

# 钢换撑支撑体系下狭长形基坑围护结构 受力及变形分析

徐立武<sup>1</sup>, 陈卓异<sup>2</sup>, 邱力杰<sup>2</sup>

(1. 中交一公局厦门工程有限公司, 福建 厦门 361000; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 依托某大型深基坑工程, 通过自动化监测和数值模拟, 研究采用钢换撑支撑体系的狭长形深基坑在开挖过程中基坑支撑围护体系变形特性、受力特点及周边地表沉降变化趋势。该文采用Midas GTS建立基坑模型, 分别针对有钢换撑断面及无钢换撑断面, 探讨钢支撑水平间距、第3道钢支撑距基坑底距离、钢支撑预加轴力及基坑围护桩桩径的变化对围护桩结构变形与受力及周边地表沉降的影响。结果表明: ① 不同钢支撑水平间距对围护结构变形及周边地表沉降控制效果不同, 钢支撑水平间距越小, 基坑桩体位移、桩身弯矩、地表沉降值越小; ② 第3道钢支撑的位置对基坑稳定性影响不大; ③ 通过施加钢支撑预加力, 可以有效控制基坑围护桩体变形及周边地表沉降值; ④ 随着围护桩桩径的增大, 围护结构变形及地表沉降值均有所减小, 但超出某一桩径时, 基坑变形及周边地表变形对围护桩桩径的敏感性将减弱; ⑤ 对于底板浇筑完成的基坑工程, 钢换撑在控制基坑结构变形、受力及周边地表沉降方面并无明显效果, 在综合考虑各项工程条件的情况下, 可取消钢换撑架设。

**关键词:** 狭长形深基坑; 钢换撑; 变形; 受力; 数值模拟

中图分类号: U455

文献标志码: A

## Stress and Deformation of Retaining Structure in Narrow and Long Foundation Pit Based on Steel Braces

XU Liwu<sup>1</sup>, CHEN Zhuoyi<sup>2</sup>, QIU Lijie<sup>2</sup>

(1. China First Highway Xiamen Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** Based on a large deep foundation pit project, the deformation characteristics of the pit support enclosure system, force characteristics, and changing trend of surrounding ground surface settlement during the excavation process of the narrow and long deep foundation pit with steel braces were studied through automated monitoring and numerical simulation. Midas GTS was used to establish the pit model, and the effects of the horizontal spacing of the steel brace, the distance of the third steel brace from the bottom of the pit, the preloaded axial force of the steel brace, and the change of the pile diameter of the pit enclosure on the deformation and force of the retaining pile structure and the surrounding ground surface settlement were investigated for the sections with and without steel brace, respectively. The results show that: ① The horizontal spacing of different steel braces has different control effects on the deformation of the retaining structure and the surrounding ground surface settlement; smaller horizontal spacing of steel braces indicates smaller values of pile displacement, pile bending moment, and ground surface settlement of the foundation pit; ② the position of the third steel brace has little effect on the stability of the foundation pit; ③ the deformation of the retaining pile

收稿日期: 2023-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51708047, 51778069); 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2019JJ50670)

作者简介: 徐立武, 男, 大学本科, 副高级工程师. E-mail: 875820305@qq.com

in the foundation pit and the surrounding ground surface settlement can be effectively controlled by applying the preloaded force of steel braces; ④ with the increase in the diameter of the retaining pile, the deformation of the retaining structure and ground surface settlement values are reduced. Once it exceeds a certain pile diameter, the sensitivity of the pit deformation and the surrounding surface deformation to the diameter of the retaining pile will be weakened; ⑤ for the foundation pit project with the completion of the base slab pouring, the steel brace does not have an obvious effect in controlling the deformation of the pit structure, the force, and the surrounding ground surface settlement. Through the comprehensive consideration of engineering conditions, the steel brace can be removed.

**Keywords:** narrow and long deep foundation pit; steel brace; deformation; force; numerical simulation

## 0 引言

明挖法施工城市下穿隧道主体结构,常采用排桩支护进行基坑开挖。为保证基坑安全,将结合地下结构的施工流程逐层拆除临时支撑,并及时进行合理的换撑。然而,因为换撑钢管将增加一道换撑工序,且临时换撑增加的钢管往往位于主体结构内部,极大地增加了后期拆除难度,且阻碍了模板安装或移动台车的施工便利性。带来了复杂的施工工序,增加了施工工期和拆除风险。

城市下穿隧道主体结构常规断面形式为双舱矩形框架,顶板和底板壁厚为 1.1~1.6 m,隧道净空不大于 6.5 m。距基坑底第 1 道钢支撑往往距离基坑底部 4.0~5.0 m,距基坑底第 2 道钢支撑通常位于主体结构顶板顶面约 1.0 m。在主体结构底板施工完成后,若直接拆除距基坑底的第 1 道钢支撑,此时第 2 道钢支撑距离底板顶面 7.5~8.5 m。综合考虑基坑周边环境和地质条件的复杂程度、基坑深度等因素,取消换撑工序将成为可能。

目前,大多数学者基于实际基坑工程,采用现场实测、数值模拟分析等方法,考虑各类影响因素及施工工况,开展基坑开挖过程中的围护体系受力及变形规律研究。刘杰等<sup>[1]</sup>采用数值模拟的方法,研究了钢支撑竖向间距对基坑围护结构水平位移的影响效果;孔德森等<sup>[2]</sup>引入抗隆起稳定性计算公式,分析钢支撑距离基坑底高度对坑底抗隆起稳定性的影响程度;雷霆等<sup>[3]</sup>研究不同钢支撑预加轴力下围护结构的变形特点,根据地区工程条件提出了钢支撑预加轴力建议值;赵良云等<sup>[4]</sup>通过建立 Midas 模型,研究了温度变化对钢支撑轴力的影响规律。以上研究均是分析基坑开挖过程中钢支撑参

数变化对基坑围护结构变形及受力的影响,另有部分学者对钢支撑拆除过程中结构变形特点及钢换撑作用效果进行了研究。秦胜伍等<sup>[5]</sup>通过对比监测数据及数值模拟结果,研究了钢支撑拆除对周边地表变形、建筑物位移及围护结构顶部位移的影响效果;赵行立等<sup>[6]</sup>对钢支撑拆除工况下的基坑立柱稳定性进行了深入探讨;刘燕等<sup>[7]</sup>考虑基坑空间效应,分析了排桩+斜撑支撑系统的拆换撑过程中围护结构位移及受力情况。目前,对于支撑拆除阶段的研究鲜见,且针对钢换撑在控制基坑变形方面的研究多集中于采用盆式开挖的大型基坑工程中<sup>[8-12]</sup>,对于其在狭长形深基坑工程的作用效果研究较少。所以,对于狭长形基坑最后一道钢支撑拆除工况下,钢换撑对基坑变形及周边地表沉降的影响规律仍须进一步探索与研究。

本文以某深基坑工程为研究对象,结合数值模拟分析软件及自动化监测手段,分析深基坑工程不同开挖工况下围护结构变形及周边地表沉降,并考虑钢支撑水平间距、钢支撑距基坑底板距离、预加钢支撑轴力、围护桩桩径 4 个因素影响下的围护结构变形、受力及周边地表沉降变化规律。

## 1 工程概况

某地铁车站深基坑工程位于福建省某市,基坑全长 880.0 m,基坑宽 28.0 m,开挖深度 18.2 m。围护结构采用桩径 1.2 m、桩间距 1.5 m 的钻孔灌注桩,并采用高压旋喷桩咬合止水,自上而下分别采用一道 800 mm×800 mm 的混凝土支撑,两道  $\varnothing 609$  mm×16 mm 的钢支撑,支撑横向间距分别为 9 m 和 3 m。将周边大型机械及车辆堆载等效为 10 kPa 超载施加于基坑周边。围护结构横断面图如图 1 所示。

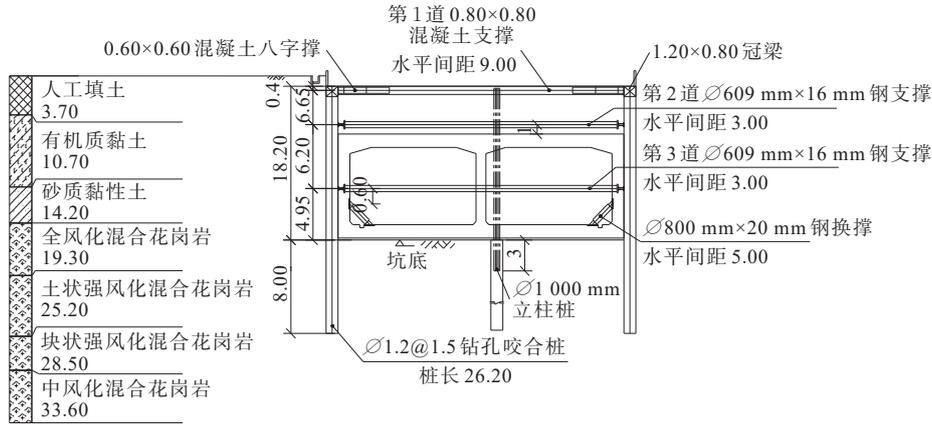


图1 基坑围护结构及支撑体系横断面图(单位:m)

Figure 1 Cross-sectional view of retaining structure and support system of foundation pit (unit:m)

## 2 监测数据及数值模拟结果对比分析

### 2.1 数值模型参数设置

为模拟基坑开挖过程,研究结构与土体间作用关系,本文使用 Midas GTS 数值模拟分析软件进行数值分析。与异形或方形深基坑支撑体系不同,狭长形深基坑长宽比较大,沿长边方向支撑体系多采用垂直于长边的对撑体系,其不同断面基坑支撑形式基本一致,通过研究典型断面下钢换撑对基坑变形及受力的影响效果,可应用于不同地质条件下全线的基坑断面。因此,本文选取典型断面,建立狭长形深基坑模型,如图2所示,基坑尺寸为 29.0 m × 110.0 m × 28.2 m,设置开挖深度为 18.2 m,围护桩嵌固深度 8.0 m,考虑到基坑开挖影响范围约为3倍开挖深度,将整个模型尺寸设置为 130 m × 180 m × 50 m。

围护桩、混凝土支撑、钢支撑等均使用1D梁单元进行模拟;采用基于HS本构模型的实体单元模拟基坑周围土体;考虑模型四周的边界约束。将周边重载等效为 10 kPa 均布荷载,施加于基坑周边地表。对于HS模型参数的选取,本文参考其他工程实例及研究并结合华东地区土层特性<sup>[13-19]</sup>,最终确定模型计算参数如表1所示。

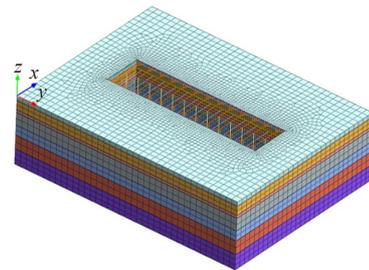


图2 数值计算模型网格划分

Figure 2 Numerical computation model meshing

表1 基坑土层参数

Table 1 Soil layer parameters of foundation pit

土层	层厚/ m	重度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	c/ kPa	φ/ (°)	$E_{50}^{ref}$ / (10 <sup>3</sup> kPa)	$E_{oed}^{ref}$ / (10 <sup>3</sup> kPa)	$E_{ur}^{ref}$ / (10 <sup>3</sup> kPa)
人工填土	3.7	18.3	10	15	9.6	8	24
有机质黏土	7.0	17.5	12	3	6.0	5	35
砂质黏性土	3.5	18.5	23	23	26.4	22	154
全风化混合花岗岩	5.1	19.0	20	26	72.0	60	240
土状强风化混合花岗岩	5.9	20.0	38	32	204.0	170	680
块状强风化混合花岗岩	3.3	21.5	45	33	300.0	250	1 000

注:c为黏聚力;φ为内摩擦角; $E_{50}^{ref}$ 为三轴固结排水剪切试验割线模量; $E_{oed}^{ref}$ 为固结试验切线模量; $E_{ur}^{ref}$ 为三轴固结排水卸载再加载的参考割线模量。

### 2.2 模型计算工况设置

工况 1: 激活所有土体网格、设置边界条件及自

重等荷载,之后计算初始地应力并进行位移清零;工况 2: 设置支撑立柱、钻孔灌注桩;工况 3: 基坑开挖至

0.40 m,设置第1道混凝土支撑;工况4:基坑开挖至7.05 m,设置第2道钢支撑;工况5:基坑开挖至13.25 m,设置第3道钢支撑;工况6:基坑开挖至18.20 m,已达基坑底,施工完成;工况7:浇筑底板及部分侧墙;工况8:架设钢换撑;工况9:拆除第3道钢支撑。

### 2.3 现场试验方案

为研究钢换撑在钢支撑拆除过程中对围护结构变形及周边地表沉降的控制效果,选取两个断面进行现场试验,其中断面1支护结构设计有钢换撑,断面2支护结构设计无钢换撑。对基坑从开挖到第3道支撑拆除过程的支护桩桩体水平位移及周边地表沉降进行监测,监测频率为1次/d。测点平面布置如图3所示,桩体水平位移监测点及地表沉降监测设备如图4、5所示。

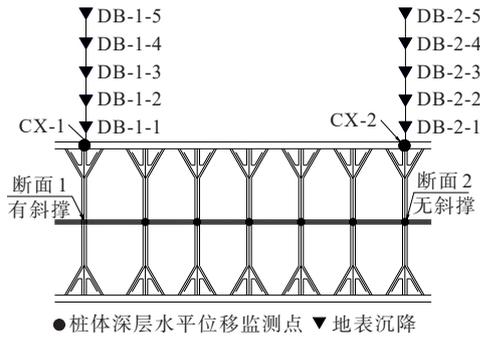


图3 测点平面布置图

Figure 3 Horizontal layout of measurement points



图4 桩体水平位移监测设备

Figure 4 Horizontal pile displacement monitoring equipment



图5 地表沉降监测设备

Figure 5 Ground surface settlement monitoring equipment

### 2.4 围护桩桩体水平位移对比分析

将断面1及断面2围护桩体水平位移试验数据与数值软件计算结果进行对比,浇筑完底板后(工况7)及第3道钢支撑拆除后(工况9)桩体水平位移的对比曲线如图6、7所示。

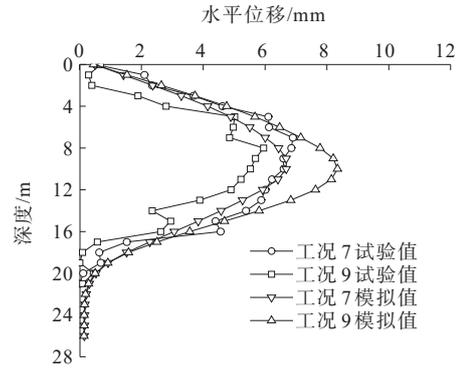


图6 断面1钢支撑拆除前后桩体水平位移变化曲线  
Figure 6 Variation of horizontal displacement of pile before and after removal of steel brace in section 1

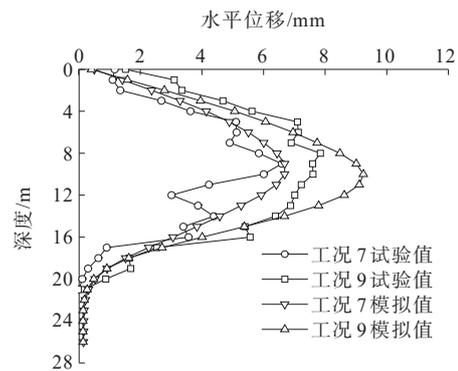


图7 断面2钢支撑拆除前后桩体水平位移变化曲线  
Figure 7 Variation of horizontal displacement of pile before and after removal of steel brace in section 2

由图6、7可知:第3道支撑拆除前后,试验与数值分析所得围护墙水平位移变化曲线基本一致,整体呈现两端变形小、中间变形大的“弓形”变化趋势。钢支撑拆除前后,断面1及断面2桩体水平位移试验结果的最大值增量分别为0.94 mm和1.25 mm,数值模拟所得水平位移最大值增量分别为1.66 mm和2.55 mm,钢换撑可以控制钢支撑拆除后围护结构的变形,但控制效果不明显。通过对比发现:相同工况下,监测所得桩体位移均略小于计算值,这是因为计算模型中施加了重载,而实际基坑工程中往往不存在重载或基坑周边土压力小于施加荷载,导致实测值小于计算值。

### 2.5 地表沉降对比分析

图8、9为断面1、2在支撑拆除前后的周边地表沉

降试验值及计算值对比图。模拟所得结果与实际监测数据接近,地表沉降的变形曲线为下凹形。断面1、2处钢支撑拆除前后试验所得地表沉降出现位置均为距基坑8 m处,最大值增量分别为1.05 mm和1.74 mm,钢换撑可在一定程度上控制周边地表沉降。

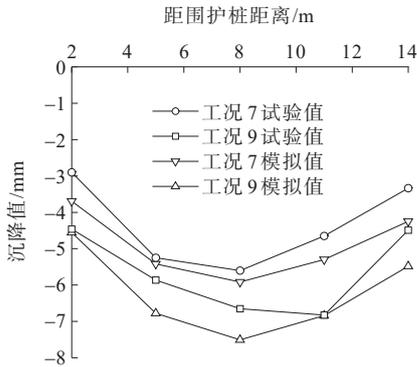


图8 断面1钢支撑拆除前后地表沉降变化曲线  
Figure 8 Variation of ground surface settlement before and after removal of steel brace in section 1

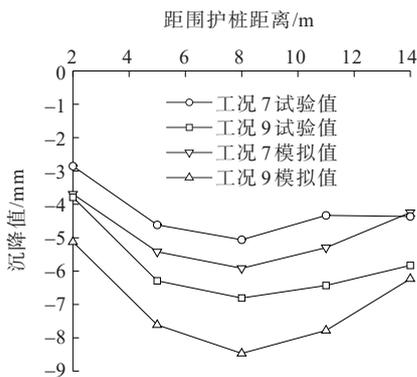


图9 断面2钢支撑拆除前后地表沉降变化曲线  
Figure 9 Variation of ground surface settlement before and after removal of steel of steel brace in section 2

### 3 影响因素分析

上文试验数据与数值模拟结果的对比分析说明,钢换撑可控制基坑结构及周边地表变形,但控制效果并不明显。为了进一步分析钢换撑在钢支撑拆除过程中对基坑稳定性的作用效果,从支撑横向间距、第3道钢支撑距底板间距、钢支撑预加轴力及围护结构桩径4个方面对基坑变形、受力及周边地表沉降的影响进行敏感性分析,研究取消换撑工序的可能性。基于2.1节数值模型参数,建立如表2所示各影响因素分析方案,分析基坑拆除第3道钢支撑工况(工况9)时基坑的围护桩水平位移、弯矩及周边地表沉降3项指标。

表2 影响因素分析方案

Table 2 Influencing factor analysis scheme

钢支撑横向 间距/m	第3道钢支撑距 底板间距/m	钢支撑预加轴力(占 设计值百分比)/%	围护桩桩 径/m
5、7、9、11、13	3.5、4.5、5.5、 6.5、7.5	0、20、40、60、 80、100	0.7、0.9、1.1、 1.3、1.5

#### 3.1 钢支撑横向间距

图10~12为有钢换撑断面及无钢换撑断面在不同钢支撑横向间距下的围护桩体水平位移、围护桩弯矩、周边地表沉降变化曲线。

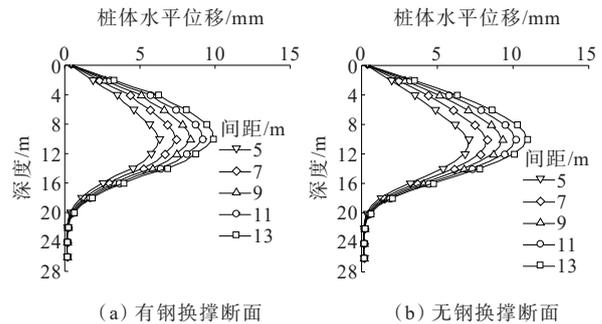


图10 不同钢支撑横向间距下桩体水平位移变化曲线  
Figure 10 Variation of horizontal displacement of pile under different transverse spacing of steel brace

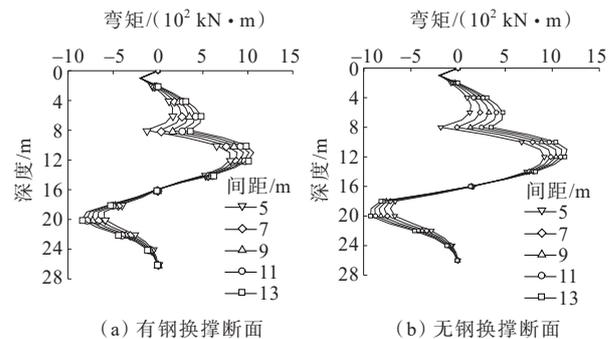


图11 不同钢支撑横向间距下桩体弯矩变化曲线  
Figure 11 Variation of pile bending moment under different transverse spacing of steel brace

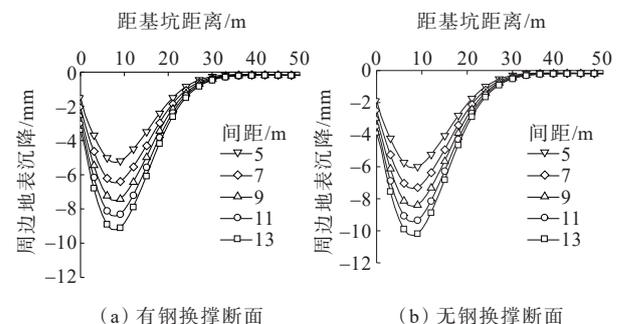


图12 不同钢支撑横向间距下地表沉降变化曲线  
Figure 12 Variation of ground surface settlement under different transverse spacing of steel brace

由图10~12可知:有钢换撑断面与无钢换撑断面曲线变化趋势基本一致,随着钢支撑横向间距的增加,支护桩水平位移、支护桩正弯矩及周边地表沉降值逐渐增大。当钢支撑横向间距为13 m时,桩体水平位移最大值、周边地表沉降最大值、桩体最大正弯矩值分别约为支撑横向间距为6 m时的1.5倍、1.7倍、1.3倍。对比有钢换撑断面与无钢换撑断面的各项控制指标可知:当钢支撑横向间距取最大值(13 m),架设钢换撑断面的最大围护桩水平位移比无钢换撑断面的减小9%,最大正弯矩减小8%,最大地表沉降减小约10%,所得结果相差不大,钢换撑对基坑结构受力与变形及周边地表沉降的控制效果不明显。

### 3.2 钢支撑距底板距离

图13~15为基坑第3道钢支撑在距基坑底板不同竖向间距下的围护桩体水平位移、围护桩弯矩、周边地表沉降变化曲线。

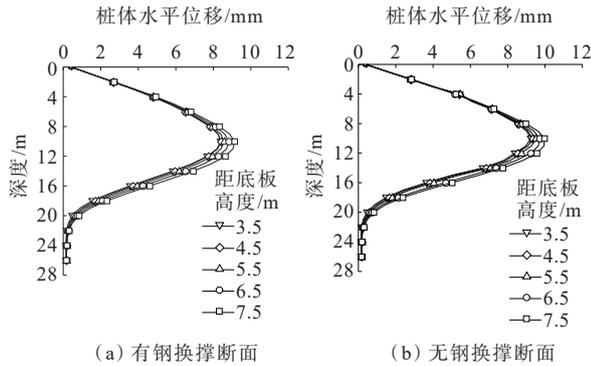


图13 钢支撑距基坑底不同距离时桩体水平位移曲线  
Figure 13 Horizontal displacement curve of pile under different distances of steel brace from pit bottom

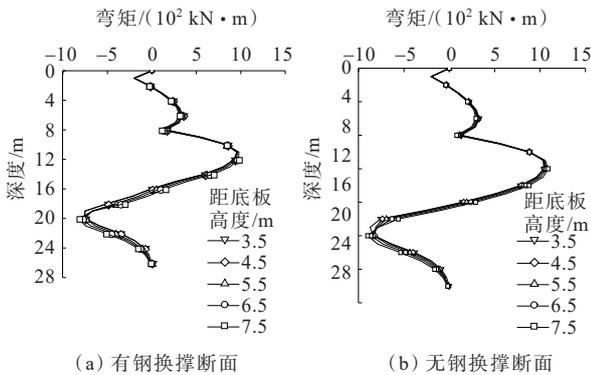


图14 钢支撑距基坑底不同距离时桩体弯矩变化曲线  
Figure 14 Variation of pile bending moment under different distances of steel brace from pit bottom

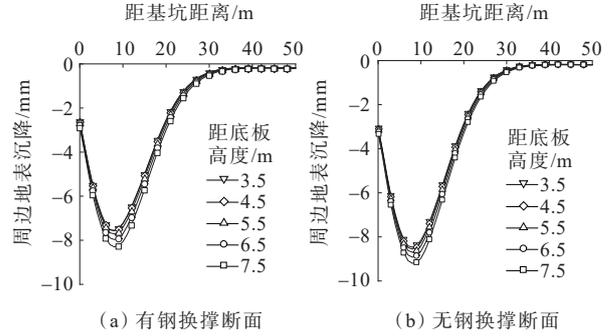


图15 钢支撑距基坑底不同距离时地表沉降曲线  
Figure 15 Variation of ground surface settlement under different distances of steel brace from pit bottom

由图13~15可知:围护桩水平位移、桩身最大弯矩及地表沉降随着最后一道钢支撑距底板高度的增大缓慢增大。当第3道支撑距底板高度由3.5 m增加至7.5 m时,对于无钢换撑断面,桩体最大水平位移增幅为7.87%,桩体最大正弯矩增幅为4.61%,地表沉降最大值增幅为8.64%,该工程条件下各项控制指标对第3道钢支撑距底板距离的敏感性不高,这是由于底板起到了较强的支撑作用,在第3道钢支撑拆除后有效控制了基坑底部隆起及围护桩下部的位移。分别对比图13~15中的(a)、(b),相比于无换撑断面,在钢支撑距基坑底板不同距离条件下,钢换撑的架设对桩体最大水平位移、桩体最大正弯矩及地表沉降最大值的减小幅度均不大于10%,钢换撑作用效果不大。总的来说,对于该基坑工程,适当调高第3道钢支撑高度对结构稳定性影响不大,取消钢换撑还可以提高施工效率。

### 3.3 预加钢支撑轴力的影响

图16~18分别为有钢换撑断面及无钢换撑断面

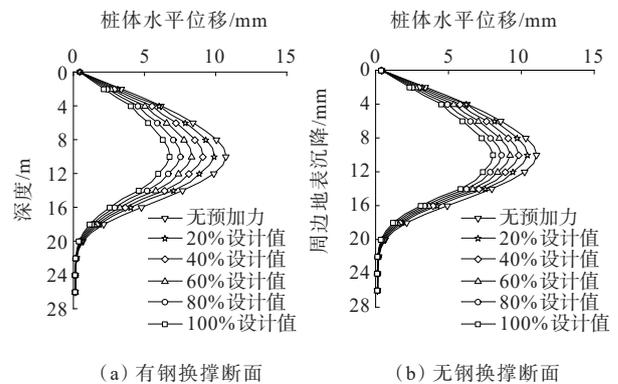


图16 不同钢支撑预加轴力下桩体水平位移变化曲线  
Figure 16 Variation of horizontal displacement of pile under different preloaded axial forces of steel brace

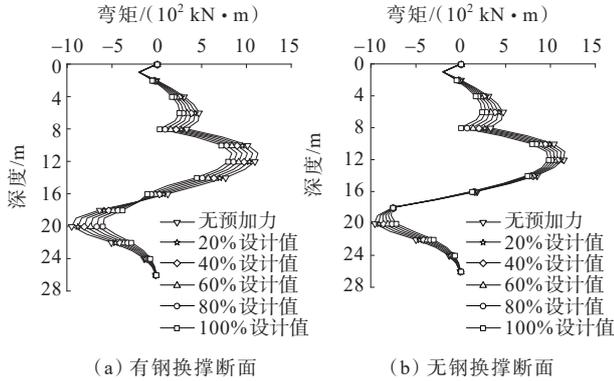


图 17 不同钢支撑预加轴力下桩体弯矩变化曲线  
 Figure 17 Variation of pile bending moment under different preloaded axial forces of steel brace

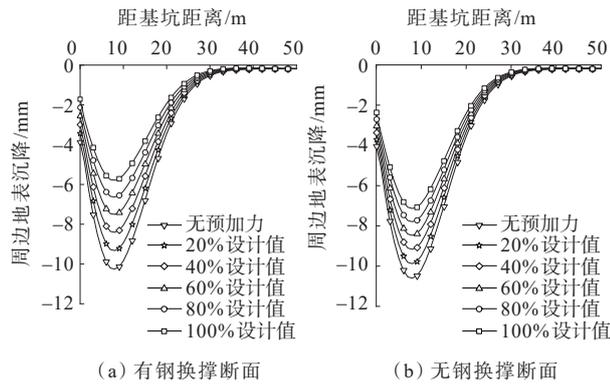


图 18 不同钢支撑预加轴力下地表沉降变化曲线  
 Figure 18 Variation of ground surface settlement under different preloaded axial forces of steel brace

在钢支撑预加轴力变化时,基坑围护桩水平位移、围护桩弯矩及周边地表沉降的计算曲线。

由图 16~18 可知:整体上看,各控制指标均随钢支撑预加轴力值的增大而减小,由图 16~18 的(b)图可知,预加轴力由无预加力增加至设计值时,围护桩水平位移最大值由 11.06 mm 减小至 8.08 mm,围护桩弯矩最大值由 1 160.49 kN·m 减小至 976.57 kN·m,地表沉降最大值由 10.59 mm 减小至 7.13 mm,说明预加轴力可以有效控制围护结构变形、受力状态及地表沉降;无钢换撑断面在预加力为 60% 设计值时与有钢换撑断面在预加力为 40% 设计值时的桩体最大水平值比值为 1.01%,最大正弯矩比值为 1.03%,最大地表沉降比值为 1.00%。可见,通过调整钢支撑预加轴力值,对于围护桩的变形与受力及周边地表沉降的控制,均可达到与有钢换撑相近的效果。

3.4 围护桩桩径的影响

图 19~21 为不同围护桩桩径下计算所得围护桩水平位移、弯矩及周边地表沉降变化曲线。

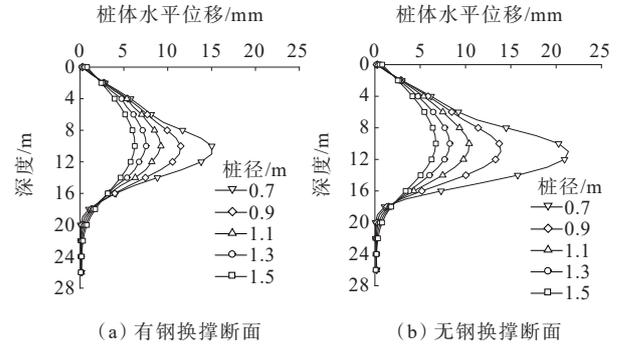


图 19 不同围护桩桩径下桩体水平位移变化曲线  
 Figure 19 Variation of horizontal displacement of pile under different diameters of retaining pile

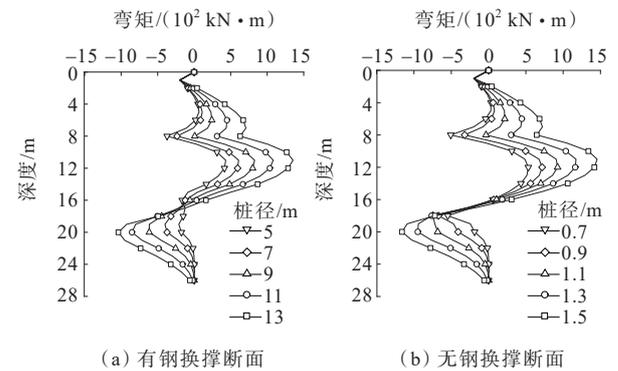


图 20 不同围护桩桩径下桩体弯矩变化曲线  
 Figure 20 Variation of pile bending moment under different diameters of retaining pile

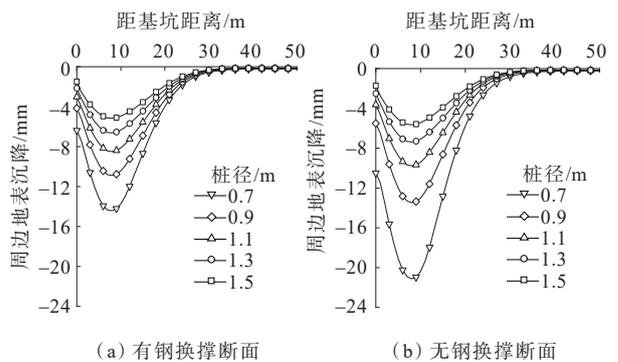


图 21 不同围护桩桩径下地表沉降变化曲线  
 Figure 21 Variation of ground surface settlement under different diameters of retaining pile

由图 19(b)可知:随着围护桩桩径的增大,桩体水平位移最大值不断减小,当桩径由 0.7 m 增加至 1.5 m 时,围护桩位移最大值分别为 21.35 mm、13.89 mm、10.04 mm、8.26 mm、6.72 mm,其减小幅度分别为 34.94%、27.72%、17.73%、18.64%,说明围护桩桩径越小,桩体侧向位移对于桩径的敏感性越大。

由图 20 可知:围护桩正弯矩随桩径值增大而增加,这是因为桩径增加后围护桩抵抗弯矩也随之增加。由图 21 可以看出:以围护桩桩径为影响因素下的地表沉降变化趋势与围护桩位移趋势类似,均存在一个有效桩径决定其对地表沉降的影响效果。

对比图 19 中(a)、(b)可知:当围护桩桩径由 0.7 m 增加至 1.5 m 时,设置钢换撑断面较未设置钢换撑断面桩体水平位移减小幅度分别为 29.64%、17.42%、11.29%、8.77%、7.04%;图 21 中地表沉降的变化趋势与桩体水平位移变化趋势类似。由此可知,仅在设计围护桩桩径较小时,可设置钢换撑对基坑围护结构变形及周边地表沉降进行控制,但为保证基坑开挖过程整体结构稳定性,对基坑桩径有严格控制,为控制工程造价而选用小桩径组合钢换撑的支护方式并不可取。

## 4 结论

本文以某基坑为研究对象,建立数值分析模型,研究不同影响因素对基坑围护结构变形、受力及周边地表沉降的影响效果,得出以下结论:

(1) 钢支撑横向间距、钢支撑预加轴力、围护桩桩径均对基坑桩体水平位移、桩身弯矩、周边地表沉降有一定程度的影响。

(2) 第 3 道钢支撑距基坑底板的距离对基坑整体稳定性影响不大,钢换撑对于基坑稳定性的控制效果不明显。

(3) 对于与本文开挖深度、支护形式及周边土质等工程条件类似的狭长形基坑工程,当主体结构底板施工完成后,基坑受力及变形已趋于稳定,在设计中通过调整第 3 道钢支撑位置或调整施加于钢支撑的预加力,对基坑变形的控制可以达到与钢换撑接近的效果,因此可取消架设钢换撑的工序,直接进行下一步施工。

### 参考文献:

### References:

[1] 刘杰,姚海林,任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学,2010,31(增刊 2):456-461.  
LIU Jie, YAO Hailin, REN Jianxi. Monitoring and

numerical simulation of deformation of retaining structure in subway station foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(sup 2): 456-461.

- [2] 孔德森,门燕青. 基坑坑底抗隆起稳定性影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(4): 979-984.  
KONG Desen, MEN Yanqing. Analysis on influencing factors of basal stability in deep foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (4): 979-984.
- [3] 雷霆,宋建学,丁保华,等. 地铁车站基坑钢支撑预加轴力幅度研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(1): 195-203.  
LEI Ting, SONG Jianxue, DING Baohua, et al. Study on the pre-axial force amplitude of steel support for foundation pit of subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 195-203.
- [4] 赵良云,卜铭,徐茂虎,等. 温度作用下深基坑钢支撑自伺服系统轴力研究[J]. 中外公路,2021,41(4): 36-40.  
ZHAO Liangyun, BU Ming, XU Maohu, et al. Study on axial force of steel supporting self-servo system in deep foundation pit under temperature load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 36-40.
- [5] 秦胜伍,苗强,张领帅,等. 基坑开挖与支撑拆除对周围环境的影响的研究[J]. 工程地质学报,2020,28(5): 1106-1115.  
QIN Shengwu, MIAO Qiang, ZHANG Lingshuai, et al. Finite element analysis on influence of excavation and support removal of foundation pit to surrounding environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28 (5): 1106-1115.
- [6] 赵行立,赵娜. 深基坑内支撑拆除过程中钢立柱的稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(增刊 2): 773-780.  
ZHAO Xingli, ZHAO Na. Study on stability of steel column in the process of demolition of inner supporting in the deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(sup 2): 773-780.
- [7] 刘燕,刘俊岩,辛振宇,等. 排桩+斜撑组合支撑系统的换撑技术研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊 1): 306-311.  
LIU Yan, LIU Junyan, XIN Zhenyu, et al. Support replacement technology of bracing system with oblique bracing + piles in row[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(sup 1): 306-311.
- [8] 蒋宏鸣. 软土地区临河基坑支护的变形监测及环境影响分析[J]. 建筑结构,2020,50(增刊 2): 721-725.  
JIANG Hongming. Analysis of the environmental impact of the foundation pit adjacent to a river in soft soil area by deformation monitoring[J]. Building Structure, 2020, 50

- (sup 2): 721-725.
- [9] 孙海忠.有限元数值分析在基坑围护设计中的应用[J].岩土工程学报,2012,34(增刊1): 129-133.  
SUN Haizhong. Application of finite element numerical analysis in excavation design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(sup 1): 129-133.
- [10] 侯宪伟,宋文智,洪陈超,等.SMW工法与斜抛撑围护体系在超大深基坑中的应用[J].施工技术,2020,49(1): 25-28.  
HOU Xianwei, SONG Wenzhi, HONG Chenchao, et al. Application of SMW construction method and oblique bracing envelope system in super large deep foundation excavation[J].Construction Technology,2020,49(1): 25-28.
- [11] 钟翰虎,李聪,李雨林,等.偏压荷载下深基坑支护结构非对称变形与控制技术研究[J].中外公路,2022,42(1): 34-37.  
ZHONG Hanhu, LI Cong, LI Yulin, et al. Research on asymmetric deformation and control technology of supporting structure of deep foundation pit under eccentric load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1):34-37.
- [12] 齐朋,张宇奇,王宁.深基坑围护结构横向位移监测和数值模拟分析[J].中外公路,2022,42(1):38-42.  
QI Peng,ZHANG Yuqi,WANG Ning.Lateral displacement monitoring and numerical simulation analysis for retaining system of deep foundation pit[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022, 42(1):38-42.
- [13] 庞小朝,黄俊杰,苏栋,等.深圳地区原状花岗岩残积土硬化土模型参数的试验研究[J].岩土力学,2018,39(11): 4079-4085.  
PANG Xiaochao, HUANG Junjie, SU Dong, et al. Experimental study on parameters of the hardening soil model for undisturbed granite residual soil in Shenzhen[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(11): 4079-4085.
- [14] 王海波,徐明,宋二祥.基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J].岩土力学,2011,32(1): 39-43,136.  
WANG Haibo, XU Ming, SONG Erxiang. A small strain constitutive model based on hardening soil model[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(1): 39-43,136.
- [15] 王卫东,王浩然,徐中华.上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J].岩土力学,2013,34(6): 1766-1774.  
WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(6): 1766-1774.
- [16] 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].岩土力学,2012,33(8): 2283-2290.  
WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. 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.
- [17] 张军辉,周勤伟,黎峰,等.框架梁锚固边坡支护结构研究进展综述[J].中外公路,2023,43(2):17-23.  
ZHANG Junhui, ZHOU Qinwei, LI Feng, et al. Review of research progress of frame beam anchored structure in slope supporting[J].Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3):17-23.
- [18] 武俊,张波,毛宽红,等.钢结构换撑梁在内支撑基坑工程中的应用[J].建筑技术,2020,51(9):1055-1059.  
WU Jun, ZHANG Bo, MAO Kuanhong, et al. Application of steel structure changing beams in inner supporting foundation pit engineering[J]. Architecture Technology, 2020,51(9):1055-1059.
- [19] 陈国雄,贺佐跃,黄仕平.考虑开挖宽度效应的基坑受力变形分析[J].中外公路,2022,42(2):1-6.  
CHEN Guoxiong, HE Zuoyue, HUANG Shiping. Analysis of force and deformation of foundation pit considering effect of excavation width[J].Journal of China & Foreign Highway,2022, 42(2):1-6.