

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.06.015

近接基坑开挖影响下既有地铁附属结构联合支护体系优化分析

陶 畅¹, 彭丽云¹, 刘兵科², 陈涵宇¹

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京建工土木工程有限公司, 北京 100015)

摘 要: 针对既有地铁附属结构在临近深基坑一侧, 支护结构施作难的问题, 提出“护坡桩+对拉锚杆+斜拉锚索”配合注浆联合支护体系。采用 Midas 软件建模, 从对拉锚杆间距与直径、斜拉锚索锚固段长度与道数 4 个方面设计单因素优化方案, 并通过工程实例验证方案的合理性。研究表明: 桩顶最大水平位移随对拉锚杆间距的减小而减小, 随对拉锚杆直径、斜拉锚索锚固段长度与道数的减小而增大; 护坡桩桩顶水平、竖向位移的模拟结果与监测结果趋势吻合, 竖向位移呈抛物线型, 水平位移呈弓型; 基坑在施工过程中, 地铁附属结构的变形控制较好, 远低于近接深基坑桩顶位移; 基坑顶部沉降位移呈波动上升趋势, 深层水平位移在不同开挖阶段的变形趋势均为中间大两端小, 且随着开挖深度的增加, 地铁附属结构的最大水平变形位置沿井壁逐渐向下移动。

关键词: 城市轨道交通; 联合支护体系; 地铁附属结构; 支护优化; 数值计算

中图分类号: TU745.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)06-0106-09

Optimization of Combined Support Systems for Existing Subway Ancillary Structures Affected by Adjacent Excavation

TAO Chang¹, PENG Liyun¹, LIU Bingke², CHEN Hanyu¹(1. College of Civil Engineering and Transportation, Beijing University of Architecture, Beijing 100044;
2. Beijing Construction Civil Engineering Co., Ltd., Beijing 100015)

Abstract: This paper proposes a combined support system comprising retaining piles, tensioned anchor rods, and inclined anchor cables with grouting to solve the problems associated with constructing supporting structures for deep excavations near obstacles on one side. The study utilized Midas software for modeling, and single-factor optimization analysis schemes were designed considering four aspects: spacing and diameter of tensioned anchor rods and number and length of segments for inclined tensioned anchor cables. The rationality of this scheme was validated using engineering examples. The results showed a match between the simulated trends of the horizontal and vertical displacements of the slope-protection pile tops and the monitoring results. The vertical displacement exhibited a parabolic trend, and the horizontal displacement exhibited an arched shape. The maximum horizontal displacement of the pile tops decreased as the spacing of the tensioned anchor rods decreased and increased as their diameters and the number and length of segments of inclined tensioned anchor cables decreased. During construction, the deformation of subway ancillary structures was well-controlled and significantly less than that of the adjacent deep excavation.

收稿日期: 2024-04-30 修回日期: 2024-08-15

第一作者: 陶畅, 男, 硕士研究生, 主要从事城市轨道交通土建设计、监测、安全防护等研究, 18256954735@163.com

通信作者: 彭丽云, 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为特殊土力学、城市轨道交通工程, pengliyun@bucea.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(42172299)

引用格式: 陶畅, 彭丽云, 刘兵科, 等. 近接基坑开挖影响下既有地铁附属结构联合支护体系优化分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(6): 106-114.

TAO Chang, PENG Liyun, LIU Bingke, et al. Optimization of combined support systems for existing subway ancillary structures affected by adjacent excavation[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(6): 106-114.

The top settlement showed a fluctuating upward trend, whereas the deep horizontal displacement had a middle-high and end-low pattern at different excavation stages. As the excavation depth increased, the subway structures' maximum horizontal deformation shifted downward along the shaft wall.

Keywords: urban rail transit; combined support system; subway ancillary structures; support optimization; numerical calculation

城市化进程的加快促使地下空间建设飞速发展,接踵而来的近接工程也愈来愈多,其中不乏地铁站附属结构周边有深基坑开挖工程存在的情形。这种情况下临近深基坑一侧,支护结构难以施作致使地铁附属结构存在风险;同时基坑开挖中又要确保自身的安全,这将对支护结构提出更高的要求。若支护结构设计不合理,势必造成严重事故。

目前在近接基坑工程中,既有构筑物的加固形式,如临近住宅楼深基坑工程中的“桩+撑”支护^[1-3],临近桥桩基坑工程中的“地连墙+内支撑”支护^[4-6],取得了较好的支护效果,然而存在造价高、内支撑设置限制施工空间、影响工程进度等不足。更经济的形式,如加设预应力锚杆、土钉墙联合支护,可有效控制基坑侧壁水平位移和临近构筑物的竖向沉降,然而锚杆、土钉数量多,施工周期长^[7-9]。更新型的形式,如“桩(墙)+撑+锚”联合支护,其加固强度高、变形控制效果好,然而同样存在费用高、施工场地空间受限等不足^[10-11];新型的框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护体系尽管考虑了结构间牵连效应的影响,又解决了临近深基坑施工空间狭窄、扰动性大的问题,然而受地下水影响注浆效果差,结构安全性降低^[12]。此外,“双排桩+预应力锚索”联合支护体系,实现了在有限支护空间内合理控制基坑水平位移,确保了既有构筑物安全,然而由于双排桩的设置,使成本大大增加^[13]。

综上所述,在近接基坑的既有构筑物加固工程中,针对具体的工程情况要采取不同的支护措施,现有研究已取得丰硕成果,且多是针对桩、撑支护体系,或在此基础上进行改进,存在成本较高、施工空间受限等不足。本文依托近接深基坑的地铁工人体育场车站附属结构支护工程进行研究,提出了“护坡桩+对拉锚杆+斜拉锚索”配合注浆联合支护体系。通过该支护体系中的护坡桩进行基坑围护,打设对拉锚杆将基坑护坡桩上的土压力传递至地铁附属结构(两竖井壁);再设置斜拉锚索将作用至地铁附属结构的土压力传递至深层注浆土体上,并借助地铁车站附属结构进行传力。该方法取得了较好的经济效益且不影响坑内施工,同时也具有工程示范意义,相关研究结果可以

为类似近接深基坑的地铁加固工程提供指导。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

本文以近接深基坑的地铁工人体育场车站附属结构支护工程为例,进行支护结构优化分析研究。工人体育场站为M3、M17线的换乘车站,两线车站同期设计、施工。M3线车站位于工人体育场北路与新东路交叉口,沿工人体育场北路东西向偏路口西侧布置,M17线车站跨工人体育场路口,沿工人体育场东路南北向设置。其中地铁附属结构2、3号竖井作为两车站施工竖井,其尺寸分别为10.3 m×8.1 m×39.4 m、17.15 m×5.6 m×39.2 m。近接基坑长140 m、宽95 m、深24 m,规模较大,深度较深。距两竖井边缘距离分别为3.5 m和6.8 m。

由于基坑开挖前作为地铁附属结构的2、3号竖井已经存在,需要对接驳区内竖井进行加固,因此拟对该段基坑采用“护坡桩+对拉锚杆+斜拉锚索”配合注浆的联合支护体系。基坑与地铁附属结构支护体系平面如图1所示。深基坑拟定支护措施为桩锚支护,根据基坑支护设计软件计算得到护坡桩桩长27~37 m、桩径1 m、间距1.3 m,混凝土强度等级C25;桩间设置腰梁,采取一桩一锚布置12排预应力锚杆,锚杆长25 m,孔径150 mm,倾角15°。

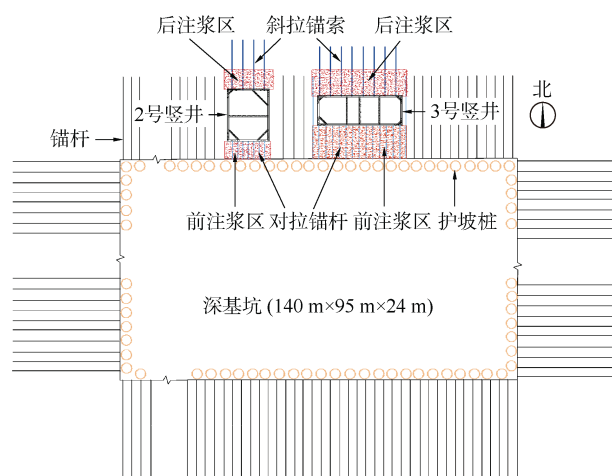


图1 基坑与地铁附属结构支护体系平面

Figure 1 Plan view of foundation pit and supporting system for metro auxiliary structures

地铁接驳区域内的基坑，由于锚杆长度受限，桩锚支护无法应用，故拟采用在护坡桩与竖井南侧壁间设置对拉锚杆并配合注浆(前注浆区)，在竖井北侧壁后土体内布设斜拉锚索并配合注浆(后注浆区)；共同形成“护坡桩+对拉锚杆+斜拉锚索”配合注浆的联合支护体系。图 2 给出了 2 号竖井处支护布置剖面示意。其中除竖井内部的角撑、对撑外，其余支护结构如斜拉锚索、对拉锚杆以及注浆区均为后来加固设置的。本文将重点对这部分联合支护体系进行优化分析以提供合理的设计参数。

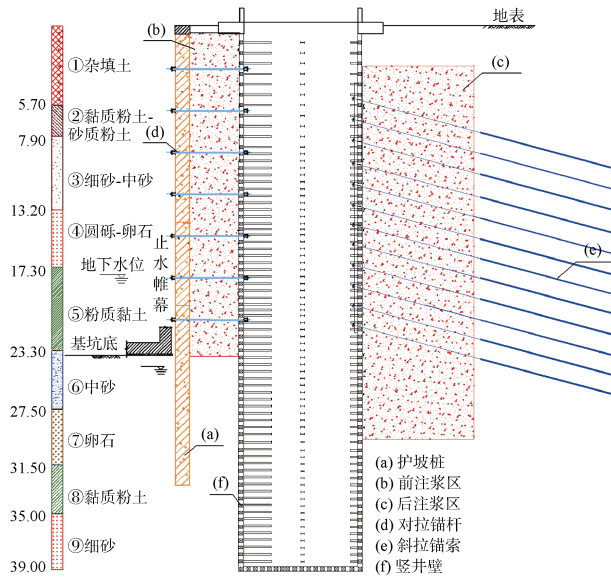


图 2 2 号竖井处支护体系剖面示意

Figure 2 The schematic profile of the supporting system at shaft No. 2

1.2 地质条件

根据场地地质资料并经现场勘查，施场地地层从上到下依次为杂填土、黏质粉土-砂质粉土、细砂-中砂、圆砾-卵石、粉质黏土、中砂、卵石、黏质粉土、细砂。新建基坑施工深度范围内的地下水为潜水，水位埋深在 15.70~16.20 m，由于施工中采用高压旋喷桩在桩间形成止水帷幕，且控水效果较好，因此计算中均不考虑地下水的影响。

2 联合支护体系单因素优化方案

根据护坡桩和竖井侧壁之间距离，确定得到 2 号、3 号竖井处的对拉锚杆长度分别为 3.5 m 和 6.8 m，已应用基坑支护结构设计软件计算得到斜拉锚索长度为 25 m、倾角按通常做法取 15°。在此基础上，以桩顶水平位移作为支护结构设计优化依据，对对拉锚杆间距 s 、对拉锚杆直径 r 、斜拉锚索锚固段长度 l 和斜拉

锚索道数 n ，4 个参数进行单因素优化分析。具体方案如表 1 所示。

表 1 单因素优化设计方案

Table 1 Single-factor optimization design scheme

优化项	s/m	r/mm	l/m	$n/道$
s 优化	0.9, 1.1, 1.3, 1.5,	150	10	12
r 优化	1.3	200, 175, 150, 125, 100	10	12
l 优化	1.3	150	6, 8, 10, 12, 14	12
n 优化	1.3	150	10	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14

3 有限元模型建立

3.1 基本假定与模型参数

假定土层均匀、水平、层状分布；土体为理想弹塑性材料；支护结构为各向同性的线弹性体材料。土体和注浆体均采用修正摩尔-库伦本构模型，注浆体弹性模量取 50 MPa。其中土体参数如表 2 所示， H 为土层厚度， E_u 为弹性模量， μ 为泊松比， γ 为天然重度， c 为黏聚力， ϕ 为内摩擦角。各支护结构类型、属性及参数如表 3 所示。考虑到护坡桩以水平受力为主，且桩顶设有冠梁、桩身设有圈梁，整体性较好，因此在模拟时可将其等效为 0.63 m 厚的地连墙^[14-15]，等效地连墙的计算式为

$$\frac{1}{12}(D+t)h^3 = \frac{1}{64}\pi D^4 \quad (1)$$

式中， h 为等效板单元厚度，m； t 为桩间净距，m； D 为桩径，m。

表 2 土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil layers

层号	名称	H/m	E_u/MPa	μ	$\gamma/(kN/m^3)$	c/kPa	$\phi/(^\circ)$
1	杂填土	5.7	21	0.37	20.2	10	11
2	黏质粉土-砂质粉土	2.2	72	0.27	19.4	18	20
3	细砂-中砂	5.3	72	0.32	19.8	—	24
4	圆砾-卵石	4.1	210	0.42	21.5	—	40
5	粉质黏土	6.0	45	0.30	19.8	15	16
6	中砂	4.2	84	0.35	20.2	—	36
7	卵石	4.0	300	0.50	22.5	—	52
8	黏质粉土	3.5	90	0.32	20.2	42	16
9	细砂	4.0	105	0.35	20.3	—	32

表3 支护体系建模参数

Table 3 Parameters for supporting system modeling

结构名称	模型类型	单元属性	弹性模量/MPa	泊松比
斜拉锚索	植入式桁架	1D	2.0×10^6	0.25
内支撑	梁单元	1D	2.1×10^5	0.20
护坡桩	等效板单元	2D	3.0×10^4	0.20
对拉锚杆	植入式桁架	1D	1.8×10^5	0.20
冠梁/腰梁	梁单元	2D	3.0×10^4	0.20
底板	板单元	2D	3.5×10^4	0.20

注：1D 为仅受轴力的杆单元，2D 为平板单元。

3.2 建立模型

根据工程概况和表1中的优化方案,采用 Midas GTS 软件先按照其中一组参数进行建模,如图3所示。地连墙与土体的接触采用界面单元模拟。一般对基坑工程来说,其开挖影响范围为距离基坑周边3~5倍的开挖深度^[6]。针对本文的计算模型,其长度、宽度方向分别扩大了约3倍基坑开挖深度,故取模型尺寸为200 m(x方向)×170 m(y方向)×45 m(z方向)。模型单元按由内到外的顺序进行划分,其中对拉锚杆、斜拉锚索按2 m划分网格,其余支护结构和土层按5 m划分网格。模型底面设置固定约束,周围设置法向约束,顶面为自由面。其他建模在该模型基础上通过调整参数得到。

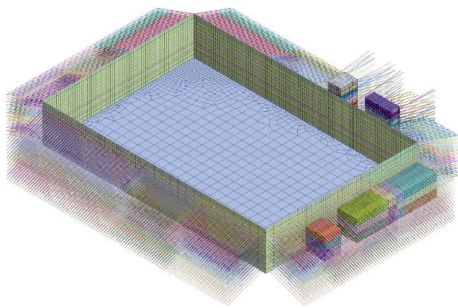


图3 支护结构有限元模型

Figure 3 Finite element model of supporting structure

3.3 开挖过程模拟

根据施工工序进行开挖与支护过程模拟,共分为30个工况,如表4所示。表4为一种优化参数下的模拟,其他参数下的模拟相应进行调整,本文按照表1优化方案共进行了23组建模计算。

4 联合支护体系单因素优化分析

根据上述23组建模计算结果,对近接既有地铁附属结构接驳区域内的支护进行分析,并参照国家标准《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497—2019)^[17],

以基坑桩顶最大水平位移报警值36 mm为依据,得出最佳方案。

表4 基坑施工阶段详情

Table 4 Details of excavation construction stages

编号	工况	简述(标高均为建筑标高)
1	初始应力场计算	整个分析模型内只有土体
2	注浆区施工	先进行注浆区施工,使其对土体产生影响
3	既有2号竖井模拟	2号竖井为既有竖井,基坑开挖对其产生影响
4	既有3号竖井模拟	3号竖井为既有竖井,基坑开挖对其产生影响
5	基坑护坡桩施	护坡桩施工,使其对周围土体产生影响
6	后注浆区斜拉锚索施工	在后注浆区按施工方案设置斜拉锚索
7	基坑第1次开挖	基坑开挖至-2 m
8	基坑第1次支护	第1次打入锚索,设置腰梁、对拉锚杆
⋮	⋮	⋮
29	基坑第12次开挖	基坑开挖至-24 m
30	基坑第12次支护	第12次打入锚索,设置腰梁、对拉锚杆

4.1 对拉锚杆参数优化分析

4.1.1 对拉锚杆间距优化

根据表1第2列中的优化方案,计算得到各开挖深度下对拉锚杆间距与桩顶最大水平位移曲线如图4所示。

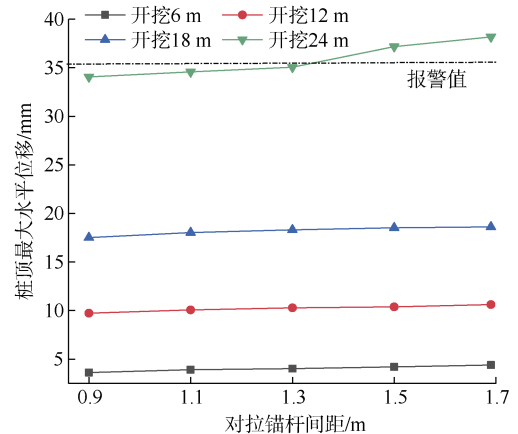


图4 对拉锚杆间距与桩顶最大水平位移关系曲线
Figure 4 The relationship between tie rods spacing and maximum horizontal displacement at piles head

由图4可知:相同对拉锚杆间距、不同开挖深度下,桩顶最大水平位移随开挖深度的增加而增大,尤其是在开挖至18 m至24 m区间,增幅最大;当开挖深度小于24 m时,随着对拉锚杆间距的增加,桩顶最大水平位移略有增加但增幅不大;当开挖至24 m,对

拉锚杆间距为 1.3 m 时, 桩顶最大水平位移接近工程中给出的报警值 36 mm; 此后, 随着锚杆间距的增大, 桩顶位移增幅较大。综上, 对拉锚杆间距初步选取 1.3 m, 此时的桩顶最大水平位移接近报警值, 但该数据来源于所有桩中位移最大的桩, 其余桩的桩顶水平位移均小于该值, 故选取合理。

4.1.2 对拉锚杆直径优化

根据表 1 第 3 列中的优化方案, 计算得到各开挖深度下对拉锚杆直径与桩顶最大水平位移曲线, 如图 5 所示。

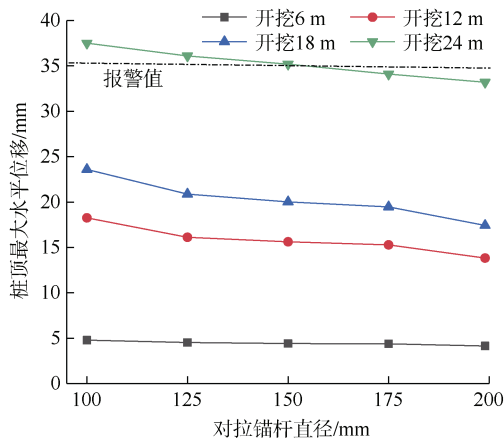


图 5 对拉锚杆直径与桩顶最大水平位移关系曲线
Figure 5 The relationship between tie rods diameter and maximum horizontal displacement at piles head

由图 5 可知: 当基坑开挖深度为 6 m 时, 对拉锚杆直径与桩顶最大水平位移关系曲线接近水平, 说明此时对拉锚杆直径对基坑水平变形影响不显著; 当开挖深度大于 6 m 后, 相同开挖深度下, 桩顶水平位移随对拉锚杆直径的增加呈下降趋势, 此时拉杆直径对控制基坑变形的作用逐渐显著; 不同开挖深度下, 相同对拉锚杆直径下桩顶水平位移的增幅不同, 在开挖深度从 18 m 至 24 m 这个过程中增幅最大, 且当开挖深度 24 m、拉杆直径为 150 mm 时, 最大水平位移略超报警值, 但该值为所有桩中位移最大值, 其余桩最大水平位移均小于报警值。故选取 150 mm 作为对拉锚杆直径。

4.2 斜拉锚索参数优化分析

4.2.1 斜拉锚索锚固段长度优化

根据表 1 第 4 列中的优化方案, 计算得到斜拉锚索锚固段长度与桩顶最大水平位移关系曲线, 如图 6 所示。

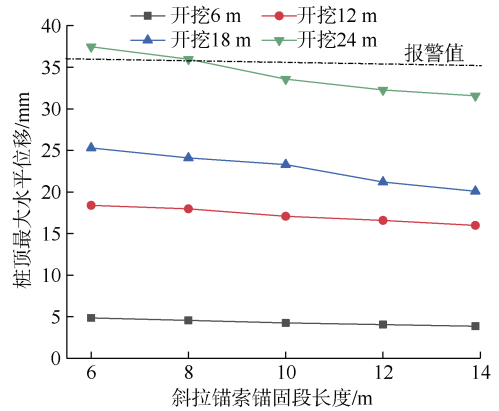


图 6 斜拉锚索锚固段长度与桩顶最大水平位移关系曲线
Figure 6 The relationship between anchor cable anchorage length and maximum horizontal displacement at piles head

由图 6 可知: 各开挖深度下, 桩顶最大水平位移随锚索锚固段长度的增加而降低, 其中当基坑开挖至 24 m 时, 锚固段长度对基坑水平变形的影响最为明显; 开挖深度 24 m、锚固段长度 8 m 的工况下, 桩顶最大水平位移接近于报警值。由于锚固段注浆体与周边岩土体的摩擦力决定锚固效果, 考虑到现场的注浆效果, 故锚固段长度按保守取值, 按计算数值 8 m 增加 2 m 后取 10 m。

4.2.2 斜拉锚索道数优化

根据表 1 第 5 列中的优化方案, 计算得到斜拉锚索道数与桩顶最大水平位移关系曲线, 如图 7 所示。

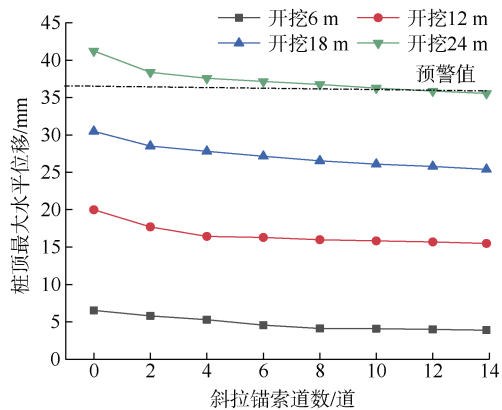


图 7 斜拉锚索道数与桩顶最大水平位移关系曲线
Figure 7 The relationship between number of inclined cable stays and maximum horizontal displacement at piles head

由图 7 可知: 相同开挖深度下, 桩顶最大水平位移随斜拉锚索道数增加而降低, 初期降幅较快, 如 0~4 道、6~10 道时降幅减缓, 12~14 道时降幅趋于平缓, 其中开挖 24 m、道数为 0 时桩顶最大水平位移高达 42.22 mm, 超报警值 6.22 mm, 说明仅靠“护坡桩+

对拉锚杆”并配合注浆的支护体系难以保证工程的安全，故必须配合斜拉锚索。就具体斜拉锚索的道数而言，12道时位移回落到报警值以下，且斜拉锚索作用取决于施工质量和与周围锚固体的锚固作用，理论计算与现场施工还有一定误差。故斜拉锚索道数需保守取值，拟采用12道。

综合上述优化结果，建议对拉锚杆间距采用1.3m，直径采用150mm；斜拉锚索锚固段长度采用10m，道数为12道。实际工程中也按照此方案进行了施工。

5 实际工程中的应用效果

5.1 监测点布置

对地体接驳区进行现场监测，监测点布置如图8所示，在护坡桩冠梁上每间距20m设置一组桩顶水平和竖向位移监测点，共10组。以北侧桩连线为x轴，以基坑中心线为y轴。向东为正，向西为负，将监测点与基坑中线的距离与具体坐标一一对应。

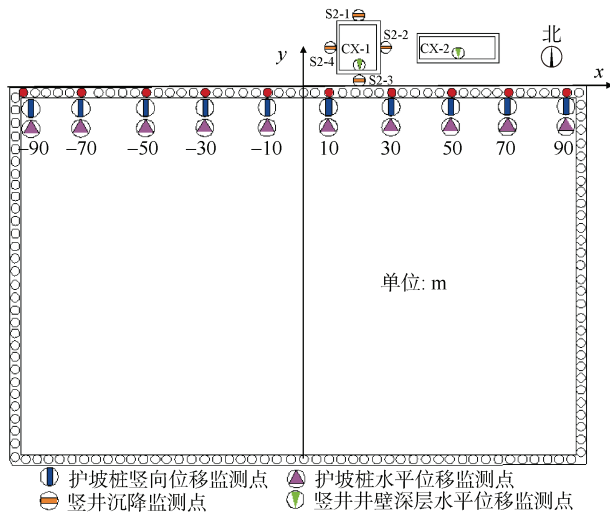


图8 工程监测点布置平面

Figure 8 Layout plan of engineering monitoring points

5.2 桩顶水平位移模拟值与监测值对比

基坑支护各阶段开挖完成后，提取上述监测点的桩顶水平位移监测值和模拟值，绘制护坡桩桩顶水平位移模拟值与监测值对比曲线，如图9所示，桩顶水平位移曲线整体上呈“弓”字形分布，在基坑两角端、竖井对应位置处的位移较小，其余地方相对较大，最大位移发生在距基坑中心线左侧50m处；两角端由于侧边冠梁与水平侧冠梁共同约束，其水平位移较小；竖井对应位置处由于注浆区的设置，故在基坑中心线右侧水平位移减小；随着基坑开挖深度的增加，桩顶

水平位移呈现增大趋势，但整体上来说，最大值小于报警值36mm，说明联合支护体系优化方案合理；此外，监测值和模拟值两者尽管在数值上有一定差异，但误差最大仅为29.8%，且变化趋势吻合，说明选取的支护结构参数有效。

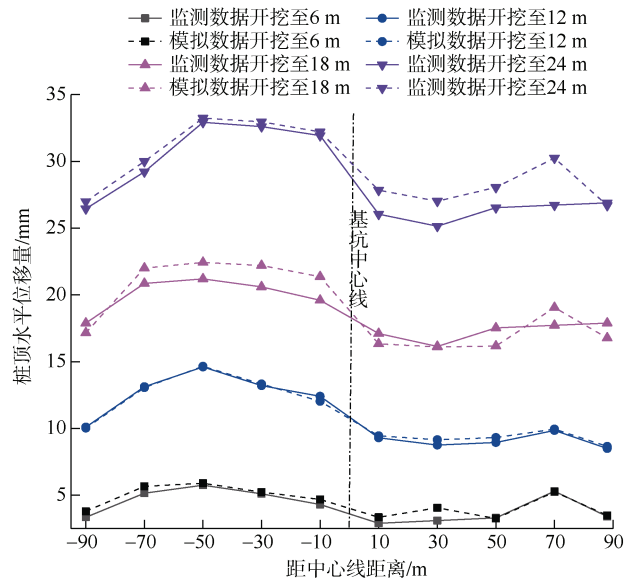


图9 护坡桩水平位移模拟值与监测值对比

Figure 9 Comparison between simulated and monitored horizontal displacement values of slope protection piles

5.3 桩顶竖向位移模拟值与监测值对比

绘制护坡桩桩顶竖向位移模拟值与监测值对比曲线如图10所示，相同开挖深度下，桩顶竖向位移曲线

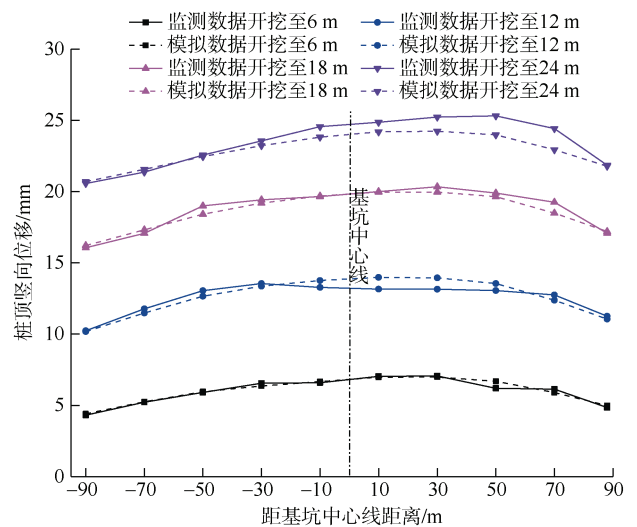


图10 护坡桩竖向位移模拟值与监测值对比

Figure 10 Comparison between simulated and monitored vertical displacement values of slope protection piles

近似呈抛物线分布,即由基坑两端向中间逐渐增大,但在开挖深度小于18 m时变化幅度不大,趋势较平缓,达到24 m后变化较大;距基坑中心线相同距离时,随着开挖深度的增加,桩顶水平位移增大,但整体上来说,最大值小于桩顶竖向位移报警值28 mm;此外,监测值和模拟值最大误差为23.4%,也仅为少数几个点,说明该数值模型真实有效,参数基本正确,也说明优化方案合理有效,在工程中得到了合理应用。

5.4 地铁附属结构的实际结构变形

选取2号竖井4个方向测点S2-1、S2-2、S2-3和S2-4的沉降位移实测数据进行分析,如图11所示。

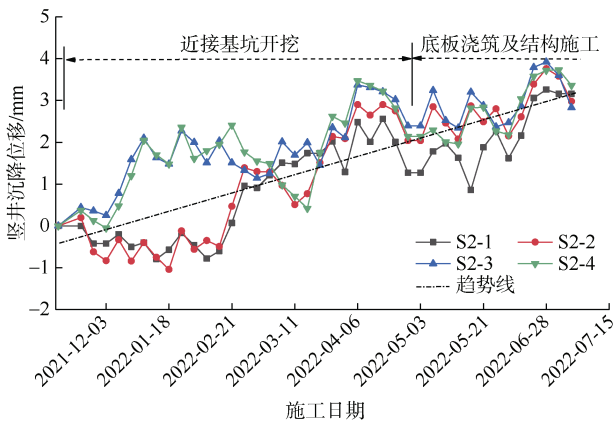


图11 竖井顶部沉降位移时程

Figure 11 Time series of top settlement displacement of the shaft

由图11可知:在基坑各阶段施工过程中,竖井顶部沉降位移变化呈波动上升趋势。主要原因是基坑土体开挖卸载,坑底土体向上隆起而导致临近竖井随之上浮,竖井南北两侧注浆控制其上浮阈值,基坑先挖再打设对拉锚杆导致沉降位移波动上升,其中竖井顶部最大沉降位移发生在测点S2-3处(即远离车站一侧位置),值为3.92 mm,远远小于近接深基坑桩顶竖向位移,说明该联合支护结构通过注浆加固土体,打设锚索锚杆传递土压力的支护措施能有效控制既有地铁附属结构的竖向变形。

为进一步体现近接深基坑开挖下,该联合支护体系对既有地铁附属结构水平变形的控制效果,选取两竖井靠深基坑侧两个测点CX-1、CX-2的各开挖阶段竖井井壁深层水平位移监测数据进行分析,如图12所示。各测点竖井井壁在不同开挖阶段的变形趋势均为中间大两端小;随着开挖深度的增加,竖井井壁的最

大水平变形位置沿井壁逐渐向下移动;开挖深度小于18 m时,竖井井壁位移变化平稳,开挖深度大于18 m时,井壁深层水平位移呈波动变化,最大水平变形发生在测点CX-1处,为15.8 mm,但远低于近接深基坑桩顶水平位移。产生这种现象的主要原因是:对拉锚杆与斜拉锚索将护坡桩上的土压力传递至竖井后方深层土体,而竖井仅作为土压力传递载体;加之对竖井周边土体进行注浆,形成了较大的刚度,故近接基坑开挖引起地铁附属结构的扰动远小于地层的扰动。

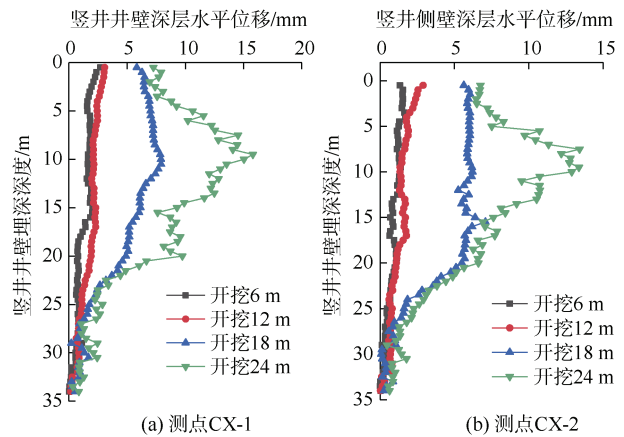


图12 竖井井壁深层水平位移开挖阶段曲线

Figure 12 Excavation stage curves for deep horizontal displacement of the shaft wall

综上,施工过程中竖井井壁最大深层水平位移为15.8 mm,竖井顶部沉降最大值为3.92 mm,均小于变形控制要求,满足《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)^[18]允许变形值控制要求。基坑在施工过程中,地铁附属结构的变形控制较好,确保了既有地铁车站及其附属结构的安全。在地铁运营之后,两竖井将作为车站风亭,为确保其在使用中的安全,将对两竖井进行全程监测。

6 结论

本文以实际工程为背景,采用数值模拟与现场监测相结合的方法,分析了“护坡桩+对拉锚杆+斜拉锚索配合注浆”联合支护体系对基坑变形的影响规律和对既有地铁附属结构的加固效果,并对该体系进行优化,得出如下结论:

1) 护坡桩桩顶水平位移最大值为33.23 mm,桩顶水平位移最大值为24.24 mm,均小于规定的报警值;竖井顶部最大沉降值为3.92 mm,深层水平位移最大值为15.8 mm,远低于近接基坑桩顶竖向与水平位移;

说明“护坡桩+对拉锚杆+斜拉锚索”配合注浆联合支护体系在解决临近深基坑一侧、既有地铁附属结构支护难以施作的加固工程中是切实可行的，其控制基坑变形效果好，可同时确保既有地铁附属结构的安全。

2) 通过优化分析得到本工程中的联合支护体系方案为：对拉锚杆间距 1.3 m、直径 150 mm；斜拉锚索长度 25 m、倾角 15°、直径 150 mm、锚固段长度 10 m，道数 12 道。将该方案应用于实际工程后，监测数据与模拟数据趋势基本一致。

3) 联合支护体系中通过注浆加固地铁附属结构周边土体，对拉锚杆与斜拉锚索将护坡桩上的土压力传递至地铁附属结构后方深层土体的支护措施起到了良好的实际加固效果，为类似近接基坑及既有地铁附属结构加固工程提供参考。

参考文献

- [1] 王杰, 李迪安, 田宝吉, 等. 新型桩-土-撑组合支护体系工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 93-96.
WANG Jie, LI Dian, TIAN Baoji, et al. Theoretical analysis and engineering application of new pile-soil-support system[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41(S2): 93-96.
- [2] 周勇, 王惠君, 朱彦鹏. 某地铁深基坑桩撑支护结构施工力学行为分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(1): 86-92.
ZHOU Yong, WANG Huijun, ZHU Yanpeng. Construction mechanics behavior analysis of pile-strut supporting structure of a subway deep foundation pit[J]. Journal of railway engineering society, 2019, 36(1): 86-92.
- [3] 尹利洁, 李宇杰, 朱彦鹏, 等. 兰州地铁雁园路站基坑支护监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 111-116.
YIN Lijie, LI Yujie, ZHU Yanpeng, et al. Monitoring and numerical simulation of support for foundation pit at Yanyuan Road Station of Lanzhou Metro[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S1): 111-116.
- [4] 王翠, 闫澍旺, 张启斌. 深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制及控制措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2994-3000.
WANG Cui, YAN Shuwang, ZHANG Qibin. Study of influence of deep pit excavation on adjacent bridge foundation piles[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(S1): 2994-3000.
- [5] 张坤勇, 张梦, 孙斌, 等. 考虑时空效应的软土狭长型深基坑地连墙变形计算方法[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2389-2399.
ZHANG Kunyong, ZHANG Meng, SUN Bin, et al. A calculation method for deformation of diaphragm wall of narrow deep foundation pit in soft soil considering spatio-temporal effect[J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(8): 2389-2399.
- [6] 周中, 鄢海涛, 李守文, 等. 高层建筑紧邻深大基坑开挖变形分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增刊 1): 1102-1110.
ZHOU Zhong, YAN Haitao, LI Shouwen, et al. Analysis of Excavation-induced deformation of high-rise building adjacent to deep and large foundation pit[J]. Modern tunneling technology, 2022, 59(S1): 1102-1110.
- [7] 亢鑫超, 王士杰, 王崇宇, 等. 考虑降水渗流效应的土钉-桩锚支护结构深基坑数值分析[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(2): 129-133.
KANG Xinchao, WANG Shijie, WANG Chongyu, et al. Numerical analysis on the seepage effect of deep foundation pit dewatering[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2018, 41(2): 129-133.
- [8] 陈长流, 叶帅华, 朱彦鹏. 预应力锚杆与土钉联合支护体系在兰州深基坑工程中的应用与监测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 484-489.
CHEN Changliu, YE Shuaihua, ZHU Yanpeng. Application and monitoring analysis of combined supporting system by prestressed anchors and soil nails for a deep excavation in Lanzhou[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 484-489.
- [9] 周勇, 张磊. 深基坑土钉加预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 106-112.
ZHOU Yong, ZHANG Lei. Sensitivity analysis of design parameters of soil-nailing and prestressed anchor structure for deep excavations[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(S2): 106-112.
- [10] 冯申铎, 姜晓光, 杨志银, 等. “桩(墙)-撑-锚”联合支护技术的工程应用与变形协调探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 456-460.
FENG Shenduo, JIANG Xiaoguang, YANG Zhiyin, et al. Application and deformation compatibility of combined support of pile (wall)-bracing-anchor[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 456-460.
- [11] 王召磊, 杨志银, 张俊, 等. 桩撑锚组合支护结构的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 230-232.
WANG Zhaolei, YANG Zhiyin, ZHANG Jun, et al. Three-dimensional numerical analysis of combined support

- structure of pile-strut bracing-anchor[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 230-232.
- [12] 董建华, 庄超. 深基坑框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 619-633.
DONG Jianhua, ZHUANG Chao. Mechanical properties of the combined retaining structure of frame prestressed anchors and micro steel tube piles in deep foundation pits[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(3): 619-633.
- [13] 王鸿运, 姚小波, 张尧, 等. 基于双排桩和锚索支护基坑开挖监测分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 446-450.
WANG Hongyun, YAO Xiaobo, ZHANG Yao, et al. Monitoring and analysis of excavation based on supporting structures of double-row piles and prestressed anchor cables[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(S2): 446-450.
- [14] 徐奴文. 地铁车站深基坑开挖与支护有限元数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
XU Nuwen. Finite element numerical simulation of deep foundation pit excavation and support in subway station[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [15] 刘性锋, 刘禹, 李辉, 等. 地铁站深基坑桩撑支护开挖变形[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14332-14341.
LIU Xingfeng, LIU Yu, LI Hui, et al. Deformation of pile support excavation in deep foundation pit of subway station[J]. Science technology and engineering, 2023, 23(33): 14332-14341.
- [16] 叶永, 刘杨, 谢旋. 深基坑开挖中支护结构参数优化设计[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 14-19.
YE Yong, LIU Yang, XIE Xuan. Optimization design of supporting structure parameters in deep foundation pit excavation[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, 45(3): 14-19.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for monitoring of building excavation engineering: GB 50497—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- (编辑: 王艳菊)

(上接第90页)

- [10] 邹春华, 周顺华, 徐正良, 等. 基于位移反分析法的盾构掘进面土压力计算[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(4): 53-58.
ZOU Chunhua, ZHOU Shunhua, XU Zhengliang, et al. Calculation of the earth pressure on the excavation face of the shield tunnel based on the inverse displacement analysis method[J]. China railway science, 2010, 31(4): 53-58.
- [11] 马云新. 克泥效抑制沉降工法在盾构近距离下穿地铁既有有线工程中的应用[J]. 施工技术, 2015, 44(1): 94-98.
MA Yunxin. Application of clay shock method for settlement control in shields crossing the existing subway in short distance[J]. Construction technology, 2015, 44(1): 94-98.
- [12] 程雪松, 赵林嵩, 郑刚, 等. 盾构周围空隙充填控沉材料配合比研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(3): 99-102.
CHENG Xuesong, ZHAO Linsong, ZHENG Gang, et al. Research on proportion of void filling and settlement control materials around shield[J]. Railway engineering, 2023, 63(3): 99-102.
- [13] 有智慧, 李雪, 霍鹏, 等. 城市轨道交通盾构同步注浆国内外现状及发展[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(4): 72-83.
YOU Zhihui, LI Xue, HUO Peng, et al. Present status and development of simultaneous grouting of shield tunnel in the urban rail transit industry[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(4): 72-83.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for protection structures of urban rail transit: CJJ/T 202—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- (编辑: 王艳菊)