

基坑伺服钢支撑分阶段轴力设计及效果分析^{*}

顾浩磊¹ 邓向振^{2,3} 许炳刚^{2,3} 狄宏规⁴ 金钰寅⁴ 范小叶^{2,3}

(1. 南京地铁建设有限公司, 210017, 南京; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 200120, 上海;

3. 中国建筑第八工程局第三建设有限公司, 210046, 南京; 4. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:在软土地区进行基坑开挖时,可采用伺服钢支撑系统减小基坑围护结构的变形以及对周边环境的影响,但目前对一道伺服支撑仅有一个初始设计值,无法指导开挖过程中支撑轴力的调整,因此需要针对开挖全过程提出相应的伺服支撑轴力设计值。**方法:**依托南京地铁9号线白云亭路基坑工程,分别对伺服支撑设置情况不同的全伺服段,部分伺服段断面各开挖步下的伺服支撑轴力进行分阶段优化设计。结合有限元模型与遗传算法,通过有限元模型计算某组伺服支撑设计轴力下的围护结构变形,并通过遗传算法不断生成新的轴力设计值,直至围护结构变形等参数满足设计要求;据此得到不同开挖步下较优的伺服支撑轴力设计值,实现了伺服钢支撑轴力的动态设置。建立了伺服支撑基坑的三维有限元模型,验算优化设计方案下的伺服支撑的变形控制效果及对周边环境的影响。**结果及结论:**分阶段优化设计得到的伺服支撑轴力可以有效控制开挖过程中围护结构的变形及周边地面沉降。

关键词 伺服钢支撑; 分阶段设计; 遗传算法; 围护结构变形; 地面沉降

中图分类号 TU94⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.006

Design and Effect Analysis of Phased Axial Force for Servo Steel Bracing in Foundation Pits

GU Haolei, DENG Xiangzheng, XU Binggang, DI Honggui, JIN Yuyin, FAN Xiaoye

Abstract Objective: During excavation of foundation pits in soft soil areas, a servo steel bracing system can be employed to minimize deformation of foundation pit retaining structure and the impact on surrounding environment. However, there is only one initial design value for a set of servo bracing, lacking guidance for adjusting bracing axial forces during the excavation process. Thus, it is necessary to propose corresponding SBAF (servo bracing axial force) design values for the entire

excavation process. Method: Leveraging the foundation pit project at Baiyunting Road Station of Nanjing Metro Line 9, full servo sections are set for different servo bracing configurations, and for some servo sections, phased optimization design is carried out for the SBAF of the profile at each excavation step. By integrating a finite element model with genetic algorithm, the finite element model is used to calculate the retaining structure deformation under the design axial force of a set of servo bracing. The genetic algorithm continuously generates new axial force design values until the retaining structure parameters including deformation meets the design requirements. Optimal SBAF design values for different excavation steps are obtained, realizing dynamic adjustment of the servo steel bracing axial forces. A three-dimensional finite element model of the servo bracing foundation pit is established to assess the deformation control effect and the impact on surrounding environment under the optimized design scheme. Result & Conclusion: The SBAF obtained from phased optimization design can effectively control the retaining structure deformation and land subsidence during excavation process.

Key words servo steel bracing; phased design; genetic algorithm; retaining structure deformation; land subsidence

Author's address Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210017, Nanjing, China

随着城市轨道交通的快速发展,地铁车站建设面临的问题也愈加复杂。其中,深基坑开挖阶段围护结构变形过大导致的工程事故时有发生。因此,控制基坑开挖引起的围护结构变形及周边地面沉降具有重要意义^[1-3],尤其是对于城市中心区的深基坑开挖。

支撑轴力会影响围护结构的变形控制效果。文献[4]基于时空效应理论,提出了随基坑工况变

^{*} 国家自然科学基金面上项目(52278456)

化动态调整轴力的轴力施加策略。文献[5]对深基坑开挖与周边既有建筑物改造同时进行的最优工况进行了研究。文献[6]通过实测和数值模拟分析了基坑变形对周围建筑物影响,结果表明合理设置支撑轴力可控制周边建筑物沉降。

伺服钢支撑轴力具有可主动补偿,控制轴力的特点,近年来被广泛应用于环境保护等级较高的深基坑工程中^[7-10]。但目前一道伺服支撑仅有一个设计轴力值,无法指导具体开挖过程中支撑轴力的调整,使得部分基坑的伺服钢支撑的使用效果未必能达到预期。

本研究构建了伺服钢支撑的分阶段设计方法,依托南京地铁9号线白云亭路站基坑工程进行伺服钢支撑轴力进行分阶段设计。同时,构建三维数值模型分析分阶段轴力对围护结构变形及周边地面沉降的控制效果。该研究结果表明,分阶段设计得到的伺服支撑轴力可以有效地控制基坑开挖引起的变形,对伺服钢支撑轴力的设计与现场调整具有一定的指导意义。

1 工程概况

1.1 工程简介

白云亭路站为南京地铁9号线的换乘站,于热河南路南北向布置,如图1所示。拟建场地填土层厚度较大,填土层之下覆盖层深度范围内主要为淤泥质粉质黏土,具有低渗透性、高压缩性等特点。各土层具体物理力学指标如表1所示。



图1 白云亭路站周边情况

Fig.1 Surroundings of Baiyunting Road Station

1.2 白云亭路站基坑支护方案

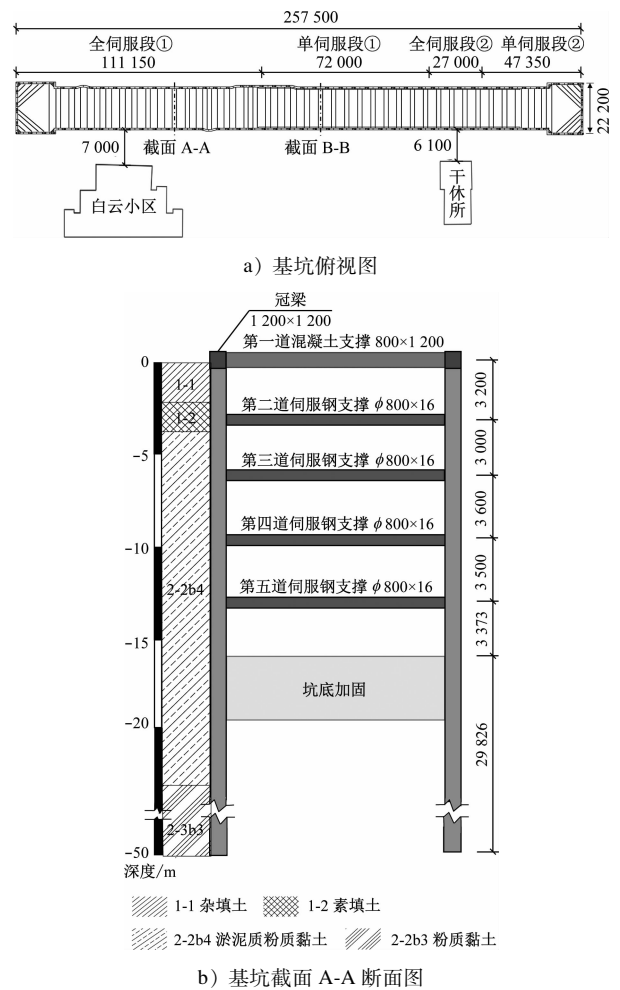
白云亭路站外包总长为257.50 m,车站标准段宽度为18.10 m,端头井外包宽度为22.20 m,标准段基坑深度为18.57 m,端头段基坑深度为19.42 m。车站主体基坑选用800 mm厚地下连续墙+水

平内支撑支护体系,地下连续墙总深度约为49 m。车站西侧紧邻白云小区和陆军干休所等敏感建筑物,其距基坑仅为7.00 m和6.10 m。白云亭路站基坑断面情况如图2所示。

表1 工程场地土层分布及物理力学参数
Tab.1 Soil layer distribution and physical mechanical parameters of engineering site

土层名称	厚度/ m	γ / (kN/m ³)	c / kPa	φ / (°)	E / MPa	泊松比
1-1 杂填土	2.4	18.0	5.0	18.0	3.74	0.20
1-2 素填土	1.5	18.2	13.7	14.8	3.74	0.20
2-2b4 淤泥质粉质黏土	22.4	17.9	12.5	13.3	3.69	0.40
2-3b3 粉质黏土	16.6	18.0	12.9	14.5	4.20	0.37
k2p-3 中等风化泥质粉砂	27.1	26.2	30.0	36.0	20.00	0.23

注: γ 为土层重度, c 为土层黏聚力, φ 为土层内摩擦角, E 为土层压缩模量。



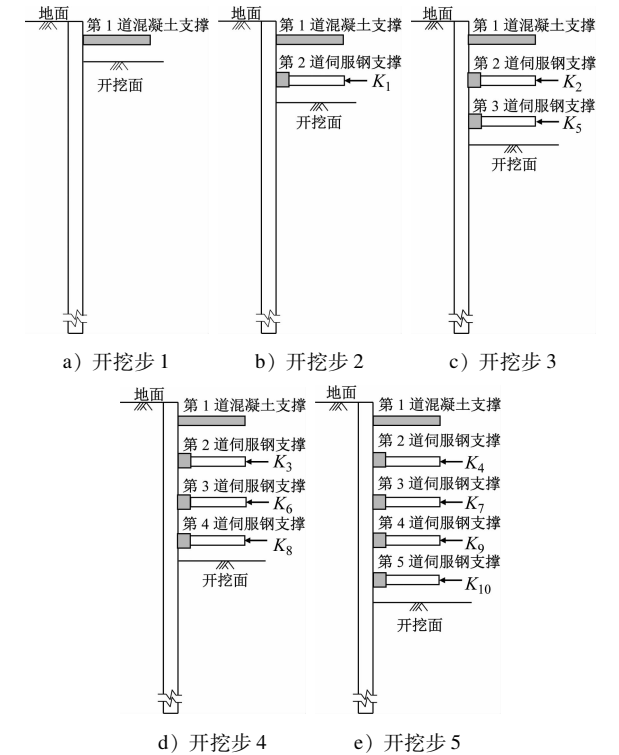


图4 基坑全伺服段①开挖步示意图

Fig. 4 Schematic diagram of excavation steps for the full servo section ① of foundation pit

型为:

$$\begin{cases} f(K_1, K_2, \dots, K_{10}) = \min(U_{\max}), K_1, K_2, \dots, K_{10} \in \mathbf{R}^n \\ 0 \leq K_1, K_2, \dots, K_{10} \leq F_a, K_1, K_2, \dots, K_{10} \in \mathbf{R}^n \\ S_{i \max} \leq rH_i, i = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

- F_a ——单根伺服钢支撑失稳极限荷载;
- H_i ——第 i 步基坑开挖深度;
- r ——环境保护要求,即围护结构变形最大值与开挖深度的比值。

表4 全伺服段伺服钢支撑设计轴力最终优化结果

Tab. 4 Final optimization results of the axial force for servo steel support design in the full servo section					
轴力设计方案类型	开挖工况	第2道支撑轴力/ (kN/m)	第3道支撑轴力/ (kN/m)	第4道支撑轴力/ (kN/m)	第5道支撑轴力/ (kN/m)
原始设计方案	开挖第1道混凝土撑				
	开挖第2道钢支撑	250			
	开挖第3道钢支撑	250	350		
	开挖第4道钢支撑	250	350	400	
	开挖第5道钢支撑	250	350	400	400
优化设计方案	开挖第1道混凝土撑				
	开挖第2道钢支撑	396			
	开挖第3道钢支撑	398	803		
	开挖第4道钢支撑	404	408	709	
	开挖第5道钢支撑	411	416	318	519

使用 Matlab 软件编写代码实现伺服钢支撑轴力动态设置。由于传统的梯度下降法等方法存在梯度难以计算,容易陷入局部最优等问题,本研究使用遗传算法,基于算法自适应调整搜索方向的特点,可有效地解决上述问题。轴力设置联合运算流程如图5所示。

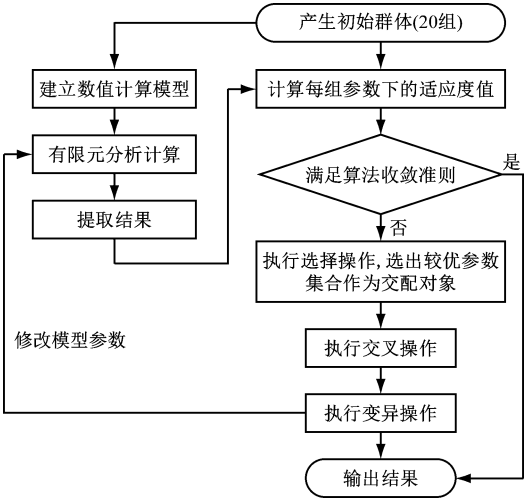


图5 轴力设置联合运算流程图

Fig. 5 Flow chart of axial force setting joint operation

采用上述方法对单伺服段和全伺服段的伺服轴力设计进行优化,结果分别见表3和表4。

表3 单伺服段伺服钢支撑设计轴力最终优化结果

Tab. 3 Final optimization results of the axial force for single servo section servo steel support design

开挖工况	第3道支撑原始 设计轴力/(kN/m)	第3道支撑优化 设计轴力/(kN/m)
开挖第1道混凝土撑		
开挖第2道钢支撑		
开挖第3道钢支撑	400	354
开挖第4道钢支撑	400	598

开挖至坑底时,各断面伺服钢支撑在不同轴力设计方案下的围护结构水平位移情况如图 6 所示。采用伺服轴力动态优化设计值后,单伺服段、全伺服段①和全伺服段②的围护结构最大水平位移与原始设计方案相比,分别降低了 2.1%、10.9% 和 9.2%。当全断面设置伺服钢支撑时,该方法的围护结构变形控制效果更明显。

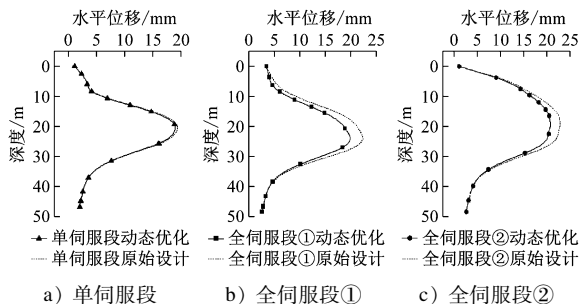


图 6 开挖至坑底时不同伺服轴力设计方案下的围护结构水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of retaining structure under different servo axial force design schemes after excavation to pit bottom

3 基坑开挖数值模拟

为分析基坑开挖对邻近建筑物的影响,本研究使用三维有限元软件 PLAXIS 建立模型,对围护结构和周边土体变形进行计算,同时验证分阶段轴力的变形控制效果。

设三维模型长为 350 m,宽为 125 m,高为 70 m,同时考虑了基坑周边的建筑物,其基坑开挖网格示意图如图 7 所示。其中,土体本构模型采用小应变土体 HSS(硬化本构模型)。使用恒定的集中力模拟伺服支撑轴力补偿值,具体开挖步示意图如图 8 所示。

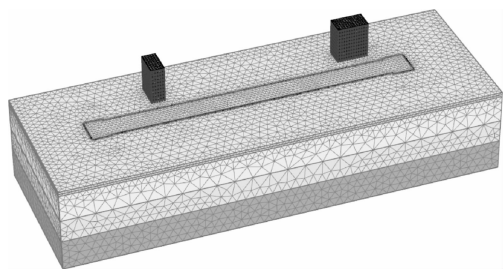


图 7 基坑开挖网格示意图

Fig. 7 Schematic diagram of foundation pit excavation grid

4 结果分析与比较

4.1 围护结构变形对比

图 9 为开挖至坑底最大变形深度处沿基坑长度方向的

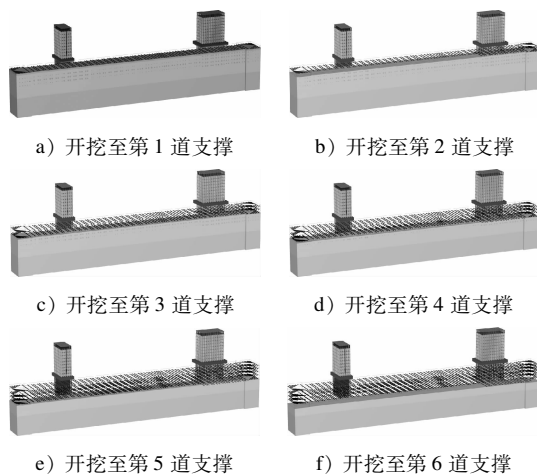


图 8 基坑开挖步骤示意图

Fig. 8 Schematic diagram of excavation steps for foundation pit

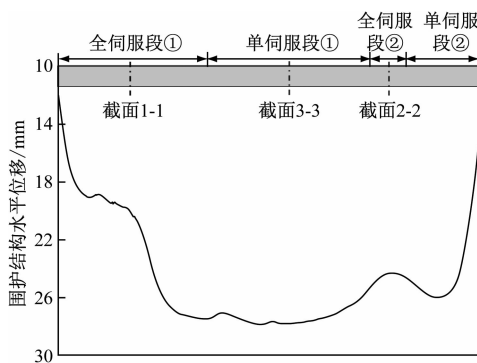


图 9 开挖至坑底后最大变形深度处沿基坑长度方向的围护结构水平位移图

Fig. 9 Horizontal displacement diagram of retaining structure along the length direction of the foundation pit at the maximum deformation depth of the excavation to the bottom of the pit

方向的围护结构水平位移图。由图 9 可知:开挖至坑底后围护结构水平位移在最大位移深度处沿基坑长度方向的变形情况。开挖至坑底后基坑中段围护结构水平位移最大,向两端逐渐减小。在全伺服段①范围内,围护结构的水平位移显著降低,全伺服段②范围内的围护结构水平位移降低不明显,原因在于全伺服段②仅设置了 3 道伺服钢支撑,而全伺服段①设置了 4 道伺服钢支撑。

选取全伺服段①、全伺服段②和单伺服段①的中间截面(即截面 1-1、截面 2-2 和截面 3-3)对不同工况下围护结构侧向位移进行分析,如图 10 a) 所示。随着深度的增加,围护结构变形呈现先增后减的趋势;开挖至坑底时,3 处截面的最大变形量均发生在坑底以下位置。单伺服段①基坑围护结构最

大水平位移为 27.83 mm,而全伺服段①和②的基坑围护结构最大水平位移分别为 19.55 mm 和 24.59 mm,降低了约 20.5% 和 29.8%。虽然 3 处截面的围护结构最大水平位移均能满足一级安全基坑的变形控制要求,但是通过增加伺服支撑设置道数,能够显著减小围护结构的水平变形。

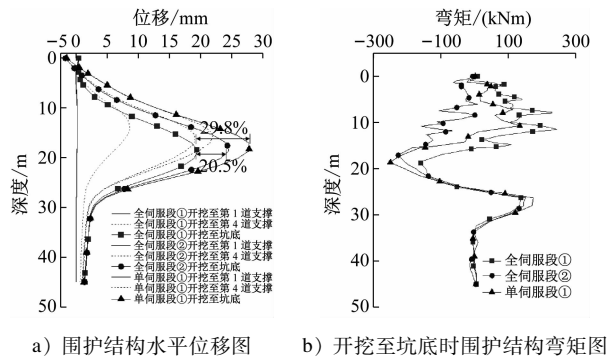


图 10 基坑开挖过程中围护结构力学响应

Fig. 10 Mechanical response of retaining structure during foundation of pit excavation

图 10 b) 为开挖至坑底时围护结构沿深度方向的墙体弯矩图。从图 10 b) 可知:3 处截面在开挖面以上的墙身弯矩,基本呈现沿深度方向先增大后减小至零,再反向增大的分布趋势;而开挖面以下 3 处截面的墙身弯矩基本相同,无明显区别。对于全伺服段①,其最大负弯矩值小于其他两处截面,且正负弯矩值相差不大,内力分布最优,因此通过增加伺服支撑设置道数,除了控制围护结构的水平位移,还能够改善围护结构的内力分布,使之受力均匀。

4.2 周边地面沉降对比

图 11 为有限元模拟得到的基坑周边地面沉降情况。基坑开挖至坑底时,基坑中部地面沉降最大。由于全断面伺服钢支撑的设置,全伺服段①和全伺服段②的地面沉降与附近区域相比明显减小,

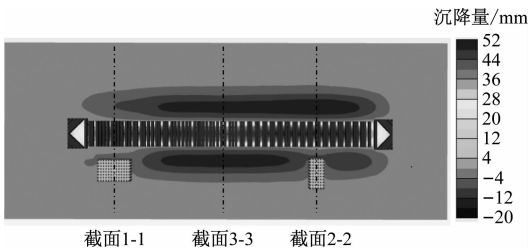


图 11 开挖至坑底基坑周边地面沉降图

Fig. 11 Diagram of foundation pit surrounding land subsidence after excavation to pit bottom

并且在既有建筑物桩基础的作用下,建筑物附近区域的地面沉降比基坑另一侧与之对应的区域小。

选取全伺服段①、全伺服段②和单伺服段①中间截面(即截面 1-1、截面 2-2 和截面 3-3)对部分不同工况下靠近建筑物侧基坑周边地面沉降进行分析,如图 12 所示。基坑开挖过程中,随着与基坑围护结构的相对距离增大,周边地面沉降呈现先增大后减小的变化规律,最后趋于恒定值。

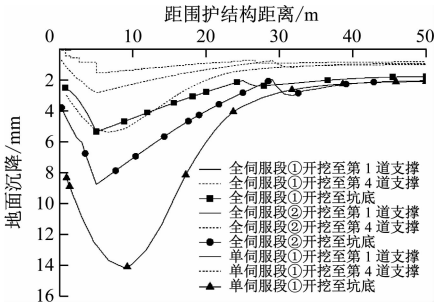


图 12 基坑开挖周边地面沉降图

Fig. 12 Diagram of land subsidence in foundation pit surrounding

基坑周边地面沉降最大值位于单伺服段①中部,距离围护结构 10 m 左右。基坑开挖至坑底时,单伺服段①和全伺服段②的基坑周边地面沉降最大值分别为 14.12 mm 和 8.76 mm,而设置 4 道伺服钢支撑的全伺服段①基坑周边地面沉降最大值仅为 5.35 mm,同比降低 62.1% 和 38.9%。因此通过增加伺服支撑设置道数,可以更有效地控制基坑周边地面沉降,从而减小基坑开挖的环境影响。

5 结论

1) 本研究将伺服钢支撑简化为“非线性弹簧单元+集中力”,围护结构简化为弹性地基梁,基于有限元与遗传算法联合迭代求解的思路,构建了基于变形控制的伺服钢支撑轴力全局优化方法,可用于伺服钢支撑分阶段轴力设计。

2) 对南京地铁 9 号线白云亭路站地铁基坑伺服支撑轴力进行动态设置和优化,与原始设计方案相比,单伺服段、全伺服段①和全伺服段②的围护结构最大水平位移分别降低了 2.1%、10.9%、9.2%。当全断面设置伺服钢支撑时,该方法的围护结构变形控制效果更明显。

3) 本研究对南京地铁九号线白云亭路站地铁基坑进行模拟分析,并对采取不同伺服钢支撑布置方案断面的围护结构变形及周边环境效应进行对

比分析。结果表明,通过增加伺服钢支撑设置道数,可以使基坑在整个开挖过程中及开挖完成后的围护结构水平位移最多降低 29.8%,周边地面沉降最多减少 62.1%,变形控制效果显著。

4) 由于建筑物地基刚度整体较大,沉降时始终是一个整体,在建筑物地基的两侧,土体沉降均随着与基坑围护结构的相对距离增大而呈现先增大后减小的趋势,说明建筑物的桩基础可以减小基坑开挖对建筑物的影响。

参考文献

- [1] 黄大明, 黄栩. 钢支撑轴力伺服系统在基坑变形控制中的应用研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊1): 1069.
HUANG Daming, HUANG Xu. Applied research servo system of axial force for steel support in deformation control for deep foundation pit[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 1069.
- [2] LIU L, CAI G, LIU S, et al. Deformation characteristics and control for foundation pits in floodplain areas of Nanjing, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(7): 5527.
- [3] YANG J, KONG D. Deformation of deep and large foundation pit in soft soil of Fuzhou Subway [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(1): 36.
- [4] 唐克. 基坑伺服轴力钢支撑系统轴力加载策略研究[J]. 城市道桥与防洪, 2019(8): 237.
TANG Ke. Study on axial force loading strategy of servo axial force steel support system for foundation pit [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(8): 237.
- [5] 颜超, 孙廉威, 程子聪. 深基坑开挖与周边既有建筑物改造相互影响研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 80.

YAN Chao, SUN Lianwei, CHENG Zicong. Study on interaction between deep foundation pit excavation and reconstruction of surrounding existing buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 80.

- [6] 张波, 钱德玲, 蒋玉敏. 深基坑开挖变形控制及对周边建筑物影响的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(11): 1513.
ZHANG Bo, QIAN Deling, JIANG Yumin. Study of deformation control of deep foundation pit excavation and the influence on surrounding buildings[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38(11): 1513.
- [7] CHEN B, YAN T, SONG D, et al. Experimental investigations on a deep excavation support system with adjustable strut length [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104046.
- [8] DI H, GUO H, ZHOU S, et al. Investigation of the axial force compensation and deformation control effect of servo steel struts in a deep foundation pit excavation in soft clay [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1.
- [9] 周石喜, 王新线. 钢支撑轴力伺服系统在车站深基坑支护的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2021(4): 56.
ZHOU Shixi, WANG Xinxian. Application of steel support axial force servo system in deep foundation pit supporting[J]. Modern Urban Transit, 2021(4): 56.
- [10] 孙九春, 白廷辉, 廖少明. 基于支撑轴力相干性的深基坑变形主动控制[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 529.
SUN Jiuchun, BAI Tinghui, LIAO Shaoming. Active control of deep foundation pit deformation based on coherence of supporting axial force[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 529.

(收稿日期:2023-01-11)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

