

软土区地铁车站基坑取消换撑可行性分析研究^{*}叶 如¹ 申文明² 景 浩¹ 王小刚² 王晨竹² 董毓庆^{3**} 张在恒⁴

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波; 2. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 315175, 杭州;
3. 杭州岩通科技有限责任公司, 310005, 杭州; 4. 宁波市岩土工程有限公司, 315012, 宁波//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为深入研究软土地区地铁车站深基坑中取消换撑的可行性和实际决策过程中所需要考虑的工程因素, 依托现场实测数据, 探究基坑变形的变化规律, 总结有换撑区段与无换撑区段的变形差异, 提出地铁车站基坑取消换撑的可行性建议。研究结果表明: 不同的环境因素会导致基坑地下连续墙和地表沉降呈现出不同的变形规律及幅度; 在实际工程中, 应根据实际工程地质、施工工况、监测数值并结合变形计算或有限元模拟等初期计算结果综合判断深层土体应力释放变形是否充分, 从而决定是否取消换撑, 同时对于存在复杂环境因素或较多不利因素的截面应该保留换撑, 以防后续产生无法预测的测量量激增。

关键词 地铁车站; 深基坑; 换撑; 软土地区; 实测分析

中图分类号 TV551.4⁺2:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.016

Feasibility Analysis of Cancelling the Support Replacement of Metro Station Foundation Pit in Soft Soil Area

YE Ru, SHEN Wenming, JING Hao, WANG Xiaogang, WANG Chenzhu, DONG Yuqing, ZHANG Zaiheng

Abstract To study in-depth the feasibility of cancelling the support replacement of metro station deep foundation pit in soft soil area and the engineering factors to be considered in the actual decision-making process, by referring to field measurement data, the foundation pit deformation law is studied. The deformation difference between the sections with and without support replacement is summarized, and suggestions on the feasibility of cancelling the support replacement is put forward. The results show that different environmental factors will cause different deformation laws and amplitudes of the foundation pit underground diaphragm wall and land subsidence. In actual engineering cases, whether the stress release and deformation of the deep soil are sufficient to cancel the support replacement

should be comprehensively judged by the actual engineering geology, construction conditions, monitoring data, combined with deformation calculations, finite element simulation and other initial calculation results. At the same time, the support replacement method should be reserved for the sections with complex environmental factors or unfavorable factors to prevent the unpredictable sharp inclination increment as a result.

Key words metro station; deep foundation pit; support replacement; soft soil area; field measurement analysis

First-author's address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

基坑作为地下工程,其隐蔽性和复杂性使得工程往往倾向于以安全为主。国内对于基坑换撑技术的探讨可以追溯到1994年,文献[1]对上海由由大厦工程中采用混凝土传力带作为基坑换撑的形式进行了研究。随着基坑深度和跨度的发展,基坑换撑也逐渐发展成采用钢支撑等内支撑形式。换撑技术原理就是让围护结构因内支撑拆除所产生的部分应力通过受力媒介分化或传递给具备足够承受能力的底板等结构。然而,传统的换撑方式不仅增加了工作量,而且造成工作面闲置,延误施工进度。因此在确保围护结构安全与稳定的前提下,通过对车站基坑支撑布置进行优化,采用更为有效的手段替代传统的换撑方式是十分必要的。文献[2]根据基坑换撑前的变形情况和地质条件,在经过变形和稳定计算的前提下成功取消换撑。文献[3]通过取消换撑等方式进一步缩短工期并减少造价。但城市基坑的施工环境十分复杂,目前对不同环境及变形情况的分析仍不够充足。本文依托宁波地铁5号线钟公庙站工程,从基坑变形实测数据入手,结合周边环境因素探讨换撑对于软土区深基

^{*} 浙江省建设科研项目(2019K029)

^{**} 通信作者

坑围护结构的意义。研究结果也为地铁车站取消换撑的后续研究提供工程经验和指导。

1 工程概况

钟公庙站为地下二层岛式车站,基坑采用明挖法施工,主体基坑结构采用 800 mm 厚、35 m 深地下连续墙结合五道内支撑,坑底进行搅拌桩加固。顶部设有冠梁,用腋角与第一道混凝土支撑相连接。内支撑第一道为 800 mm×1 000 mm 混凝土支撑,第二和第四道采用直径 609 mm、厚 16 mm 钢支撑,第三和第五道采用直径 800 mm、厚 16 mm 钢支撑,均按 3.6 m、2.4 m 间隔疏密布置。其中 12~16 轴保留换撑,第四道需要换撑,第三道改为直径 609 mm 钢支撑。基坑采用阶梯式开挖,从两端端头井先行开挖,而后向中段开挖。由上而下分割成 6 层,每层约为 3 m,按长度方向分为 9 段。

本基坑安全等级为一级,变形保护等级为二级。基坑本体设置的监测项目如表 1 所示。

表 1 监测项目表

Tab.1 Monitoring items

监测项目	监测代码	控制值	
		绝对值	相对于基坑深度 H 的控制值
支护墙体水平位移	cx	60 mm	二级 0.5% H
地面沉降	D	50 mm	二级 0.5% H
支撑轴力	ZH(混凝土支撑); 最大值:轴力标准值 ZG(钢支撑) 最小值:(80%~100%)标准值		

2 基坑实测数据分析

2.1 地下连续墙测斜

地下连续墙水平位移最大值随时间变化如图 1 所示,北侧正值表示向基坑内侧移,南侧负值代表向基坑内侧移。从图中可以看出,南北两侧最大测斜值变形曲线规律相似但数值存在差异。北侧最大值出现在 cx15 测点,南侧最大值出现在 cx5 测点;支撑变形位置一致,但北侧要比南侧大约 31.45%,其中 cx17/3 截面该值为 33.71%、cx16/4 截面该值为 46.51%,均为北侧偏大;而基坑东侧及端头井处,为北侧偏大 9.31%~3.82%。结合该工程施工工况及周边环境情况,造成此种差异的原因主要有 3 个:①西北侧的 3H(H 为基坑开挖深度)影响范围内有多幢筏板基础的砖混结构楼房,由于无桩基础,额外建筑物荷载会加剧围护结构在基坑

开挖过程中的变形,与文献[4]的研究结论一致;②西北侧还存在一不良地质——暗浜,而暗浜的存在也加剧了建筑物荷载对基坑变形的影响;③基坑施工荷载大多集中在基坑北侧,相当于 20 kPa 的附加荷载^[5]。相较而言,南侧周边环境相对良好,且保留了沉管灌注桩的桩基础,可以起到一定程度的围护效果。

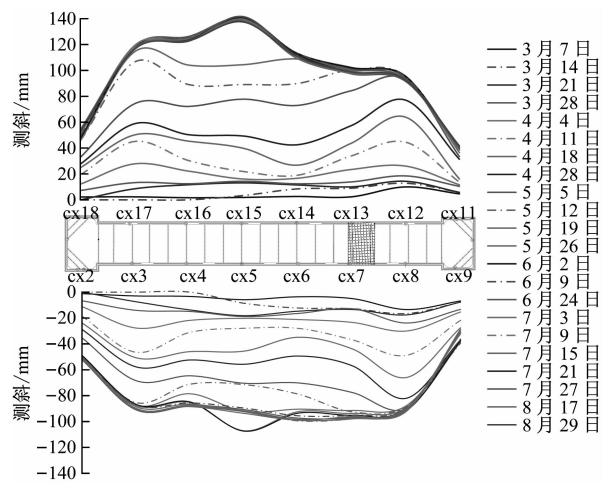


图 1 地下连续墙最大测斜发展平面图
Fig.1 Development diagram of underground diaphragm wall maximum inclination

本基坑墙体最大测斜的变形规律与施工工况有关。由于基坑土体开挖形式为阶梯式开挖,从两端端头井先行开挖,表现在基坑曲线上即为曲线两端,从图 1 中可以看出,端头井段最大侧移值最先开始增长,直至端头井底板施工完毕。端头底板施工完毕后,最大侧移值随即停止增长,基坑中段的最大侧移值也随着相应的开挖持续增长。

从墙体最大侧移来看,换撑对于基坑地下连续墙最终变形有着一定的维护效果。从北侧来看,有换撑段的最终变形要略小于西侧;从基坑东侧变形来看,有换撑段位于基坑中段,自身受到空间效应的影响,最终变形本应当大于两端端头井段变形。而在该工程中,有换撑段的最终变形与东侧无换撑段相近,由此可知换撑对于基坑地下连续墙最终变形有着一定的维护效果。从南侧来看,有换撑段的最终变形要略大于无换撑段的西侧,但西侧的小变形主要是由于其坑外存在遗留的建筑物桩基,起到了一定的维护作用。

图 2 为 cx6/14 和 cx7/13 截面的地下连续墙测斜随时间的变化曲线。图中地下连续墙测斜正值表示向坑内侧移,其中 cx6 测点底部末端损坏。由

图可知,截面南北两侧变形曲线近似,整体均呈现出“两端小,中间大”的“涨肚型”曲线,符合其“开挖深度大、初期顶部支撑刚度大”的工程实际情况^[6]。但南侧底端变形较大,在4月28日后开始逐渐增长,最后超过了40 mm,呈现出一定的“脚踢型”的

趋势。结合实际工况可知,4月28日后为地连墙中段最底层土体的开挖阶段,由于在该时段基坑底部支撑及土体刚度不够且侧向土压力较大,从而导致了该阶段地连墙底部位移的增大。

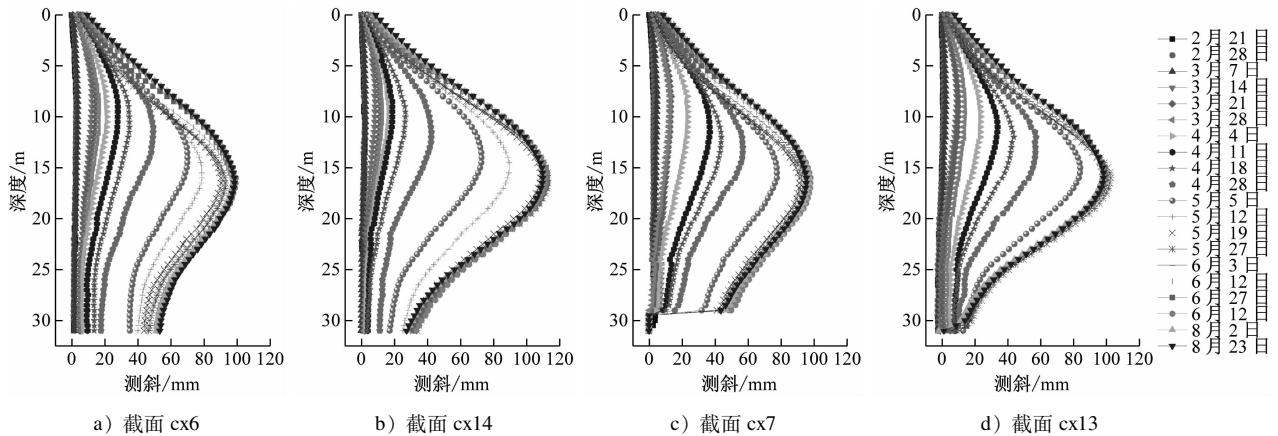


图2 地下连续墙测斜随时间变形图

Fig. 2 Diagram of underground diaphragm wall inclination deforming over time

图3为地下连续墙最大侧移发展曲线图。图中地下连续墙最大侧移正值表示向基坑内侧移。图3 a)包含了南北两侧标准段所有测点,可以看出地连墙最大侧移的发展主要分为4个阶段:

1) 9 m 以上土层开挖阶段:此时地连墙最大侧移发展较为缓慢,各测点测量值接近 30 mm, 占各测点总变形的 15.4% ~ 49.9%, 中位数为 33.7%。

2) 9 m 以下土层开挖阶段:地连墙最大侧移增长速率明显增大,且各测点增长速率及最终达到的变形量各有不同。该阶段的变形占总变形的 47.4% ~ 85.5%, 中位数为 65.5%。

3) 坑底底板施工阶段:各测点之间由于底板施

工的顺序不同,部分测点存在短时的起伏。

4) 全段底板施工完毕:此时基坑内部围护结构通过底板连接形成更为坚固的整体,各测点测量值也不再增大。

如图3 b)所示,cx16 和 cx15 就整体趋势而言,在第三阶段侧移量快速增长。这可能是额外建筑荷载、北侧坑外施工荷载以及无支撑暴露时间较长等综合作用的结果。由于额外荷载的存在,导致基坑开挖至底部受到的侧向土压力较大,同时长时间缺乏内支撑或底板的支撑,使得基坑变形迅速增大。如图3 c)所示,多数测点在开挖至坑底且浇筑底板后,其测量值不再增长并趋于稳定。其原因一

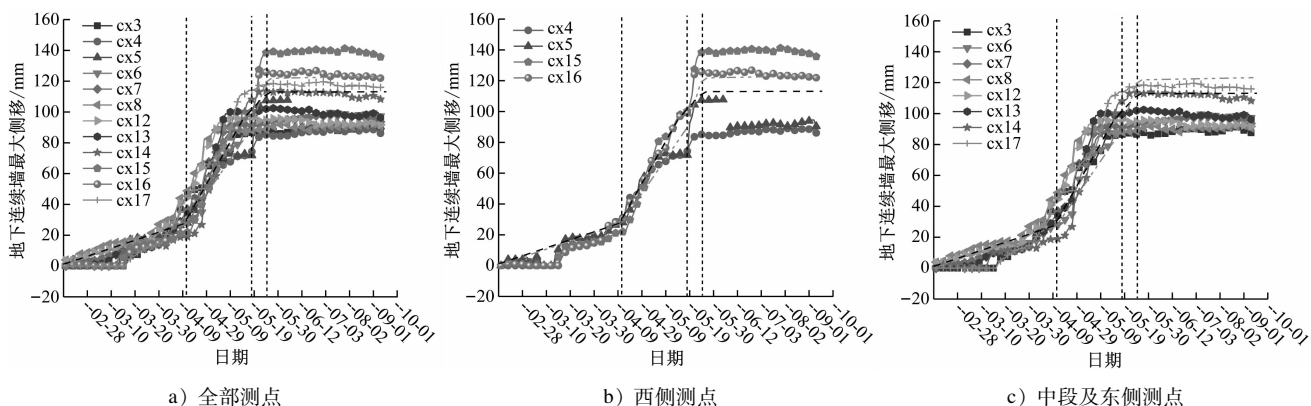


图3 地连墙最大侧移随时间变化曲线图

Fig. 3 Curve diagram of underground diaphragm wall maximum lateral displacement changing over time

是周边环境无较大的额外荷载;二是多数测点靠近端头井,所受到的空间效应并不明显,有着较好的变形控制能力。

2.2 坑外地面沉降

基坑外周边最终地面沉降云图如图 4 所示。图中灰色区域由于存在地上建筑物而无法布置地面沉降测点。受西北侧建筑物群和西南侧遗留桩基础影响,基坑外地面沉降表现为“北大南小,西大东小”的变形分布规律。在建筑物群的影响下,西北侧地面最大沉降值为 198.99 mm,同时西北侧地面沉降普遍大于 87.00 mm,而同侧对称位置的地面沉降大多小于 87.00 mm;西侧 D16 和 D17 测点最大地面沉降为 179.87 mm 和 130.01 mm;东侧 D12 和 D13 测点最大地面沉降为 107.91 mm 和 120.47 mm。两组对称测点中,西侧的最大地面沉降比东侧分别大了 49.31% 和 16.99%。

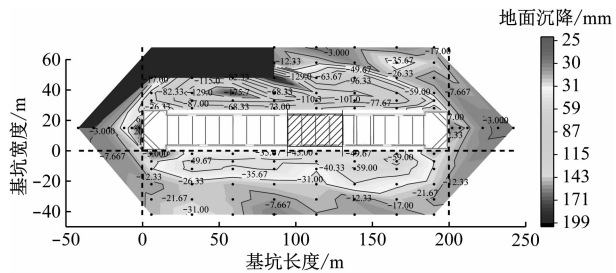
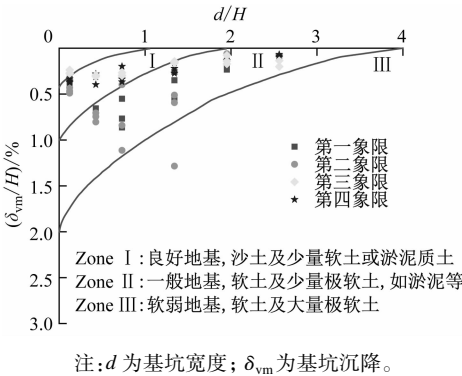


图 4 坑外土体地面沉降云图

Fig.4 Land subsidence nephogram of soil outside the pit

以基坑中心为原点,将基坑墙后沉降测点划分为 4 个象限区域:右上角的第一象限存在一个不利环境因素(坑外施工荷载);左上角第二象限存在两个不利环境因素(坑外施工荷载及 3H 范围内存在房屋荷载);左下角第三象限存在一个有利环境因素(遗留建筑物桩基础);右下角第四象限无额外环境因素影响。各象限地面沉降散点如图 5 所示。根据该工程地质报告,该工程地质介于 Zone I 与 Zone II 之间。第四象限和第三象限的数据主要分布在 Zone I 和 Zone II;第一象限由于工程施工荷载的影响,变形大于第四象限,主要分布于 Zone II;第二象限的地面沉降远大于其他象限,部分测点已到达了 Zone III 的范围。从该工程不同区域的变形对比来看,基坑环境因素对于地面沉降的影响较为明显,因此应尽可能避免多种不良因素共同叠加作用于某一区域。



注: d 为基坑宽度; δ_{vm} 为基坑沉降。

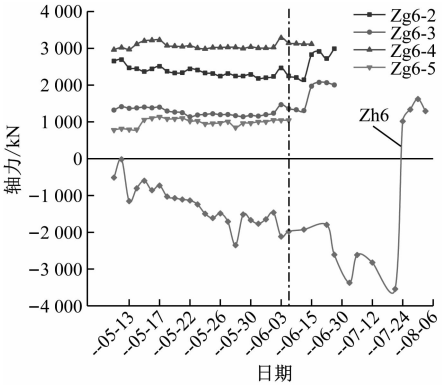
图 5 地面沉降散点图

Fig.5 Scatter plot of land subsidence

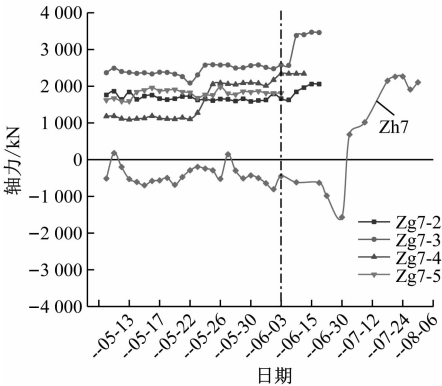
3 取消换撑可行性分析

3.1 内支撑轴力波动

图 6 为基坑内支撑轴力随日期的波动曲线图。Zg 代表钢支撑轴力,Zh 代表混凝土支撑轴力,后缀数字代表其为第几道支撑。图 6 a) 和图 6 b) 分别为 Zg6 和 Zg7 测点第一道混凝土支撑轴力和第 2 ~ 5 道钢支撑轴力随时间的变化情况。如图 6 a) 所示,



a) Zh6 与 Zg6-2 ~ 5



b) Zh7 与 Zg7-2 ~ 5

图 6 内支撑轴力变化图

Fig.6 Change diagram of internal support axial force

在换撑区域的第五道钢支撑拆除之后,第三道和第四道支撑分担了第五道支撑的轴力,随后出现了约 500 kN 的增长,但整体依旧未超过钢支撑原设计标准值。在基坑下部钢支撑均拆除完毕后,第一道混凝土支撑从受拉转变为受压。这是由于坑内结构逐渐完成,整体性进一步提升,受力分布形式也从“底部集中受力”转变为“整体受压”,且最终轴力也未超过混凝土支撑设计标准值。如图 6 b) 所示,与之相邻的 Zg7 测点为无换撑区域,整体轴力变化趋势与有换撑的 Zg6 一致,均表现为:上部钢支撑在第五道钢支撑拆除后出现约 500 kN 的增长,混凝土支撑在所有钢支撑拆除后从受拉转变为受压。由此可见,对于该工程而言,取消换撑不会对内部支撑产生明显的不良影响,内支撑轴力也无明显变化。

3.2 地连墙侧斜增量

基坑各测点自底板浇筑完成后至基坑内部结构完成时地下连续墙测斜增量结果如图 7 所示。图中地下连续墙测斜增量正值代表向基坑内侧移,负值代表向基坑外侧移。增量整体变形呈现“弯刀状”:以基坑底板为分界点,上部由于内部结构回筑过程中一步步拆除基坑内支撑,使得地下连续墙进一步向坑内变形,由于底板的整体刚度更大,变形曲线呈现出上端偏大的偏态分布曲线;下部由于底板能很好地限制坑底隆起变形,故下部地下连续墙测斜表现为整体平移。

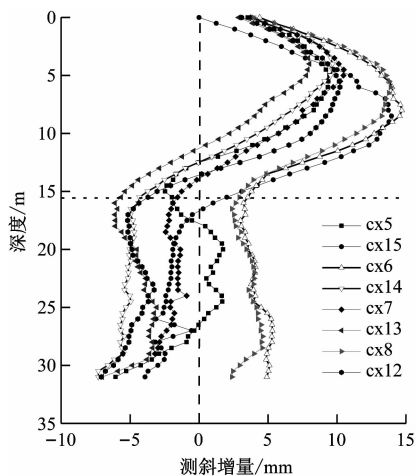


图 7 地下连续墙测斜增量图

Fig. 7 Increment diagram of underground diaphragm wall inclination

基坑上部的测斜增量如图 8 所示。考虑到换撑主要是为基坑底部提供刚性支撑,减小在拆撑过程中底部测斜增大量,能更好地反映换撑在该工程所

起到的作用,因此以底板深度 16 m 处的测斜增量为基准点。从图中可知,采用换撑的 cx6 和 cx14 测点的变形曲线处于其他未采取换撑措施的变形曲线之内,未表现出明显的位移约束作用。参考图 3 可以发现,该基坑在基坑开挖完毕与底板浇筑期间,该深度的土体应力释放变形几乎全部完成,且由于底板的存在,换撑对于底部变形的约束效果并不明显。但在实际工程中,挖土阶段的应力释放程度是需要根据实际工程地质、施工工况及监测数值,结合变形计算或有限元模拟等初期计算结果综合判断的。在本工程最后开挖过程中,由于存在施工荷载及房屋荷载,cx5/15 和 cx4/16 截面最大测斜增量值较大。因此对于复杂环境因素或存在较多不利因素的截面应该保留换撑手段,以防后续产生可能存在的测斜量激增。

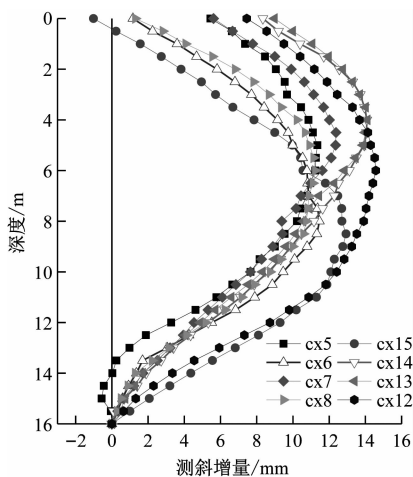


图 8 地下连续墙上部测斜增量图

Fig. 8 Increment diagram of underground diaphragm wall inclination at the top part

4 结语

本文依托宁波地铁 5 号线钟公庙站工程,结合周边环境因素,对基坑变形实测数据进行分析,总结有换撑区段与无换撑区段的变形差异,探讨地铁车站基坑工程取消换撑的条件,结论如下:

1) 在该工程中,基坑底板施工完毕后,抗压能力较好的混凝土底板足以起到底部支撑的作用,此时换撑对于基坑变形的影响不大。

2) 取消换撑区段的轴力相较于有换撑区段无明显波动,取消换撑不会对内部支撑产生明显的不良影响,轴力的变化规律也并无明显变化。有换撑区段的后期变形曲线位于其他未采取换撑措施的

变形曲线之内,未表现出明显的上部测斜约束作用。

3) 在基坑开挖完毕至底板浇筑期间,该深度的土体应力释放变形几乎全部完成,因此后续换撑手段的工程效益并不明显,反而会延长施工工期。

由于不同的环境因素会导致基坑地下连续墙和地面沉降呈现出不同的变形规律及幅度,且多个不利因素会相互叠加作用于基坑变形,会使得某区域的基坑变形过大。因此,在实际工程中,应对此类区域采取针对性的预防加固措施,合理设计施工方案,避免该区域承受的荷载集中;需要根据实际工程地质、施工工况及监测数值,结合变形计算或有限元模拟等初期计算结果综合判断深层土体应力释放变形是否充分,从而决定是否取消换撑;同时对于复杂环境因素或存在较多不利因素的截面应该保留换撑,以防后续产生可能存在的测斜量激增。

参考文献

- [1] 周以大,薛启秀.大型深基坑减少水平支撑的几项技术措施——28层的由由大厦基坑围护工程实践[J].建筑施工,1994(4):5.
- ZHOU Yida, XUE Qixiu. Technical measures taken for the reduction in number of horizontal braces of large-size foundation pit—experience with pit enclosure of 28-storeyed Youyou Tower[J]. Building Construction, 1994(4):5.

(上接第83页)

- [3] MURPHEY Y L, MILTON R, KILIARIS L. Driver's style classification using jerk analysis[C]//2009 IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems. Nashville, TN, IEEE, 2009:23.
- [4] MESEGUER J E, CALAFATE C T, CANO J C, et al. Characterizing the driving style behavior using artificial intelligence techniques[C]//38th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2013). Sydney: IEEE, 2011:2.
- [5] GUARDIOLA C, PLA B, BLANCO-RODRÍGUEZ D, et al. Modelling driving behaviour and its impact on the energy management problem in hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2014, 91(1):147.
- [6] 胡斌,杨中平,林飞,等.城市轨道交通用超级电容器组等效

- [2] 李向荣,历朋林.地铁站深基坑换撑施工优化探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):47.
- LI Xiangrong, LI Penglin. Discussion on optimization of support replacement construction for deep excavation in subway station construction[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(12):47.
- [3] 宋诗文.北京地铁深基坑支护结构设计优化与施工[J].隧道建设,2017,37(增刊1):91.
- SONG Shiwen. Design optimization and construction of support structure of deep foundation pit of Beijing Metro[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S1):91-98.
- [4] 张向东,范世兴,张晨光,等.周边建筑对深基坑支护结构的影响分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):76.
- ZHANG Xiangdong, FAN Shixing, ZHANG Chenguang, et al. Effect of surrounding buildings on supporting structure of deep foundation pit[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(1):76.
- [5] 刘军.基坑周边施工荷载作用效应分析与辅助措施[J].岩土工程技术,2017,31(6):317.
- LIU Jun. Effect analysis and auxiliary measures on the construction load around the foundation pit[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017, 31(6):317.
- [6] 龚晓南,高有潮.深基坑工程施工设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- GONG Xiaonan, GAO Youchao. Deep foundation pit engineering construction design manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.

(收稿日期:2021-06-29)

电路模型研究[J].机车电传动,2013(5):65.

- HU Bin, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Equivalent circuit model of super capacitor group for urban rail transit application[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(5):65.
- [7] WON J S, LANGARI R. Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver: IEEE, 2003:2560.
- [8] 陈维荣,刘禹贝,戴朝华,等.有轨电车典型行驶工况的构建[J].西南交通大学学报,2020,55(6):1141.
- CHEN Weirong, LIU Yubei, DAI Chaohua, et al. Construction of typical driving cycle for tram[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020,55(6):1141.

(收稿日期:2020-12-12)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn