

半幅铺盖法施工的地铁车站基坑中铺盖体系的稳定性研究^{*}

李华磊¹ 王碧云²

(1. 新乡职业技术学院建筑工程系, 453006, 新乡; 2. 陕西建工第五建设集团有限公司, 710086, 西安//第一作者, 讲师)

摘 要 半幅铺盖法修建地铁车站时, 基坑的围护结构除受土的卸荷作用外, 铺盖上方还要承受车辆的自重荷载, 因此研究围护结构的变形和内力变化规律对确保地铁建设中基坑的稳定是十分必要的。以某地铁车站为研究案例, 通过数值模拟和施工现场监测相结合的方法研究基坑在开挖过程中围护结构的变形规律, 得到如下结论: ①数值模拟显示中间桩桩顶水平位移最大值是 6.54 mm, 最大沉降值是 5.8 mm; ②基坑周边的沉降由近及远呈“倒锅型”, 基坑开挖至 13 m 和 19 m 处基坑周边地表的沉降变化最为明显, 距离地下连续墙 4.6 m 处地表沉降达到最大值 8.914 mm。现场监测数据验证了数值模拟结果的正确性, 并且根据工程地质、监测数据和周边环境分析了影响基坑稳定性的因素。

关键词 地铁; 车站基坑; 铺盖体系; 半幅铺盖法; 数值模拟; 现场监测

中图分类号 TU433; U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.025

Stability of the Pavement System in Metro Station Foundation Pit Construction by Semi-pavement Method

LI Hualei, WANG Biyun

Abstract The foundation pit enclosure is not only subjected to the unloading effect of soil, but also to the self-weight load of vehicles in metro station construction by semi-pavement method. Therefore, it is necessary to study the deformation and internal force variation of the pit support structure during metro construction to ensure the stability of the foundation pit. Taking a metro station as the case study, the deformation law of the retaining structure during the foundation pit excavation is studied through numerical simulation and construction site monitoring. The conclusions are as follows: 1) the numerical simulation shows that the maximum horizontal displacement of the middle pile top is 6.54 mm and the maximum settlement value is 5.8 mm; 2) the settlement around the foundation pit

presents an “inverted pot” type from near to far, the settlement changes are most obvious when the foundation pit is excavated from 13 m to 19 m, and the ground settlement will reach the maximum value of 8.914 mm at 4.6 m away from the underground continuous wall. The field monitoring data have verified the correctness of the numerical simulation results, and factors affecting the foundation pit stability are analyzed according to the engineering geology, monitoring data and the surrounding environment.

Key words metro; station foundation pit; pavement system; semi-pavement method; numerical simulation; field monitoring

First-author's address Department of Architectural Engineering, Xinxiang Vocational and Technical College, 453006, Xinxiang, China

半幅铺盖法修建地铁不同于全盖挖法和明挖法, 其铺盖体系受力较为复杂, 铺盖系统面积大。围护结构中铺盖的承载力是本车站不同于一般明挖地铁车站最显著的特点, 铺盖体系的稳定是保证基坑、周边行人以及车辆安全的关键因素^[1-2]。图 1 所示铺盖体系是围护结构的一半, 由中间临时立柱桩、边墙和路面铺盖组成。中间临时立柱桩的周围土体约束解除后, 成为自由高度大和承受荷载的立柱, 较易失稳, 因此中间临时立柱桩是监测和分析的重点。基坑变形研究方法包括现场施工监测数据分析、简单的理论计算以及数值模拟方法。文献[3-5]通过现场监测数据分析了基坑围护结构的稳定性, 现场监测可以真实地反映基坑的变形, 随时了解基坑的变形情况, 但现场监测只能得到监测的最终结果, 无法提前预测基坑的变形情况以及存在的隐患。文献[6-8]采用数值模拟方法分析基坑的稳定性, 数值计算结果可以直观地反应基坑整体变形情况, 还可以预先发现变形较大的部位以及各个因素对于基坑变形的影响, 但模型的建立

^{*} 国家自然科学基金(51804339); 中国矿业大学“双一流”未来科学家计划项目(2019WLKXJ076)

和计算参数的选取比较困难,往往很难和现场数据一致^[9-10]。铺盖体系受力较为复杂^[11],很难通过数学解析方法对其进行稳定性分析。本文以西安地铁 4 号线某车站为工程背景,通过 Flac3D 有限元数值模拟和施工现场监测对铺盖体系的六四式军用梁的应力和挠度、中间临时立柱桩的顶端水平位移和沉降以及基坑周边土体的沉降进行了分析。

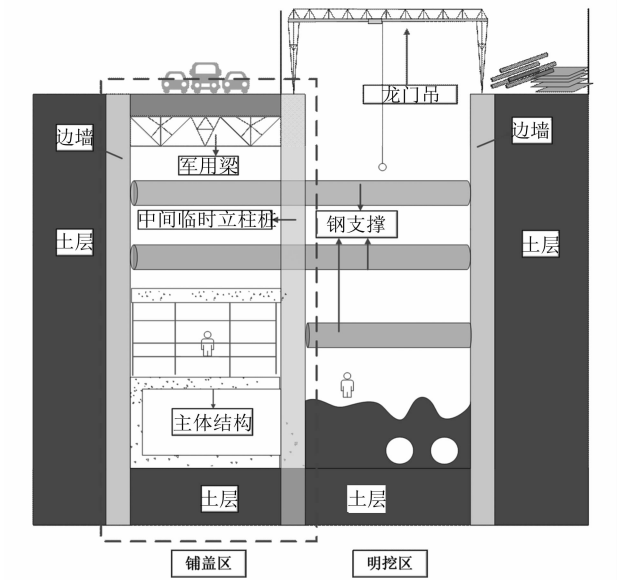


图 1 半幅铺盖法施工的地铁车站基坑剖面示意图

1 工程概况

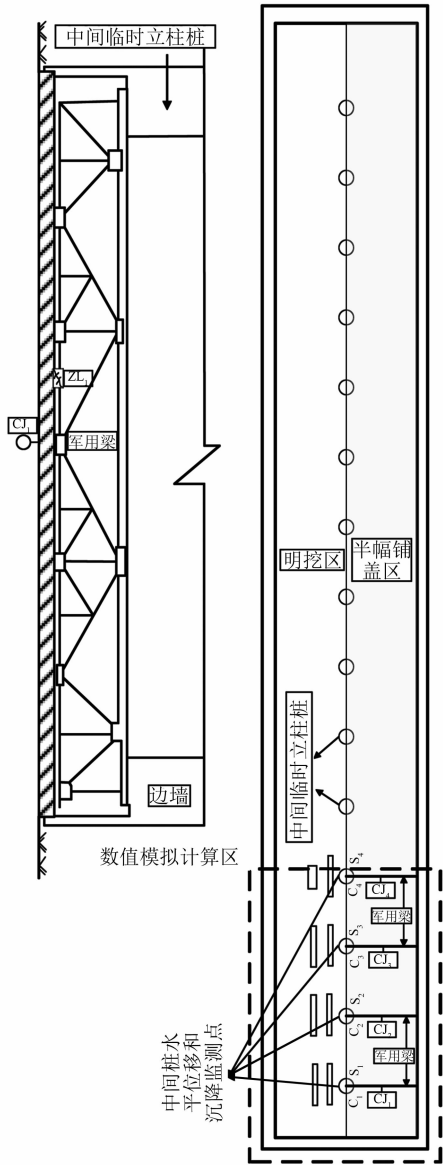
该车站周边建筑物繁多,施工环境十分复杂。车流量非常大,交通不允许被阻断,车站采用半幅铺盖顺筑法修建。半幅铺盖法施工与全盖挖法和明挖法相比,车站周边环境更为复杂,施工场地一般都非常狭小,人员安全问题更为严峻。如图 1 所示的基坑边墙、中间临时立柱桩及其支撑的铺盖体系承受较大的风险。车站主体围护结构为宽 1.0 m 的地下连续墙,基坑中部为桩径为 1.2 m 的临时立柱。基坑内部设计 4 道水平支撑,第 1 道为 600 mm×800 mm 混凝土支撑以及在基坑两端的 4 个角设置斜撑;第 2~4 道为 ϕ 609 mm、壁厚为 14 mm 的钢管支撑,水平间距为 3 m。临时路面主要由六四式加强型军用梁、厚 200 mm 的承重预制盖板和其最上面的沥青混凝土路面构成。综上所述,基坑的情况比较复杂,因此对于围护结构的稳定性研究是十分必要的。

2 铺盖体系变形现场监测

2.1 监测方案

施工现场实时监测铺盖体系的变形和内力,分析

监测数据,能够及时发现安全隐患并采取治理措施,防止更大灾害的出现。半幅铺盖体系的监测内容包括六四式军用梁的轴力、军用梁的挠度以及中间临时立柱的桩顶水平位移和沉降。监测点的布置如图 2 所示。



注: C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 表示军用梁挠度的测点;
 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 表示桩顶水平位移的测点;
 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 表示桩顶竖直沉降的测点

图 2 半幅铺盖六四军用梁测点和临时中间立柱桩测点布置

2.2 监测结果与影响因素分析

图 3 展示了中间临时立柱桩的累计水平位移变化规律。桩顶的水平位移是影响铺盖体系稳定性的关键因素,较大的水平位移会导致基坑直接失稳。从图 4 可以看出,基坑开挖初期,基坑土体的卸载以及基坑两侧地下水施加的水压作用导致桩顶水平

位移逐渐增大;基坑开挖后及时实施第1道混凝土支撑和第1道钢管支撑,所以桩顶水平位移未出现突然增大的情况;在基坑开挖至11~13 m时,桩顶水平位移开始快速增长,一方面是因为天气的原因,此时正处于雨季,基坑周围的地下水位突然性的增高而基坑的降水设备能力不足,导致侧向水压力的增加以及基坑周边土体强度降低致使桩顶水平位移增长速率变大,且位移增加较明显。图4展示的是由于暴雨天气和排水应急能力不够导致现场基坑积水的情况,监测数据亦显示此时桩顶的水平位移明显增加。由于车站主体的修建使用横向分成多段、竖向分多层的建造方法,因此当开挖至19 m左右时,车站主体结构施工逐渐完成,桩顶水平位移累计值逐渐收敛。这4个监测点处 S_4 的位移值为6.2 mm,是4个监测点中的最大值,即此处的沉降值最大,施工人员应着重监测。

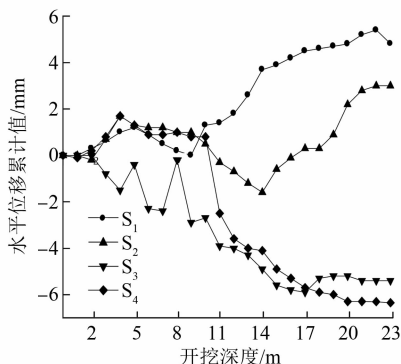


图3 中间临时立柱桩桩顶水平位移累计值曲线



图4 现场排水能力不足导致的基坑积水

车站处的道路是城市主干道,交通拥挤且车流量较大,由于车辆产生的重复动荷载以及军用梁自身弹性的相互作用,因此为保证基坑铺盖体系的安全性,对军用梁挠度进行实时监测和分析是十分必要的。图5展示了六四式军用梁挠度累计值曲线。

由图5可知,曲线整体呈现逐渐增加的趋势,在基坑深度大于11 m后,挠度增加较快;基坑完成开挖后,挠度趋于收敛不再增加,挠度累计值最大为8.2 mm,小于报警值36 mm。上述数据表明基坑的深度是影响军用梁挠度的主要因素。

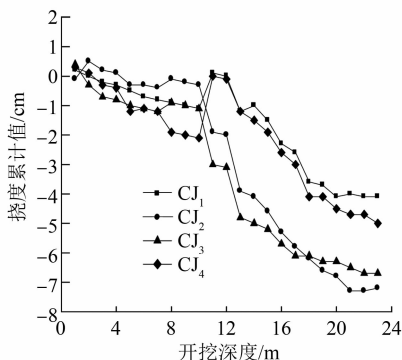


图5 六四式军用梁跨中挠度累计值曲线

图6显示的是基坑中间临时立柱桩的沉降累计值。由图6可知,基坑未开挖时,桩体因承受上部结构的车辆荷载以及铺盖体系自重,初期会有一定的沉降值;基坑深度不大时,由于土层中多为黄土、黏土和砂土,土与桩体相接触时,会对桩体产生较大的摩擦力,产生的沉降很小;随着基坑的开挖,表面的土体与中间临时立柱桩脱离导致土与桩之间的接触面积减小,土对桩的摩阻力随基坑的开挖减小,特别是基坑深度达到10 m以后,立柱桩沉降值的增加明显加快;当基坑开挖完成后,沉降值趋于稳定, C_4 监测点的桩顶沉降值达到最大值6.3 mm。

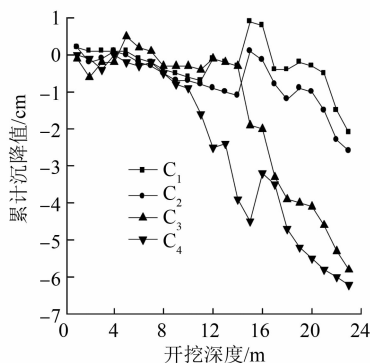


图6 中间临时立柱桩的沉降累计值曲线

3 基坑变形数值模拟方法

3.1 基坑开挖数值模拟

取基坑东段一部分进行数值模拟研究,运用Flac3D软件建立数值模拟计算模型,如图7所示。模型包含的部分和采用的单元类型如下:地下连续

墙、冠梁以及第 1 道混凝土支撑采用 beam 单元,第 2、3、4 道钢管支撑采用 beam 单元。军用梁采用杆单元来简化模拟,其余土层采用六面体单元。各土层、混凝土支撑(包括斜撑)、边墙以及中间临时立柱桩等模块采用 Mohr-Coulomb 模型进行数值计算,军用梁和钢管支撑模块采用线弹性本构模型进行数值计算。数值模拟计算所需要的各层土体和支撑的物理力学参数如表 1 所示。

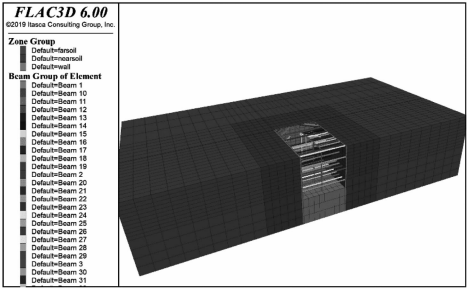


图 7 车站基坑数值计算模型

材料	厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	弹性 模量/MPa	泊松 比
新黄土(水上)	2.0	18.0			7.8	0.32
新黄土(水下)	2.0	18.6	33	24.0	8.2	0.33
饱和软黄土	1.0	17.6	22	20.0	4.5	0.38
古土壤	2.5	20.0	38	25.0	7.7	0.31
粉质黏土	9.0	20.4	41	25.6	8.6	0.30
混凝土		25.0			2 000	0.18
军用梁		78.5			2.06×10 ¹⁰	0.32
钢管支撑		76.9			2.05×10 ¹⁰	0.35

根据车站基坑的开挖方案,车站分 6 个步骤模拟基坑开挖过程。

步骤 1:根据基坑的设计建立基坑模型以及中间临时立柱桩,设置横向支撑、半铺盖军用梁,并进行初始数值计算,然后将相应位移清零。

步骤 2:基坑开挖至 7 m,然后设置第 1 道钢支撑。

步骤 3:基坑开挖至 13 m,然后设置第 2 道钢支撑。

步骤 4:基坑开挖至 19 m,然后设置第 3 道钢支撑。

步骤 5:基坑开挖至 23 m。

3.2 数值模拟结果

基坑和围护结构的变形是影响基坑稳定性的关键因素。按照上述数值模拟方法对基坑开挖过程中围护结构的水平变形和竖向变形计算结果进行分析。各开挖步骤下的计算结果如图 8 所示。

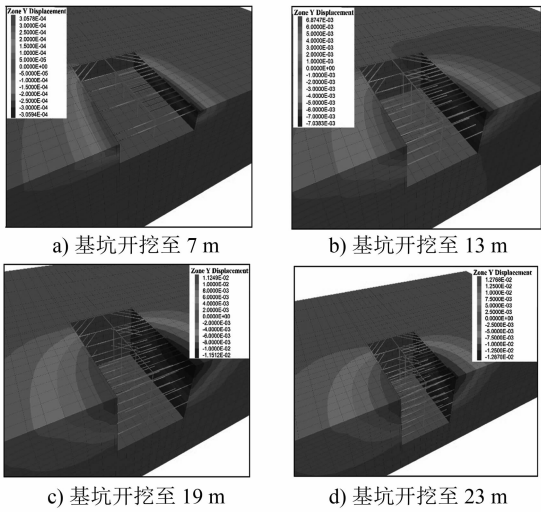


图 8 基坑在开挖过程中的水平位移变化云图

从图 8 可以看出,基坑的端部变形最小,沿基坑长度方向逐渐增大;基坑中部地表的变形最大,位移方向朝向基坑内部;各点的位移均随着基坑的开挖深度增加而增大,基坑开挖至 13 m 和 19 m 处基坑土层以及围护结构的变形比较明显,说明此时土体的卸荷作用比较大,也是影响基坑稳定性的关键时期。随着基坑深度的增加,地下连续墙的位移最大值由 0.3 mm 增加至 13.1 mm。此外靠近基坑中部的横向混凝土支撑和钢支撑的横向变形同样比其他部位的变形值大,且横向支撑中部的变形最小,两端的变形最大,最大值为 13.1 mm,方向朝向基坑内部。支撑半铺盖体系的中间临时立柱桩的水平位移向明挖一侧逐渐变化,水平位移逐渐增加,这是由于铺盖体系的军用梁施加了汽车荷载的作用。

图 9 显示了基坑开挖过程中基坑土层以及围护结构竖向位移的变化规律。由图 9 可知,基坑周边的沉降由近及远呈“倒锅型”,基坑中部的土体沉降相对于基坑端部的沉降要大。基坑开挖至 13 m 和 19 m 处周边地表的沉降变化比较明显,距离地下连续墙 4.6 m 处地表沉降达到最大值 8.914 mm。基坑开挖引起的地表沉降影响范围是距离地下地下连续墙 20 m 范围内,因此需要对基坑周边的 20 m 范围内的建筑物进行严密的变形监测,防止基坑开挖致使建筑物变形过大。基坑底部的隆起值在开挖至 23 m 处达到最大值 5.156 mm。中间临时立柱桩由于承受铺盖体系自重、其上部荷载和土的卸荷作用,因此具有一定的沉降值,C₄ 处的沉降值为 8.7 mm,是沉降值最大测点。

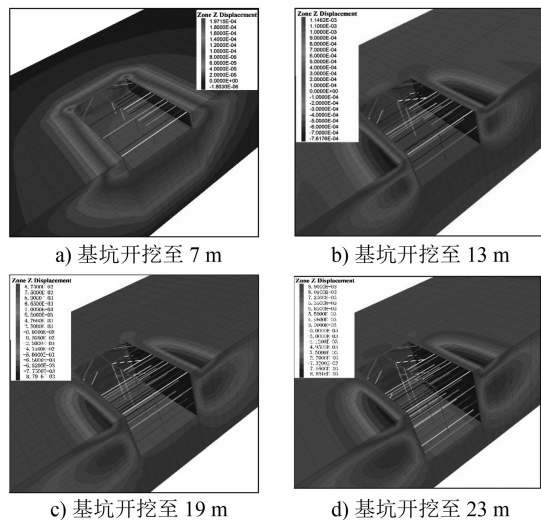


图9 基坑在开挖过程中的竖向位移变化云图

3.3 数值模拟结果与现场监测结果对比分析

通过对比分析现场监测数据和数值模拟,可以验证数值模拟方法的实用性,也可以改善数值模拟方法。

图 10 显示了中间临时立柱桩测点 C_3 和 C_4 的水平位移及沉降的现场监测值和数值模拟计算值的变化规律。由于模拟施工过程中,忽略基坑周边堆放的建筑垃圾和材料(见图 1),因此出现中间临时立柱桩顶水平位移模拟值大于实测值的情况。 S_4 处的数值计算最大值是 6.54 mm,监测数据最大值是 5.21 mm,都小于报警值 19 mm。 S_3 处的数值计算最大值是 4.6 mm,监测数据最大值是 3.6 mm,均在基坑安全的预警值范围内。这表明测点处的中间临时立柱桩处于安全状态。对比曲线的变化规律可以看出,数值模拟计算结果与现场监测结果虽有一些差距,但整体上变化具有吻合性,说明本文提出的数值模拟方法能够反映基坑开挖过程中基坑及支护结构的变化规律,亦可以作为基坑开挖过

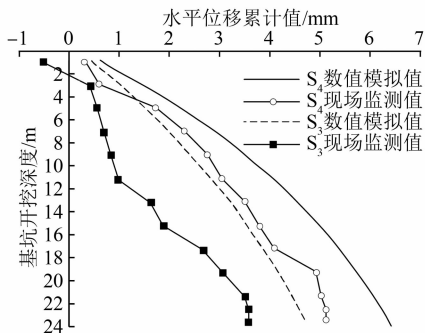


图 10 中间临时立柱桩桩顶水平位移累计现场监测值和数值模拟值

程中基坑稳定性评价的指标。导致结果出现差异性的原因包括地质的不均性、土体和支护结构参数的选取以及模型的简化等。

图 11 中显示了基坑开挖过程中,中间临时立柱桩的沉降监测值与数值计算值的演化规律。由图 12 可知,桩顶的沉降计算值与监测值变化趋势具有一定的相似性,其计算值在基坑开挖深度都大于实测值,这是由于数值模拟计算对半铺盖体系上方行驶的车辆以及行人产生的动载和施工现场周边环境的复杂性欠考虑,数值计算时可将这些荷载折算为静荷载。中间临时立柱桩的数值计算沉降值最大为 5.8 mm,小于报警值 10 mm。另外基坑开挖的数值计算显示军用梁、地下地下连续墙以及中间临时立柱桩的变形值在安全预警范围内。图 12 显示军用梁挠度值最初变化较慢;随着基坑深度的增加,挠度逐渐增加,在基坑开挖至 14~16 m 后,挠度值逐渐收敛; C_4 处数值计算最大挠度值是 5.74 mm,监测值为 4.35 mm; C_3 数值计算最大挠度值是 4.12 mm,监测值为 3.4 mm。整体而言,无论数值模拟计算值还是现场监测值均在安全预警范围内。

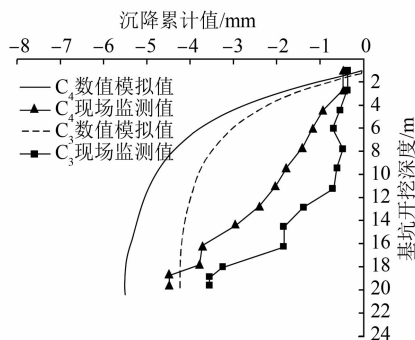


图 11 中间临时立柱桩沉降累计现场监测值和数值模拟值对比曲线

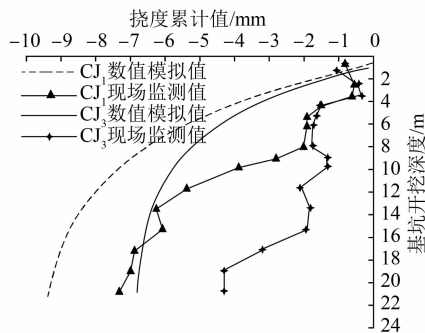


图 12 军用梁挠度累计现场监测值和数值模拟值对比曲线

4 结论

本文以西安某地铁车站为研究案例,通过数值模拟和施工现场监测两种方法研究半铺盖法施工的地铁车站基坑及其围护结构在开挖过程中的变形规律,得出如下结论:

1) 围护结构的现场监测是判断铺盖体系是否处于稳定状态的有效方法。监测数据显示中间临时立柱桩的桩顶水平位移最大值为 6.2 mm,最大沉降值为 6.3 mm,数据表明该车站基坑开挖中,铺盖体系各个部位的变形都在预警范围内,说明基坑一直处于安全稳定状态。结合具体的施工环境,狭小的施工空间和恶劣的暴雨天气对于基坑的变形影响比较大。

2) 数值模拟显示,在基坑开挖中地下地下连续墙的位移最大值随着基坑深度由 0.31 mm 增加至 13.1 mm;基坑周边土体的沉降曲线由近及远呈“倒锅型”,基坑开挖至 13 m 和 19 m 处基坑周边地表的沉降变化比较明显,距离地下连续墙 4.6 m 处地表沉降达到最大值 8.914 mm;基坑底部隆起值在开挖至 23 m 处达到最大值 5.156 mm。数值模拟可以分析在基坑不同开挖深度铺盖体系的变形以及基坑各个部位的稳定性,对于查找基坑的安全隐患很有效。

通过数值模拟计算结果与现场监测数据对比分析,数值计算值与现场监测值的变化曲线整体上

(上接第 98 页)

台的能耗计算值与实测值间的差值在 15% 以内,在目前地铁车辆空调系统全年能耗难以测试和计算的情况下,该计算平台的建立将对地铁车辆空调系统全年能耗的预估有一定的指导意义。

该计算平台只适用于重庆地铁 6 号线所用的空调系统,当空调系统参数发生改变时,该计算平台便不再适用。因此对于一个新的空调系统,只能重新搭建计算平台,实际上这个过程也保证了计算平台的精度。搭建一个能够针对所有地铁车型、所有空调机组的列车空调系统能耗预测平台,是今后的努力方向。

参考文献

- [1] 王彦鲁,刘忠庆,张笑慰,等. 数值计算地铁车辆空调系统全年能耗[J]. 铁道车辆, 2019(5): 1.
- [2] CENELEC. 铁路应用-城市和市郊轨道车辆空调-第 1 部分:舒适

较为吻合,模型建立的困难与地质的不均性是导致结果出现差异性的主要原因。本文的研究方法和结论可为地铁基坑施工和设计提供参考。

参考文献

- [1] 李化. 地铁车站明盖挖结合施工基坑稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [2] 罗耀武,凌道盛. 环形超深基坑围护结构受力变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011(2): 617.
- [3] 负永峰,吴禄源,袁超,等. 西安地铁四号线五路口站深基坑围护结构施工技术[J]. 铁道建筑, 2015(5): 78.
- [4] 刘俊伟,汤洪霞,皮景坤,等. 某地铁车站深基坑施工监测分析[J]. 工业建筑, 2014(8): 121.
- [5] 宋顺龙,章晓鹏,李文波. 新型盖挖法在上海地铁车站的应用[J]. 都市快轨交通, 2009(6): 71.
- [6] 赵伯霖. 基于 FLAC3D 地铁车站深基坑变形规律研究[D]. 石家庄:河北工程大学, 2011.
- [7] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [8] 成峰,张远芳,那姝姝,等. 北京地区深基坑变形特性研究[J]. 工业建筑, 2012(增刊 1): 361.
- [9] 刘长宝,邹金杰,彭加强. 既有地铁隧道上方明挖基坑施工方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(6): 133.
- [10] 李化. 地铁车站明盖挖结合施工基坑稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [11] 郭洋洋,有智慧,王正振,等. 明挖与盖挖结合法对地铁车站基坑支护结构变形影响研究[J]. 施工技术, 2019(13): 94.

(收稿日期:2019-10-06)

度参数:EN 14750-1:2006[S]. Brussels:CENELEC, 2006.

- [3] CENELEC. 铁路应用-城市和市郊轨道车辆空调-第 2 部分:型式试验:EN 14750-2:2006[S]. Brussels:CENELEC, 2006.
- [4] 中华人民共和国铁道部. 铁路空调客车热工计算方法:TB/T 1957-91[S]. 北京:中国铁道出版社, 1992.
- [5] 陆强,杨美传,蒲思培. 列车空调制冷系统的仿真与分析[J]. 制冷与空调, 2011(5): 471.
- [6] 梁兆惠. 空调制冷系统性能模拟与能效标准的研究[D]. 天津:天津大学, 2003.
- [7] 吴业正,朱瑞琪,曹小林,等. 制冷原理及设备[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2010.
- [8] 穆广友,臧建彬. 地铁车辆空调系统设计要点分析[J]. 城市轨道交通研究, 2008(11): 29.
- [9] CHRISTIAN D, WALTER S, MARTIN K. A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 616.

(收稿日期:2018-12-28)