

# 温度对地铁深基坑支护结构的影响分析

李 兵,曲晶彤,葛思远

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究地铁深基坑工程中支护结构受温度的影响规律,分析造成影响的各种因素,为类似地铁深基坑工程支护结构的保护提供指导。方法 以有限元分析软件 ABAQUS 为基础,结合沈阳地铁十号线北大营站地铁工程,建立有限元模型,将分析数据与实测数据对比,以此验证有限元模型,并通过模型分析确定温度对基坑支护结构的影响因素。结果 温度对支撑轴力的影响较大,支撑轴力随着温度升高而增大,反之减小;温度变化会使钢支撑产生热胀冷缩,导致围护结构水平位移的增加,对基坑整体和基坑周围环境造成不利影响。结论 温度变化会使钢支撑产生热胀冷缩,地连墙发生朝向基坑内方向的移动趋势,通过改变钢支撑和围护结构的力学性质减小温度对支护结构的影响,提高施工的安全性。

**关键词** 温度作用;支护结构;深基坑工程;应对措施

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Effect of Temperature on Supporting Structure of Metro Deep Foundation Pit

LI Bing, QU Jingtong, GE Siyuan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The influence of temperature on the supporting structure of subway deep foundation pit and its various factors that cause the influence are analyzed, so as to provide reliable guidance for the protection of supporting structure in similar subway deep foundation pit engineering. Based on the finite element analysis software ABAQUS, taken the subway project of Beidaying station of Shenyang Metro Line 10 as research object, the finite element model is established. The model is verified by simulation data and the measured data. The influence factors of temperature on supporting structure of the foundation pit are determined through the model simulation. The results show that the temperature has a great influence on the support axial force, and the force increases with the increase of temperature and decreases on the contrary; the change of temperature will cause thermal expansion and cold contraction of the steel support, resulting in the increase of

收稿日期:2020-08-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51738007);辽宁省重点研发计划项目(2019JH8/10100099);沈阳市科学技术计划项目(201764)

作者简介:李兵(1974—),男,教授,博士,主要从事地下结构方面研究。

horizontal displacement of the retaining structure, which has adverse effects on the whole foundation pit and the surrounding environment of the foundation pit. And meantime the diaphragm wall will move toward the direction of foundation pit. By changing the mechanical properties of steel support and retaining structure, the influence of temperature on the supporting structure can be reduced, and to improve the safety of construction.

**Key words:** temperature action; supporting structure; deep foundation pit engineering; counter measures

21 世纪中国各城市地铁的覆盖率已成为衡量城市幸福指数,评价人民生活质量的主要指标<sup>[1-2]</sup>。在实际工程中,地铁深基坑工程比较复杂,针对温度变化对结构造成的影响展开研究并取得不凡的研究成果<sup>[3-5]</sup>。N. Massoudi<sup>[6]</sup> 总结分析了美国某大厦的经典改造工程连续 14 个月的基坑工程监测数据,发现并指出温度场变化过程对于深基坑支护结构产生的影响,其锚杆变形和受力与温度均存在一定关系,温度升高,轴力减小,反之成立。陆培毅等<sup>[7]</sup> 根据实际基坑开挖支护结构工程,利用修正剑桥弹塑性模型,对于温度应力在开挖过程中产生温度效应,得到环境温度变化比较大时,需要将其作为工况考虑。甘朝锋<sup>[8]</sup> 通过对我国南方某地温差达到 20℃ 进行施工监测,对监测结果结合温度变化研究,得出温度应力对支撑轴力和结构变形的影响变化规律。王莹<sup>[9]</sup> 以天津某深基坑在建工程为例,根据现场监测数据对比分析,只在温度作用下的内支撑体系变化情况,进一步证明了温度效应对于内支撑体系变形产生影响。基坑工程属于大型的临时性工程,在设计计算阶段把一些对基坑围护和支撑体系影响比较小的非永久荷载往往忽略不计或者简要计算,但是由于我国城市基础设施建设的不断推进,基坑设计和适用范围不断扩大,加之周边的环境复杂,通过一些工程上的检测数据和分析研究,部分基坑意外(高温)事故发生后往往是不可控制的<sup>[10-12]</sup>。支护结构大部分都是采用一些受高温性能易产生变化的材料,温度高低变化直接会导致其内部性质发生改变<sup>[13-14]</sup>。根

据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120—2012),当基坑支撑结构超过 40m 时需对其考虑支撑内力的影响。根据实践经验和理论计算,支撑系统在温度变化的影响下,引起支撑内部的轴力变化,所产生的高温或者极端的温差变化导致基坑工程出现安全事故,需研究温差变化在基坑工程的效应<sup>[15-17]</sup>。笔者研究温度对地铁深基坑工程的影响,根据现场数据与有限元模型的对比分析,得出温度变化会使钢支撑产生热胀冷缩,地连墙发生朝向基坑内方向的位移趋势。

## 1 工程实例

### 1.1 工程概况

沈阳地铁北大营街站是处于地铁 4 号线和 10 号线的换乘车站。车站为地下两层双柱三跨岛式站台车站,有效站台宽度 14 m,车站长 166 m,标准段宽度为 22.9 m,盾构井段宽 26.7 m。车站顶板覆土约 3.5~4.4 m,基坑深度 26.15 m,车站采用盖挖顺做法施工,车站标准段围护结构采用钻孔灌注桩  $\phi 1\ 000@1\ 400$ ,围护结构采用钻孔灌注桩,第 1 层为混凝土支撑,其下有 4 道钢支撑。

### 1.2 工程监测

施工段地处城市老城区居民区,周围建筑较多管线分布密集,周围环境复杂,对施工要求较高需制定较为严格的监测措施。对深基坑主体进行相应监测点布置工作,对深基坑的钢支撑及地连墙均布置有 12 个监测点,钢支撑监测点编号为 ZCZL1~ZCZL12,地连墙的监测点编号为 CX1~CX12,监测点的具体布置情况如图 1 所示。

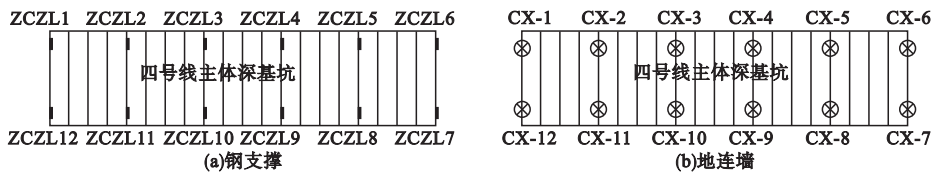


图 1 深基坑北区布置点平面图

Fig. 1 Monitoring point layout plan in north area of deep foundation pit

2 工程监测结果分析

2.1 支撑轴力实测分析

所选施工段的施工周期自 2018 年 10 月起至次年的 1 月结束,但现场的轴力、地表沉降、建筑沉降和测斜等监测仍照常运行直至 2019 年 4 月,且这段时期未受到其他因素的干扰,为基坑支护结构温度的研究提供了近乎理想的测量条件。依据现场的状况、监测条件等对车站深基坑北区标准段和标准段相结合的第 4 施工段进行了相应监测点的监测工作。表 1 为第 1 道、第 2 道钢支撑实测轴力与现场实测温度。钢支撑受温度作用影响较大,且与周围的支护结构相连相互作用。导致周围环境受到影响,钢支撑在温度差作用下会产生相应的热胀冷缩现象,随着施工环境温度的变化钢支撑也会产生一定的变形,当冬季温度相对较低时,支撑出现收缩变形,周围土体与其变形不一致导致对钢支撑的约束也会相应减小,轴力逐渐变小甚至消失;而随着季节交替气温逐渐回暖,钢支撑出现膨胀变形四周的围护结构对其约束作用逐步增强,钢支撑轴力也逐渐增大,出现钢支撑轴力随着温度的逐渐升高而增大的现象,为了保证钢支撑结构能够达到预期工况,温度对结构的影响不容忽视。

表 1 中钢支撑受温度变化而出现的轴力差值变化。温度变化对于第 1 道钢支撑轴力所造成影响小于第 2 道钢支撑。原因是:①随着基坑深度的不断增加,支撑周围的土体及围护结构对其的约束作用不断增加,温度对下层支撑轴力所造成的影响也随之增大;②深度较浅的支撑受温度影响产生较大位

移,而埋深大的支撑受温度作用位移量略小,上层支撑由于受到较大位移作用支撑受力收到了部分的卸载,所产生的结果就是第 1 道钢支撑轴力受温度变化的影响小于第 2 道。

表 1 不同支撑实测轴力与对应现场实测温度  
Table 1 Measured axial force of different supports and measured temperature in corresponding field

第 1 道钢支撑轴力/kN		第 2 道钢支撑轴力/kN		温度/ ℃
ZCZL8	ZCZL9	ZCZL8	ZCZL9	
569.19	543.61	525.89	684.46	-17.00
712.63	632.11	568.7	719.52	-13.00
735.63	800.26	591.55	784.56	-10.00
806.54	775.75	652.39	835.33	-6.00
822.21	893.61	677.73	918.23	0.00
858.5	943.84	801.39	1005.68	3.00
925.28	993.36	947.19	1082.7	8.00

2.2 不同温度下地连墙水平位移变化情况  
支撑体系在完成开挖阶段后,以 10℃为变化幅度,5 组不同温度变化条件下的地下连续墙的水平位移变化曲线如图 2 所示。

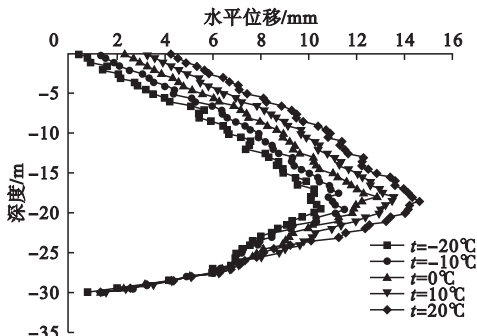


图 2 不同温度下地连墙水平位移变化曲线  
Fig. 2 Horizontal displacement curve of diaphragm wall under different temperatures

从图 2 可以看出,随着温度的不断升高地连墙向坑外方向移动的趋势更加明显,反

之成立。因坑底以下由两侧土体对其产生约束作用,地连墙的位移相对较小,故在基坑的坑底以上与支撑结构连接部分的地连墙水平位移变化量较大,第 1 道和第 2 道支撑的中间部位出现最大水平位移增量。

3 有限元分析过程及验证

为深入探究温度对深基坑支护结构的影响,采用 ABAQUS 软件进行模拟分析计算。针对沈阳地铁实际工程进行模拟分析,测量地铁站主体深基坑长度为 125 m,宽度为 25 m,基坑深度为 25 m。根据相关研究和圣维南原理可知,基坑开挖对土体的扰动范围大致在基坑开挖深度的 3~4 倍<sup>[18]</sup>,文中有限元模型取长 240 m 宽 125 m,深 50 m,有限元模型如图 3 所示。

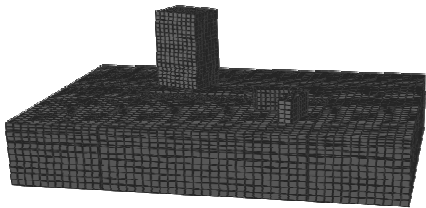


图 3 整体模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the whole model

3.1 有限元模型参数选取

根据沈阳地铁实际工程作为模型依据,对深基坑支护结构进行计算分析,真实准确地反映实际工程的各方面特性。对土体的本构模型选用 Mohr-Coulomb 准则(弹-塑性模型)。根据沈阳地铁北大营站深基坑实际地质勘察报告以及实际调研,土层厚度及参数如表 2 所示。

表 2 主要土层参数

Table 2 Key soil parameters

序号	地层	层厚/m	重力密度/(kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
1	杂填土	2.5	19.0	0.35	20	11.4	3.5
2	砾砂	4.0	19.5	0.35	20	35.0	22.0
3	圆砾	7.0	19.5	0.31	20	35.0	26.2
4	圆砾	7.0	21.0	0.35	30	36.0	30.0
5	砾砂	19.5	20.8	0.35	30	36.0	29.0

围护结构采用钻孔灌注桩,围护结构设计参数如表 3 所示。钻孔灌注桩是由单个桩体形成的桩体组,其受力形式基本与地下连续墙一致。在建模计算过程中将围护桩等效成地下连续墙的形式。由于在支撑对应位置

安设了圈梁和钢围檩,加强了桩体的整体刚度,笔者根据抗弯刚度相等的原则,将围护桩结构转化为等刚度结构的壁式地下连续墙来模拟<sup>[19]</sup>。等刚度转换后的标准段地下连续墙的厚度  $h$  取值为 1.18 m。

表 3 围护结构设计参数

Table 3 Design parameters of enclosure structure

构件	重力密度/(kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量 $E$ /MPa	线膨胀系数/ $10^{-6}$	比热容/(kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> )
钻孔灌注桩	20	0.17	30	12	480
混凝土支撑与圈梁	25.5	0.20	32	10	920
钢支撑	79	0.30	210	12	480
钢围檩	78	0.20	200	12	480

3.2 有限元分析结果与实测数据对比

图 4 为施工段的支撑轴力有限元计算值与实测值之间的对比曲线,通过对比可以看

出施工段内支撑轴力实测值和计算值的变化趋势大致相同。由于实际基坑内部土体存在地下水的渗流作用,但模型建立过程未考虑

地下水对施工现场的影响,且模型建立及施工环境相对理想,故存在一些差异。

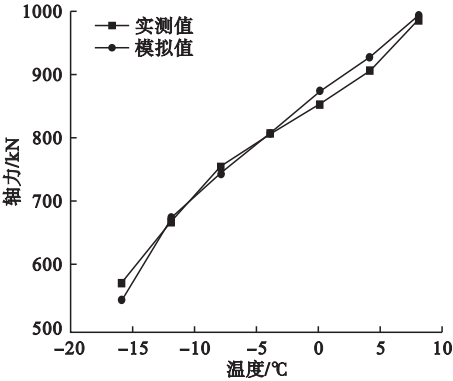


图 4 施工段支撑轴力实测值与计算值对比图  
Fig. 4 Comparison of measured and calculated values of support axial force in construction section

图 5 为对深基坑围护桩深层水平位移监测选取 3 个具有代表性的监测点进行模拟分析所得对比图。由有限元分析结果与实测数据对比分析可知,有限元分析过程能够体现实际工程受力变化过程,有限元分析过程合理有效。

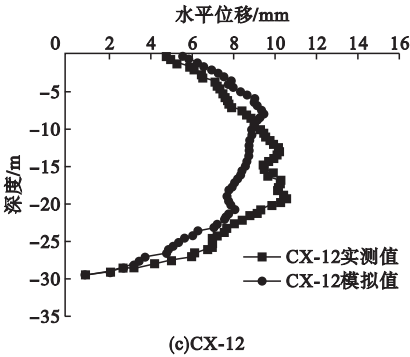
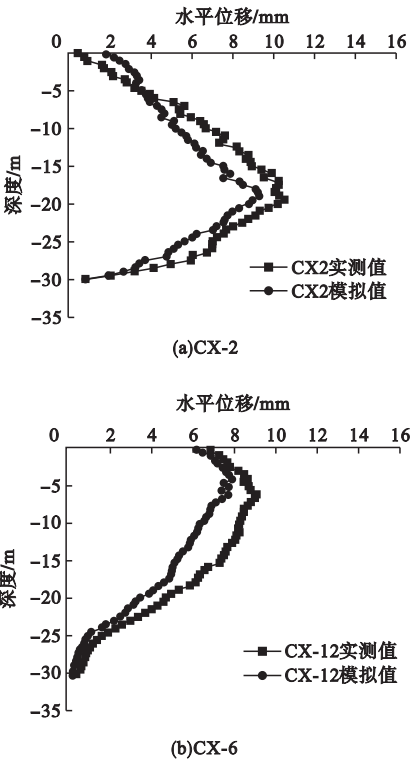


图 5 地下连续墙水平位移模拟值与实测值对比图  
Fig. 5 Comparison between simulated and measured horizontal displacement of diaphragm wall

#### 4 温度对深基坑支撑结构产生效应的影响因素分析

根据建立的有限元分析过程,分析温度对支撑体系的主要影响因素,在深基坑支护结构中支撑结构受到温度变化影响较明显,根据材料特性分析,对结构刚度、支撑刚度、支撑材料线膨胀系数等因素变化的情况下进行分析。

##### 4.1 围护结构刚度变化的影响分析

围护结构刚度采用材料弹性模量  $E = 26 \text{ GPa}$ 、 $E = 39 \text{ GPa}$ 、 $E = 52 \text{ GPa}$  状态下,有限元模型模拟计算的支撑轴力。图 6 为在围护结构刚度改变对于第 1 道支撑、第 2 道钢支撑支撑轴力在不同温度下的变化曲线。图 7 为不同围护结构刚度下地连墙水平位移增量温度变化曲线。根据图中轴力变化曲线能够看出,第 1 道钢支撑随着围护结构刚度的增大,支撑轴力随温度变化的越程度越大,当  $E = 26 \text{ GPa}$  时,轴力接近于一条平滑的直线,围护结构刚度不断地增大。第 2 道钢支撑也随之变化,支撑轴力随温度的变化曲线变得越来越陡峭,第 1 道钢支撑的轴力变幅受围护结构刚度影响明显大于第 2 道钢支撑,通过水平位移增量变化图分析,当  $t = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,不同围护结构刚度下地连墙水平位移增量变化差异不明显。因此,刚度越大,受到的温度变化越明显。采用围护结构尽量采取相对小



的刚度,来减缓支撑轴力受到温度变化的影响。

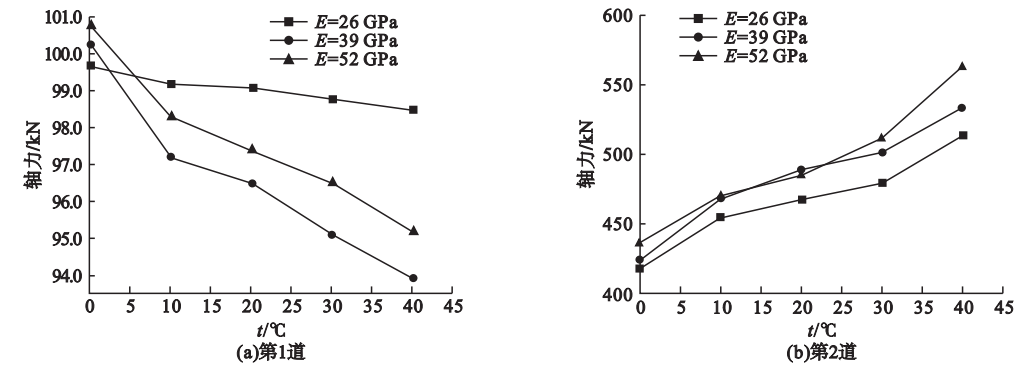


图6 不同围护结构刚度下钢支撑轴力温度变化曲线

Fig. 6 Temperature variation curve of steel support's axial force under different enclosure stiffness

4.2 支撑刚度变化的影响分析

支撑结构主要依靠钢材进行支撑及承重,以常规的钢材作为标准,选取不同数值的弹性模量  $E = 103 \text{ GPa}$ 、 $E = 206 \text{ GPa}$ 、 $E = 309 \text{ GPa}$ 来改变支撑刚度。模拟计算支撑轴力和地连墙水平位移变化情况。图8为改变支撑刚度的情况下,第1道、第2道钢支撑与温度的变化规律。图9为不同支撑刚度下地连墙水平位移增量温度变化曲线。在一定温度下,在给定条件下水平位移增量变化情况,由图9可知,地连墙在条件改变的状态下,增量出现较小的波动。因此,支撑刚度对支撑轴力在温度影响下的变化较小,增加刚度降低轴力受温度的影响。

图7 不同围护结构刚度下地连墙水平位移增量变化曲线

Fig. 7 Incremental change curve of connected walls' horizontal displacement under different stiffness of enclosure structure

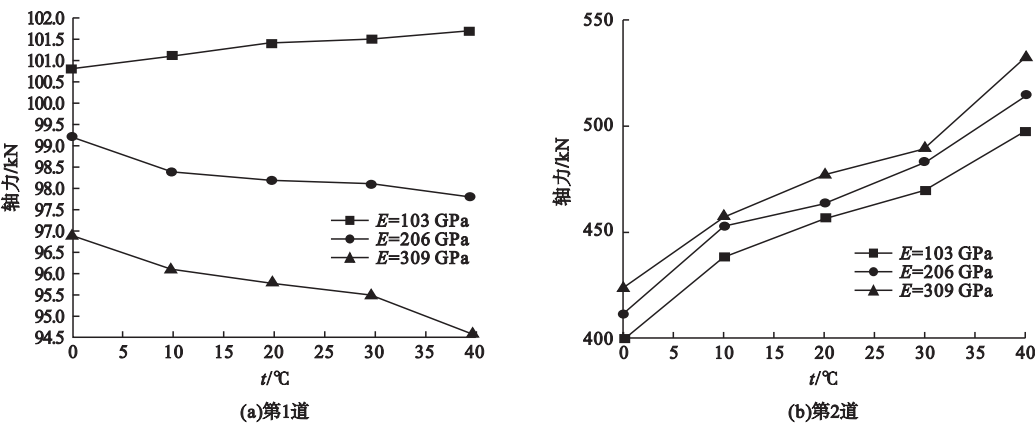


图8 不同支撑刚度下支撑轴力温度变化曲线

Fig. 8 Temperature variation curve of support axial force under different support stiffness

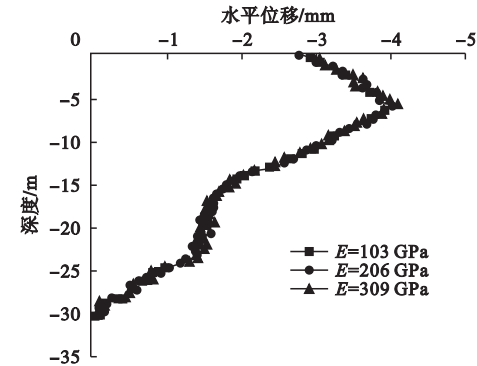


图 9 不同支撑刚度下地连墙水平位移增量变化曲线

Fig. 9 Incremental change curve of connected walls' horizontal displacement under different supporting stiffness

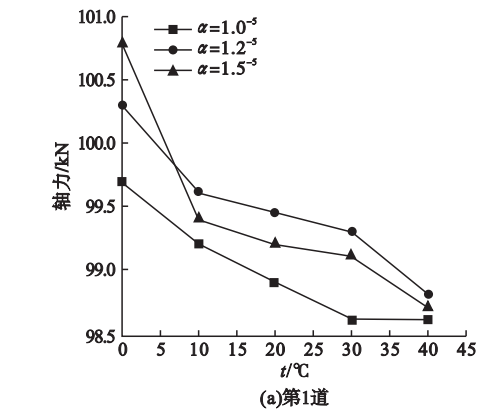


图 10 不同线膨胀系数钢支撑轴力温度变化曲线

Fig. 10 Temperature variation curve of axial force of steel brace with different coefficient of linear expansion

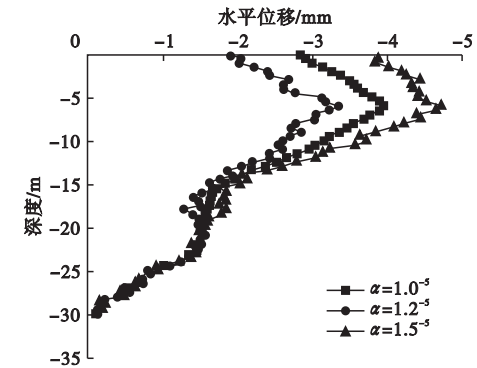


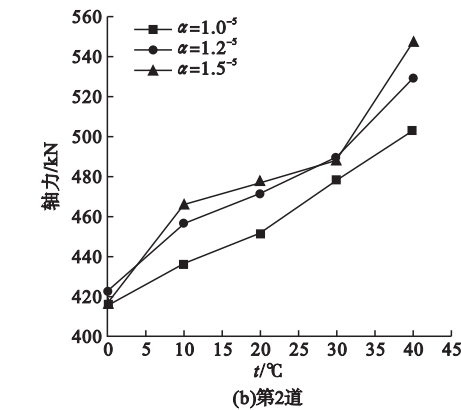
图 11 不同线膨胀系数地连墙水平位移增量变化曲线

Fig. 11 Incremental change curve of horizontal displacement of connected wall with different line expansion coefficients

从图 11 可知,水平位移增量与支撑线胀

4.3 线膨胀系数变化的影响分析

钢支撑的线膨胀系数是影响钢支撑温度与应力大小的主要因素。支撑材料线膨胀系数 $\alpha = 1.0^{-5}$ 、 $\alpha = 1.2^{-5}$ 、 $\alpha = 1.5^{-5}$ 状态下,不同支撑结构膨胀系数对第 1 道、第 2 道钢支撑受到温度变化的轴力曲线变化如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着线膨胀系数的增加,第 1 道钢支撑轴力变化曲线变化下降趋势不断加快,第 2 道钢支撑轴力变化曲线变化上升趋势不断加快。图 11 为  $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时地下连续墙在不同支撑线胀系数下的水平位移增量变化曲线图。



系数呈正相关,水平位移增量随着线胀系数的增大而增加。因此,降低支撑的线膨胀系数能有效的减缓钢支撑受到温度变化时的形变程度,进一步降低支撑轴力受温度的影响。

5 结 论

(1)通过有限元软件模拟结果和实测数据对比,能够相对完整地还原现场施工过程,验证整体模型具有合理性。模拟结果变形曲线较平稳,该模型对实际工程具有借鉴作用。

(2)在基坑支护结构中,温度变化对支撑轴力具有较大的影响。对于施工地点处于温度差变化大的地区,基坑施工设计时考虑温度效应对基坑支护的影响。温差变化会使钢支撑产生热胀冷缩,导致地连墙发生朝向

基坑内方向的移动趋势,施工过程中对于钢支撑和地连墙抵抗温度效应保护是必要的。

(3)通过改变钢支撑和围护结构的力学性质对深基坑支护结构温度效应的变化影响,为确保施工安全,减小温度的影响可采取增加深基坑周围的围护结构刚度,并采用膨胀系数相对较小的支撑材料来减小温度效应对深基坑以及周围环境、建筑物的影响。

## 参考文献

- [1] 张国碧,李家稳,郭建波.我国地铁的发展现状及展望[J].山西建筑,2010,36(33):13-15.  
(ZHANG Guobi, LI Jiawen, GUO Jianbo. The present development status and prospect on the domestic railway [J]. Shanxi architecture, 2010, 36(33):13-15.)
- [2] 刘涛,杨帆.浅谈我国地铁发展现状及展望[J].中小企业管理与科技,2014(2):129-130.  
(LIU Tao, YANG Fan. On the subway development status and prospect[J]. Management and technology of small and medium sized enterprises, 2014(2):129-130.)
- [3] 宋涛.考虑临近建筑物影响的深基坑支护设计及变形规律研究[D].西安:西安科技大学,2017.  
(SONG Tao. Study on supporting design and deformation law of deep foundation pit considering influence of adjacent buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.)
- [4] ENDO M, KAWASAKI T. Study of thermal stresses acting on struts[J]. Transactions of the architectural institute of Japan, 1963(63):689-692.
- [5] HASHASH Y M A, MARULANDA C, KERSHAW K A, et al. Temperature correction and strut loads in central artery excavations [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2015, 129(6):495-505.
- [6] MASSOUDI N. Contemporary topics in ground modification, problem soils, and geo-support-temperature effect on tieback loads [J]. American society of civil engineers international foundation congress and equipment expo 2009-Orlando, Florida, United States, 2009(1):49-56.
- [7] 陆培毅,韩丽君,于勇.基坑支护支撑温度应力的有限元分析[J].岩土力学,2008,29(5):1290-1294.  
(LU Peiyi, HAN Lijun, YU Yong. Finite element analysis of temperature stress in stnt of foundation pit[J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(5):1290-1294.)
- [8] 甘朝锋.温度应力对深基坑支护结构的影响分析[J].江西建材,2016(19):67-70.  
(GAN Chaofeng. Influence of temperature stress on supporting structure of deep foundation pit[J]. Jiangxi building materials, 2016(19):67-70.)
- [9] 王莹.内支撑体系温度效益对深基坑变形的影响分析[J].天津建设科技,2019,29(3):65-67.  
(WANG Ying. Influence of temperature benefit of internal support system on deformation of deep foundation pit [J]. Tianjin construction science and technology, 2019, 29(3):65-67.)
- [10] LI L Y, QIU Z W, DONG Y Y, et al. Risk caused by construction of the metro shaft adjacent to building and its control measure [J]. Procedia engineering, 2016, 165:40-48.
- [11] DEMENKOV P, VERBILO P. Methodology of prediction stress-strain state deep foundation structures of subway station's taking into account stages of its construction [J]. Procedia engineering, 2016, 165:379-384.
- [12] VOGIATZIS K, ZAFIROPOULOU K, MOUZAKIS H. Monitoring and assessing the effects from metro networks construction on the urban acoustic environment: the athens metro line extension [J]. Science of the total environment, 2018, 639:1360-1380.
- [13] 田敬学.深基坑围护结构温度应力监测与分析[J].施工技术,2006(7):21-22.  
(TIAN Jingxue. Monitoring and analysis of deep foundation pit enclosure structure [J]. Construction technology, 2006(7):21-22.)
- [14] 张亚龙.季节性温度变化对基坑支护受力和变形影响研究[D].天津:天津大学,2016.  
(ZHANG Yalong. Study on influence of seasonal temperature change on stress and deformation of foundation pit support [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.)
- [15] 张中普,姚笑青.某深基坑事故分析及技术处理[J].施工技术,2005(12):72-73.  
(ZHANG Zhongpu, YAO Xiaqing. Accident analysis and technology dispose of certain deep foundation pit [J]. Construction technology, 2005, 34(12):72-73.)
- [16] KULKARNI A C, KRISHNAN A. Evaluation of heat stress in construction site of metro rail in Chennai. [J]. Indian journal of occupational and environmental medicine, 2018, 22(2):101-105.
- [17] 尹茂周.高层建筑深基坑支护施工技术的思考[J].中国标准化,2018(24):72-73.  
(YI Maozhou. Consideration on construction technology of deep foundation pit support of high rise building [J]. China standardization, 2018(24):72-73.)
- [18] 于忠波,任磊,皮景坤,等.相邻深基坑开挖方式对地下管线的影响分析[J].公路与汽运,2012,151(4):239-241.  
(YU Zhongbo, REN Lei, PI Jingkun, et al. The influence analysis based on the excavation method of adjacent deep foundation pit on understand pipeline [J]. Highways & automotive applications, 2012, 151(4):239-241.)
- [19] 王桦.考虑温度应力的内支撑结构体系受力性状分析[D].扬州:扬州大学,2015.  
(WANG Hua. Mechanical behavior analysis of internal braced structure considering temperature stress [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)