

DOI: 10.7672/sjgs2025130032

温度对大型基坑超长混凝土支撑轴力影响研究*

林丽芬¹, 李萧翰², 李牧羽²

(1. 广州地铁设计院施工图咨询有限公司, 广东 广州 510010;

2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

[摘要] 以广州市某轨道交通大型基坑工程为研究对象,研究超长混凝土支撑轴力在夏季早中晚太阳辐射下的变化规律。通过现场监测,获得支撑体表温度与支撑轴力数据,分析支撑轴力与温度变化的相关性。利用最小二乘法对轴力和温度进行拟合,并将拟合公式和现场监测数据进行比较,验证了拟合公式的可靠性。结果表明,混凝土支撑轴力受温度的影响较大,夏日太阳辐射引起混凝土支撑结构温度大幅升高,进而导致支撑轴力增加,最大可增加60%。受温度变化影响,混凝土支撑轴力变化存在滞后性,温度升高2h后,支撑轴力发生明显变化。拟合公式可精准预测混凝土支撑轴力随温度的变化趋势,误差<5%。

[关键词] 基坑;混凝土;支撑;轴力;监测;温度

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)13-0032-06

Study on Influence of Temperature on Axial Force of Super-long Concrete Supports in Large Foundation Excavation

LIN Lifen¹, LI Xiaohan², LI Muyu²

(1. Guangzhou Metro Design Institute Construction Drawing Consulting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China;

2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China)

Abstract: Taking a large foundation excavation project of the rail transit in Guangzhou as the research object, the variation law of axial force of super-long concrete support under solar radiation in the morning, afternoon, and evening of the summer was studied. The surface temperature of the support and the support axial force data were obtained, and the correlation between the support axial force and the temperature change was analyzed through on-site monitoring. The least square method was used to fit the axial force and temperature, and the reliability of the fitting formula was verified by comparing the fitting formula with the field monitoring data. The results indicate that the axial force of concrete support is greatly affected by temperature. The temperature of the concrete support structure is greatly increased by summer solar radiation, which leads to the increase in support axial force, with the maximum increase of 60%. Under the influence of temperature change, the change of axial force of concrete support has hysteresis. After the temperature rises for 2 hours, the axial force of support changes obviously. The fitting formula can accurately predict the change trend of concrete support axial force with temperature, and the error is less than 5%.

Keywords: foundation excavation; concrete; supports; axial force; monitoring; temperature

0 引言

随着我国城市建设的快速发展,越来越多的大型基坑不断出现。强烈太阳辐射下基坑支撑结构

将产生较大的温度应力,非均匀分布的温度应力对结构承载性能将产生重要影响^[1]。以往的研究已经证明,温度应力的增加是导致支撑结构失稳的重要因素^[2]。夏季高温时,长时间的太阳辐射引起的温度变化,可引起支撑结构产生裂纹甚至发生失稳破坏,尤其是当支撑结构较长时,温度应力对基坑支撑结构的影响将更为显著,不能忽略^[3-6]。因此,

* 国家重点研发计划(2022YFC3005203);广东省城市轨道交通工程建造新技术企业重点实验室资助项目(2017B030302009)

[作者简介] 林丽芬,高级工程师,E-mail:linlifan@dsjy.com

[通信作者] 李萧翰,博士,E-mail:lixiaohan@dsjy.com

[收稿日期] 2025-03-20

研究温度对大型基坑超长混凝土支撑轴力的影响,对基坑稳定性控制具有重要意义。

针对支撑轴力与温度的关系,科研人员采用理论分析、数值研究和现场监测等手段开展了诸多研究。向艳^[7]分析了武汉某基坑的监测数据,得到了环境温度对内支撑轴力和支护结构水平位移的影响规律,结果表明当温差大于 20℃ 时,支撑结构受温度应力的影响较大。徐冠玉等^[8]通过现场监测,研究了温度对超大超深基坑混凝土板支撑轴力的影响,获得了日光照射下超长板支撑轴力变化与变形规律。范君宇^[9]基于深大基坑工程背景,通过理论分析与现场监测,建立并验证了支护结构水平支撑温度内力与变形的计算方法。陈林靖等^[10]对福州地铁 6 号线潘墩站基坑工程进行了数值分析,结果表明,环境温度变化对基坑内支撑轴力和变形的影响较大,基坑支撑轴力随温度变化而表现出线性变化规律;不同开挖阶段,支撑轴力受温度效应的影响区别较大。王辉^[11]研究了石家庄市地铁基坑支撑轴力的影响因素,结果表明温度对混凝土支撑轴力的影响较大,且太阳辐射时间也影响支撑轴力值。

近年来,能否对混凝土支撑结构在温度作用下的应力变化进行有效预测,是学术界和工程界关注的重点。Chapman 等^[12]针对华盛顿的一处基坑,发现了支撑轴力与环境温度会出现同步变化,并提出了 1 个考虑温差作用的经验公式,但该公式的适用范围有限,仅能预测单层支撑的轴力变化。郑刚等^[13]针对基坑工程 1 道支撑结构,在弹性抗力法的基础上,给出了支撑结构温度应力的简化计算方法,预测计算值与现场实测数据偏差达 23%。朱家晖^[14]通过对佛山某基坑监测数据进行分析,提出支撑轴力温度系数的概念,预测了环境温度变化对支撑轴力的影响数值大小。金亚兵等^[15]提出了采用弹性抗力法的温度应力简化计算方法,并采用自主研发的工程结构安全自动化监测预警平台,进行了深基坑内支撑系统温度变化影响的实时、连续、在线的自动化监测。

当前,对于大型基坑超长混凝土支撑的温度效应研究较为缺乏,尚无法对温度作用下的混凝土支撑轴力变化进行精准预测。基于此,本研究依托广州某轨道交通基坑工程对超长混凝土支撑轴力进

行监测分析,获得了大量实测数据,在此基础上研究夏季太阳辐射作用下支撑体表温度变化对支撑轴力的影响,实现了对混凝土支撑结构在温度作用下应力变化的有效预测。

1 工程概况

本工程共有 5 条地铁线在此换乘,为大型超深基坑工程,基坑东西方向长约 614m,南北方向长约 589m,基坑深 16~35m,为多个不同深度的超深超大的连体组合基坑。基坑采用 1 200mm 厚地下连续墙+竖向 5 道内支撑方式,第 1 道支撑为超长栈桥支撑,分为 A、B、C 3 个栈桥,栈桥长度达 160m,如图 1、2 所示。

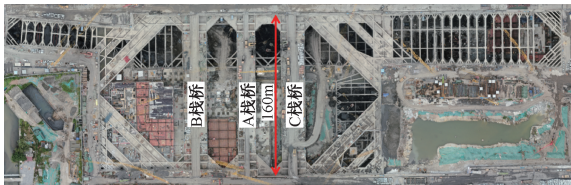


图 1 本工程基坑航拍

Fig. 1 Aerial photo of foundation excavation

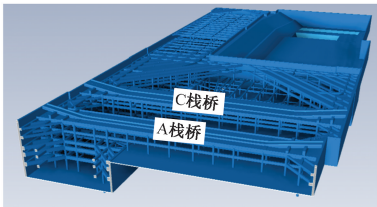


图 2 支撑布置

Fig. 2 Layout of support

本工程地质属于二叠系栖霞组石灰岩,覆盖型岩溶,见洞率超 50%,洞高最高达 27m。岩溶发育程度为强发育。溶洞高度变化大,无规律。以表层溶蚀发育为主要特点,分布规律性差,形态规模各异,岩溶洞体充填差。

工程所在位置为低纬度地区,终年气温较高,年平均气温为 21.4~21.9℃。最冷月为 1 月,月平均气温为 12.9~13.5℃。最热月为 7 月,月平均气温为 28.4~28.7℃。极端最高气温 39.1℃,各月平均气温如表 1 所示。夏季太阳辐射强烈,尤其在 7、8 月份,多次因支撑轴力过大而预警,现场采用自动洒水装置降温来减小支撑轴力。累年逐月太阳总辐射量统计如表 2 所示。

表 1 广州市各月平均气温

Table 1 Average temperature for each month in Guangzhou

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气温/℃	13.4	14.3	17.8	21.8	25.6	27.3	28.4	28.3	27.0	23.9	19.4	15.0

表 2 广州市累年逐月太阳总幅射量统计

Table 2 Statistics of total solar radiation in Guangzhou over the years and month by month

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
辐射量(MJ·m ⁻²)	306	243	268	301	389	419	507	490	444	440	377	335

2 现场监测

2.1 监测点布置

栈桥支撑轴力监测采用混凝土应变计,应变计在绑扎钢筋笼时埋设,其中 A 栈桥设置 7 个监测点(G1-24~G1-30),B 栈桥设置 8 个监测点(G1-14~G1-21),C 栈桥设置 8 个监测点(G1-32~G1-39),如图 3 所示。读取轴力数据的同时,测量同位置支撑的体表温度。

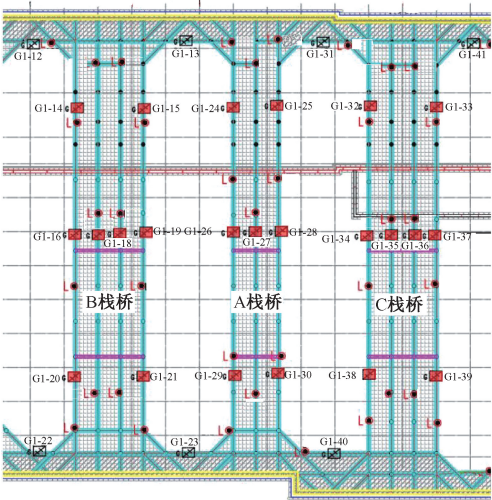


图 3 栈桥支撑轴力监测点布置

Fig. 3 Layout of trestle support axial force monitoring points

2.2 混凝土支撑轴力计算

对于轴力监测,可使用混凝土应变计,首先监测获得混凝土结构应变,再利用公式计算得到支撑轴力。混凝土支撑轴力计算如下^[16]:

$$N_i = \varepsilon(E_c A_c + E_s A_s) \tag{1}$$

式中: N_i 为支撑杆件测量轴力; E_c 和 E_s 分别为混凝土和钢筋的弹性模量; A_c 和 A_s 分别为支撑结构的混凝土横截面积和钢筋横截面积; ε 为混凝土应变计监测获得的混凝土应变均值,可由下式计算:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i / n \tag{2}$$

式中: n 为单个监测断面内布置的混凝土应变计数量。

2.3 监测数据分析

选取 2021 年 7 月 14 日 7:00—23:00 的监测数据进行分析,监测时基坑已开挖至基底,支撑已全部浇筑完成。轴力与支撑体表温度的日变化曲线如图 4~9 所示。

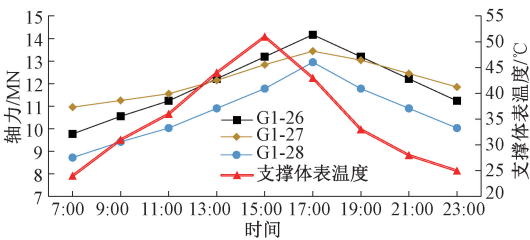


图 4 A 栈桥跨中轴力与温度变化曲线

Fig. 4 Curve of axial force and temperature variation of A-trestle bridge mid-span

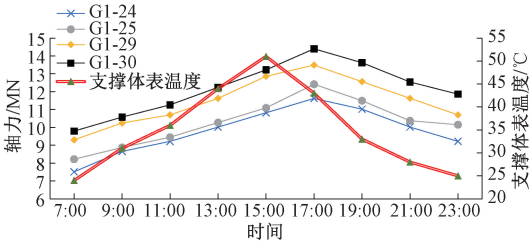


图 5 A 栈桥边跨轴力与温度变化曲线

Fig. 5 Curve of axial force and temperature variation of A-trestle bridge side-span

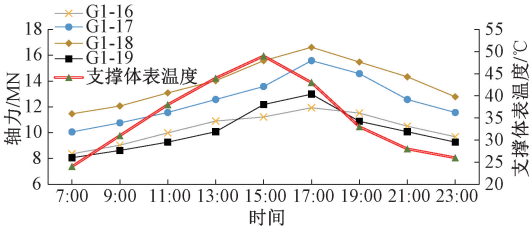


图 6 B 栈桥跨中轴力与温度变化曲线

Fig. 6 Curve of axial force and temperature variation of B-trestle bridge mid-span

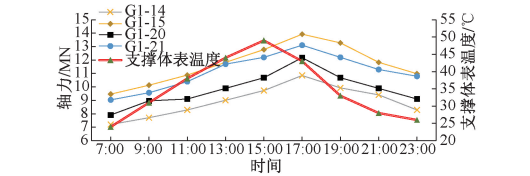


图 7 B 栈桥边跨轴力与温度变化曲线

Fig. 7 Curve of axial force and temperature variation of B-trestle bridge side-span

通过对比可发现支撑体表温度曲线与支撑轴力曲线的变化趋势是吻合的,表明温度变化与支撑轴力具有相关性,日轴力增长幅度均在 20% 以上。其中 G1-37 测点是在太阳辐射作用下,轴力变化最大的,从 7:00 的 8 587kN 增加到了 17:00 的

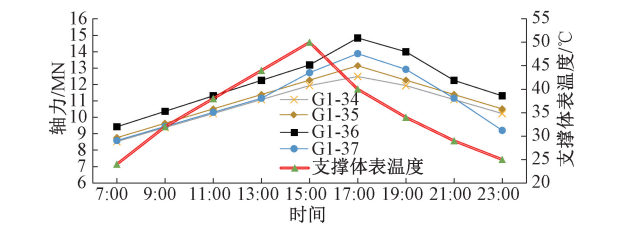


图 8 C 栈桥跨中轴力与温度变化曲线

Fig. 8 Curve of axial force and temperature variation of C-trestle bridge mid-span

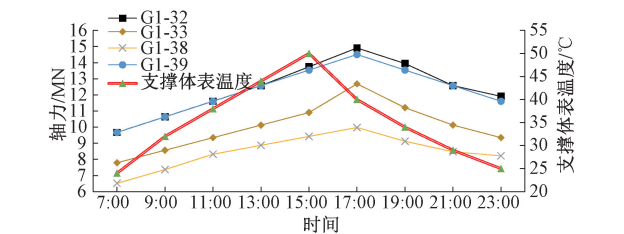


图 9 C 栈桥边跨轴力与温度变化曲线

Fig. 9 Curve of axial force and temperature variation of C-trestle bridge side-span

13 881kN,增加幅度达 62%。且因栈桥支撑体量及长度极大,即使处于同一监测断面或同一个混凝土梁上的不同测点,轴力也存在很大差别。

此外,对栈桥体表温度的监测在 15:00 达到峰值,温度越高支撑的热胀冷缩越强,支撑应发生更大的形变,直接增大支撑轴力。但从监测曲线可以看出,支撑轴力峰值时间并不是体表温度的峰值时间,而是在晚于温度峰值时间的 17:00。因此,支撑轴力的变化较体表温度的变化存在滞后性,变化并不同步,原因是混凝土比热容大,热量传导效率低,温度从体表传至内部需要时间。

3 轴力-温度相关性拟合及后期轴力预测

基于支撑体表温度曲线与支撑轴力曲线的一致,采用最小二乘法对基坑支撑轴力与温度进行线性拟合。监测数据表明支撑轴力变化较支撑体表温度变化存在明显的滞后性,温度峰值较轴力峰值早 2h,故将轴力数据前移,仅拟合温度的上升段,各测点拟合如图 10~15 所示。

2021 年 8 月 21 日项目附近气温高达 36℃,晴天太阳辐射强烈,混凝土支撑体温达到 60℃,对上述监测点读取轴力数据,将实测轴力最大值与拟合公式预测值进行对比,如表 3 所示。预测值与实测值相差较少,最大偏差仅 4.94%,说明拟合公式能较好地预测轴力随支撑体温的变化关系。

4 混凝土支撑轴力计算公式修正

支撑轴力监测的出发点是通过测量出构件的应变,乘以材料弹性模量,在钢筋与混凝土间良好的共

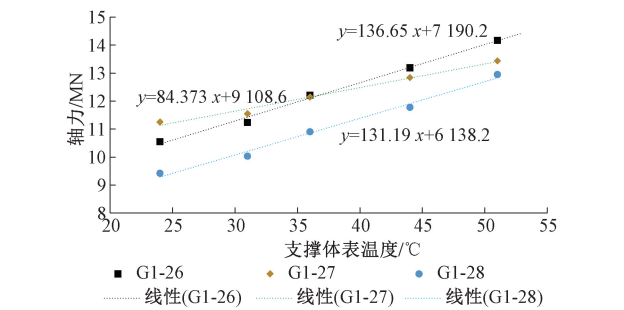


图 10 A 栈桥跨中轴力与温度拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of axial force and temperature variation of A-trestle bridge mid-span

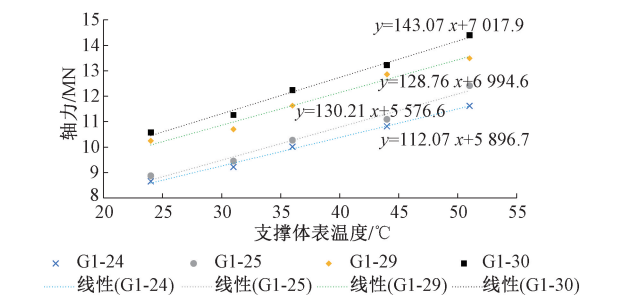


图 11 A 栈桥边跨轴力与温度拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of axial force and temperature variation of A-trestle bridge side-span

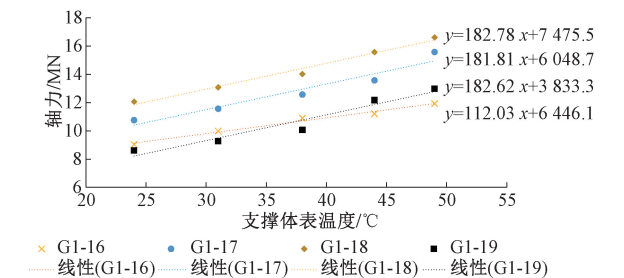


图 12 B 栈桥跨中轴力与温度拟合曲线

Fig. 12 Fitting curve of axial force and temperature variation of B-trestle bridge mid-span

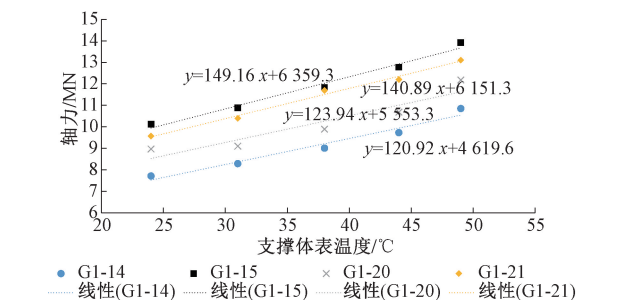


图 13 B 栈桥边跨轴力与温度拟合曲线

Fig. 13 Fitting curve of axial force and temperature variation of B-trestle bridge side-span

同工作基础上得到支撑轴力。上述支撑轴力计算公式,是在假设支撑发生温度应变、受到支座反作用时

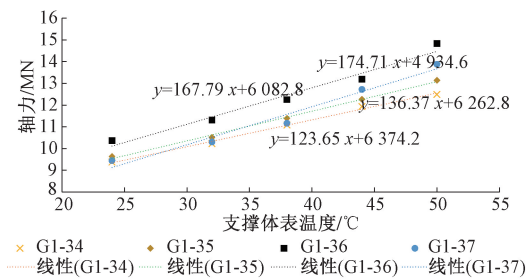


图 14 C 栈桥跨中轴力与温度拟合曲线

Fig. 14 Fitting curve of axial force and temperature variation of C-trestle bridge mid-span

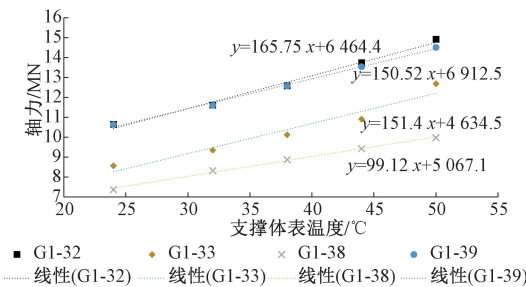


图 15 C 栈桥边跨轴力与温度拟合曲线

Fig. 15 Fitting curve of axial force and temperature variation of C-trestle bridge side-span

接近于纯受压或小偏心受压构件。但在实际条件下,尤其是对于本工程超长混凝土支撑,围护桩(墙)产生的反作用力与支撑轴心可能偏离较大,且混凝

土支撑也一般是带裂缝工作的。这种情况下通过传统公式计算出的轴力与真实轴力就会存在较大偏差,无法反应支撑实际轴力。

单跨支撑的弯矩分布如图 16 所示,可以看出,当监测点布置在 b 点或 c 点时,支撑弯矩较大,监测得到的轴力受弯矩影响较大,而监测点布置于 a 点时,弯矩极小,监测得到的轴力值能更好地反映实际轴力值。因此选对测点位置可减少弯矩对轴力计算的影响,本工程轴力监测点均布置在跨中 b 点位置,且因支撑兼作栈桥,上部有重型机械和堆载,弯矩很大,弯矩对轴力的影响不可忽略。

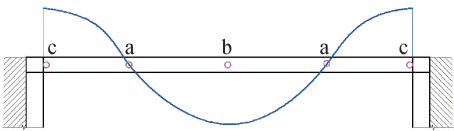


图 16 混凝土支撑弯矩

Fig. 16 Bending moment of concrete support

且混凝土开裂前由截面的受拉区和受压区共同承担轴力,而开裂后,受拉区退出工作,不再承担轴力,因此对考虑弯矩影响的轴力计算公式进行如下修正。

开裂前轴力计算公式:

$$N = \frac{\sigma_{pr} + \sigma_{pu}}{2} \times \frac{E_c A_c + E_s A_s}{E_s} \tag{3}$$

表 3 60℃轴力实测值与预测值对比

Table 3 Comparison of measured and predicted values of axial force for 60℃					
	测点	拟合公式	拟合公式预测值/kN	实测轴力最大值/kN	预测值与实测值的差值/%
A 栈桥	G1-24	y= 112.07x+5 896.7	12 621	12 955	2.58
	G1-25	y= 130.21x+5 576.6	13 389	13 005	-2.95
	G1-26	y= 136.65x+7 190.2	15 389	15 709	2.04
	G1-27	y= 84.373x+9 108.6	14 171	14 882	4.78
	G1-28	y= 131.19x+6 138.2	14 010	14 255	1.72
	G1-29	y= 128.76x+6 994.6	14 720	14 150	-4.03
	G1-30	y= 143.07x+7 017.9	15 602	15 897	1.86
B 栈桥	G1-14	y= 120.92x+4 619.6	11 875	12 166	2.39
	G1-15	y= 149.16x+6 359.3	15 309	15 783	3.00
	G1-16	y= 112.03x+6 446.1	13 168	12 970	-1.53
	G1-17	y= 181.81x+6 048.7	16 957	17 065	0.63
	G1-18	y= 182.78x+7 475.5	18 442	18 805	1.93
	G1-19	y= 182.62x+3 833.3	14 791	14 269	-3.65
	G1-20	y= 123.94x+5 553.3	12 990	13 371	2.85
C 栈桥	G1-21	y= 140.89x+6 151.3	14 605	15 136	3.51
	G1-32	y= 165.75x+6 464.4	16 409	16 064	-2.15
	G1-33	y= 151.4x+4 634.5	13 719	14 431	4.94
	G1-34	y= 123.65x+6 374.2	13 793	14 123	2.34
	G1-35	y= 136.37x+6 262.8	14 445	14 167	-1.96
	G1-36	y= 167.79x+6 082.8	16 150	16 661	3.07
	G1-37	y= 174.71x+4 934.6	15 417	15 571	0.99
	G1-38	y= 99.12x+5 067.1	11 014	11 555	4.68
	G1-39	y= 150.52x+6 912.5	15 944	15 265	-4.45

开裂后轴力计算公式:

$$N = \frac{\varepsilon_{pr} E_c h_1 b}{2} + \frac{\varepsilon_{pr} + \varepsilon_{pu}}{2} A_s \tag{4}$$

$$E_s = \frac{\varepsilon_{pr}^2 E_c h b}{2(\varepsilon_{pr} + \varepsilon_{pu})} + \frac{\sigma_{pr} + \sigma_{pu}}{2} A_s \tag{5}$$

式中: h, b 为截面的高度和宽度; h_1 为受压区截面高度, $h_1 = \varepsilon_{pr} h / (\varepsilon_{pr} + \varepsilon_{pu})$; σ_{pr} 为受压钢筋的均值应力, $\varepsilon_{pr} = \sigma_{pr} / E_s$; σ_{pu} 为受拉钢筋的均值应力, $\varepsilon_{pu} = \sigma_{pu} / E_s$ 。可由 ε_{pu} 值的大小来判断混凝土支撑是否开裂, 即当 $\varepsilon_{pu} E_c$ 大于混凝土抗拉强度设计值时, 表明混凝土产生裂缝。结果表明, 将监测点布置在混凝土支撑弯矩较小的位置, 所得到的轴力值更能反映实际轴力值。

5 结语

1) 温度对基坑支撑轴力的影响十分显著, 支撑体表温度曲线与支撑轴力曲线的变化趋势线性相关, 夏日晴天支撑轴力的增幅最大可达 60%, 表明在基坑施工稳定的情况下, 夏日太阳辐射使得混凝土支撑结构温度升高, 是基坑支撑轴力变化的主要原因。

2) 支撑轴力变化较体温变化存在一定的滞后性, 大约在 2h 左右。采用最小二乘法获得支撑轴力与温度的线性拟合方程, 可精准预测混凝土支撑轴力随温度的变化趋势, 误差 < 5%。

3) 对传统支撑轴力计算公式进行改进, 考虑弯矩对其影响。建议将监测点布置在弯矩较小的位置, 测得的轴力值能更好地反映实际轴力值。

参考文献:

[1] 胡琦, 凌道盛, 程泽海, 等. 温度应力对环形地连墙围护结构受力变形的影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (11): 2139-2143.
HU Q, LING D S, CHENG Z H, et al. Effects of temperature stress on diaphragm wall of circular deep foundation pit [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35 (11): 2139-2143.

[2] 叶林, 张怡琦, 李翠翠, 等. 考虑共同作用的超长混凝土梁温度应力计算分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (3): 113-117.
YE L, ZHANG Y Q, LI C C. Calculation and analysis of temperature stress of super long concrete beam considering interaction [J]. Construction technology, 2023, 52 (3): 113-117.

[3] 谭宜玮. 基于温度效应的深基坑长板撑内力预测和预警研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
TAN Y W. Research on prediction and early warning of internal force of long slab bracing in deep foundation pit based on temperature effect [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.

[4] 魏星星. 高温差对呼和浩特地铁基坑支撑温度效应影响分析 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.

WEI X X. Influence of high temperature difference on temperature effect of foundation pit support in Hohhot metro [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018.

[5] 彭晓光. 西北干旱地区深基坑支护温度效应研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
PENG X G. Research on temperature effect of deep foundation pit retaining in arid area of northwest China [D]. Xi ' an: Xi ' an Technological University, 2022.

[6] 罗川疆. 太阳辐射作用下基坑围护结构非均匀温度效应与力学行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
LUO C J. Non-uniform temperature effect and mechanical behavior of foundation pit retaining structure under solar radiation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[7] 向艳. 温度应力对深基坑支护结构内力与变形的影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (S2): 64-69.
XIANG Y. Influence of temperature stress on internal force and deformation of retaining structures for deep excavations [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36 (S2): 64-69.

[8] 徐冠玉, 陈俊生, 刘自兵, 等. 温度对超大超深基坑长板撑支护结构支撑轴力的影响研究 [J]. 四川水泥, 2023 (4): 198-200.
XU G Y, CHEN J S, LIU Z B, et al. Study on the influence of temperature on the axial force of long plate supporting structure in super-large and ultra-deep foundation pit [J]. Sichuan cement, 2023 (4): 198-200.

[9] 范君宇. 深大基坑中水平支撑的温度内力与变形计算 [J]. 山西建筑, 2014, 40 (18): 59-62.
FAN J Y. In deep big hole excavated for building foundation level support temperature endogenic force and distortion computational method [J]. Shanxi architecture, 2014, 40 (18): 59-62.

[10] 陈林靖, 罗一鸣, 戴自航. 软土地基坑中坑支护体系温度效应的数值分析 [J]. 地质与勘探, 2023, 59 (3): 637-646.
CHEN L J, LUO Y M, DAI Z H. Numerical analysis of temperature effect on retaining system for pit-in-pit excavation engineering in soft soil ground [J]. Geology and exploration, 2023, 59 (3): 637-646.

[11] 王辉. 温度对地铁基坑混凝土支撑轴力影响分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38 (1): 20, 22.
WANG H. Influence of temperature on axial force of concrete support in subway foundation pit [J]. Communications science and technology Heilongjiang, 2015, 38 (1): 20, 22.

[12] CHAPMAN K R, CORDING E J, SCHNABEL H. Performance of a braced excavation in granular and cohesive soils [C] // ASCE, Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, 1972.

[13] 郑刚, 顾晓鲁. 考虑支撑-围护桩-土相互作用的基坑支护水平支撑温度应力的简化分析法 [J]. 土木工程学报, 2002, 35 (3): 87-89, 108.
ZHENG G, GU X L. Simple method for calculating temperature stress in horizontal strut of foundation pit considering strut-pile-soil interaction [J]. China civil engineering journal, 2002, 35 (3): 87-89, 108.

的干扰。最后,还讨论了不可控因素引起的意外风险,包括自然灾害和人为破坏,提出了紧急预警机制和数据备份的应急处理措施。

参考文献:

[1] 王芝原,罗士雅,罗天宇,等. 监控量测技术在高速公路隧道施工的应用[J]. 科学技术创新,2023(27):165-168.
WANG Z Y,LUO S Y,LUO T Y,et al. Application of monitoring and measurement technology in expressway tunnel construction [J]. Scientific and technological innovation, 2023 (27): 165-168.

[2] 钱蔚然. 地铁隧道盾构施工监控量测与顶管沉降变形预测 [J]. 工程机械与维修,2023(6):58-60.
QIAN W R. Monitoring and measurement of subway tunnel shield construction and prediction of pipe jacking settlement and deformation [J]. Construction machinery & maintenance, 2023 (6):58-60.

[3] 殷晓林. 邻近既有运营高铁深大基坑变形监测 [J]. 施工技术 (中英文),2024,53(16):97-101.
YIN X L. Deformation monitoring of deep and large foundation excavation adjacent to existing operating high-speed railway [J]. Construction technology, 2024,53(16):97-101.

[4] 曾星巨,戴剑锋,蒋振梁,等. 监控量测在软岩隧道信息化施工中的应用研究 [J]. 中国新技术新产品,2012(21):23.
ZENG X J,DAI J F,JIANG Z L,et al. Research on application of monitoring measurement in information construction of soft rock tunnel [J]. China new technologies and products, 2012(21):23.

[5] 石立来. 关于隧道监控量测工作技术的分析与探讨 [J]. 中国高新区,2017(15):167,169.
SHI L L. Analysis and discussion on tunnel monitoring and

measurement technology [J]. Science & technology industry parks, 2017(15):167,169.

[6] WU Q H, WAN S M, YANG Y L. Research the deformation prediction system of foundation pit based on grey theory [J]. Applied mechanics and materials, 2012,170:174-178.

[7] JIANG N,ZHANG Y Q,ZHOU C B,et al. Influence of blasting vibration of MLEMC shaft foundation pit on adjacent high-rise frame structure; A case study [J]. Energies, 2020,13(19):5140.

[8] WEI H M. Influence of foundation pit excavation and precipitation on settlement of surrounding buildings [J]. Advances in civil engineering, 2021(1):6638868.

[9] WANG L J, ZHAO Q H. Deformation analysis and research of building envelope by deep learning technology under the reinforcement of the diaphragm wall [J]. Computational intelligence and neuroscience, 2022;9489445.

[10] 唐文栋,马振波. 隧道施工监控量测技术发展现状及思考 [J]. 安徽建筑,2018,25(6):83-85.
TANG W D,MA Z B. Development status and thinking of tunnel construction monitoring and measurement technology [J]. Anhui architecture, 2018,25(6):83-85.

[11] 武胜林,邓洪亮,陈凯江,等. 隧道监控量测自动预警管理系统及其应用 [J]. 测绘通报,2013(6):68-70,97.
WU S L,DENG H L,CHEN K J,et al. Automatic warning system of tunnel monitoring and its application [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2013(6):68-70,97.

[12] 蒲伟斌. 复杂地质隧道施工安全风险分析与管理 [J]. 运输经理世界,2023(8):81-83.
PU W B. Safety risk analysis and management of complex geological tunnel construction [J]. Transport business China, 2023 (8):81-83.

(上接第 37 页)

[14] 朱家晖. 佛山大良站基坑横向支撑对围护结构变形影响研究 [D]. 西安:长安大学,2019.
ZHU J H. Study on the influence of transverse bracing system on the deformation of enclosure structure of Foshan daliang foundation pit [D]. Xi' an; Changan University, 2019.

[15] 金亚兵,沈翔,劳丽燕. 温度变化对深基坑内支撑轴力和变形的影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2021,43(8):1417-1425.
JIN Y B,SHEN X,LAO L Y. Influences of temperature change on

axial force and deformation of inner support in deep foundation pits [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43 (8):1417-1425.

[16] 王琪明. 基坑混凝土支撑轴力监测系统与数据处理方法研究 [D]. 绵阳:西南科技大学,2021.
WANG Q M. Research on axial force monitoring system and data processing method of concrete bracing in foundation pit [D]. Mianyang; Southwest University of Science and Technology, 2021.