

DOI: 10.7672/sgjs2026040056

温度效应下干旱区深基坑支护结构 力学响应研究*

张小毛¹, 张琼武², 闫鑫雨³, 刘柱¹, 李登峰⁴

(1. 中交(广州)建设有限公司, 广东 广州 511400;

2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010;

3. 广东省市政轨道交通精建造工程技术研究中心, 广东 广州 510220;

4. 中国十九冶集团有限公司, 四川 成都 610031)

[摘要] 以西宁市某地铁车站基坑工程为研究背景, 采用数值模拟系统分析了温度效应下干旱区深基坑支护结构的力学响应规律。研究了不同环境温度、围护结构刚度、钢支撑弹性模量、线膨胀系数和支撑长度对钢支撑轴力的影响。研究表明: 环境温度升高会导致钢支撑轴力显著增大, 当围护结构混凝土强度等级提高时, 钢支撑轴力逐渐减小; 随着环境温度的增加, 钢支撑弹性模量和膨胀系数的增加同样加剧了轴力增长; 当钢支撑长度为63m时, 温度引起的轴力增量超过规范规定限值, 对基坑稳定性造成不利影响。在基坑开挖过程中, 应避免极端温度条件下进行钢支撑安装和预加轴力施工, 应优先选择热膨胀系数较低的钢材, 以控制温度变形对支护体系的不利影响。

[关键词] 地铁车站; 基坑; 温度效应; 钢支撑; 支护; 轴力

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0056-06

Research on Mechanical Response of Deep Foundation Excavation Support Structure in Arid Areas Based on Temperature Effect

ZHANG Xiaomao¹, ZHANG Qiongwu², YAN Xinyu³, LIU Zhu¹, LI Dengfeng⁴

(1. CCCC (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;

2. China Municipal Engineering Central South Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Municipal Rail Transit Lean Construction, Guangzhou, Guangdong 510220, China; 4. China 19th Metallurgical Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Taking a subway station foundation excavation project in Xining City as the research background, this paper employs a numerical simulation system to analyze the mechanical response patterns of the supporting structure in deep foundation excavations in arid regions under temperature effects. The influences of different environmental temperatures, retaining structure stiffness, elastic modulus of steel struts, linear expansion coefficients, and strut lengths on the axial force of steel struts are investigated. The results indicate that an increase in environmental temperature leads to a significant rise in the axial force of steel struts, while an improvement in the concrete grade of the retaining structure gradually reduces the axial force. As environmental temperature increases, the growth of the elastic modulus and expansion coefficient of steel struts further amplifies the axial force. When the steel strut length reaches 63m, the temperature-induced axial force increment exceeds the code-specified limit, adversely affecting the stability of the foundation excavation. During excavation, the installation and prestressing of steel struts should be avoided under extreme temperature conditions. Steel materials with lower thermal expansion coefficients should be prioritized to mitigate the unfavorable effects of thermal

* 中施企协科研课题([2025]37号)

[作者简介] 张小毛, 高级工程师, E-mail: 18520885169@139.com

[收稿日期] 2025-09-05

deformation on the support system.

Keywords: subway stations; foundation excavation; temperature effect; steel struts; supporting; axial force

1 工程概况

以西宁市某地铁车站基坑工程为研究背景,基坑南侧为主干路绿化带,东侧为外环高加桥,西侧和北侧为多层建筑。该基坑总长 180m,标准段宽度 25.7m,两端宽度 31.3m,最大深度 26.5m,基坑周边采用钻孔灌注桩+高压旋喷桩止水帷幕进行支护,钻孔灌注桩直径为 1 250mm,长 36.05m,相邻桩中心间距为 1.6m,高压旋喷桩直径为 1.05m,相邻桩中心间距为 1.45m。基坑内部采用钢支撑进行支护,钢支撑随着开挖深度分 5 层进行支护,第 1~2 层钢支撑直径为 609mm,厚 16mm,第 3~5 层钢支撑直径为 800mm,厚 16mm。

在基坑开挖区,最上层为杂填土,杂填土下依次为粉质黏土、含砾黏质粉土,杂填土呈灰褐色、灰黄色,以粉质黏土为主,内含建筑垃圾,粉质黏土为土黄色,土质均匀,含少量砂姜石颗粒,含砾黏质粉土呈浅黄色,颗粒成分泥浆、砂岩,分布不均匀。地下水主要为裂隙潜水和孔隙潜水,水位埋深为 6.8~8.4m,因此在施工过程中需进行降水。

2 数值模型建立

2.1 模型建立

根据基坑现场情况,采用 ABAQUS 有限元软件建立模型进行模拟计算,设置基坑长 180m、标准段宽度为 25.7m、两端宽度为 31.3m,深 26.5m。为减小边界效应,设置模型长 260m、宽 180m、高 80m,如图 1 所示。

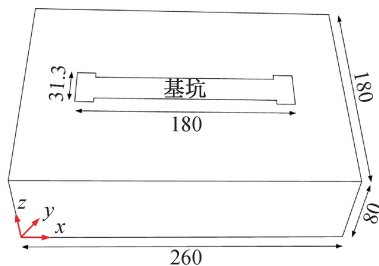


图 1 有限元模型(单位:m)

Fig. 1 Finite element model(unit:m)

2.2 边界条件及计算参数

在建模过程中,在模型底部添加固定约束,在模型四周约束法向位移,模型顶面为自由界面。设置土体为具有莫尔-库仑准则的弹塑性材料,基坑支护结构为理想弹塑性材料,基坑支护结构包括钻孔灌注桩及钢支撑。由于支护结构钻孔灌注桩桩体由单桩组成,在成拱效应下,其受力方式与地下连

续墙相似,因此,本文以地下连续墙替代钻孔灌注桩,墙体厚度采用抗弯刚度等效法计算:

$$\frac{1}{12}(D+t)h^3 = \frac{1}{64}\pi D^3 \quad (1)$$

式中: D 为桩体直径(m); t 为桩间净间距(m); h 为墙厚(m)。

当环境温度不同时,基坑支护结构在热胀冷缩效应下发生热应变,支撑长度变化如下:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (2)$$

式中: Δl 为支护结构长度热应变的变化量; α 为支护结构的线膨胀系数; ΔT 为温度差($^{\circ}\text{C}$); L 为支护结构长度(m)。当结构产生热膨胀时,结构因膨胀产生的初始线应变计算公式为:

$$\varepsilon_0 = \alpha(\phi - \phi_0)[111000]^T \quad (3)$$

式中: α 为线膨胀系数; ϕ_0 为初始温度场($^{\circ}\text{C}$); ϕ 为稳态和瞬态温度场($^{\circ}\text{C}$)。

根据土层情况及 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》,各材料物理力学参数如表 1 所示。

表 1 各材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each material

名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	线膨 胀系 数
杂填土	17.2	7.3	0.31	9.8	12	—
粉质黏土	18.7	10.6	0.32	19.5	16	—
含砾黏质粉土	19.6	15.6	0.33	28.4	38	—
地下连续墙	25.6	3.0×10^4	0.22	—	—	—
止水帷幕	25.2	3.0×10^4	0.22	—	—	—
钢支撑	78.6	2.02×10^5	0.24	—	—	1.32×10^{-5}

2.3 开挖工序及研究方案

基坑开挖深度 26.5m,在基坑开挖过程中,采用分层开挖,土体每次开挖深度 $\leq 2\text{m}$ 。土体开挖步骤为:①钻孔灌注桩施工;②第 1 次开挖,开挖后安装第 1 道钢支撑;③第 2 次开挖,开挖后安装第 2 道钢支撑,然后依次循环开挖;④开挖至基坑底部,开挖后安装第 5 道钢支撑。1~5 道钢支撑分别距地表 1.65,7.83,12.98,18.13,21.12m。

为研究温度效应下基坑支护结构的力学效应,本次研究设置 5 种环境温度: -8°C , 0°C , 12°C , 22°C , 32°C ;设置 3 种不同的围护结构弹性模量,即围护结构混凝土强度等级:C30,C35,C40;设置 3 种钢支撑弹性模量: 2.02×10^5 , 2.17×10^5 , 2.32×10^5 MPa;设置 3 种钢支撑线膨胀系数: 1.12×10^{-5} ,

1.32×10^{-5} , 1.62×10^{-5} ; 设置3种钢支撑长度: 23, 43, 63m, 并根据钢支撑长度改变基坑宽度。

3 温度效应下支护结构力学响应分析

3.1 温度对地下连续墙变形的影响

结合式(1), 在基坑开挖过程中, 环境温度为 22°C , 当环境温度升高至 32°C 时, 基坑地下连续墙在 y 方向的水平位移分布如图2所示。

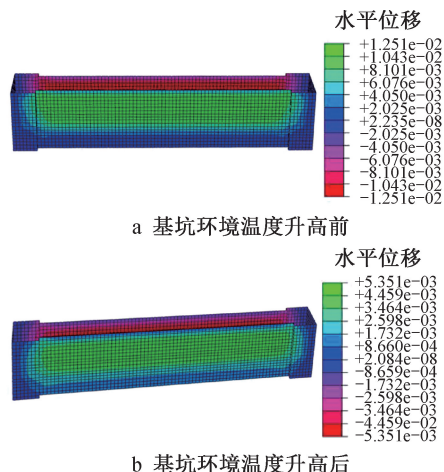


图2 不同环境温度下地下连续墙的水平位移(单位:m)

Fig. 2 Horizontal displacement distribution of underground continuous wall under different environmental temperatures (unit: m)

由图2可知, 在环境温度升高前, 基坑地下连续墙在 y 方向的最大水平位移主要集中在墙体长边中上部, 最大水平位移为 1.25cm , 从墙体中部至基坑底部, 墙体在 y 方向的水平位移逐渐减小。在环境温度升高后, 基坑地下连续墙在 y 方向的最大水平位移逐渐减小, 但最大水平位移分布范围无明显变化, 墙体的最大水平位移为 0.54cm 。可见, 随着温度的增大, 基坑地下连续墙的最大水平位移逐渐减小。

3.2 围护结构刚度对支撑轴力的影响

选取第1~3道钢支撑为研究对象, 在不同环境温度下, 当围护结构的弹性模量变化时, 即混凝土的强度等级分别为 C30, C35, C40 时, 基坑钢支撑轴力变化如图3所示。

在相同混凝土强度下, 随着环境温度的增加, 第1道钢支撑的轴力逐渐增大, 这是由于环境温度升高使钢支撑产生显著的伸长变形趋势, 但基坑两侧的混凝土围护结构会对其伸长形成约束, 由于混凝土围护结构整体刚度大、变形受限, 无法随钢支撑自由伸长, 从而导致钢支撑被强行约束, 这种约束会在钢支撑内部产生温度附加应力, 从而表现为轴力增大。当混凝土强度相同时, 温度越低, 钢支撑产生收缩变形趋势越大, 在此阶段, 约束作用表

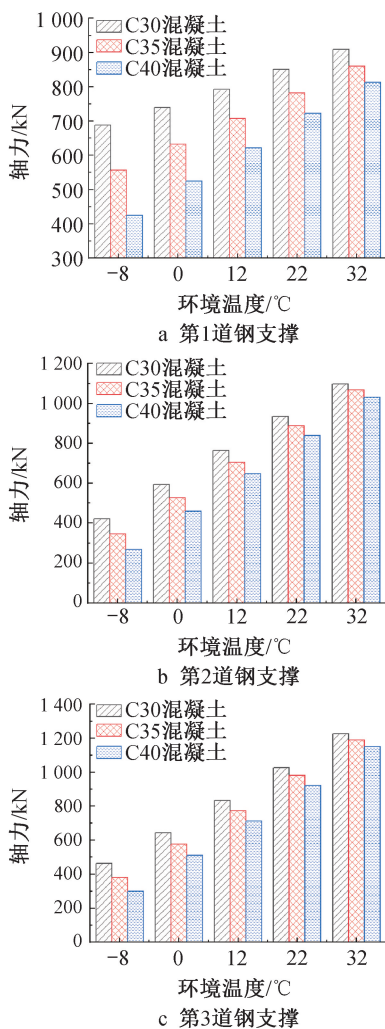


图3 不同围护结构弹性模量下钢支撑轴力变化

Fig. 3 Changes in axial force of steel support under different elastic moduli of enclosure structures

现为限制收缩, 产生的附加应力远小于限制伸长的应力, 因此钢支撑轴力减小。当混凝土强度等级为 C30 时, 围护结构抵抗变形能力弱, 无法承担过多侧向荷载, 大部分荷载需由钢支撑承担, 因此钢支撑轴力最大。当混凝土强度等级增大至 C40 时, 围护结构自身能承担更多侧向荷载, 钢支撑承担荷载的比例降低, 在此阶段, 第1道钢支撑的轴力最小。

当基坑施工到第2道钢支撑时, 在不同混凝土强度和环境温度下, 第2道钢支撑的轴力变化趋势与第1道钢支撑基本一致。在相同环境温度下, 随着混凝土强度的增大, 第2道钢支撑的轴力逐渐减小。在相同混凝土强度条件下, 当温度较低 (-8°C) 时, 围护结构整体收缩, 钢支撑对灌注桩的约束力度减弱, 仅需承担少量因收缩产生的拉力或土压力传递的轴力, 轴力减小。当温度升高 (32°C) 时, 结构整体膨胀, 灌注桩有向基坑内侧膨胀位移的趋势, 钢支撑有沿水平方向伸长的趋势, 但两者均被

刚性连接约束,无法自由变形,在此阶段,膨胀产生的推力全部转化为钢支撑的轴向压力,且温度越高,热膨胀变形量越大,钢支撑的轴力越大。当基坑施工到第3道钢支撑时,在不同混凝土强度和环境温度下,第3道钢支撑的轴力变化趋势与第1,2道钢支撑基本一致。

3.3 钢支撑材料参数的影响

3.3.1 弹性模量的影响

选取第1道钢支撑为研究对象,在不同环境温度下,当钢支撑弹性模量分别为 2.02×10^5 , 2.17×10^5 , 2.32×10^5 MPa 时,基坑钢支撑轴力变化如表2所示。

表2 不同钢支撑弹性模量下钢支撑轴力变化

Table 2 Changes in axial force of steel supports under different elastic moduli of steel supports

钢支撑	弹性模量/MPa	不同环境温度下的钢支撑轴力/kN				
		-8℃	0℃	12℃	22℃	32℃
第1道	2.02×10^5	436.41	503.98	569.38	637.98	703.90
	2.17×10^5	556.51	632.11	706.89	782.18	860.77
	2.32×10^5	677.02	764.36	849.34	934.31	1022.28
第2道	2.02×10^5	328.88	501.71	673.31	846.04	1019.49
	2.17×10^5	345.67	526.64	705.24	887.14	1066.46
	2.32×10^5	357.00	550.74	737.89	916.91	1099.53
第3道	2.02×10^5	376.36	569.80	761.79	963.67	1172.35
	2.17×10^5	381.31	576.39	771.57	979.84	1189.96
	2.32×10^5	386.46	582.36	772.81	993.23	1207.68

由表2可知,相同环境温度下,随着钢支撑弹性模量的增大,3道钢支撑的轴力逐渐增大。在相同钢支撑弹性模量下,随着环境温度的增大,钢支撑的轴力也逐渐增大。钢支撑轴力遵循材料力学胡克定律,在相同环境温度下,由于钢支撑两端顶紧围护结构,围护结构变形会直接转化为钢支撑的压缩量,当钢支撑的压缩量和钢支撑的长度固定不变时,钢支撑的弹性模量越大,其轴力也相应越大。在相同钢支撑弹性模量条件下,随着环境温度的升高,钢支撑的热膨胀趋势被围护结构强制限制,产生附加压缩应变,总应变逐渐增大,从而导致第1道钢支撑轴力逐渐增大。

钢支撑的弹性模量是材料抵抗变形能力的核心指标,弹性模量越大,材料刚度越大,越难以被压缩或拉伸,钢支撑弹性模量较小时,钢支撑刚度小,只需相对较小的轴力,就能产生足够的变形量来匹配围护结构的变形。钢支撑弹性模量增大时,钢支撑强度增大,要产生相同的变形量抵消围护结构变形,需更大的轴力。因此,在相同环境温度条件下,第2道钢支撑的弹性模量越大,其轴力也相应越大。在钢支撑弹性模量相同条件下,钢支撑因环境温度变化产生热胀萎缩变形。温度升高时,钢支撑表现

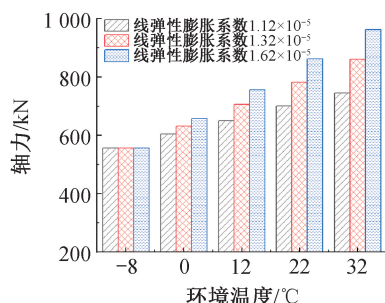
出伸长趋势,围护结构限制其伸长变化,钢支撑被挤压,产生轴向压力,且温度越高,伸长趋势越强烈,相应的轴力越大。

在不同钢支撑弹性模量和环境温度下,第3道钢支撑的轴力变化趋势与第1,2道钢支撑基本一致。在相同环境温度下,随着钢支撑弹性模量的增大,第3道钢支撑的轴力逐渐增大,但增大趋势不明显。在相同钢支撑弹性模量下,随着环境温度的增大,第3道钢支撑的轴力逐渐增大,增大趋势显著。

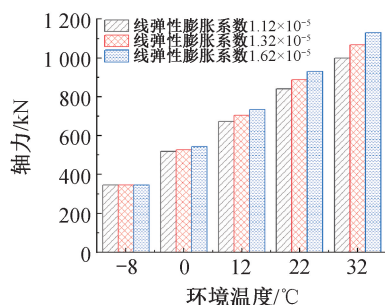
综上所述,相同温度下,钢支撑弹性模量的增大对其轴力的影响有限。在相同钢支撑弹性模量下,环境温度增大对其轴力的变化影响显著。

3.3.2 线膨胀系数的影响

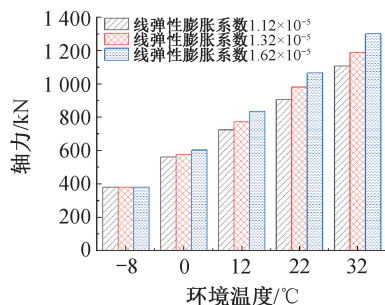
选取3道钢支撑为研究对象,在不同环境温度下,当钢支撑线膨胀系数分别为 1.12×10^{-5} , 1.32×10^{-5} , 1.62×10^{-5} 时,基坑钢支撑轴力变化如图4所示。



a 第1道钢支撑轴力变化



b 第2道钢支撑轴力变化



c 第3道钢支撑轴力变化

图4 不同钢支撑线弹性膨胀系数下的钢支撑轴力变化

Fig. 4 Changes in axial force of steel support under different elastic expansion coefficients of steel support lines

在相同钢支撑线膨胀系数下,随着环境温度的增大,第 1 道钢支撑轴力总体随之增大。在环境温度为 -8°C 条件下,当钢支撑线膨胀系数分别为 1.12×10^{-5} , 1.32×10^{-5} , 1.62×10^{-5} 时,钢支撑轴力基本相等。当环境温度增大至 32°C 时,第 1 道钢支撑轴力分别增大至 745.82,860.77,962.74kN,增大幅度明显,且环境温度越高,钢支撑轴力越大。

在相同温度条件下,随着线弹性膨胀系数的增大,第 1 道钢支撑轴力随之增大。在不同环境温度和钢支撑线膨胀系数条件下,第 2,3 道钢支撑轴力变化趋势与第 1 道钢支撑阻力基本一致。

当钢支撑的线膨胀系数相同时,环境温度升高时,钢支撑因热胀产生伸长变形的趋势,由于钢支撑两端被围护结构限制,伸长变形被强制约束,在该强制约束下,钢支撑内部产生附加压力,即钢支撑的轴力,温度越高,被约束的变形越显著,钢支撑的轴力随之增大。

3.3.3 支撑长度影响

当钢支撑长度为 23,43,63m 时(根据钢支撑长度相应改变基坑宽度,其余参数不变),基坑钢支撑轴力变化如表 3 所示。

表 3 不同钢支撑长度下钢支撑轴力变化

Table 3 Changes in axial force of steel supports under different lengths of steel supports

钢支撑 长度/m	不同环境温度下钢支撑轴力/kN				
	-8°C	0°C	12°C	22°C	32°C
23	451.86	500.07	554.86	592.15	649.72
43	408.70	490.59	563.72	646.12	724.19
63	365.44	472.26	587.82	681.14	787.23

由表 3 可知,随着环境温度的增大,不同钢支撑长度下钢支撑轴力逐渐增大。当环境温度为 32°C 时,相比温度为 -8°C 时,钢支撑轴力分别增大 43.79%,77.19%,115.42%,增大幅度显著。当环境温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 时,随着钢支撑长度的增大,钢支撑轴力逐渐减小,当环境温度 $>0^{\circ}\text{C}$ 时,随着钢支撑长度的增大,钢支撑轴力逐渐增大。当钢支撑长度为 63m 时,相比长度为 23m 时,钢支撑轴力增大了 21.16%,超过《建筑基坑支护技术规程》规定限值,因此,在不同温度下,钢支撑长度越大,对基坑的稳定性影响越大。

4 工程建议

环境温度越高,对基坑钢支撑轴力的影响越大,由于不同钢材的热膨胀系数也不同,因此,在实际基坑工程进行钢支撑支护时,在满足支护强度和力学性能要求的条件下,应选择热膨胀系数相对小的钢材,减小钢支撑因温度变化产生变形。布设钢

支撑过程中,可采用多重支护体系,在关键部位布设备用支撑或采用交叉支撑的方式进行支护,当部分钢支撑由于温度效应产生变形,或内力发生变化时,其他支撑可分担荷载,保证基坑的稳定性。合理设置支撑间距,并根据基坑开挖区环境气温变化范围、钢支撑规格等因素对钢支撑间距进行优化,间距小的钢支撑可减小单根支撑的变形,但会增加材料用量和施工难度,间距大的钢支撑,可单根支撑在温度作用下产生大的变形,同时在钢支撑的连接部位或适当位置预留伸缩缝,允许钢支撑在温度变化时有一定的伸缩空间。

在基坑开挖过程中,避免在极端温度条件下进行钢支撑的安装和预加轴力施工,应选择气温稳定的季节或时段进行施工,可减小温度变化对钢支撑初始状态的影响。工期紧张时,当必须在温度变化大的时期进行施工时,可采取相应的温控措施,对钢支撑进行遮阳处理,或适当加热后使其接近环境温度后再安装。

5 结语

1)随着环境温度的增大,基坑地下连续墙的最大水平位移逐渐减小,不同围护结构混凝土强度等级下的钢支撑轴力逐渐增大,当围护结构混凝土强度等级增大时,钢支撑轴力逐渐减小。

2)随着环境温度的增大,不同钢支撑弹性模量下的钢支撑轴力逐渐增大,在环境温度相同条件下,随着钢支撑弹性模量的增大,钢支撑轴力逐渐增大,但增大幅度不大,对钢支撑轴力影响小。当环境温度增大时,在不同钢支撑线膨胀系数下,钢支撑轴力随之增大,环境温度越高,钢支撑线膨胀系数越大,钢支撑轴力越大。

3)随着环境温度的升高,不同钢支撑长度下钢支撑轴力逐渐增大,在环境温度为 32°C 条件下,当钢支撑长度为 63m 时,相比长度为 23m 时,钢支撑轴力增大了 21.16%,增大幅度显著,已超过规范规定限值,将对基坑稳定性产生不利的影响。

4)在实际基坑工程进行钢支撑支护时,选择热膨胀系数相对小的钢材,可减少钢支撑因温度变化产生变形。合理设置支撑间距,并根据基坑开挖区环境气温变化范围、钢支撑的规格等因素对钢支撑间距进行优化,同时在钢支撑的连接部位或适当位置预留伸缩缝,允许钢支撑在温度变化时有一定的伸缩空间。

参考文献:

- [1] 朱虎成,马鑫磊,张晓伦.温度骤降对混凝土内支撑结构体系的变形影响分析及建议[J].广东土木与建筑,2024,31(9):

- 76-79.
- ZHU H C, MA X L, ZHANG X L. Analysis and suggestion on the influence of temperature plunge on the deformation of concrete internal support structure system [J]. *Guangdong architecture civil engineering*, 2024, 31(9): 76-79.
- [2] 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.
- [3] 秦杏春. 饱和软黄土层深基坑支护与降水施工技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(13): 115-119.
- QIN X C. Construction technology of deep foundation excavation support and dewatering in saturated soft loess stratum [J]. *Construction technology*, 2024, 53(13): 115-119.
- [4] 任文峰, 赵鹏飞, 黄勤, 等. 冻融循环对长春典型土层深基坑开挖变形及稳定性影响分析[J]. *建材技术与应用*, 2024(1): 26-31.
- REN W F, ZHAO P F, HUANG Q, et al. Analysis of effects of freeze-thaw cycles on deformation and stability of deep foundation pit excavation in typical soil layers in Changchun [J]. *Research & application of building materials*, 2024(1): 26-31.
- [5] 韦钦闯, 孙超, 郭浩天, 等. 长春市某越冬深基坑桩锚支护结构受力变形监测与数值模拟对比分析[J]. *吉林建筑大学学报*, 2024, 41(1): 67-71.
- WEI Q C, SUN C, GUO H T, et al. Comparative analysis of stress deformation monitoring and numerical simulation of pile-anchor supporting structure of a deep foundation pit in winter in Changchun [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2024, 41(1): 67-71.
- [6] 何彦伟, 黄杰. 饱和软黄土地区深基坑支护施工技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(8): 97-102.
- HE Y W, HUANG J. Construction technology of deep foundation excavation support in saturated soft loess low area [J]. *Construction technology*, 2025, 54(8): 97-102.
- [7] 张新, 邵伟汉, 王俊增. 超深基岩基坑分段支护及底板抗浮控制技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(12): 154-161.
- ZHANG X, SHAO W H, WANG J Z. Segmented support of the ultra-deep bedrock foundation excavation and anti-floating control technology of bottom plate [J]. *Construction technology*, 2024, 53(12): 154-161.
- [8] 徐长剑, 李大华, 刘一博, 等. 大跨度下基坑支护结构体系受力及变形分析[J]. *兰州工业学院学报*, 2024, 31(5): 35-41.
- XU C J, LI D H, LIU Y B, et al. Stress and deformation analysis of a large-span support structure system [J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2024, 31(5): 35-41.
- [9] 何林南. 软土地区某复杂边界条件深大基坑支护设计与分析[J]. *建筑施工*, 2024, 46(10): 1687-1692.
- HE L N. Study and analysis of complex deep foundation pit support with complex boundary conditions in soft soil area [J]. *Building construction*, 2024, 46(10): 1687-1692.
- [10] 赖汶龙, 樊东昌, 蒋倩. 深基坑施工过程中支护结构变形分析[J]. *砖瓦*, 2024(10): 77-79.
- LAI W L, FAN D C, JIANG Q. Deformation analysis of supporting structure during deep foundation pit construction [J]. *Brick-tile*, 2024(10): 77-79.
- (上接第 34 页)
- [5] 张胜, 吕仁杰, 黄岩. 建筑废弃物在虹桥综合交通枢纽工程中的应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2009(8): 210-213.
- ZHANG S, LÜ R J, HUANG Y. Application of building waste matters in Hongqiao comprehensive traffic hub project [J]. *Urban roads bridges & flood control*, 2009(8): 210-213.
- [6] LIU L L, LI Z, CAI G J, et al. Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 259: 120977.
- [7] 张志跃, 杨军强, 魏振国, 等. 建筑垃圾在高速公路上的应用研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(4): 46-48, 61.
- ZHANG Z Y, YANG J Q, WEI Z G, et al. Research on the application of construction waste on expressways [J]. *Construction technology*, 2022, 51(4): 46-48, 61.
- [8] ZHANG J H, DING L, LI F, et al. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 255: 120223.
- [9] 高志兴. 建筑垃圾路基填筑技术[J]. *城市道桥与防洪*, 2020(1): 30-33, 9-10.
- GAO Z X. Construction waste subgrade filling technology [J]. *Urban roads bridges & flood control*, 2020(1): 30-33, 9-10.
- [10] 胡栾乔, 谭强, 朱曙光. 大吨位、高激振力压路机应用于红砂岩、泥岩路基填筑施工技术[J]. *工程建设与设计*, 2021(2): 202-203.
- HU L Q, TAN Q, ZHU S G. The application of large tonnage and high exciting force roller in red sandstone and mudstone subgrade filling construction technology [J]. *Construction & design for project*, 2021(2): 202-203.
- [11] 谢军, 房格莉, 魏振国. 建筑垃圾粗骨料含量对路用性能的影响与工程应用[J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(10): 101-106.
- XIE J, FANG G L, WEI Z G. Influence of coarse aggregate content of construction waste on road performance and engineering application [J]. *Construction technology*, 2022, 51(10): 101-106.