

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202501032



# 温度作用下高精电子厂房开洞 华夫板的力学性能分析

杨超祺<sup>1</sup>, 陈连健<sup>2</sup>, 方四宝<sup>2</sup>, 向勇<sup>2</sup>, 李海锋<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 上海宝冶集团有限公司, 上海 201900)

**摘要:** 为分析不设置伸缩缝的开洞华夫板受温度影响下楼板的应力及裂缝响应, 采用 ABAQUS 有限元分析软件对开洞华夫板进行仿真模拟, 对比工程实际, 得到该类楼板在不同尺寸及温度变化下的应力、变形情况。结果表明: 在日常温度变化下, 核心区楼板均不超过计算应力限值, 位移最大与应力集中主要出现在板柱节点处; 随着混凝土强度上升, 同温差下整体应力无明显变化, 增量不大于 2%, 但楼板厚度的增加会导致应力突变及变形趋势的改变; 考虑对跨度较大的钢筋混凝土楼板进行分块施工, 合理控制板块间的温差为 15~30 °C, 有利于整体浇筑后楼板的应力均匀分布。

**关键词:** 温度作用; 开洞华夫板; 有限元模拟; 超长混凝土

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)03-0272-11

## Mechanical Performance Analysis of Perforated Waffle Plate in High-Precision Electronic Factory Building Under Temperature Effect

YANG Chaoqi<sup>1</sup>, CHEN Lianjian<sup>2</sup>, FANG Sibao<sup>2</sup>,  
XIANG Yong<sup>2</sup>, LI Haifeng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Shanghai Baoye Group Limited Company, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** In order to analyze the stress and crack response of the floor under temperature influence in perforated waffle plate without expansion joints, the ABAQUS finite element analysis software is used to simulate the perforated waffle plate, comparing with the engineering practice, the stress and deformation of this kind of floor under different sizes and temperature variations are obtained. The results show that under the daily temperature variation, the floor in the core area does not exceed the calculation stress limit, and the maximum displacement and stress concentration mainly appear at the slab-column joints. With the increase of concrete strength, the overall stress has no obvious change under the same temperature difference, and the increment is less than 2%, but the increase of floor thickness leads to the sudden change of stress and the change of deformation trend. Considering the block construction of the reinforced concrete floor with large span, the reasonable control of the temperature difference between plates within 15-30 °C is beneficial to the uniform stress distribution in the floor after monolithic pouring.

收稿日期: 2025-01-20

通信作者: 李海锋(1983-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事钢结构的研究。E-mail: lihaifeng@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省科技计划项目对外合作项目(2024I0015)

**Keywords:** temperature effect; perforated waffle plate; finite element simulation; super-long concrete

光电产业已成为新一代信息技术的重要支撑,对推动数字经济、智能制造等战略性新兴产业的发展起到关键性作用。开洞华夫板在高精度电子厂房中具有独特的结构优势,其楼板表面均匀分布的孔洞能够形成有效的回风通道,防止尘埃的附着,实现空气循环,满足高精仪器的洁净度要求。同时,大体积楼板的设计与密肋交叉梁系有利于管线布置,能够极大地提高空间利用率,该设计与隔层的微振柱体系一起组成了楼层结构的防微振系统,确保电子厂房的稳定性和安全性。随着光电产业的不断发展,华夫板将会作为主要楼板结构得到广泛的应用。

目前,国内外学者对于这类超长混凝土无梁楼板结构在温度作用下的力学性能已进行了较多研究。丁然等<sup>[1]</sup>针对超高性能混凝土(UHPC)华夫板,开展 4 点支承和 4 边支承条件下弹性和弹塑性工况的静力加载试验,探讨了不同边界条件对华夫板受力性能的影响。郑晓芬<sup>[2]</sup>分析了采用预应力措施控制超长混凝土结构温度裂缝的可行性,并从建材、设计、施工等 3 方面对超长混凝土结构裂缝控制提出建议。郑伟等<sup>[3]</sup>通过对大体积混凝土试块的实验及有限元模拟,发现考虑水化影响的混凝土温度场分析相较于传统温度场计算更接近实际。对于净高与管线布置具有特殊要求的电子厂房开洞无梁楼盖结构,陈春超等<sup>[4]</sup>发现老混凝土对新混凝土收缩变形,以及混凝土表里温差形成的约束作用是引起大体积混凝土早期开裂的因素。朱兆聪等<sup>[5]</sup>发现气温骤降可使超长混凝土内部提前达到稳态,且不同龄期影响程度不同。盛海洋<sup>[6]</sup>采用超声回弹法进行混凝土测强,明确不同龄期对混凝土内部碳化程度具有明显的影响。朱伯芳<sup>[7]</sup>改进传统公式,推导了考虑气温变化及水化放热影响的大体积混凝土温度场计算方法。张寒硕等<sup>[8]</sup>提出一种兼顾环境温度、日照辐射和混凝土水化放热条件的超长混凝土温度场计算方法,并对大体积混凝土结构的后浇带施工提出指导建议。王冬晔等<sup>[9]</sup>对比了模拟结果与规范曲线,证明有限元模拟钢筋混凝土板柱结构受温度场作用的可行性。Zhu 等<sup>[10]</sup>采用自行研发的溫度应力试验机(TSTM),测试混凝土由温度或收缩引起的开裂破坏行为,发现由于混凝土的低导热性,构件的核心温度可快速增加但难以消散,导致核心与表面之间的显著温差,可能引起较大的热应力。Hu 等<sup>[11]</sup>对现场实测的大体积混凝土浇筑温度进行研究,发现不同月份的环境温度对新浇筑混凝土核心区不同深度的温度演化具有显著影响。Li 等<sup>[12]</sup>通过算例与理论推导,论证有限元模拟大体积混凝土在温度应力影响下裂缝拓展的可行性。Zhang 等<sup>[13]</sup>对局部空气传热影响下的大体积混凝土温度和应力进行计算,明确对于空间相对封闭的大体积混凝土,内部空气的升温会影响中心混凝土的温度和拉应力。Zhao 等<sup>[14]</sup>采用数值模拟方法研究水化热参数对混凝土的影响,发现提高混凝土导热系数可以降低混凝土最高温度。Ouyang 等<sup>[15]</sup>利用光学反射仪等装备建立分布温度监测系统,为大体积混凝土实现智能温控创造条件。然而,在电子厂房尤其是面板厂房中,开洞华夫板(下文简称华夫板)单一结构单元平面尺寸超长,已经极大超出规范允许的可不考虑温度作用的结构单元尺寸。在分析温度作用时,这类特殊结构需要综合考虑施工、正常使用等不同阶段的影响因素。目前,多数研究主要针对超长混凝土结构或连续无梁楼盖结构,对于具有较多洞口的电子厂房华夫板,其温度取值及相应的温度配筋主要依靠同类项目经验,缺乏准确量化的依据及手段。因此,本文基于厦门天马光电子有限公司面板生产线项目,建立阵列厂房局部有限元模型,对温度作用下高精电子厂房开洞华夫板的力学性能进行分析。

# 1 工程概况

该项目为厦门天马光电子有限公司第 8.6 代新型显示面板生产线,位于福建省厦门市翔安区内田溪路以东、溪东路以西、舫阳东路以南、内垵大道以北的围合范围之内。项目总占地面积 65 万 m<sup>2</sup>,总建筑面积 101 万 m<sup>2</sup>。其中,阵列厂房占地面积 10.1 万 m<sup>2</sup>。厂房分为核心区、支持区两部分,结构形式为框架混凝土结构,混凝土屋面。厂房的 3 层和混凝土屋面为梁板结构,2 层和 4 层为华夫板结构。

筒体由顶盖、ABS 材质钢筒底座、镀锌钢筒本体及固定螺杆等部分组成。施工时,除模具本体外,底座、顶盖及配件均可循环使用。施工过程中,华夫板支撑采用 60 盘扣架,能够有效避免华夫板下沉等不利影响。工程效果图与现场图,如图 1 所示。

为了监测楼板在施工过程中的温度及应变数值,已在浇筑前期埋入相应的应变计。混凝土应变计

是根据振弦原理制造,安装于混凝土结构内部,监测混凝土内部应变变化。内置的温度传感器可同时监测环境温度,并对温度影响进行自动补偿修正。应变计布置示意图,如图 2 所示。

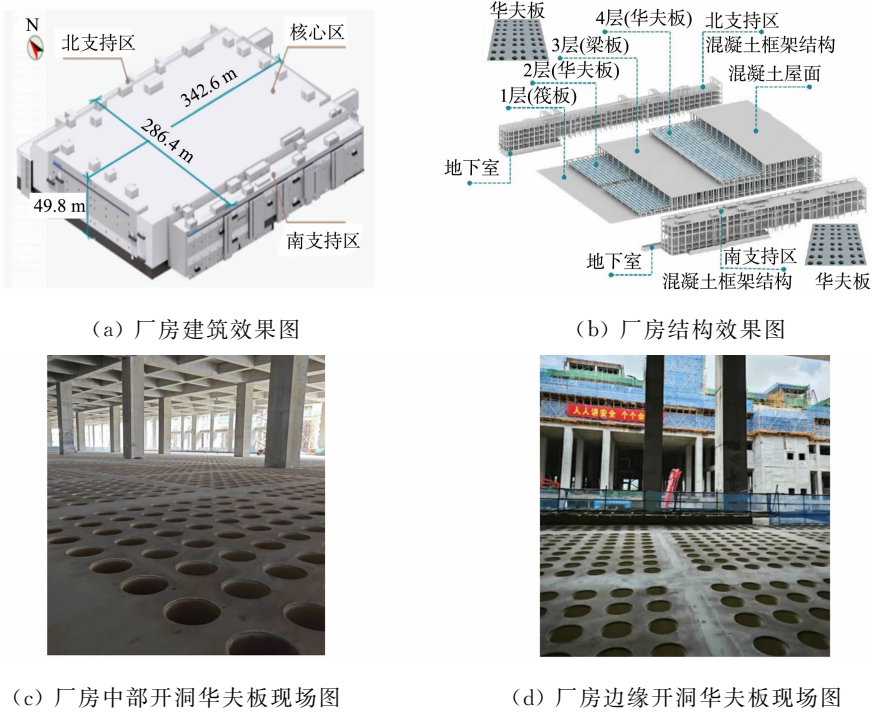


图 1 项目效果图与现场图

Fig. 1 Effect diagrams and site diagrams of project

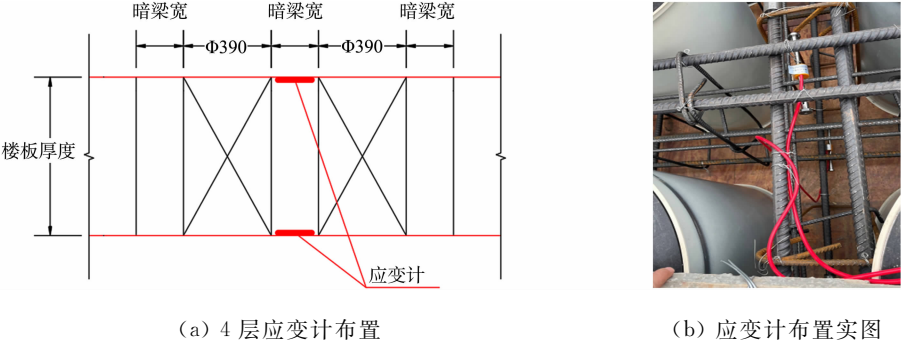


图 2 应变计布置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagrams of strain gauge arrangement (unit: mm)

2 楼板温度应力计算

在弹性阶段,分析温度对华夫板超长混凝土结构的影响时,需引入混凝土收缩当量温差,以考虑混凝土收缩导致的温度应力不均匀<sup>[16]</sup>。分析当日温差下的华夫板内温度应力可不考虑徐变效应。

2.1 混凝土收缩当量温差

由于水泥水化放热引起华夫板混凝土内部高温,当降至环境温度时,就存在收缩现象。在计算温度应力时,需将混凝土收缩变形转换为混凝土收缩当量温差( $t_1$ ),即

$$t_1 = \epsilon_c^T / \alpha_c, \tag{1}$$

$$\epsilon_c^T = \epsilon_{y0} (1 - e^{-0.01T}) \times \prod_{i=1}^n M_i. \tag{2}$$

式(1)、(2)中: $\alpha_c$  为混凝土线膨胀系数,取  $1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\epsilon_c^T$  为混凝土在任意时间  $T$  下的收缩量,文中  $T$  取混凝土龄期; $\epsilon_{y0}$  为标准状态下混凝土的最终收缩量,取  $3.24 \times 10^{-4}$ ;  $M_i$  为修正系数, $i$  取 1~9(修正系数与水泥品种、水灰比、环境湿度等影响因素有关),取值方法参考文献[17]。

混凝土修正系数,如表 1 所示。表 1 中:水力半径倒数按中心板厚 75 cm,宽 600 cm 进行计算;混凝土强度等级为 C30,环境湿度取厦门市 2023 年 6 月的平均值。经计算,可以得到混凝土收缩当量温差  $t_1=10.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,近似取  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 混凝土修正系数  
Tab. 1 Correction coefficients of concrete

影响因素	工程实际	$M_i$	影响因素	工程实际	$M_i$
水泥品种	普通硅酸盐水泥	$M_1=1.000$	初期养护时间/d	7	$M_6=1.000$
水泥细度/ $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$	3 500	$M_2=1.070$	环境湿度/%	70	$M_7=0.770$
骨料	砾砂	$M_3=1.000$	水力半径倒数	0.03	$M_8=1.120$
水灰比	0.45	$M_4=1.105$	振捣方式	机械振捣	$M_9=1.000$
水泥浆量/%	28	$M_5=1.350$			

2.2 华夫板结构的外部温度

气象温差主要分为以下 3 种类型。1) 日照温差。由于太阳辐射在不同时间段(特别是白天和夜晚)对地表或物体产生的加热和冷却效应,从而导致温度差异,属于时间跨度相对较短的温差变化,在此类温差计算中,通常不考虑混凝土的徐变效应。2) 季节温差。它反映一个年度内,气温随着季节变化而产生的显著差异,这种差异主要体现在不同季节之间的温度变化,通常以一年为周期,表现出有规律的变化。3) 骤降温差。它主要是指由于突发性的气象事件(如冷空气突然侵袭,或在阳光暴晒后紧接着遭遇暴雨等情况)导致的温度急剧下降现象。采用日照温差( $t_2$ )作为变量分析,依据厦门市 2023 年 6 月的日照温差情况,按不利取值,可得  $t_2=7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 温度应力

结构总温差  $t=t_1+t_2=18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相较于整体结构,模型尺寸较小,结构刚度大,将该模型近似为二维全约束边界情况,在此边界条件下,混凝土板最大温度应力( $\sigma_{\max}$ )<sup>[17]</sup>为

$$\sigma_{\max}=-\left(E_c\alpha_c t/(1-\mu)\right)=-0.077。 \tag{3}$$

式(3)中: $E_c$ 为混凝土弹性模量; $\mu$ 为泊松比。

3 有限元数值模拟

3.1 基本假定

为研究温度作用的占比及其对结构的影响,保证模拟数据准确,做以下 4 个基本假定。1) 根据圣维南原理,采用测点周围一跨框架华夫板模型进行分析。2) 在边界条件方面,考虑上、下两层钢筋混凝土柱的约束作用,将约束设置在柱端,以最大柱为主要约束。3) 在设置初始受力条件时,楼板模型未承担其他荷载,假定仅受自重作用,在此基础上考虑温度影响。4) 建立的局部模型比实际整体模型尺寸小,假定变形处在弹性阶段。

3.2 模型尺寸与单元类型

为了避免模拟数据受边界效应影响,采用测点四周一跨距离建模,相邻孔洞间均有钢筋笼作为板筋支撑。钢筋笼混凝土柱、楼板均采用实体单元(C3D8R)进行模拟,钢筋均采用桁架单元(T3D2)进行模拟,并通过内置区域操作模拟钢筋与混凝土的粘结。选取 4 层楼板中部的测点(测点 12-M)与边缘一榀框架的测点(测点 3-F)进行模型模拟。测点模型尺寸,如表 2 所示。

表 2 测点模型尺寸  
Tab. 2 Model sizes of measuring points

参数	测点 12-M	测点 3-F
楼板尺寸(长×宽)/m×m	16.8×16.8	16.8×16.8
上层柱高/m	14.45	14.45
下层柱高/m	7.05	7.05
华夫板孔洞直径/mm	390	390
华夫板孔洞间距/mm	210	210
楼板厚度/mm	750	650

测点 3-F 变截面梁高为 810 mm,其余梁高为 650 mm;测点 12-M 模型梁高为 750 mm。华夫板整体几何模型及网格划分,如图 3 所示。

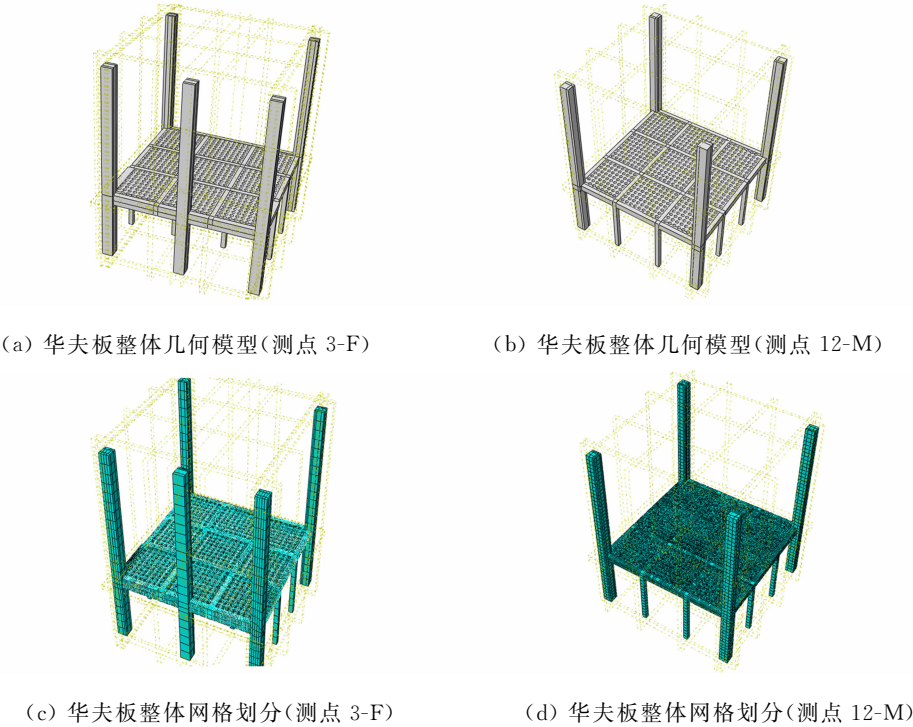


图 3 华夫板整体几何模型及网格划分

Fig. 3 Overall geometric model and mesh division of waffle board

3.3 荷载条件

依据实际工程条件,在未投入正式使用前,除楼板自重外的其他荷载均占比较小,可忽略不计,仅考虑自重下楼板的受力状态,分析不同温度场下整体结构的应力、变形情况。同时,为模拟局部板块边界约束作用,按照弹性理论假定柱端刚度较大,上、下两层共 5 根框架柱设立对称 3 向固定约束,10 根微震柱设立铰接约束。约束边界条件示意图,如图 4 所示。图 4 中: $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  分别为 X、Y、Z 方向的位移; $UR_x$ 、 $UR_y$ 、 $UR_z$  分别为 X、Y、Z 方向的转角。

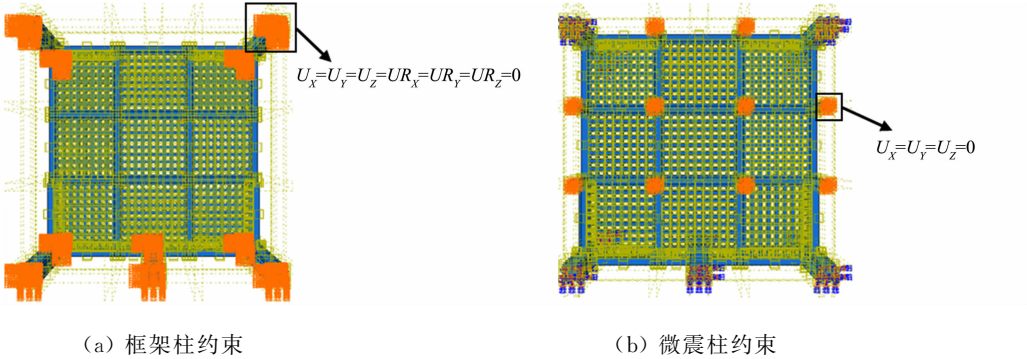


图 4 约束边界条件示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of constrained boundary conditions

3.4 材料本构及温度场参数

根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》的经验公式,混凝土弹性模量为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_{cu}} \quad (4)$$

式(4)中: $f_{cu}$ 为混凝土立方体抗压强度。

由混凝土立方体抗压强度可以计算龄期为 28 d 的混凝土弹性模量,基于实际工程结构采用 C30 混凝土,弹性模量近似为 30 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2 400 kg · m<sup>-3</sup>,热传导率为 1.28 W · (m ·



$\text{K})^{-1}$ , 普通混凝土线膨胀系数约为  $7.4 \times 10^{-6} \sim 13.0 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , 并且在常温下一般不变, 文中取  $10 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [18]; 钢筋弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为  $7\,850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 热传导率为  $45 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ , 线膨胀系数为  $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

华夫板主要采用大面积钢筋混凝土结构, 混凝土板内温度应力的 大小取决于温差, 在计算时可仅考虑使用期间的温差作用。为了得到更加符合日常温差下的模拟值, 根据实际应变计测得的温度, 在模型中设置温差幅值, 模拟在日常温度变化下结构的应力、应变情况。以实际工程中测得的应变作为参考值, 在使用 ABAQUS 有限元分析软件过程中采用温差法模拟, 能够得到较为准确的应力、应变。

## 4 模拟结果与分析

### 4.1 开洞华夫板应力与位移模拟结果

结构总温差为  $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 测点的应力云图与位移云图, 如图 5 所示。由图 5 可知: 当结构总温差为  $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 结构楼板应力均未为超过计算温度应力, 说明该结构核心区在日常温度变化下不易超过应力限值, 出现裂缝可能性较小, 但在板柱交接处出现较大应力, 需额外关注; 由于测点 12-M 位于厂房中部, 而测点 3-F 位于厂房边缘, 整体结构中部与边部变形呈现不同趋势, 中部楼板最大位移出现在板柱节点处, 向框架中心区域逐渐减小, 而边部楼板最大位移出现在与柱相邻的板块中央, 框架柱变形较小。

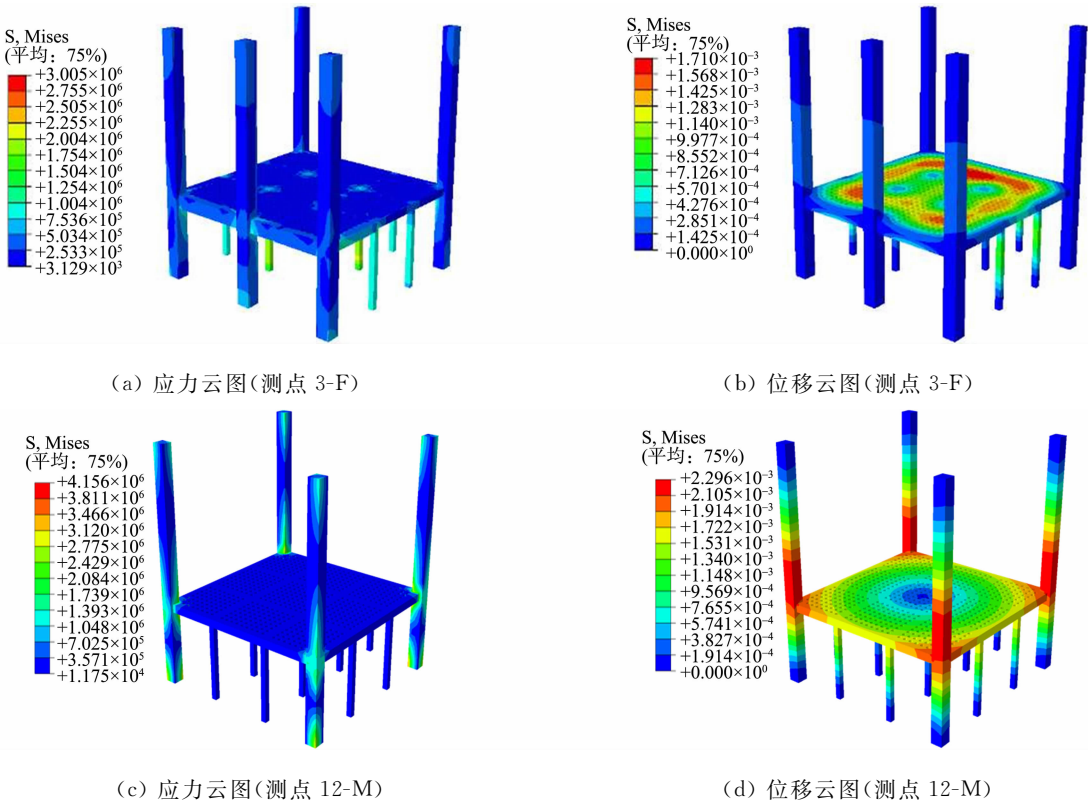


图 5 测点的应力云图与位移云图

Fig. 5 Stress and displacement cloud diagrams of measuring points

### 4.2 有限元模型验证

4.2.1 现场监测 在实际工程中, 根据设计要求, 应变计主要沿结构长度方向纵向布置, 分别在靠近中间回风夹道及南侧回风夹道附近布置两条测量点位, 间距结合各施工分区长度约 35 m 布置 1 处。为了方便参照对比, 额外在结构中间区域沿横向布置 1 个测量点位。4 层华夫板内每个点位在密肋梁上、下部各设置 1 个应变计。

整理测点 3-F, 12-M 不同温度下的应力实测值, 并与有限元模型的应力模拟值进行对比分析。测点位置, 如图 6 所示。

4.2.2 应力实测值与模拟值的对比 采用温度幅值建立模型温度场, 采用线性温度变化方式, 以实际

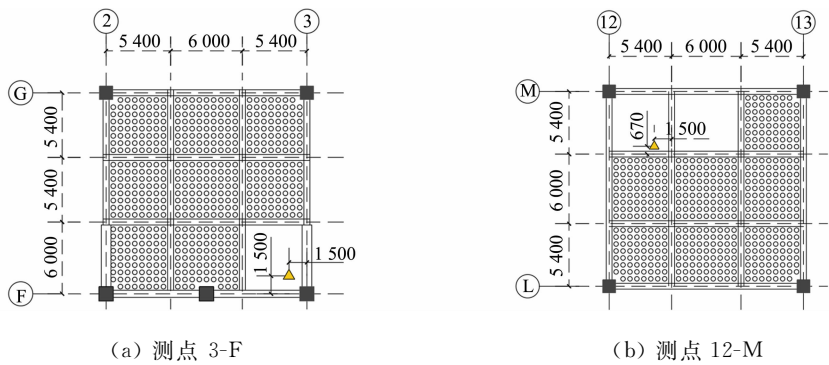


图 6 测点位置(单位:mm)

Fig. 6 Location of measuring points (unit: mm)

测量中应变计显示的参考温度作为初始值,设置具体幅值使温度升降符合实测温差变化。

测点应力的实测值与模拟值,如图 7 所示。图 7 中: $\sigma$  为应力; $N_1$  为测点 3-F 的测值编号,1~12 对应的温差分别为 11.2、7.0、-6.2、-9.2、-10.5、-5.7、-5.3、-7.5、-6.0、-4.8、-6.7、-6.2  $^{\circ}\text{C}$ ;  $N_2$  为测点 12-M 的测值编号,13~23 对应的温差分别为 10.2、9.3、-8.2、-7.0、-9.5、-6.5、-9.0、-10.5、-7.3、-7.8、-6.7  $^{\circ}\text{C}$ 。由图 7 可知:测点应力的实测值与模拟值大多能够吻合,说明有限元模型的模拟精度较高。

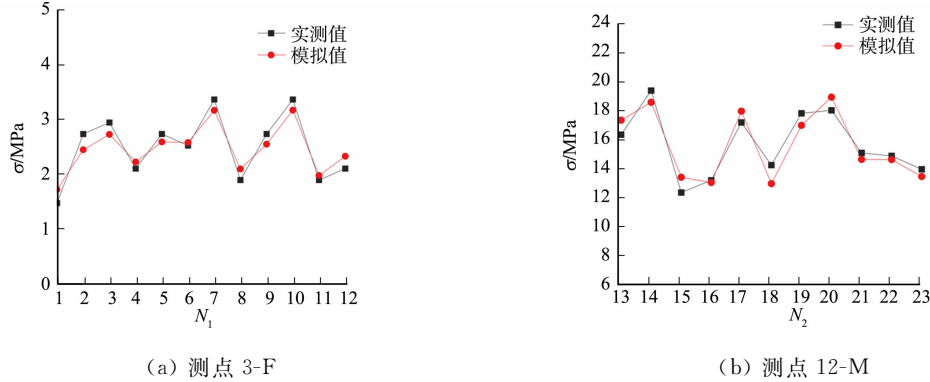


图 7 测点应力的实测值与模拟值

Fig. 7 Measured values and simulated values of measuring point stress

4.3 温度作用下开洞华夫板力学性能分析

4.3.1 混凝土强度 混凝土强度对钢筋应力、钢筋变形的影响,如图 8 所示。图 8 中: $\Delta t$  为温差; $U$  为位移,用以表征钢筋变形。

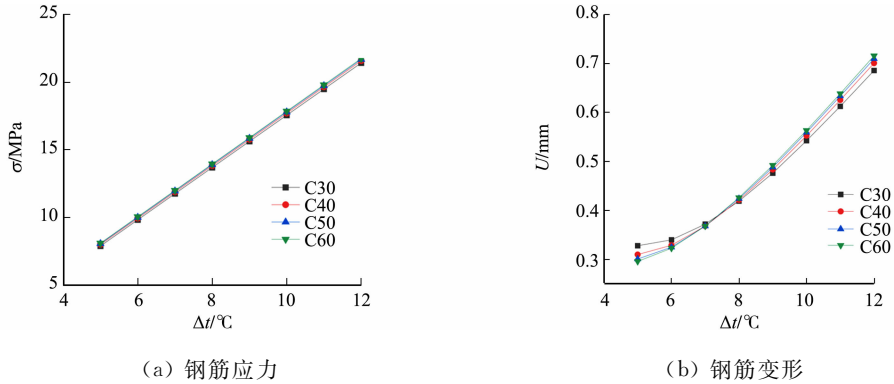


图 8 混凝土强度对钢筋应力、钢筋变形的影响

Fig. 8 Influence of concrete strength on steel stress and deformation

由图 8 可知:在一榀框架中,板内钢筋应力随温差增大而增大,呈线性关系;随着混凝土强度增大,板内钢筋应力随温差变化趋势基本一致,但相同温差下应力变化不大于 0.5 MPa,说明华夫板作为电子厂房楼板这类超长混凝土结构,板内温度应力变化与混凝土强度关系不密切;当温差较小时,板内钢筋

变形随混凝土强度增大而减小,当温差较大时,板内钢筋变形随混凝土强度增大而增大,但在相同温差下差值均未超过 2%,大致在温差为 7 ℃ 时,各个强度混凝土板内钢筋变形基本相同,说明对于超长混凝土结构,在小温差下,板内变形主要由混凝土承担,混凝土强度越大变形越小,在大温差下,钢筋对于温度变化更加敏感,由于混凝土大面积的温度变化与热传导,强度越高的混凝土板内变形越大,但由于混凝土自身的耐高温特性,不同强度等级的混凝土在日常温度变化下的应力不会出现明显飞跃增长,各级增量小于 1%,均处于安全范围内。

4.3.2 楼板厚度 对大体积混凝土而言,楼板厚度对自重及温度敏感性均有影响,所以楼板厚度也是影响华夫板在温度作用下应力情况的 1 项关键因素。楼板厚度对钢筋应力、钢筋变形的影响及位移云图,如图 9 所示。图 9 中: $b$  为楼板厚度。

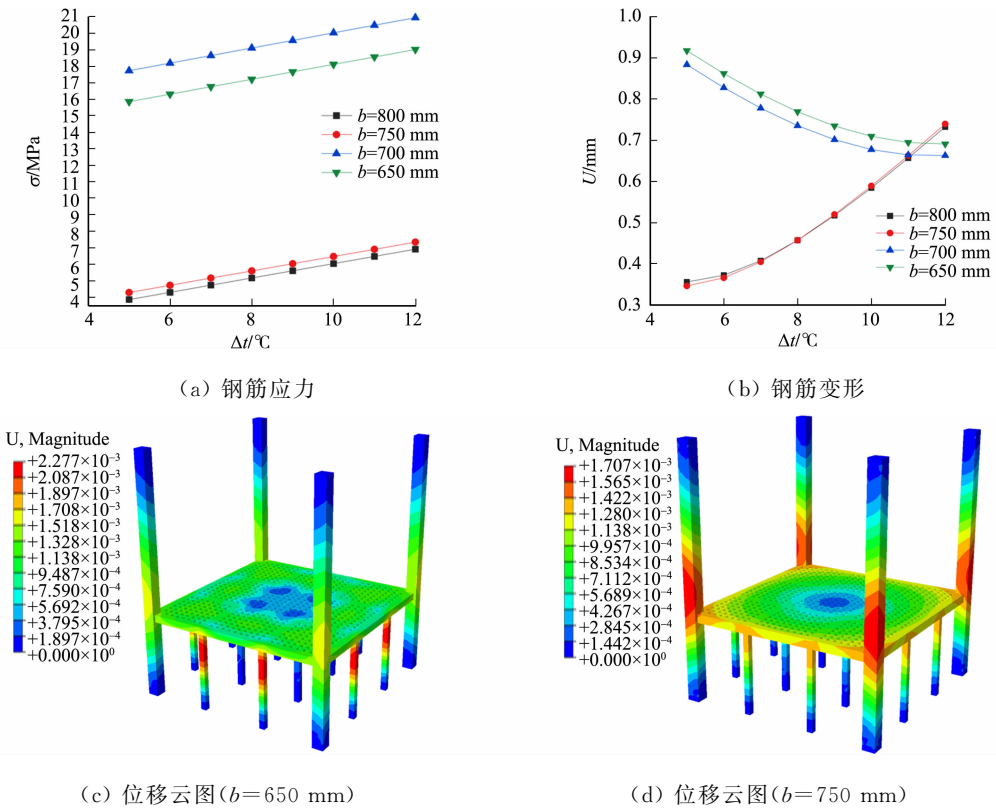


图 9 楼板厚度对钢筋应力、钢筋变形的影响及位移云图

Fig. 9 Influence of floor thickness on steel stress and deformation, and displacement cloud diagrams

由图 9 可知:随着温差的增大,钢筋应力均随温差增大而增加,呈线性关系;当楼板厚度增大至 750 mm,钢筋应力出现突变,楼板厚度较大的华夫板应力相对较小,突变值最小为 10 MPa,说明楼板厚度的增加提升了框架整体的刚度,减小了钢筋在温度变化下的应力响应;当楼板厚度较大时,钢筋变形随温差增大而上升,变形较大处集中于梁柱节点,最大可达 1.7 mm,当楼板厚度较小时,钢筋变形随温差增大而下降,变形较大处集中于四周板块,最大可达 2 mm,说明随着楼板厚度增大,板柱交接点处刚度差增大,发生刚度突变,容易产生较大位移,且交接点为荷载传递的关键节点,弯矩较大导致该区域变形增加。因此,在结构设计上应对交界处设置相应的抗弯、抗扭等构造筋。

4.3.3 水化程度 在工程中,混凝土浇筑的时间差异会对混凝土的水化程度产生显著影响,这一化学过程直接关联到混凝土内部热量的释放与分布。早期浇筑的混凝土由于水化反应较早启动,会迅速产生大量热能,使该区域温度迅速上升;相比之下,后期浇筑的混凝土水化进程相对滞后,热量释放较慢,故温度上升也较为平缓。这种因浇筑时间不同而导致的水化热释放差异会进一步造成混凝土楼板不同区域间的温度分布不均。

考虑混凝土在不同水化程度下引起区域间温度梯度对板内应力的影响,分别采用龄期为 3、7、28 d 的混凝土水化热,同时为简化计算,仅考虑混凝土绝热温升,采用文献[19]的经验公式进行计算。即



$$\theta(\tau)=\frac{W \cdot Q\left(1-e^{-m T}\right)}{c \rho} .$$

(5)

式(5)中: $\theta(\tau)$ 为混凝土在 $\tau$  d时的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$ ;  $W$ 为水泥在混凝土中的含量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $Q$ 为混凝土每千克水泥完全水化热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $c$ 为混凝土比热,取 $0.97 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ;  $\rho$ 为混凝土的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $m$ 为与水泥温升速率系数有关的参数,假设浇筑温度为 $25^{\circ}\text{C}$ , $m$ 取 $0.384$ 。

经过计算,可以得到 $\theta(3)=29.38^{\circ}\text{C}$ , $\theta(7)=43.49^{\circ}\text{C}$ , $\theta(28)=57.39^{\circ}\text{C}$ ,相应地,分别近似取为 $30$ 、 $45$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ 。

板块编号的划分,如图 10 所示。图 10 中:1~9 表示 9 个板块编号。由于板柱节点处应力较大,故将角部 4 块楼板与其余楼板进行温度区分,将一榀框架内的 9 个板块赋予不同温度,分析整体框架在不同水化热导致的温差影响下的应力分布情况。

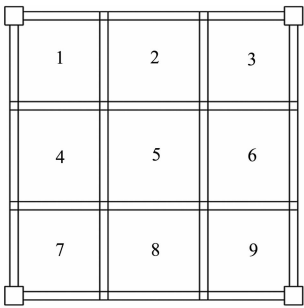


图 10 板块编号的划分

Fig. 10 Division of plate numbers

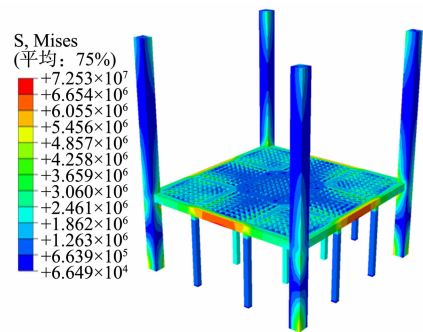
板块温度分布情况及对应的云图代号,如表 3 所示。

表 3 板块温度分布情况及对应的云图代号

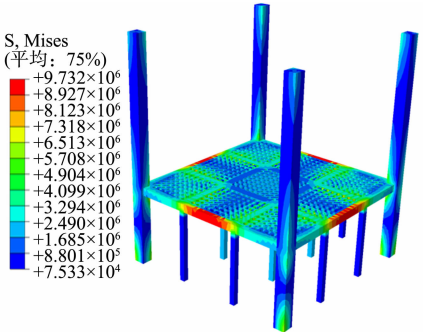
Tab. 3 Distribution of plate temperature and corresponding cloud diagram codes							
云图代号	板块编号			云图代号	板块编号		
	30 ℃	45 ℃	60 ℃		30 ℃	45 ℃	60 ℃
30-45	1、3、7、9	2、4、5、6、8	—	30-60	1、3、7、9	—	2、4、5、6、8
45-30	2、4、5、6、8	1、3、7、9	—	45-60	—	1、3、7、9	2、4、5、6、8
60-30	2、4、5、6、8	—	1、3、7、9	60-45	—	2、4、5、6、8	1、3、7、9

不同水化程度的应力云图,如图 11 所示。

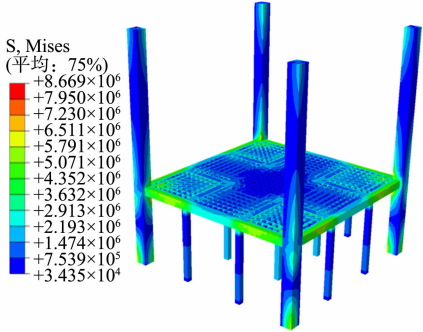
由图 11 可知:当角部区域温度低于其余板块时,最大应力集中在边梁中部;当角部区域温度高时,最大应力出现在板柱节点处,且蔓延至临近框架柱的洞口;当角部温度为 $45^{\circ}\text{C}$ ,其余温度为 $30^{\circ}\text{C}$ 时,板块整体应力分布较为均匀,板块间应力梯度增量均约为 $1 \text{ MPa}$ ,相比云图 30-45 的水化情况应力也无显著增长,相同应力等级下增量约为 $20\% \sim 30\%$ ,且随着水化的进行会呈现云图 60-45 的应力情况。



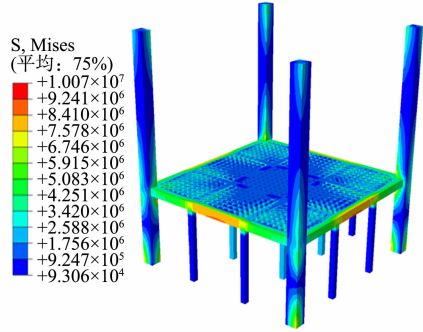
(a) 云图 30-45



(b) 云图 30-60



(c) 云图 45-30



(d) 云图 45-60

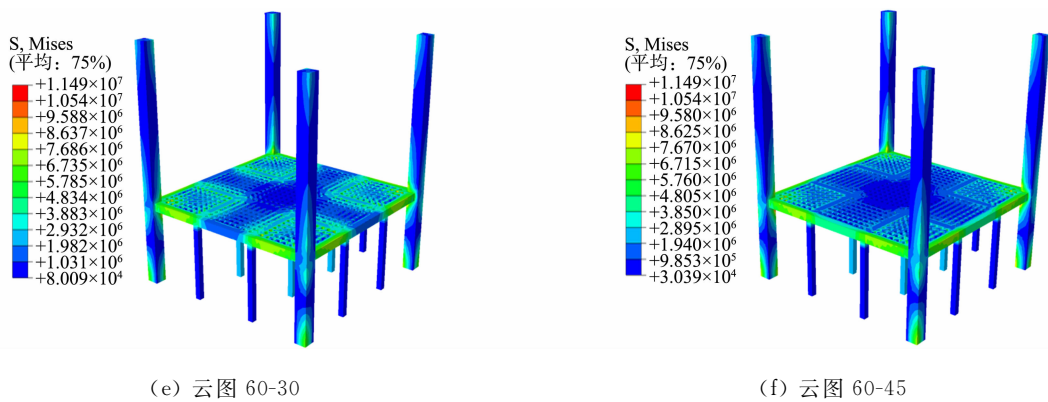


图 11 不同水化程度的应力云图

Fig. 11 Stress cloud diagrams with different degrees of hydration

因此,在施工时选择居中心龄期的混凝土作为一榀框架角部大体积混凝土有利于温度应力均匀分布,避免出现较大应力集中。

此外,区域间温差较大时,板块整体应力上升,所以在施工中相近板块间温差不应过大,以避免出现接触面上的应力集中。

## 5 结论

基于 ABAQUS 有限元分析软件,建立受自重及温度场作用下开洞华夫板力学性能的数值分析模型,利用该模型对测点周围一榀框架下的钢筋混凝土楼板进行数值分析,验证了有限元模型的准确性。同时,利用该数值模型分析不同温度对华夫板与板内钢筋应力、应变的影响规律,可得以下 5 个结论。

1) 通过 ABAQUS 有限元分析软件的数值模拟与现场监测数据的比对分析可知,中部板块测点应力差值最大为 1.283 MPa,边缘板块测点应力差值最大为 0.287 MPa,表明数值模拟的精度较高,应力模拟值和实测值均能较好吻合。

2) 相同温差下混凝土强度对板内钢筋应力影响较小,近似呈正相关;大致在温差为 7 ℃ 时,各个强度混凝土板内钢筋变形基本相同,应力差值均不大于 0.5 MPa;当温差小于 7 ℃ 时,混凝土强度小的变形大,当温差大于 7 ℃ 时,混凝土强度大的变形大。这说明相同温差下,强度大的混凝土对温度更敏感,且随着温差增大,产生的变形更加明显,在日常温度变化不超过 12 ℃ 时,各级混凝土应力增速不超过 1%,且钢筋变形不超过 1 mm。

3) 不同楼板厚度对钢筋应力、变形影响明显,呈现两种不同的变化情况。当楼板厚度由 650 mm 增大至 750 mm,钢筋应力发生突变,减小量可达 10 MPa 以上,变形随温差增大而增大;较大的楼板厚度虽然提高了整体板块的刚度,但梁柱节点处存在刚度差更容易出现应力集中,应考虑增加构造措施。

4) 在同一温度作用下,应力与变形分布与主要层间柱有关。从整体看,梁柱节点处应力较大,变形由梁柱节点向板中央减小,相邻最大尺寸柱的钢筋与混凝土应力明显大于中央区域的钢筋与混凝土应力,在框架柱的板柱节点处出现应力集中。

5) 对大体积混凝土进行不同时间段浇筑,考虑混凝土水化放热的温度作用时,将一定龄期的混凝土作为框架角部楼板浇筑,并且控制板块间应力温差在 15~30 ℃ 内,有利于实现整体楼板的应力均匀分布,避免较大应力集中。

## 参考文献:

[1] 丁然,张亚朋,武维宏,等.超高性能混凝土华夫板受力性能试验研究与数值模拟[J].建筑结构学报,2024,45(8): 93-107,117. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.0558.

[2] 郑晓芬.超长预应力混凝土梁板结构温度收缩裂缝控制研究[D].上海:同济大学,2003.

[3] 郑伟,袁中夏,乔宏霞,等.考虑水化度影响的大体积混凝土温度场分析[J].材料导报,2024,38(增刊1):262-268. DOI:10.11896/js.20242124020108.

[4] 陈春超,陈士海,陈建福,等.地铁车站叠合墙内衬早龄期温度与应变演化规律[J].华侨大学学报(自然科学版),

2024,45(2):193-200. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202312041.

[5] 朱兆聪,梁汝鸣,葛序尧,等. 气温骤降对超长混凝土结构底板温度应力的影响[J]. 建筑结构,2023,53(增刊1):1723-1727. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1255.

[6] 盛海洋. 考虑龄期影响的福州地区超声回弹综合测强曲线[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2017,38(3):325-329. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201703008.

[7] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[8] 张寒硕,卜凡民,聂建国,等. 超长混凝土框架结构温度场模拟与温度效应研究[EB/OL]. (2023-11-28)[2025-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20231127.1457.047.html>.

[9] 王冬晔,董毓利,王卫华,等. 混凝土板柱结构抗火性能的有限元分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2019,40(6):724-732. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201905008.

[10] ZHU He, HU Yu, LI Qingbin, *et al.* Restrained cracking failure behavior of concrete due to temperature and shrinkage[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244:118318. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118318.

[11] HU Yehong, CHEN Jin, ZOU Feng, *et al.* A comparative study of temperature of mass concrete placed in August and November based on on-site measurement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00694. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00694.

[12] LI Yan, NIE Lei, WANG Bo. Anumerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete[J]. Automation in Construction, 2014, 37:203-210. DOI:10.1016/j.autcon.2013.08.005.

[13] ZHANG Heng, SU Chao, CHEN Xiaohu, *et al.* Calculation of mass concrete temperature and creep stress under the influence of local air heat transfer[J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2024, 140(3):2977-3000. DOI:10.32604/cmes.2024.047972.

[14] ZHAO Yuqin, LI Gaosheng, FAN Caixia, *et al.* Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1-16. DOI:10.1155/2021/5541181.

[15] OUYANG Jianshu, CHEN Xianming, HUANGFU Zehua, *et al.* Application of distributed temperature sensing for cracking control of mass concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197:778-791. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.221.

[16] 范重,陈巍,李夏,等. 超长框架结构温度作用研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(1):136-145. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.01.016.

[17] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

[18] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[19] 江正荣. 建筑施工计算手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 方德平)