

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412038



温度作用下超精电子厂房 大跨度楼板力学性能

莫家樑¹, 陈连健², 方四宝², 李海锋¹

(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: 基于福建省厦门市天马光电子有限公司超精电子厂房项目, 采用 ABAQUS 有限元软件, 对梁板结构进行三维模型仿真模拟, 将模拟数据与施工现场的监测数据进行对比分析。研究板厚、板配筋率、混凝土强度等级等参数在温度作用下对超长结构大跨度楼板的影响, 并提出在实际工程中的参数取值建议。研究结果表明: 温度作用对楼板应力的影响呈正相关。在温度作用下, 板配筋率对楼板应力和变形均有明显的影响, 而混凝土强度等级只对楼板变形有明显影响, 板厚对楼板应力产生一定影响; 温度差对于楼板中心变形有着一定的影响。

关键词: 超精电子厂房; 超长结构; 温度作用; 大跨度楼板; 有限元分析

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0410-09

Mechanical Properties of Large-Span Slab of Ultra-Precision Electronic Factory Under Temperature Action

MO Jiali¹, CHEN Lianjian², FANG Sibao², LI Haifeng¹

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

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

Abstract: Based on the ultra-precision electronic factory of Tianma Optoelectronics Limited Company of Xiamen City, Fujian Province, ABAQUS finite element software was used to simulate 3-dimensional (3D) model of the beam-slab structure, the simulation data and the monitoring data from the construction site were compared. The influence of temperature action on the ultra-long structure with large-span slab was studied from the slab thickness, reinforcement ratios, and concrete strength grades, and parameter value suggestions were proposed for actual engineering. The study shows that the influence of temperature action on the slab stress is positively correlated. Under temperature action, the reinforcement ratios of the slab have a significant impact on the stress and deformation of the floor slab, while the strength grades of concrete only have a significant impact on the deformation of the floor slab, and the the slab thickness has a certain impact on the stress of the floor slab. The temperature difference has a certain impact on the deformation of the central floor.

Keywords: ultra-precision electronics factory; ultra-long structure; temperature action; large-span slab; finite element analysis

近些年, 随着国内科技的发展, 电子工业快速崛起, 超精电子厂房的建设也逐渐增加。然而, 超精电

收稿日期: 2024-12-08

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: lihailfeng@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省科技计划项目对外合作项目(2024I0015)

子厂房通常设计成超长结构,即单一结构的单元平面尺寸超长,远远超出规范允许的结构单元尺寸。目前,国内外学者对温度作用下超长结构的力学性能已开展了一些研究。张寒硕等^[1]为了确定结构不同阶段的温度荷载,提出了关于超长混凝土框架结构温度场的计算方法。文献[2-7]分析了超长结构的设计、温度应力及施工措施等,提出了一系列简便易行、经济实用的新技术措施。范重等^[8]针对超长结构的特点,得到了温度内力沿结构竖向的变化规律。何本贵等^[9]探究温度作用影响超长混凝土结构边柱弯矩敏感性大小的先后次序。郑永路等^[10]分析了超长钢筋混凝土框架结构在温度作用下的内力及变形特点。文献[11-12]提出了一种基于退化三维实体虚拟层合单元的数值方法,得出后浇条的数量和保温时间能有效地改变结构的温度应力的结论。Li 等^[13]通过实验模拟和有限元分析,研究超长结构的江苏省南京市奥体中心主平台的温度应力和变形。Yang 等^[14]对椭圆平面钢筋混凝土框架的结构温度效应进行了分析,得到了曲率对环形超长结构的温度应力有明显影响的结论。

关于温度作用下超长结构楼板的力学性能研究较少,本文以福建省厦门市天马光电子有限公司超精电子厂房项目为例,研究温度作用下超精电子厂房大跨度楼板力学性能。

1 工程概况

天马光电子有限公司超精电子厂房位于厦门市翔安区田溪路以东、溪东路以西、舫阳东路以南、内垵大道以北的范围内。项目总占地面积为 65 万 m²,总建筑面积为 101 万 m²。其中,厂房占地面积 10.1 万 m²,分为核心区、支持区两部分,结构形式为框架混凝土结构,屋盖为钢筋混凝土,3 层(3F)为有梁板结构,2F、4F 为华夫板结构。超长结构电子厂房图,如图 1 所示。

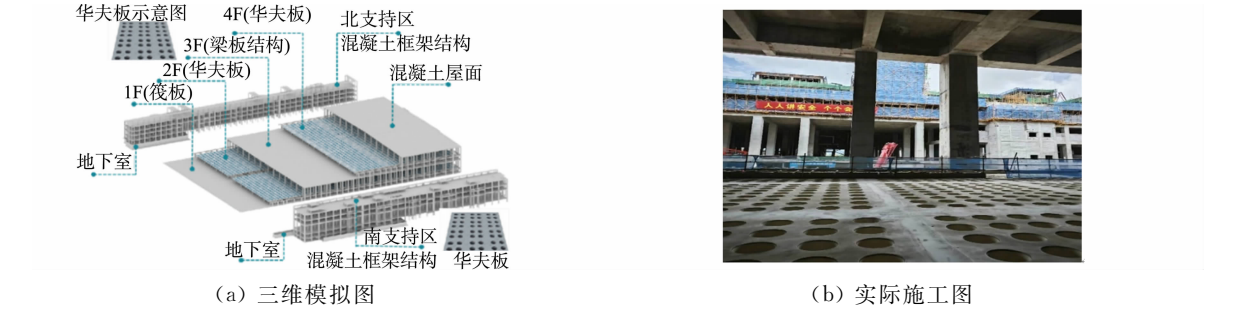


图 1 超长结构电子厂房图

Fig. 1 Diagrams of ultra-long structure electronic factory

2 有限元模型校验

2.1 模型参数设计

为了使三维有限元模型更加符合实际工程情况,在梁、板构件的基础上,增加了上下层柱子。测点模型参数,如表 1 所示。表 1 中: $a_{柱}$ 为柱长度; $b_{柱}$ 为柱宽度; $a_{梁}$ 为梁长度; $b_{梁}$ 为梁宽度; t 为板厚。

表 1 测点模型参数

Tab. 1 Parameters of measuring point model

编号	$a_{柱} \times b_{柱} / \text{mm} \times \text{mm}$	$a_{梁} \times b_{梁} / \text{mm} \times \text{mm}$	t / mm
测点 1	600×600 1 000×1 000	600×1 650 1 000×2 000	150
测点 2	600×600 1 000×1 000	600×1 650 1 000×2 000 1 400×2 200	150
测点 3	600×600 1 000×1 000	600×1 650 1 000×2 000 1 400×2 200	150
测点 4	600×600 1 000×1 000	600×1 650 1 000×2 000 1 400×2 200	150

2.2 模型材料本构

三维有限元模型涉及的材料均符合连续性、均匀性、各向同性。考虑到实际工程情况,混凝土材料弹性模量为 34.401 GPa、泊松比为 0.2、密度为 $2\,350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、线膨胀系数为 $1.0\times10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。钢筋材料为 205 GPa,泊松比为 0.3,密度为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[15-16]。为方便计算,混凝土采用线弹性模型,钢筋采用双折线模型。

2.3 建模方法

在确保数值模拟分析精度的情况下,为兼顾计算成本,三维有限元模型中混凝土构件均采用 8 节点减积分三维实体单元(C3D8R)进行网格划分模拟分析^[17]。钢筋构件均采用 2 节点三维桁架单元(T3D2)进行网格划分,模拟分析网格划分情况及边界条件,如图 2 所示。

在三维有限元模型中,混凝土和钢筋的接触约束采用内置区域方法,把钢筋骨架嵌入混凝土中。为了模拟实际工程中柱与楼层的刚性连接,柱子边界条件采用完全固定约束^[18-19]。

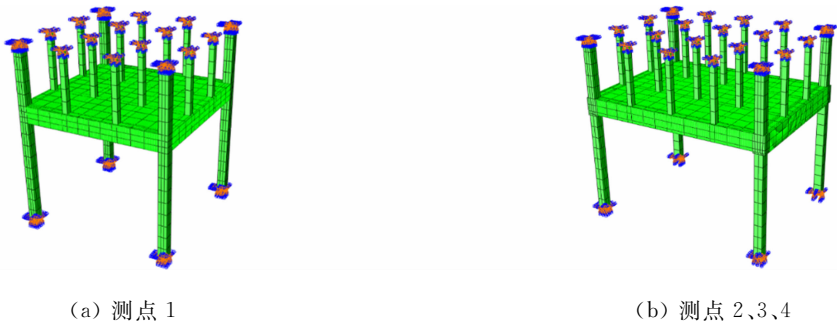


图 2 网格划分情况及边界条件

Fig. 2 Grid division and boundary conditions

相较于普通跨度楼板,超长结构楼板需要考虑温度效应对楼板的影响。对整个三维有限元模型施加了结构的自质量,还对整个梁板结构施加了实际施工温差(由实际工程记录每日规定时间的厦门市日照温度确定)。实际施工温差 ΔT_k ^[20] 的计算式为

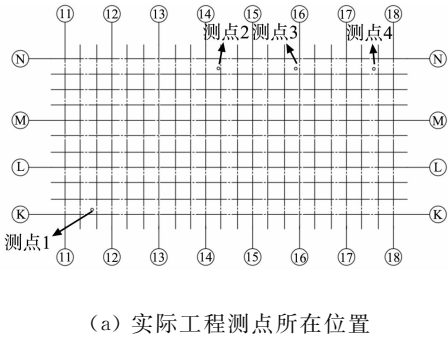
$$\Delta T_k = T_{s,\max} - T_{0,\min}。$$

(1)

式(1)中: $T_{s,\max}$ 为结构最高平均温度; $T_{0,\min}$ 为结构最低初始平均温度。

2.4 模型准确性验证

根据施工图纸测点的位置,在楼板的钢筋构件内相应位置建立勘测点,方便观测钢筋应力、变形的变化状况。实际工程与三维有限元模型测点位置的对比,如图 3 所示。图 3 中:圆点位置为实际工程测点所在位置;虚线交点处位置为三维有限元模型测点的位置;M、N、L、K 为轴。



(a) 实际工程测点所在位置

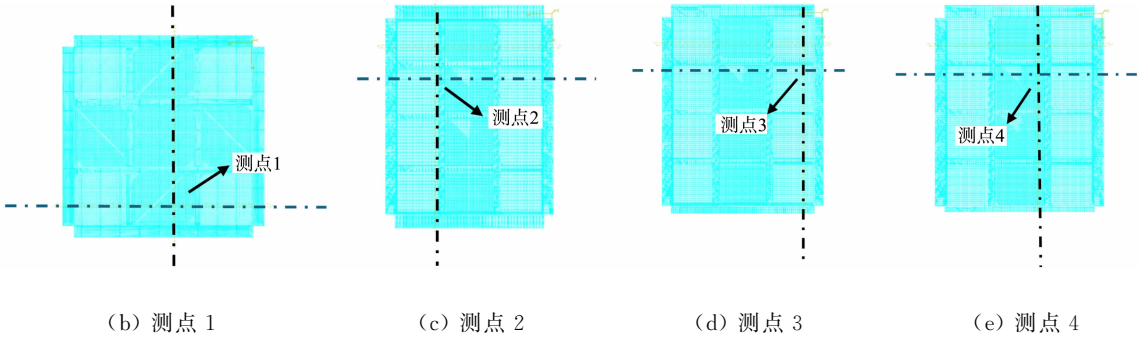


图 3 实际工程与三维有限元模型测点位置的对比

Fig. 3 Comparison of measuring point positions between actual engineering and 3D finite element model

实际工程测量应力与有限元几何模型中测点应力对比表,如表 2~5 所示。表 2~5 中: σ_1 为测量应

力; σ_2 为有限元应力; ξ 为相对误差。

表 2 测点 1 的应力对比
Tab. 2 Measuring point 1 stress

序号	$\Delta T_k/^\circ\text{C}$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	ξ
1	0.5	1.845	2.377	0.224
2	0.8	2.870	3.032	0.053
3	2.5	8.815	6.742	0.235
4	7.8	18.040	18.308	0.015
5	9.5	25.420	22.018	0.134
6	10.0	26.445	23.109	0.126

表 3 测点 2 的应力对比
Tab. 3 Measuring point 2 stress

序号	$\Delta T_k/^\circ\text{C}$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	ξ
1	0.8	3.690	2.547	0.310
2	2.2	6.560	6.131	0.065
3	3.3	5.740	8.948	0.309
4	4.2	14.350	11.252	0.216
5	5.0	12.710	13.301	0.046
6	6.0	16.810	15.861	0.056
7	7.0	17.835	18.422	0.033

表 4 测点 3 的应力对比
Tab. 4 Measuring point 3 stress

序号	$\Delta T_k/^\circ\text{C}$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	ξ
1	5.7	12.710	15.190	0.163
2	7.7	20.295	20.457	0.007
3	9.7	21.935	25.725	0.147
4	10.7	37.925	28.358	0.252
5	11.4	31.160	30.202	0.031
6	13.0	27.470	34.410	0.202

表 5 测点 4 的应力对比
Tab. 5 Measuring point 4 stress

序号	$\Delta T_k/^\circ\text{C}$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	ξ
1	2.5	12.915	7.147	0.447
2	3.5	10.865	9.627	0.114
3	4.5	11.070	12.108	0.086
4	5.7	12.710	15.084	0.157
5	6.2	11.275	16.325	0.309
6	8.5	15.170	22.030	0.311
7	9.0	26.035	23.271	0.106
8	9.2	19.270	23.767	0.189
9	9.8	25.010	25.255	0.010

在误差范围之内,三维有限元模型大部分测点结果均能对比成功,表明三维有限元模型模拟精度较高,验证了三维有限元模型的准确性。

3 有限元仿真模拟

3.1 力学性能分析

实际工程与三维有限元模型测点应力(σ)对比,如图 4 所示。由图 4 可知:根据正态分布概念,测点 1 在最小温差 0.5℃下的测点应力为 2.377 MPa,在最大温差 10.0℃下的测点应力为 23.109 MPa;测

点 2 在最小温差 0.8℃下的测点应力为 2.547 MPa,在最大温差 6.0℃下的测点应力为 18.422 MPa;测点 3 在最小温差 5.7℃下的测点应力为 15.190 MPa,在最大温差 13.0℃下的测点应力为 34.410 MPa;测点 4 在最小温差 2.5℃下的测点应力为 7.147 MPa,在最大温差 9.8℃下的测点应力为 25.255 MPa。

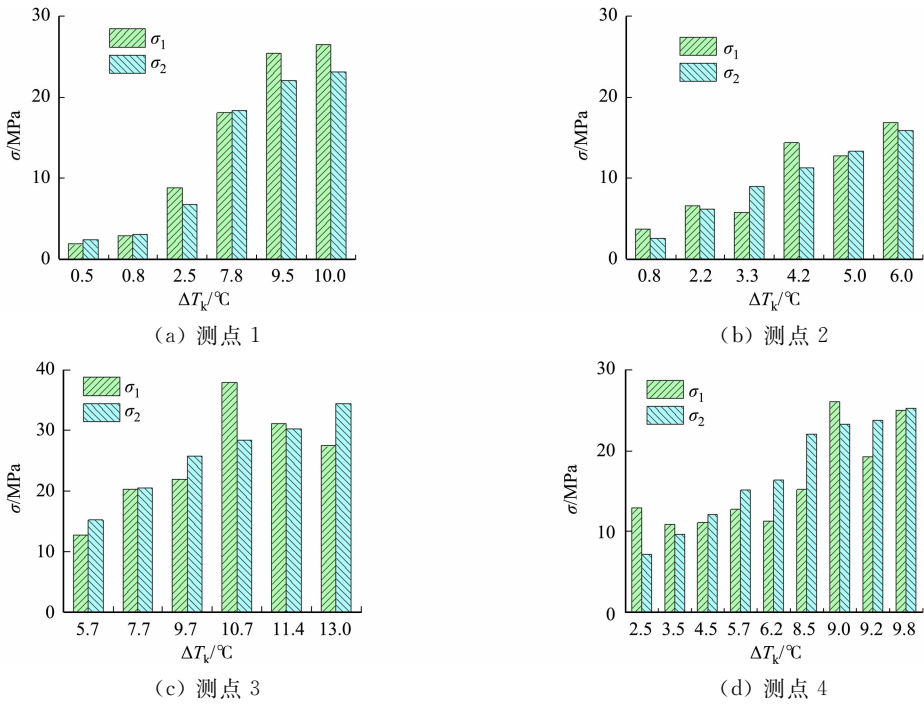


图 4 实际工程与三维有限元模型测点应力对比

Fig. 4 Comparison of stress at measuring point of actual engineering and 3D finite element model

温度作用对楼板应力的影响近似呈正相关,温差越大,楼板应力越大。同时,温度作用产生的附加应力,使考虑温度效应的超长结构楼板应力大于正常跨度的楼板应力。

三维有限元模型整体应力和变形图,如图 5 所示。楼板中心有限元应力和变形图,如图 6 所示。

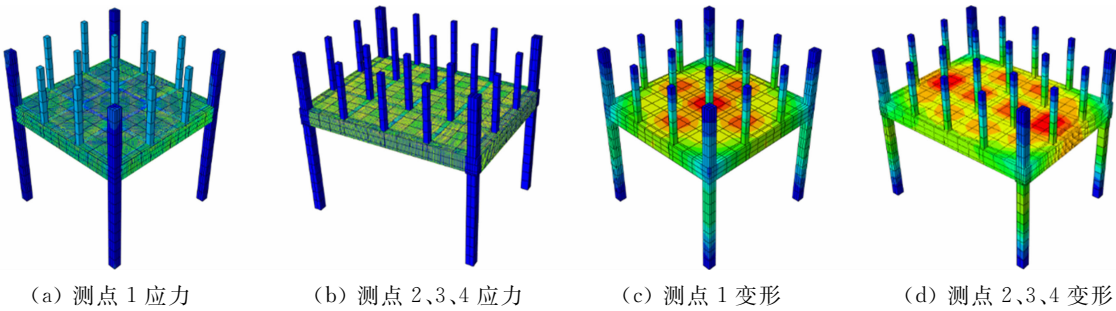


图 5 三维有限元模型整体应力和变形图

Fig. 5 Overall stress and deformation of 3D finite element model

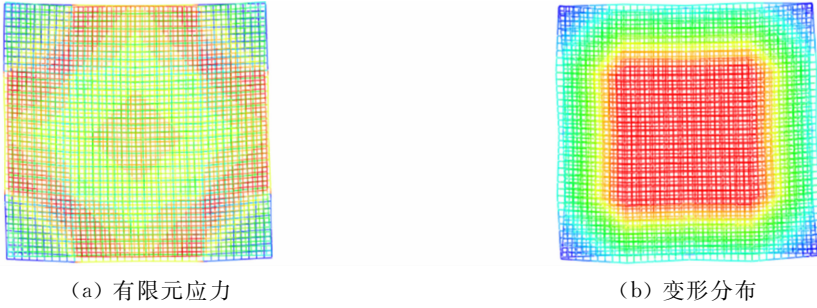


图 6 楼板中心有限元应力和变形图

Fig. 6 Finite element stress and deformation in central floor

由图 5 可知:在同一温度作用下,近梁端钢筋混凝土承受的应力较大,最大应力存在于远离最大尺寸柱的梁板节点处;梁板的变形大小与离最大尺寸柱的距离相关,当梁板形状为规则四边形时,随着距离的增加,变形也逐渐增加,最大变形位于整体楼板中心处;当梁板形状为矩形时,最大变形通常位于短边中心处。由图 6 可知:在同一温度作用下,楼板中心承受最大应力和产生最大变形。

3.2 温度作用下参数扩展分析

3.2.1 参数设计 以测点 1 三维有限元模型为例,建立了 7 个有限元扩展模型(M1~M7)。有限元扩展模型参数,如表 6 所示。表 6 中: η 为板配筋率。

表 6 有限元扩展模型参数
Tab. 6 Parameters of finite element extended models

模型	t/mm	$\eta/\%$	$a_{\text{梁}} \times b_{\text{梁}}/\text{mm} \times \text{mm}$	混凝土强度等级
M1	150	1.0	1 000×2 000	C50
M2	120	1.0	1 000×2 000	C50
M3	180	1.0	1 000×2 000	C50
M4	150	0.8	1 000×2 000	C50
M5	150	1.2	1 000×2 000	C50
M6	150	1.0	1 000×2 000	C40
M7	150	1.0	1 000×2 000	C60

3.2.2 板厚影响 合理的板厚可以确保建筑在承受荷载时不会发生破坏,增加板厚可以提高板截面刚度,从而增强承载能力。然而,过厚的楼板也会增加自质量和造价,同时,在温度作用下,板越厚,上下表面温差越大,表面拉应力越大^[21]。

楼板中心不同板厚的模型应力对比,如图 7 所示。由图 7 可知:1) 随温度差的增加,不同板厚模型的应力都呈现增大的趋势;2) 温度差较低时,M3 的应力远大于其他模型的应力;3) 随温度差的增大,M1 的应力增涨趋势明显,远大于 M2 的应力。

当板厚为 120~150 mm 时,板的自质量影响小于板厚增加承载力作用的影响,当板厚为 150~180 mm 时,板的自质量影响远超过板厚增加承载力作用的影响。板厚在温度差较低时,板厚增加承载力作用的影响较为显著,在温度差较大时,板厚增加承载力作用的影响出现明显下降。不同板厚的模型变形(δ)对比,如图 8 所示。

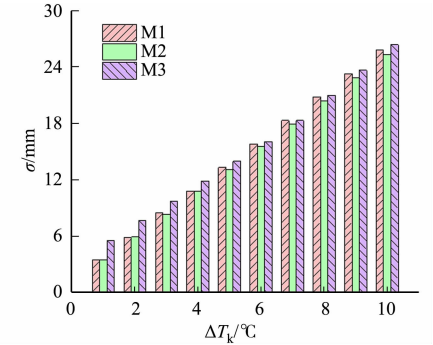
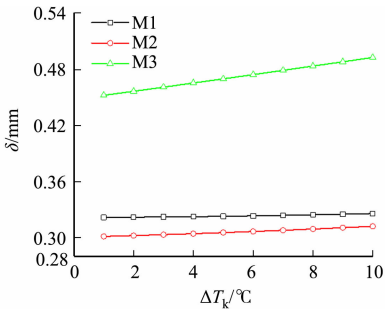
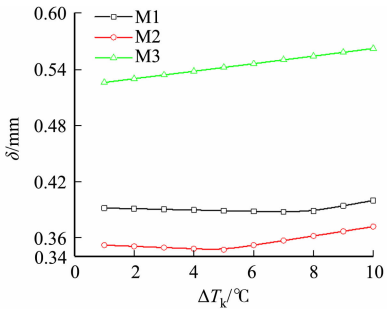


图 7 楼板中心不同板厚模型的应力对比

Fig. 7 Comparison of stress in central floor of different plate thickness models



(a) 楼板近梁端



(b) 楼板中心

图 8 不同板厚的模型变形对比

Fig. 8 Comparison of deformation in central floor of different plate thickness models

由图 8 可知:1) 随着温度差的增加,M3 的变形均呈现增大的趋势;2) M1、M2 楼板中心的变形缓慢降低,随着温度的增大,变形开始增加。3) 同一温度差下,相同板厚的楼板中心的变形远大于楼板近梁端的变形,变形增加了 10%~20%。

3.2.3 板配筋率影响 板配筋率是影响钢筋混凝土楼板承载能力的重要因素,板配筋率计算式为

$$\eta=\frac{A_s}{A}\times100\%。$$

(2)

式(2)中: A_s 为钢筋面积; A 为板截面面积。

楼板中心不同板配筋模型的应力对比,如图 9 所示。由图 9 可知:1) 随着温度差的增加,不同板配筋率模型的应力都呈现增大的趋势;2) 同一温度作用下,板配筋率最小模型的应力最大,板配筋率最大模型的应力最小;3) 温度差较低时,不同配筋率模型的应力均相近,随着温度差增大到一定程度时,板配筋率模型最大的应力明显小于板配筋率模型最小的应力。

不同板配筋率模型的变形对比,如图 10 所示。由图 10 可知:1) 对于近梁端楼板来说,板配筋率大模型随着温度差的增加,变形趋势保持平缓,板配筋率小模型的变形随着温度差的增加呈现逐渐增大的趋势;2) 对于楼板中心,随着温度差的增加,不同板配筋率模型的变形均呈现先减后增的趋势;3) 同一温度差下,相同配筋率模型的楼板中心的变形远大于楼板近梁

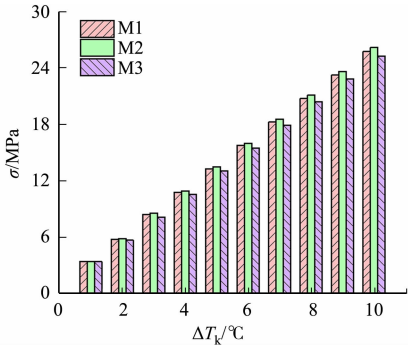
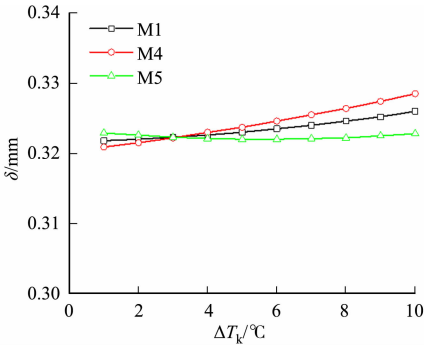
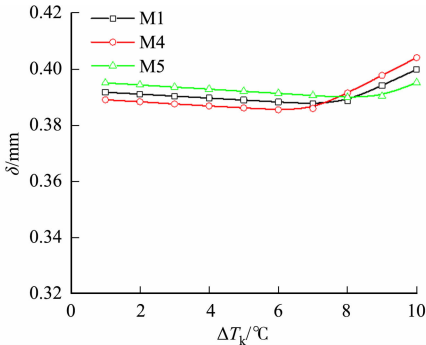


图 9 楼板中心不同板配筋模型的应力对比

Fig. 9 Comparison of stress in centran floor of different plate reinforcement models



(a) 楼板近梁端



(b) 楼板中心

图 10 不同板配筋率模型的变形对比

Fig. 10 Comparison of deformation in different reinforcement models

端的变形,变形增加了 18%~25%。

3.2.4 混凝土强度等级影响 随着混凝土强度等级的提高,楼板的承载能力也随之增强。在高层建筑或大型公共建筑中,为了满足较大的荷载要求,通常会选择较高强度等级的混凝土。因此,以混凝土强度等级 C50 为基准,楼板的刚度(B)^[22]为

$$B=E_{CS}I_s。$$

(3)

式(3)中: E_{CS} 为楼板的混凝土弹性模量; I_s 为楼板的截面抗弯惯性矩。

在相同截面情况下,高强度等级的混凝土由于较高的弹性模量和抗压强度,能更有效抵抗变形,提高结构的刚度。这有助于减少因变形引起的裂缝开展,提高结构的耐久性和使用性能。另一方面,过高的刚度可能导致结构的自振周期减小,从而使地震作用增大。楼板中心不同混凝土强度等级模型的应力对比,如图 11 所示。

由图 11 可知:1) 随着温度差的增加,不同混凝土强度等级模型的应力都呈现增大的趋势;2) 在同一温度差下,不同混凝土强度等级模型的应力均相接近。

楼板中心不同混凝土强度等级模型的变形对比,如图 12 所示。由图 12 可知:1) 对于楼板近梁端,随着温度差的增加,不同混凝土强度等级模型的变形均呈现增大趋势;2) 对于楼板中心,随着温度差的

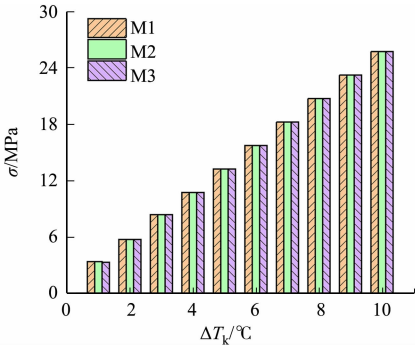


图 11 楼板中心不同混凝土强度等级模型的应力对比

Fig. 11 Comparison of stress in central floor of different concrete strength grades models

增加,不同混凝土强度等级模型的变形均呈现先减后增的趋势;3) 同一温度差下,相同混凝土强度等级模型楼板中心的变形远大于楼板近梁端的变形,变形增加了 20%~25%。

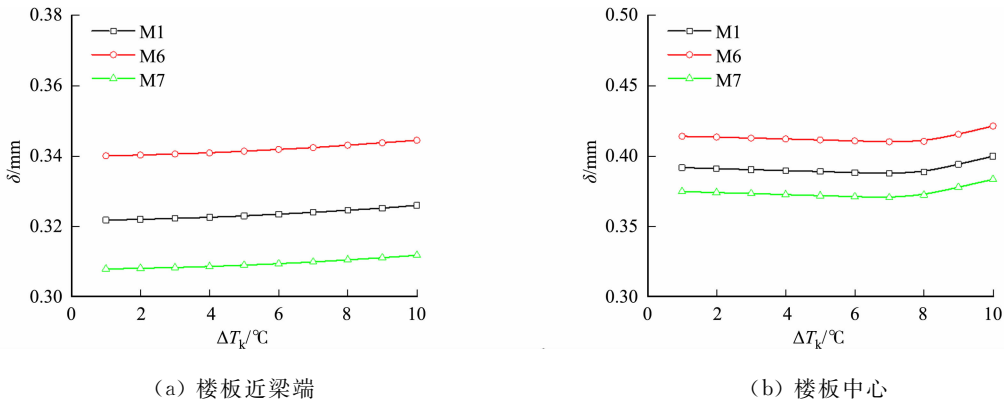


图 12 不同混凝土强度等级模型的变形对比

Fig. 12 Comparison of deformation of different concrete strength grades models

4 结论

1) 温度作用对楼板应力的影响近似呈正相关,随着温度差增加,楼板应力越大。在同一温度作用下,楼板应力和楼板变形受到最大尺寸柱的影响。楼板最大应力和最大变形往往发生在楼板中心。

2) 在温度作用下,120~150 mm 板厚对于增加承载力作用的效果较为理想,但板厚对于楼板变形的影响不大。在实际工程中,板厚设计不宜过厚,超过 150 mm 时,需要考虑自质量和温度共同作用的不利影响。

3) 在温度作用下,板配筋率对楼板应力和变形均有明显影响。同时,温度差越大时,板配筋率越大,降低楼板应力和变形的效果越明显。

4) 在温度作用下,混凝土强度等级对楼板变形影响明显。混凝土强度等级越高,楼板变形越小。

5) 温度差的变化对于楼板中心变形有着明显规律,随着温度差的增加,楼板变形一般呈现先减后增的趋势,温度差较低时,一定程度下可以抑制楼板的变形。楼板近梁端的变形通常随着温度差的增加而增大。同时,楼板中心的变形远大于近楼板梁端的变形,变形一般增加了 10%~20%。

参考文献:

[1] 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[J/OL]. 工程力学,1-9(2023-11-28) [2024-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20231127.1457.047.html>.

[2] 冯健,吕志涛,吴志彬,等. 超长混凝土结构的研究与应用[J]. 建筑结构学报,2001(6):14-19. DOI:10.3321/j.issn:1000-6869.2001.06.002.

[3] 焦彬如,吴彦,陈黎明,等. 超长混凝土墙体温度应力计算及裂缝控制新技术研究[J]. 土木工程学报,2011,44(9):35-41. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2011.09.016.

[4] 陈平友,肖克艰,陈志强,等. 成都双流国际机场 T2 航站楼超长结构中预应力的应用[J]. 建筑结构,2010,40(9):11-13. DOI:10.19701/j.jzjg.2010.09.003.

[5] 蒋方新,陈尚志,邵兴宇,等. 超长混凝土结构在使用阶段温度应力下的裂缝控制[J]. 建筑结构,2021,51(14):107-111. DOI:10.19701/j.jzjg.2021.14.018.

[6] 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.

[7] 范重,刘学林,刘涛,等. 济南遥墙机场 T2 航站楼超长结构温度及行波效应研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(9):1-13. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0833.

[8] 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.

[9] 何本贵,刘芳,常为华,等. 超长混凝土结构温度作用正交分析与研究[J]. 工业建筑,2011,41(增刊 1):714-717.

DOI:10.13204/j.gyz2011.s1.168.

[10] 郑永路,周青,杨会杰.某两层钢筋混凝土框架结构厂房温度作用计算分析[J].建筑结构,2023,53(增刊1):221-224. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1150.

[11] JIA Yigang,LU Liangjian,WU Guangyu,*et al.* Temperature stress analysis of super-long frame structures accounting for differences in the linear expansion coefficients of steel and concrete[J]. Processes,2021,9(9):1519. DOI: 10.3390/pr9091519.

[12] JIA Yigang,LU Liangjian,WU Guangyu,*et al.* Spatial nonlinear simulation analysis on the temperature shrinkage effect of a super-long frame structure considering the construction process[J]. Processes,2022,10(9):1874. DOI: 10.3390/pr10091874.

[13] LI Yanying,ZHANG Yongsheng. An analysis of temperature stress and deforming considering shrinkage and creep in super-long frame structure[J]. Key Engineering Materials,2006,326:1467-1470. DOI:10.4028/www.scientific.net/kem.326-328.1467.

[14] YANG Zhiyong,ZHAO Liang,ZHANG Peng,*et al.* Research on temperature stress of annular super-long frame structure by finite element method[J]. Advanced Materials Research,2013,639:1200-1205. DOI:10.4028/www.scientific.net/amr.639-640.1200.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2024.

[16] 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.

[17] 叶勇,薛昱莹,孙大为,等.衬塑钢管海水海砂混凝土短柱轴压性能有限元分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2023,44(4):442-450. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202303015.

[18] 何涛,陈文祥.铝模早拆体系下的楼板裂缝控制有限元建模与分析[J].建筑结构,2021,51(增刊1):1361-1367.

[19] 吴健余,杨邦成.房屋结构在地震作用下的有限元分析[J].价值工程,2017,36(7):172-174. DOI:10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2017.07.071.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[21] 高志斌.温度应力对机场道面板厚度与分块设计影响研究[J].建筑结构,2011,41(增刊1):1068-1072. DOI:10.19701/j.jzjg.2011.s1.252.

[22] 任思霖,高林,王苏康,等.基于承载性能的混凝土楼盖梁板刚度影响因素分析[J].华北理工大学学报(自然科学版),2024,46(4):100-109. DOI:10.3969/j.jssn.2095-2716.2024.04.012.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)