

大体量商业综合体楼板温度应力分析

王亚辉 黄杰 袁榛

机械工业第四设计研究院有限公司 河南洛阳 471000

摘要: 洛阳大河荟项目 2#楼为大型商业综合体, 采用现浇钢筋混凝土框架结构, 建筑物总长约为 179.70m, 总宽约为 135.44m, 为大面积超长现浇混凝土结构。本文介绍了温度作用的取值以及温度作用下楼板应力分析、整楼温度变形对竖向构件的影响, 对比分析了设置结构缝前后楼板温度应力大小, 为类似项目设计提供参考。

关键词: 温度应力; 超长混凝土结构; 附加弯矩

引言

进入 21 世纪以来, 我国经济飞速发展, 人民的生活水平有了很大的提高, 人们对建筑的需要已经不再是简单的满足使用这一基本条件, 而是最求更好的立面效果、更合理的业态流线以及更完美的空间体验。因此大体量的公共建筑如雨后春笋般涌现出来, 这其中最具代表性的是: 机场、高铁站、体育场以及大型商业综合体。这类建筑有一个共同特点, 那就是体量超大、功能流线非常复杂、建筑立面效果要求很高、建筑体型非常不规则。

传统的设计思路是采取结构缝把大体量单体切分成若干个小且规则的结构单元, 但是这种做法势必会对建筑功能、立面效果产生较大的影响, 随着人们对建筑要求的提高, 这种做法越来越难以接受。在上述背景下, 大体量超长无缝结构迅速发展起来了, 但是, 这种结构在温度作用下会产生较大的变形及应力, 若不采取可靠的措施加以防范, 会对使用产生较大的影响, 甚至会影响到主体结构的安全。近年来的工程实践证明, 随着技术及材料的进步, 采用合理的设计分析方法, 规范的施工组织, 可以有效解决这一问题。

本文以洛阳大河荟项目 2#楼为例, 介绍温度作用的取值以及温度作用下楼板应力分析、整楼温度变形对竖向构件的影响, 对比分析设置结构缝前后楼板温度应力大小, 为类似项目设计提供参考。

1 项目概况



图 1 项目鸟瞰图

项目位于洛阳市洛龙区金城寨街与站前西路东北角站前西路以北, 通衢路以南, 金城寨街以东, 永泰街以西区域。场地四周均临城市道路, 项目地理位置优越, 出入顺畅, 交通便利, 区域位置优越。项目致力于文化旅游、城市发展、消费体验、商务办公、酒店公寓、商业、充电桩等多维业态于一体的大型商业项目。2#楼建筑物总长约为 179.70m, 总宽约为 135.44m, 建筑结构总高度为 23.8 5m (室外地面至檐口和屋脊的平均高度)。地下 2 层, 地上 5 层, 主

要建筑功能为商业、餐饮、图书阅览、办公及酒店。建筑层高: 地下二层为 4.200m, 地下一层为 5.700m, 首层为 5.700m, 二层、三层为 3.900m, 四层为 4.000m, 五层顶为坡屋面。

2 结构概况

2#楼主体结构采用钢筋混凝土框架结构 (局部大跨度宴会厅采用后张法有粘结预应力混凝土梁), 平面尺寸超过了《混凝土结构设计规范》^[1]表 8.1.1 中结构伸缩缝最大间距的要求 (框架结构伸缩缝最大间距为 55m), 为超长混凝土结构。

为了满足建筑功能和立面的需要、增强结构体的整体性, 在 2#楼中部设置了一道变形缝, 其余位置均不再设置永久变形缝。现简要介绍设变形缝前后温度作用的计算分析和结构采取的应对措施。



图 2 2#楼整体分析模型 (含地下室)

3 温度作用取值

现浇钢筋混凝土框架结构温度应力分析主要考虑季节温差^[2], 同时应考虑混凝土收缩徐变和刚度退化的影响。混凝土徐变是在持续恒定应力作用下应变不断变化的一种现象, 是随时间而增加的沿应力方向的应变, 其大小与作用的应力大小成正比, 同时混凝土徐变还与构件尺寸、加载时混凝土龄期、混凝土所处环境相对湿度等诸多因素有关。因为混凝土的徐变与约束应变同向, 所以混凝土徐变会导致结构约束应力、约束应变不断减小。混凝土的收缩和季节温差都是随时间变化比较缓慢的作用, 是一个长期效应。混凝土的徐变特性有利于结构的内力重分布, 使混凝土应力产生松弛, 从而减小混凝土收缩变形产生的拉应力。徐变最终应变值约为初始瞬时应变的 1~4 倍。这种变形相当于混凝土弹性变形模量的折减, 从而引起混凝土内应力的下降^[3]。王铁梦提出^[4]松弛系数的概念, 松弛系数指松弛应力与弹性应力的比值, 以 $H(t, \tau_1)$ 表示, 该系数与产生约束应力的龄期 τ_1 有关, 也与延续时间 t 有关, 同时指出一般条件下的松弛系数在 0.3~0.5 之间。对于混凝土结构, 刚度折减系数可取 0.85, 当采用预应力时, 刚度折减系数可取 1.0。设计时, 温度效应组合可只考虑与重力荷载效应按照下式进行组合:

$$S = \gamma_G S_{GK} + \phi_T \gamma_T S_{TK}$$

其中重力荷载作用分项系数 γ_G 取 1.3, 温度效应分项系数 γ_T

取 1.5, 温度效应组合系数 ϕ_T 取 0.8。

1) 洛阳地区自然气候条件:

极端气温: $-18^{\circ}\text{C}\sim 43.5^{\circ}\text{C}$

基本气温⁹⁾: $-6^{\circ}\text{C}\sim 36^{\circ}\text{C}$

2) 根据混凝土结构对季节性气温引起的结构温度场不同的特点, 并考虑室内外温度区别, 制定本项目结构可能遭遇的气候温度如下:

$$T_{S,min} = -18^{\circ}\text{C}; T_{S,max} = 43.5^{\circ}\text{C}$$

3) 根据总包单位提供的本项目施工工期安排, 2#楼温度后浇带合拢时间大约是 2021 年 05 月份。

结构可能的合拢温度区间: $T_{0,min} = 10^{\circ}\text{C}; T_{0,max} = 25^{\circ}\text{C}$

4) 可能引起的本工程升降温度:

升温工况

$$\Delta\text{TK} = T_{S,max} - T_{0,min} = 43.5^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 33.5^{\circ}\text{C}$$

降温工况

$$\Delta\text{TK} = T_{S,min} - T_{0,max} = -18^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = -43^{\circ}\text{C}$$

5) 等效温差:

正温差 = $33.5 \times 0.4 \times 0.85 = 11.39^{\circ}\text{C}$, 负温差 = $-43 \times 0.4 \times 0.85 = -14.62^{\circ}\text{C}$ 。

4 混凝土结构单元楼板温度应力分析

表 1 楼板温度应力 (MPa) (不设缝模型)

区域	最大主应力 S_x (MPa)	最大主应力 S_y (MPa)
标高-0.050 楼板	2.23	1.58
标高 5.650 楼板	2.74	2.06
标高 9.550 楼板	1.03	0.86
标高 13.450 楼板	0.25	0.12
标高 17.500 楼板	0.11	0.10
坡屋面楼板	0.10	0.10

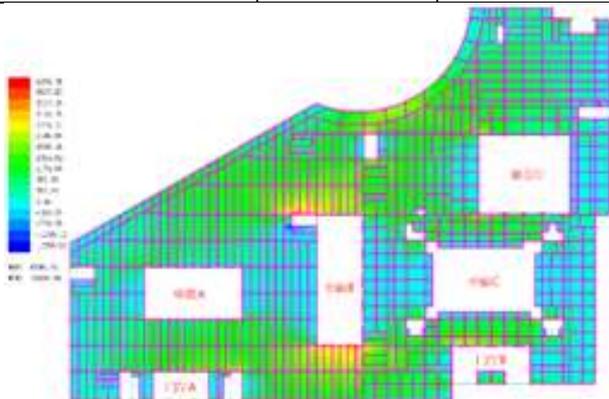


图 3 标高 5.650 楼板降温工况主应力 S_x



图 4 高 5.650 楼板降温工况主应力 S_y

4.1 结构不设变形缝, 等效温差作用下, 采用 SATWE 进行计算分析。结构整体分析采用空间杆-壳元墙元模型, 用空间杆单元模拟梁、柱等杆件, 用在壳元基础上凝聚而成的墙元模拟剪力墙, 楼板采用弹性模模拟, 并考虑梁、板、柱协同工作, 计算所得楼板温度应力列表详见表 1, 楼板温度应力云图 (局部楼层) 详见图 3~图 4。

综合应力图结果及表格统计, 分析结果如下:

1) 标高-0.050 楼板在全楼升温的工况下会出现较大的拉应力, 本层楼板各区域主应力 (95%超越概率) 的代表值约为 2.23MPa。局部楼板温度应力峰值可达 2.97MPa。局部楼板温度应力峰值超过混凝土 (C40) 的抗拉强度 2.39MPa, 设计阶段采取加大配筋的方式抵抗温度作用。

2) 标高 5.650 楼板在全楼降温的工况下会出现较大的拉应力, 本层楼板各区域主应力 (95%超越概率) 的代表值约为 2.74MPa。局部楼板 (中庭 B) 周边温度应力峰值 S_x 可达 3.13MPa, (中庭 B) 与 (中庭 C) 之间楼板温度应力峰值 S_y 可达 3.00MPa。本层大部分楼板温度应力均超过混凝土 (C40) 的抗拉强度 2.39MPa, 局部楼板温度应力较大的区域 (洞口周边) 采用无粘结预应力楼板, 通过施加预应力阻止楼板开裂, 其余位置楼板采取加大配筋的方式抵抗温度作用。

3) 标高 9.550 及以上楼板在全楼降温的工况下会出现拉应力, 拉应力 (95%超越概率) 的代表值均小于混凝土 (C40) 的抗拉强度 2.39MPa, 混凝土在温度作用下不会开裂。

4.2 结构在 (中庭 B) 左侧设置一道变形缝, 设缝后左单元结构尺寸为 99.74 米 x 103.00 米, 右单元结构尺寸为 79.80 米 x 135.44 米, 等效温差作用下, 采用 SATWE 进行计算分析。结构整体分析采用空间杆-壳元墙元模型, 用空间杆单元模拟梁、柱等杆件, 用在壳元基础上凝聚而成的墙元模拟剪力墙, 楼板采用弹性模模拟, 并考虑梁、板、柱协同工作, 计算所得楼板温度应力列表详见表 2, 楼板温度应力云图详见图 5~图 6。

表 2 楼板温度应力 (MPa) (设缝模型)

区域	最大主应力 S_x (MPa)	最大主应力 S_y (MPa)
标高-0.050 楼板	1.50	1.51
标高 5.650 楼板	左单元 1.94 右单元 1.94	左单元 1.29 右单元 1.97
标高 9.550 楼板	左单元 0.20 右单元 0.72	左单元 0.15 右单元 0.76
标高 13.450 楼板	左单元 0.10 右单元 0.26	左单元 0.10 右单元 0.12
标高 17.500 楼板	左单元 0.10 右单元 0.10	左单元 0.10 右单元 0.10
坡屋面楼板	0.10	0.10



图5 标高 5.650 楼板温降主应力 Sx



图6 标高 5.650 楼板温降主应力 Sy

综合应力图结果及表格统计,分析结果如下:

1) 标高-0.050 楼板在全楼升温的工况下会出现较大的拉应力, 本层楼板各区域主应力(95%超越概率)的代表值约为 1.51MPa。局部楼板温度应力峰值可达 1.79MPa。本层楼板拉应力均为超过混凝土(C40)的抗拉强度 2.39MPa, 混凝土在温度作用下不会开裂。

2) 标高 5.650 楼板在全楼降温的工况下会出现较大的拉应力, 本层楼板各区域主应力(95%超越概率)的代表值约为 1.94MPa。局部楼板(中庭 B)与(中庭 C)之间楼板温度应力峰值 Sy 可达 2.32MPa。本层楼板拉应力均为超过混凝土(C40)的抗拉强度 2.39MPa, 混凝土在温度作用下不会开裂。

3) 标高 9.550 及以上楼板在全楼降温的工况下会出现拉应力, 拉应力(95%超越概率)的代表值均小于混凝土(C40)的抗拉强度 2.39MPa, 混凝土在温度作用下不会开裂。

5 混凝土结构单元竖向构件温度作用下内力分析

等效温差作用下, 在 SATWE 模型中, 楼板采用弹性模, 并考虑梁、板、柱协同工作, 选取 4 颗角柱及 8 颗洞口周边柱, 统计其单工况内力(温度作用下)在设缝前后变化情况, 详见表 3。

表 3 框架柱首层柱底弯矩 (KN·m)

框架柱 编号	不设缝模型		设缝模型	
	柱底弯矩 Mx	柱底弯矩 My	柱底弯矩 Mx	柱底弯矩 My
KZ01	1516.2	1035.2	847.0	948.2
KZ02	79.4	733.6	102.3	462.4
KZ03	972.2	909.7	1029.9	617.1
KZ04	1414.6	1839.0	1311.9	1284.2
KZ05	352.4	1105.7	208.2	486.8
KZ06	76.2	592.4	50.2	84.9

KZ07	431.9	133.6	384.1	291.5
KZ08	176.3	309.5	222.7	320.0
KZ09	374.6	106.5	366.3	445.5
KZ10	26.0	777.8	88.7	401.1
KZ11	194.3	683.2	245.0	158.2
KZ12	1111.7	1509.5	933.6	945.0



图7 对比分析所选取框架柱编号图

综合分析可以看出:

1) 框架柱在升温(降温)工况下均会出现附加弯矩, 角柱受温差效应影响最为明显, 位于单体中心区域的框架柱受温差效应影响很小, 可忽略不计。

2) 单根柱子分析, 温差效应所引起的附加弯矩集中在首层柱底, 随着层高的增加, 附加弯矩急剧减小。

3) 由 KZ03 和 KZ04 可以看出, 设置伸缩缝减小了单体的水平向长度(由 184.6 米减小至 84.7 米), 柱底附加弯矩(My)随之减小 50%左右。由此可见, 在条件允许的情况下设置变形缝可以有效减少温差效应引起的柱底附加弯矩。

4) 有 KZ07 和 KZ09 可以看出, 设缝之前此部分框架柱靠近单体中心, 附加弯矩相对较小; 设缝之后, 框架柱相对温度单元的位置发生了变化, 附加弯矩有增大的趋势, 但整体来看, 附加弯矩值不大。

6 结论

从竖向对比可看出: 楼板温度应力最大的位置是首层顶板, 随着楼层的增加, 温度应力逐渐减小。造成此情况的原因是, 假定地下室无温差变化, 即地下室楼板为温度不动点, 地上各层在温差作用下的变形及应力均集中发生在与不动点相连的边界处, 即首层顶板。

同一楼层, 楼板温度应力较大部位主要是建筑物的周边、楼板大开洞的位置。设置变形缝减小结构单元的长度可有效降低楼板温度应力。

整栋楼温度变形对首层竖向构件带来的影响最大(产生附加弯矩), 设计时应引起重视。

参考文献:

[1]《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)(2015 年版)
[2]韩重庆, 孟少平. 大面积混凝土梁板结构温度应力问题的探讨[J]. 建筑技术, 2000, 31(12): 820-822.
[3]吕旭东. 超长混凝土框架结构考虑温度和收缩的裂缝控制初步研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
[4]王铁梦, 工程结构裂缝控制, 中国建筑工业出版社, 1997.8
[5]《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)