

# Temperature Effects Analysis of a Super-Long Connective Structure

Chao Gao<sup>1</sup>, Nengwen Wu<sup>2</sup>, Yongming Zhou<sup>1</sup>, Weibin Xu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Prov. Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Zhejiang Hancheng Architectural Design Co. Ltd., Yiwu Zhejiang

Email: george\_2012@163.com

Received: Apr. 4<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2020; published: May 7<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Conjoined parts of the floor by rigid connections often form a super-long structure. Under the action of horizontal temperature difference, vertical elements of towers on both sides have a great constraint on the horizontal deformation of the concrete floors. The vertical members of the tower are subject to the corresponding horizontal shear force. The temperature effect is very obvious in the design of long span super-long conjoined structure, so the horizontal temperature effect should be analyzed. Based on an example of a long span super-long conjoined structure, the stress changes of the vertical lateral force-resisting members of the conjoined towers on both sides under the action of horizontal temperature and the stress distribution characteristics of the floor slab at the conjoined parts are obtained. According to the influence range and weak position of temperature effect, some design suggestions and strengthening measures are given.

## Keywords

Temperature Effects, Super-Long Conjoined Structure, Rigid Connections

---

# 温度效应对超长连体结构的影响分析

高超<sup>1</sup>, 吴能文<sup>2</sup>, 周永明<sup>1</sup>, 徐伟斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>浙江翰城建筑设计有限公司, 浙江 义乌

Email: george\_2012@163.com

收稿日期: 2020年4月4日; 录用日期: 2020年4月30日; 发布日期: 2020年5月7日

## 摘 要

刚性连接的连体部位楼层常形成超长结构, 在水平温差作用下, 两侧塔楼竖向构件对混凝土楼层沿水平方向变形产生较大约束, 塔楼竖向构件受到相应的水平剪力作用。大跨度超长连体结构设计中温度效应非常明显, 应进行水平温度效应分析。通过某大跨超长连体结构算例, 得出了连体两侧塔楼竖向抗侧力构件在水平温度作用下的受力变化和连体部位楼板应力分布特征。针对温度效应的影响范围和薄弱部位, 给出了相关设计建议和加强措施。

## 关键词

温度效应, 超长连体, 刚性连接

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

根据连接体结构与塔楼的连接方式, 一般分为强连接方式和弱连接方式。当连接体与两侧塔楼刚性连接时, 连接体可与塔楼结构整体协调, 共同受力, 此时连接体除了承受重力荷载外, 还要协调连接体两侧塔楼的变形和振动所产生的作用效应。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010) [1]规定, 连体结构应进行风荷载和地震作用计算、施工模拟分析及舒适度验算, 尚未对刚性连接的连体结构温度效应分析作出具体规定。目前已经建成和在建的刚性连接的连体结构, 相关的研究工作主要集中在连体动力特性、抗震性能、连接节点等方面, 而针对超长连体结构温度效应分析的研究还相对较少。在温度荷载作用下, 两侧塔楼竖向构件对混凝土楼层沿水平方向变形产生较大约束, 降温时, 水平构件受拉, 塔楼竖向构件受剪而产生附加内力, 附加内力与水平温差、结构长度和约束强弱等因素直接关联, 呈非线性变化。因此, 连体结构设计中温度效应影响不可忽略。

## 2. 设计概况

本项目为某五星级酒店, 地下 2 层, 主楼地上 13 层, 结构总高度 58.2 m, 裙楼 3 层, 主楼与裙楼形成大底盘结构。因主楼建筑立面开双洞, 故在主楼第 7 层设置两跨型钢混凝土转换桁架, 跨度分别为 36 m、14 m, 桁架高度 5.1 m, 桁架下弦底部相对标高 28.900 m, 形成大跨度双跨连体结构(强连接)。1~3 层底盘结构平面尺寸为 108 × 65 m (L × B), 4~6 层三个塔楼结构平面尺寸分别为 27 × 22 m、4 × 22 m、27 × 22 m, 7~13 层连体结构平面尺寸为 108 × 22 m, 结构单元纵向长度远超《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) [2]规定的限值。连体转换层结构平面、剖面见图 1、图 2。

主体结构采用钢筋混凝土框架-剪力墙体系, 利用两侧和中部的楼、电梯间设置纵横剪力墙, 形成抗侧刚度较大的筒体。连接体部分采用钢筋混凝土框架结构, 在连接体下部楼层(7 层)沿纵向布置 4 榀型钢混凝土转换桁架承托连接体, 将连接体部分荷载传至两侧和中部塔楼。连接体下部桁架与各塔楼均采用刚性连接, 桁架上、下弦杆伸入两侧塔楼各一跨并可靠锚固。支承转换桁架的框架柱均采用型钢混凝土柱。墙柱竖向构件混凝土强度等级由下至上为 C50~C40, 梁板水平构件均为 C35。楼、屋盖均采用钢

钢筋混凝土梁板体系，除连接体转换桁架上、下弦楼板及屋面板厚度为 150 mm 外，其余楼板厚度均为 120 mm。

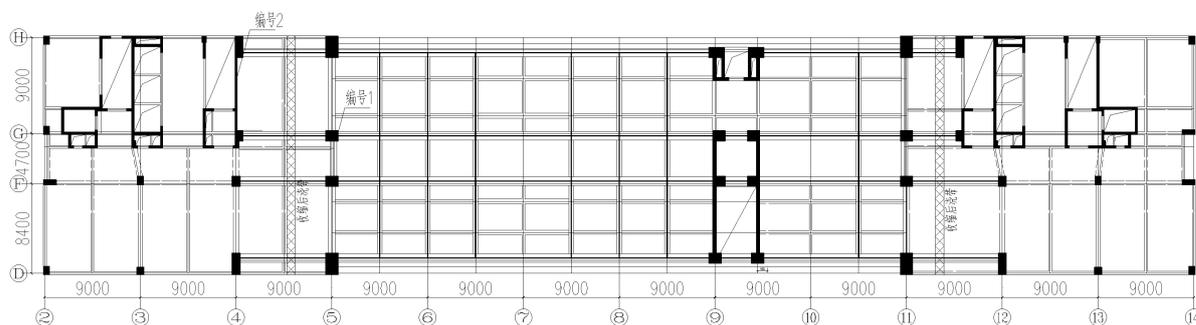


Figure 1. Schematic diagram of conjoined transfer layer structure  
图 1. 连体转换层结构平面示意图

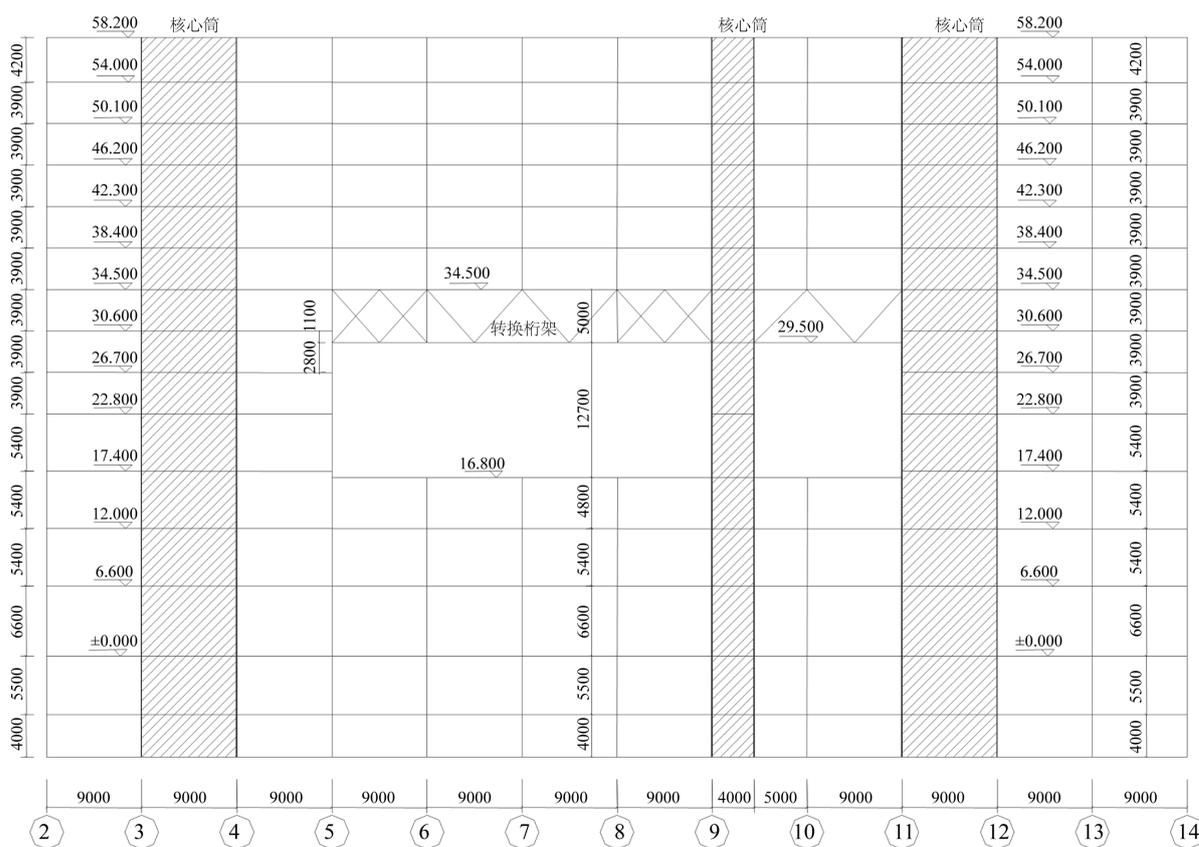


Figure 2. Schematic diagram of structural profile  
图 2. 结构剖面示意图

### 3. 水平温差计算

因季节温差作用时间长、对整体结构影响大，故分析时，温度效应可不考虑骤降温差和日照温差作用，仅考虑混凝土材料的徐变、收缩效应和季节温差效应两部分[3]，其中混凝土材料的徐变、收缩效应等效为当量温差。

1) 混凝土收缩当量温差计算:

混凝土收缩应变的形成和发展与混凝土龄期密切相关, 根据混凝土收缩应变计算公式[4]有:

$$\varepsilon_{sh}(t) = M(1 - e^{-0.01t})\varepsilon_{y0} \quad (1)$$

式中  $\varepsilon_{sh}(t)$  为龄期  $t(d)$  混凝土收缩应变;  $\varepsilon_{y0}$  为混凝土极限收缩应变, 可取  $3.24 \times 10^{-4}$ ;  $t$  根据后浇带封闭时间确定, 对收缩后浇带  $t$  可取 45 d~90 d [1];  $M$  为考虑各种非标条件的修正系数, 一般取 1.01。

混凝土收缩当量温差:

$$\Delta T_y = \varepsilon_{sh}(t) / \alpha_c \quad (2)$$

式中  $\alpha_c$  —混凝土线膨胀系数, 取  $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

2) 季节温差计算  $\Delta T_t$ : 根据结构的合拢温度区间, 按《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) [3] 规定进行计算。本工程结构合拢温度取  $T_0 = 16^\circ\text{C} \sim 18^\circ\text{C}$ ; 当地最低基本气温约  $-2^\circ\text{C}$ , 最高基本气温  $36^\circ\text{C}$ , 季节温差  $\Delta T_t = \pm 20^\circ\text{C}$ 。

3) 总水平温差  $\Delta T$ :  $\Delta T = \Delta T_t + \Delta T_y$ 。

4) 混凝土徐变应力松弛效应: 可计入混凝土徐变应力松弛系数  $k = 0.3$ , 构件刚度折减系数取 0.85。

## 4. 结构分析

设置收缩后浇带是减小混凝土徐变、收缩效应的常用措施。为分析收缩后浇带及其封闭时间对结构温度效应的影响, 分别取未设置收缩后浇带、收缩后浇带封闭时间 45 d 和 90 d 三种工况进行计算。

1) 未设置收缩后浇带(工况 1): 假定混凝土自浇筑 3 天后开始收缩, 混凝土收缩当量温差  $\Delta T_y = 31^\circ\text{C}$ , 则总水平温差  $\Delta T = -51^\circ\text{C}$  (降温)/ $-11^\circ\text{C}$  (升温)。

2) 后浇带按 45 d 后封闭(工况 2), 封闭后混凝土收缩当量温差为  $\Delta T_y = 20^\circ\text{C}$ , 则总水平温差  $\Delta T = -40^\circ\text{C}$  (降温)/ $0^\circ\text{C}$  (升温)。

3) 后浇带按 90 d 后封闭(工况 3), 封闭后混凝土收缩当量温差为  $\Delta T_y = 13^\circ\text{C}$ , 则总水平温差  $\Delta T = -33^\circ\text{C}$  (降温)/ $7^\circ\text{C}$  (升温)。

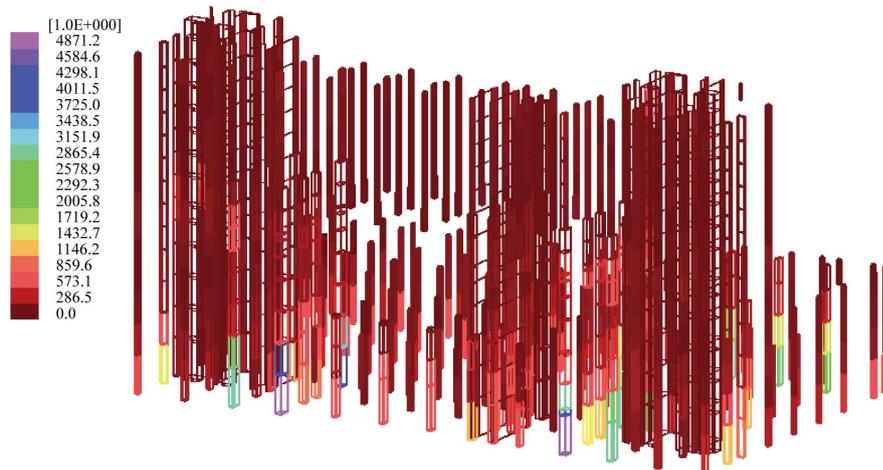
上述结果可知, 由于混凝土收缩当量温差表现为负温差, 故设计计算温差主要由负温差控制。通过设置或延长后浇带封闭时间, 可明显减小混凝土收缩当量温差。

采用 PMSAP 软件进行温度效应计算。对室内构件仅考虑混凝土收缩当量温差, 对室内外相交处构件考虑季节温差和混凝土收缩当量温差之和。按节点温差输入。荷载标准组合取重力荷载(含永久荷载和可变荷载)标准值+温差效应标准值, 荷载基本组合中温差效应分项系数取 1.5, 组合值系数取 0.6 [3]。按弹性楼板假定进行内力计算。

### 4.1. 竖向抗侧力构件内力对比

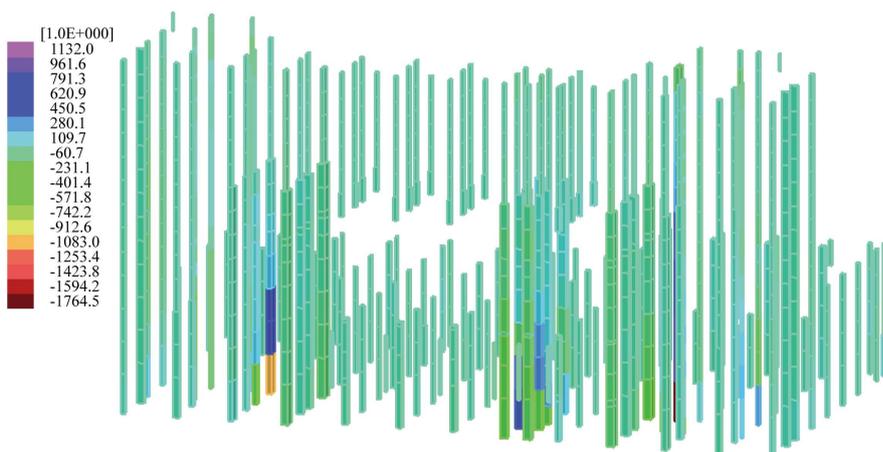
当楼层出现负温差时, 梁板因收缩而受拉, 由于竖向构件抗侧刚度较大, 对楼板和梁在水平方向的变形产生较大约束, 竖向构件会受到相应的水平剪力作用。特别是对于水平跨度较大, 核心筒分布于结构两侧的双筒连体结构, 核心筒对连体部位楼板水平变形的约束更强, 温度效应十分显著。在水平负温差作用下(工况 1), 竖向构件的内力变化如图 3、图 4 所示。

结果显示: 剪力墙和柱沿高度分布的最大剪力出现在连体底部(转换桁架层); 沿平面分布的最大剪应力出现在端柱和两侧核心筒外周剪力墙部位; 同时与连体相邻下层的剪力墙和柱也出现较大的附加剪力和弯矩。以 6 层、7 层为例, 选取转换桁架支承柱(编号 1)和邻近核心筒剪力墙(编号 2)的构件内力作对比, 见表 1。



**Figure 3.** The cloud diagram of bending moment of vertical member under the action of cooling for condition 1

**图 3.** 工况 1 降温作用下竖向构件弯矩云图



**Figure 4.** The cloud diagram of axial force of vertical member under the action of cooling for condition 1

**图 4.** 工况 1 降温作用下竖向构件轴力云图

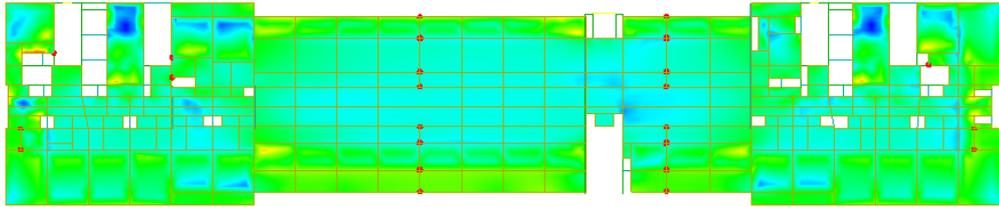
**Table 1.** Analysis of internal forces in supporting columns of transfer truss and adjacent shear wall member [Unit: kN (kN·m)]  
**表 1.** 转换桁架支承柱与邻近剪力墙构件内力分析[单位: kN (kN·m)]

构件	考虑温度效应最大剪力 (最大弯矩)	不考虑温度效应最大剪力 (最大弯矩)	差值百分比
6 层支承柱(编号 1)	371 (382)	355 (347)	4.5% (10.1%)
7 层支承柱(编号 1)	3712 (7866)	3483 (7215)	6.4% (9%)
6 层剪力墙(编号 2)	1662 (9964)	1538 (9743)	8.1% (2.2%)
7 层剪力墙(编号 2)	1634 (9874)	1485 (9385)	10% (5.2%)

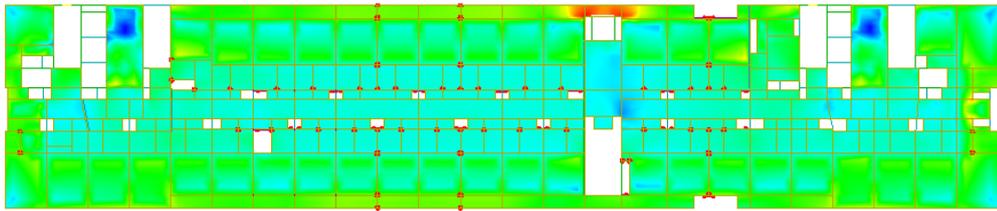
## 4.2. 楼板应力

温度变化下, 楼板在水平方向的膨胀和收缩受到约束产生拉应力。特别是对于纵向平面尺寸较长和跨度较大的连体结构的室内外相交楼板(如 7 层), 楼板温度应力最大。选取 7 层、8 层楼板进行温度应力

分析(工况 1), 降温作用下楼板正应力云图如图 5、图 6 所示。

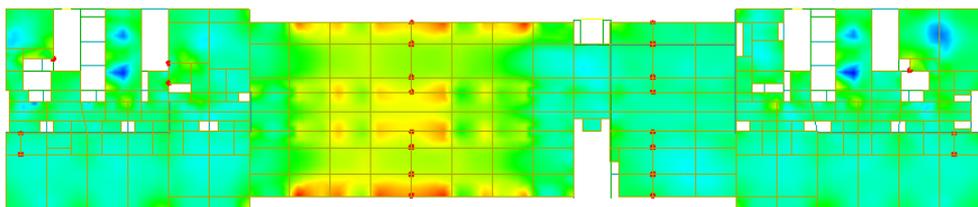


**Figure 5.** Temperature stress distribution cloud diagram of 7-floor slab (condition 1)  
**图 5.** 7 层楼板温度应力分布云图(工况 1)

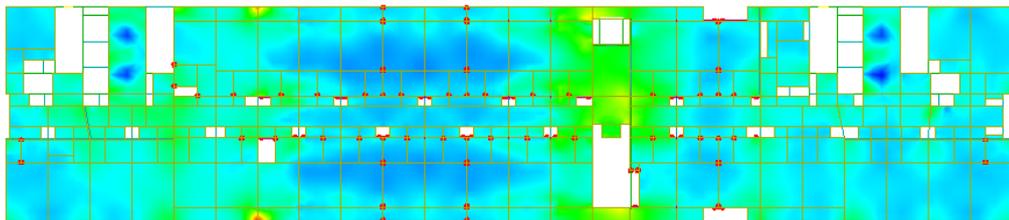


**Figure 6.** Temperature stress distribution cloud diagram of 8-floor slab (condition 1)  
**图 6.** 8 层楼板温度应力分布云图(工况 1)

结果显示: 两侧核心筒外周剪力墙附近楼板出现较大拉应力, 最大拉应力值 8.6 Mpa, 7 层连接体与两侧塔楼连接处楼板最大拉应力值 3.6 Mpa, 连接体部位的楼板应力呈梯度分布, 两端区域楼板应力最大, 中间区域楼板应力最小; 而 8 层连接体与两侧塔楼连接处楼板最大拉应力值为 2.7 Mpa。当按工况 3 计算时, 温度应力分布与工况 1 呈现相同的规律, 但两侧核心筒外周剪力墙附近楼板最大拉应力值减小为 5.1 Mpa, 7 层连接体与两侧塔楼连接处楼板最大拉应力值 2.2 Mpa。需要指出的是, 在基本组合工况下, 转换桁架下弦层楼板较大的拉应力, 而上弦层楼板受到较大的压应力, 因此, 对转换层的楼板, 尤其是下弦层楼板, 需采取必要的加强措施。基本组合工况下楼板正应力云图如图 7、图 8 所示。



**Figure 7.** Basic composite stress distribution cloud diagram of 7-floor slab (condition 1)  
**图 7.** 7 层楼板基本组合应力分布云图(工况 1)



**Figure 8.** Basic composite stress distribution cloud diagram of 8-floor slab (condition 1)  
**图 8.** 8 层楼板基本组合应力分布云图(工况 1)

## 5. 结论及建议

综上所述,水平温差效应对超长连体结构的竖向抗侧力构件内力和楼板应力均有较大影响,直接影响内力计算结果和构件截面设计,设计应予以重视。通过算例分析,可以得出如下结论及建议:

(1) 设计计算温差等于季节温差与混凝土收缩当量温差之和,而混凝土收缩当量温差表现为负温差,因此当季节正温差和负温差绝对值大致相同时,总水平负温差计算值大于正温差计算值,结构裂缝一般由负温差控制。

(2) 水平温差效应对水平跨度较大,核心筒分布于结构两侧的双筒超长连体结构的竖向构件内力产生显著影响(见表 1)。整体结构应进行水平温度效应组合分析,复核各塔楼竖向构件的承载力是否满足。

(3) 水平温差效应对与连体相邻下层(薄弱层)的竖向构件也产生一定的附加剪力和弯矩(见表 1)。剪力墙和柱截面设计时,应计入附加内力,并提高剪力墙和柱的截面配筋,同时适当控制两侧塔楼核心筒外周剪力墙和支承连接体转换柱的轴压比,有利于提高其抗剪承载力和抗震延性性能。

(4) 水平温差作用下,楼板最大拉应力出现在两侧核心筒外周剪力墙附近,与两侧塔楼相连的连接体楼板也出现较大的拉应力,该部位楼板除协调两侧塔楼的变形,承担两侧塔楼楼层地震作用力外,还承受水平温差产生的附加拉力,应提高连接处楼板、水平梁的配筋率,控制楼板拉应力。

(5) 连接体转换桁架下弦杆属拉弯构件,在竖向荷载作用下,下弦杆附近两侧楼板承受较大拉应力,且属室内外相交楼板,相对其他楼层而言,楼板温度应力最大,应力叠加值最大,为避免楼板混凝土开裂可能导致桁架刚度退化的影响,建议除加强连接体部位楼板配筋外,宜按“零楼板假定”复核转换桁架杆件内力。

(6) 设置或延长后浇带封闭时间可明显减小混凝土收缩当量温差和楼板拉应力。在两侧塔楼的连接跨设置收缩后浇带,可提前释放楼层混凝土的部分收缩应变。对温度收缩效应明显的楼层(如转换桁架上、下层等),可采取延长后浇带封闭时间的措施,减少收缩当量温差。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范(2015年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.