

某圆形平面的大跨度钢框架结构超限设计

赵菊全

深圳市建筑设计总院有限公司 广东深圳 518000

【摘要】某环形建筑为四层商业楼，带一层地下室，地上四层，采用钢框架结构体系；该建筑平面为环形建筑，结构高度为26.5m，本工程属于高度不超限，但存在扭转不规则、楼板不连续、尺寸突变以及其他不规则（夹层）四项一般不规则项的超限项目，需对该楼进行抗震超限设计。对整体结构进行了小震弹性分析，用YJK和MIDAS两种软件进行小震对比分析，确保分析结果的合理、可靠，并且采用弹性时程分析法进行补充计算，确保结构计算的准确性，并补充设防地震以及罕遇地震下的验算，并且对大跨度结构采取专项分析，验算各构件在地震作用下满足使用要求，保证结构安全。

【关键词】钢框架；钢管混凝土柱；空腹桁架；节点分析；有限元

1 工程概况

该环形建筑H#楼位于济南市高新区贤文片区崇华路以东、新泺大街以北、舜华路以西，包含A、B、C、D共4座塔楼和H#楼。圆环形的H#楼将4座塔楼建立有机的连接，建筑面积约22434平方米，主要建筑功能为商业。H#楼地上4层，在地面与2层楼面之间设有局部夹层，采用钢框架结构，地上4层，至大屋面高度为26.5m。首层层高9m，二层、三层和四层层高分别为5.5m、6.0m和6.0m，在首层与二层之间设有部分夹层（标高4.8m）。结构平面为圆环形，圆环内径为30.0m，圆环外径为46.4m，高宽比为0.29；H#楼共有3处大跨度区域，跨度分别为32.8m、22.4m和28.0m；采用钢框架结构体系。H#楼效果图如图1所示。



图1：H#楼效果图

2 结构体系

H#楼采用钢框架结构，结构竖向荷载通过钢框架梁或空腹桁架传递至框架柱，水平荷载作用由框架柱承担，框架柱采用钢管混凝土柱。根据建筑方案效果要求，大跨度有

两处采用空腹桁架一处采用空腹桁架结合支座斜腹杆形式实现。

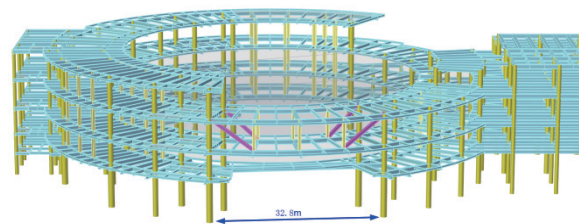


图2：桁架1（带斜腹杆）

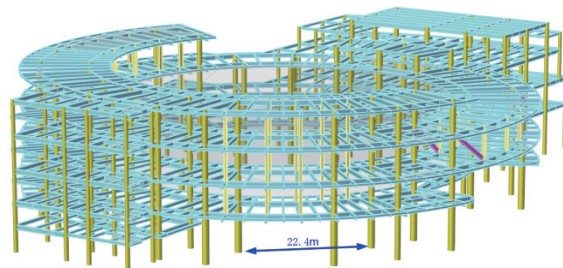


图3：空腹桁架2

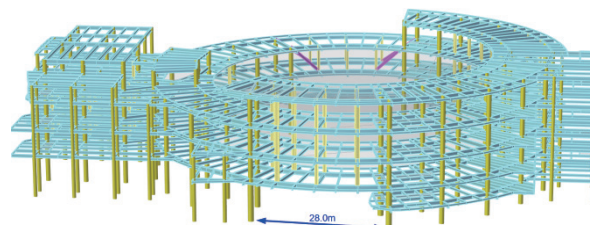


图4：空腹桁架3

3 超限情况分析

这个项目的地震防护强度设定为7级，其设计的基本地震加速度为0.10g。这个项目的设计地震被分成了第三组，场地被分类为第二类。H#楼是一个独立的抗震单元，

建筑面积大约占地22434平方米，其中商业用地超过7000平方米。因此，根据GB50223-2008建筑工程地震防护分类标准，这个项目被定位为重点防护类。不规则情况汇总如下表2：

4 抗震超限设计的计算及分析

4.1 抗震性能目标

考虑到这项工程在高度上并没有超标，但存在四个一般性的不规则项，包括扭曲不规则、楼板断裂、尺寸突变和其他不规则性（比如夹层）。结合结构超标的情况和对经济效益的考虑，我们为工程选择了C级的性能目标。受到强烈地震影响时，建筑结构部件达到了性能等级3的标准。面对罕见地震影响的预测中，构筑元素达到了第四级的性能标准。具体的性能目标见表3。

研究发现，双方软件模型在各个评测指数上大体相似，得出的数值结果都达到了现行国家标准和规定的标准。

4.2 结构小震分析结果

小震与风荷载作用下的弹性分析分别采用了YJK和MIDAS两个软件进行计算，结果如表4所示。

4.3 大空间空腹桁架的验算

以下给出大跨度空腹桁架在小震所有设计工况下的材料利用率包络值。验算结果表明，大跨度空腹桁架的材料利用率包络值均小于1.0（利用率控制在0.8以内），满足小震弹性的性能目标。

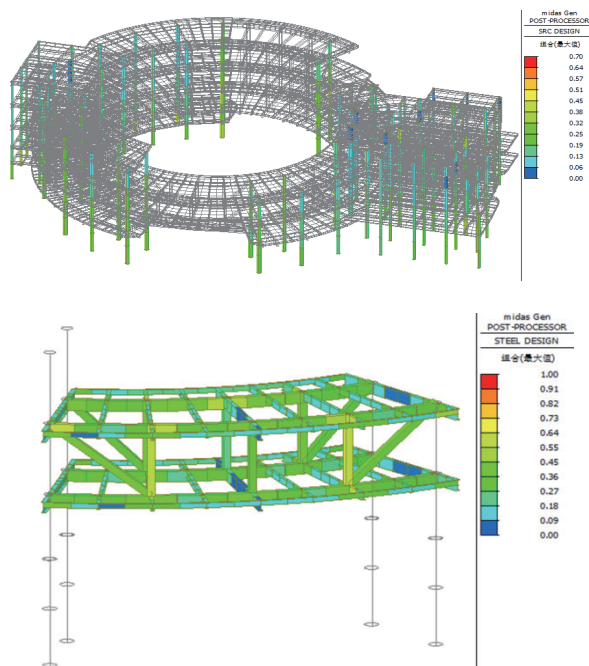


图5：空腹桁架1小震验算的材料利用率

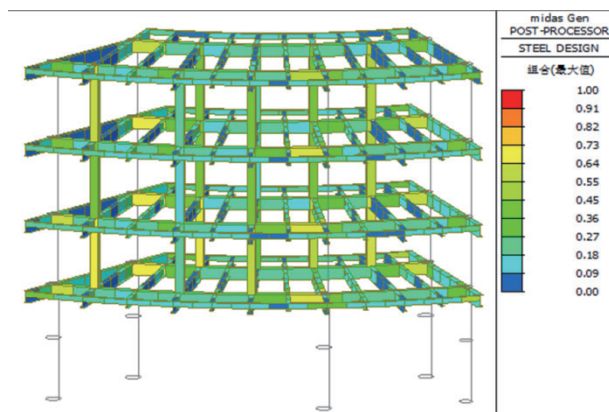


图6：空腹桁架2小震验算的材料利用率

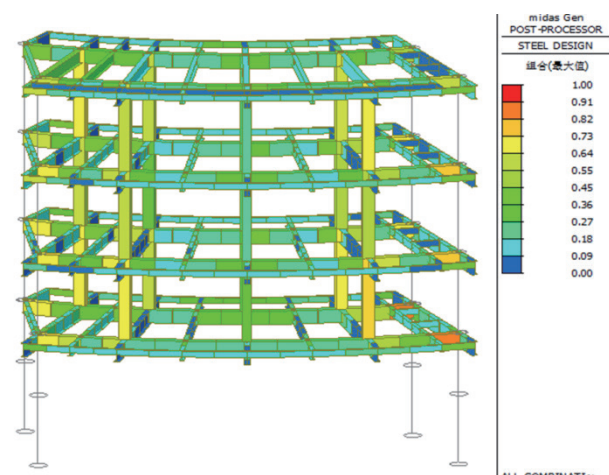


图7：空腹桁架3小震验算的材料利用率

4.4 钢框架梁和钢次梁的验算

以下给出钢框架梁和钢次梁在小震所有设计工况下的材料利用率包络值。验算结果表明，钢框架梁和钢次梁的材料利用率包络值均小于1.0（利用率控制在0.8以内），满足小震弹性的性能目标。

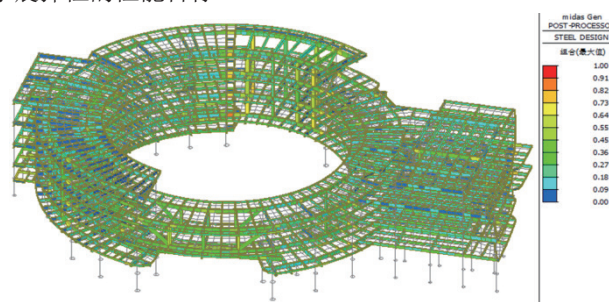


图8：钢框架梁和钢次梁小震验算的材料利用率



图9：钢框架梁和钢次梁小震验算的材料利用率

总结：以上构件验算结果表明，小震及风荷载作用下结构构件均满足性能水准1的性能目标。

4.5 小震弹性时程分析

该项目选取了两组实际地震数据及一组模拟地震资料，依据7度烈度、II级场地条件和第三组别地震影响，以及 $T_g=0.45$ 秒的设计谱作为参考目标，用于开展弹性时程响应分析，每组数据均包括两个方向的分量。在时间进程的分析当中，需要纳入双方向地震波效应的考量，测定出的加速度最大有效值达到35厘米/秒平方，并且这一数值是基于双方向同步施加的前提下获得，其水平主要方向与水平次要方向之间的比例为1.00比0.85。选取的3条地震波的场地类别，有效持时、峰值加速度等参数如表5所示：

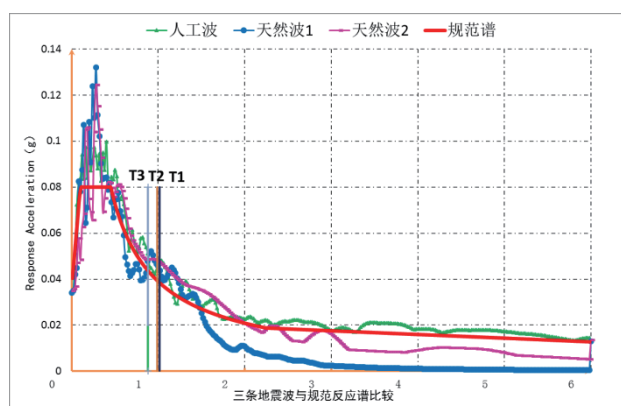


图10：三条地震波反应谱与规范谱比较

根据时程分析选用的3条地震波的地震影响系数在前三阶自振周期处与规范谱的地震影响系数的差值。结果表明，在对应于结构主要振型的周期点上，时程波的平均地震影响系数曲线与规范谱地震影响系数相比，相差不大于20%，满足规范要求。挑选的三组时间历程曲线给出的结构底层横向剪应力均处在模态分解反应谱分析法计算的65%至135%的范围内，并且这三组时间历程曲线推算出的结构底层横向剪应力的平均值位于模态分解反应谱分析法结果的80%至120%区间内，符合地震波选取的标准。

4.6 中震分析及构件复核

为确证构筑物在规定防震等级条件下的性能表现，明确在中等地震作用下潜在的、可被修复的损毁点，且调查塑性进展的可能程度，依照标准的中等地震响应谱展开了弹性反应谱的分析研究。须指出，弹性分析与不屈服算法未将部件的屈服导致的内力降低及能量耗散纳入考量，故而较为谨慎。在进行中等地震效应分析过程中，振动周期的折减系数设定为1.0，选用4%的阻尼率，并忽略风载作用情形。地震作用计算时，考虑 $(45^\circ + 135^\circ)$ 、 $(75^\circ + 165^\circ)$ 和 $(15^\circ + 105^\circ)$ 等地震作用角度。对关

键构件按预定的性能目标进行设防烈度地震作用下的抗震性能验算。

4.6.1 钢管混凝土框架柱的验算

以下给出钢管混凝土框架柱在中震弹性所有设计工况下的材料利用率包络值。验算结果表明，框架柱的材料利用率包络值均小于1.0，说明本工程框架柱达到中震弹性的性能水准。

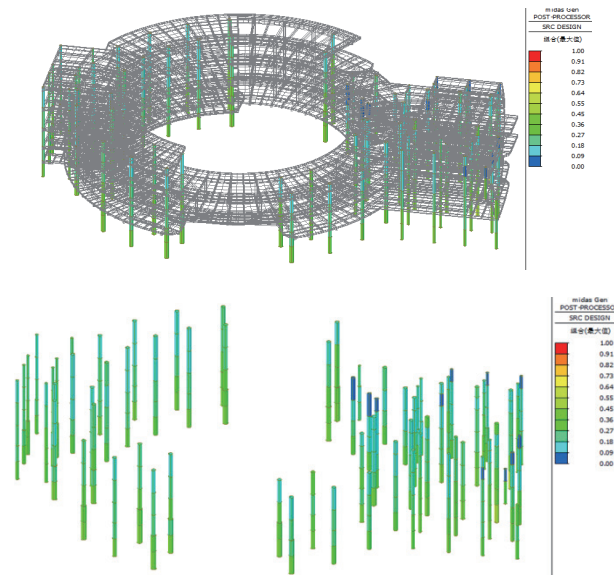


图11：钢管混凝土框架柱中震弹性验算的材料利用率

4.6.2 大跨度空腹桁架的验算

以下给出空腹桁架在中震弹性所有设计工况下的材料利用率包络值。验算结果表明，大跨度空腹桁架的材料利用率包络值均小于1.0，最大值为0.79，说明本工程空腹桁架达到中震弹性的性能水准。

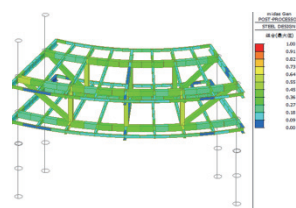


图12：空腹桁架1中震弹性验算的材料利用率

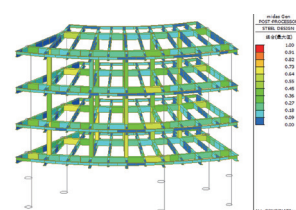


图13：空腹桁架2中震弹性验算的材料利用率

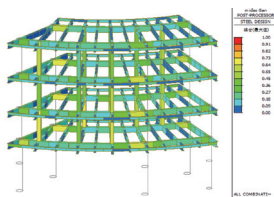


图14：空腹桁架3中震弹性验算的材料利用率

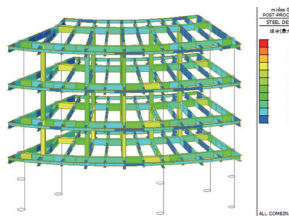


图15：二层大跨度走道处的钢梁材料利用率

4.6.3 钢框架梁的验算

以下给出钢框架梁在中震不屈服所有设计工况下的材料利用率包络值。验算结果表明，钢框架梁的材料利用率包络值均小于1.0，达到中震不屈服的性能目标。

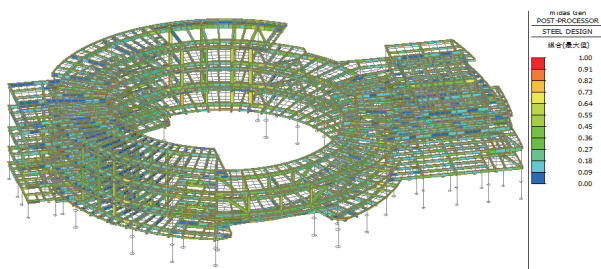


图16：钢框架梁中震不屈服验算的材料利用率

5 大震弹塑性时程分析

运用Perform-3D程序对该项目展开了罕见地震场景的弹塑性时程分析，其中涵盖了一组人工合成波及两组自然波导致的底部剪力与弹性塑性层间位移角的响应见表6。由表5可知，建筑物主体的关键支撑结构在X方向上的极限伸缩变形角度为每150分之一，而在Y方向上为每158分之一，这两个数据都遵守了规定标准中不得超过每50分之规定的规定阈值。

表1：结构的主要构件尺寸及材料强度等级

框架柱截面尺寸及材料强度等级			
	尺寸（直径D或 H×B×Tw×Tf）	壁厚t	材料强度 等级
典型钢管 砼框架柱	D=1200	32	Q345+C40
	D=1000	20/32	Q345+C40
	D=800/700	20	Q345+C40
典型空 腹桁架竖 (2~4F)	焊接箱形截面800×600×30×35		Q345
	焊接箱形截面600×600×30×30		
	焊接箱形截面500×500×24×24		
典型空腹 桁架斜腹 (3F)	焊接箱形截面600×600×30×30		

类型	楼层	尺寸 (H×B×Tw×Tf)	材料强度 等级
典型空腹 桁架弦杆	2F-4F	焊接箱形截面 900×600×30×35	Q345
典型空腹 桁架弦杆	2F-4F	焊接箱形截面 900×500×20×30	
典型钢框 架梁	2F-4F	焊接H型钢 900×400x24x30	
典型钢框 架梁	1F-4F	轧制H型钢 HN650×300×13×20	
典型钢 次梁	1F-4F	轧制H型钢 HN650×300×13×20	
典型钢 次梁	1F-4F	轧制H型钢 HN400×200×8×13	

表2：不规则情况汇总

不规则 类型	涵义	本工程情况	超限 判断
扭转不 规则	考虑偶然偏心的扭转位移 比大于1.2	最大值X向：1.13Y 向：1.31	是
楼板不 连续	有效宽度小50%，开洞面积 大30%，错层大于梁高	部分区域楼板有效 宽度小于50%	是
尺寸突 变	竖向构件收进位置高于结 构高度20%且收进大于25%， 或外挑大于10%和4m，多塔	顶层局部收进	是
其他不 规则	如局部的穿层柱、斜柱、 夹层、个别构件错层或转 换，或个别楼层扭转位移 比略大于1.2等	1F~2F间局部夹层	是

表3：抗震性能目标

构件分类	多遇地震	设防烈度地震	罕遇地震	
关键构件	框架柱	弹性	弹性	不屈服
	大跨度空腹架，大跨度钢梁	弹性	弹性	不屈服
耗能构件	框架梁	弹性	部分屈服	大部分不屈服
层间位移角限值		1/250		1/50
程序	YJK、MIDAS	MIDAS	MIDAS、Per-form3D	

表4：结构弹性计算主要结果			
计算程序		YJK	MIDAS
周期	T1(Y向平动)	1.016	1.022
	T2(X向平动)	0.988	0.986
	T3(Z向扭转)	0.881	0.911
	Ts/T1	0.867	0.891
	X向风	2603	2718
基底剪力(kN)	Y向风	3519	3608
	X向地震	12368	11728
	Y向地震	12721	12141
	X向风	1/4727	1/4495
最大层间位 移角	Y向风	1/3909	1/3504
	X向地震	1/866	1/842
	Y向地震	1/740	1/837

表5：地震波基本情况					
地震波	地震事件_编号	场地类别	持时(s)	有效持时(s)	峰值加速度(cm/s ²)
天然波1	Chi-Chi, Taiwan-02_NO_2165	II	55.0	42.3	35
天然波2	Imperial Valley-06_NO_161	II	37.8	20.1	35
人工波1	人工波	II	45.0	36.6	35

表6: 罕遇地震下基底剪力与层间位移角					
地震波		基底剪力/kN	与小震CQC 比值	最大顶点 位移/m	最大层间 位移角
人工波	X向	58503	0.99	0.101	1/150（2）
	Y向	60538	1.00	0.095	1/175（2）
天然波1	X向	42999	0.73	0.068	1/232（2）
	Y向	42424	0.70	0.070	1/275（2）
天然波2	X向	66015	1.12	0.093	1/154（2）
	Y向	64893	1.07	0.100	1/158（2）

采用Perform 3D程序创建了一个非线性模拟，以施行该结构的非线性动态响应分析。该模拟在考虑主体钢制框架侧向抗力构件的非线性行为的同事，还模拟了在强烈地震影响下建筑物所表现出的P-Δ效应。分析的主要结果如下：结构整体指标满足规范要求，所有构件在罕遇地震下均未屈服，故罕遇地震作用下各项可知指标均满足性能水准4的抗震性能目标要求。

6 楼板应力分析

借助MIDAS软件构建了一个有限元分析模型，以0.53米的单元格尺度，来评估楼板在遭受地震力和风力影响时的内力分布情况。模型也模拟了考虑到楼板垂直于平面的刚性时，轻微地震和风负荷的应力情况。通过分析应力图，识别出楼板中可能的弱点区域。从以下结果可以看出，考虑楼版面外刚度的情况下，在地震和风荷载作用下，楼板应力值在0.4~1.6Mpa范围内，楼板应力分布均匀，没有出现应力突出的薄弱部位。给出2层在小震及风荷载下的应力水平如下图。

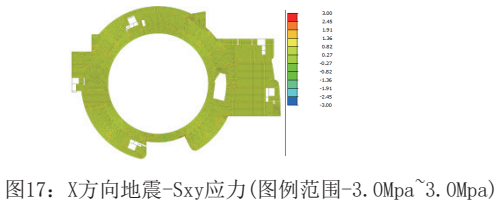


图17：X方向地震-Sxy应力(图例范围-3.0Mpa~3.0Mpa)

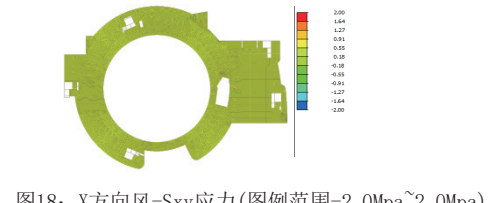


图18：X方向风-Sxy应力(图例范围-2.0Mpa~2.0Mpa)

7 楼盖舒适度

本工程存在三处大跨度区域（跨度分别为32.8m、22.4m和28.0m，因此人行激励下的楼盖舒适度问题需要特别关注。

采用Midas软件建立有限元分析模型，以实际人行走对楼板产生的动力时程为分析荷载，利用直接积分法，分别计算了楼板在单人行走激励、三人并排行走激励工况下的竖向振动加速度峰值。从结果中可以看出，单人行走激励作用下，最大的楼盖竖向振动加速度峰值是0.055m/s²；三人并排行走激励作用下，最大的楼盖竖向振动加速度峰值是0.146m/s²；楼盖竖向自振频率大跨钢梁处为2.13Hz，空腹桁架处为3.16Hz，楼盖结构在各个工况下的加速度峰值以及自振频率均小于相应限值，能够满足楼盖舒适度要求。

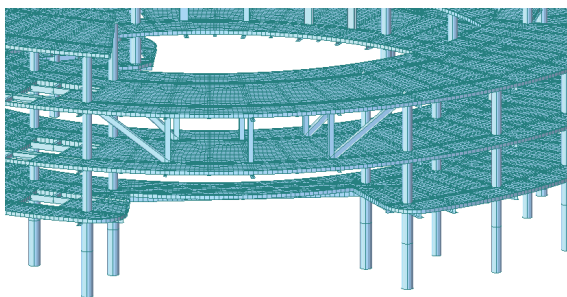


图19: 楼板舒适度分析的有限元模型

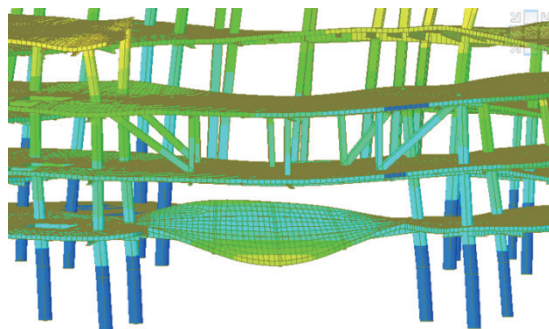


图20: 楼盖结构竖向振动模式1

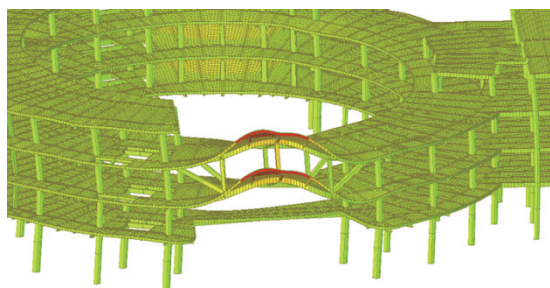


图21: 楼盖结构竖向振动模式2

8 结论

该环形建筑H#楼的抗震性能化表明,本工程结构设计合理,在小震、中震及大震作用下,结构变形计机构损伤

程度均能达到预先设定的性能标准,可为后续类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 高层建筑混凝土结构技术规程: DJB 15-92-2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 山东省大数据产业基地建设项目H#楼结构超限设计可行性论证报告深圳[R]: 深圳市建筑设计研究总院有限公司, 2019
- [3] 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要求: 建质[2015]67号[A]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015.
- [4] 陈晓栋. 某超高层剪力墙结构的性能化设计. 黑龙江科技信息[J], 2017
- [5] 袁文章. 医疗建筑结构的不规则性分析与对策. 中国医院建筑与装备[J], 2018
- [6] 程卫红, 刘枫, 赵爽, 等. 带混凝土壳的复杂拱形钢框架结构分析设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(17): 57-62.
- [7] 彭肇才, 黄用军, 刘畅, 李少成等. 深圳观澜版画艺术博物馆结构设计. 钢结构[J]. 2012
- [8] 袁国财: 某塔楼超限高层结构设计及抗震性能分析: 山西建筑[J], 2023
- [9] 梁乾乾, 潘安阳, 刘宇鑫. 嘉兴八佰伴购物中心项目结构设计: 山西建筑[J], 2023
- [10] 余勇, 陈焰周, 肖飞, 徐必兵, 胡紫东. 某超限高层结构抗震性能分析: 山西建筑[J], 2023

作者简介:

赵菊全(1990-), 男, 学士, 工程师, 主要从事结构设计与分析。