

浅谈超高层建筑设计要点

文 / 余彬彬 中冶赛迪工程技术股份有限公司成都分公司 四川成都 610000

【摘要】我国是超高层建筑大国，当前超高层建筑已经成为城市建设发展的热点，各地超高层建筑项目众多。因超高层建筑高度超高、造型新奇，其对结构设计工作提出了更高的要求，本文对超高层建筑设计过程中的一些设计要点进行了阐述，希望能为超高层建筑设计提供一些参考。

【关键词】超高层建筑；结构设计；设计要点

【DOI】10.12334/j.issn.1002-8536.2022.07.027

1、我国超限高层建筑发展概述

自 21 世纪以来，伴随着我国改革开放的深入和综合国力的增强，高层建筑在我国迅猛发展。据统计，截止 2020 年，全球 350 米以上的超高层建筑共 72 座，其中中国大陆占 31 座，表 1 中列出了我国部分超高层建筑数据，可见中国已经成为超高层建筑的大国^[1-2]。同时超高层建筑的分布区域也进一步扩大，从一线及沿海地区，扩展到二、三线城市^[3]。随着超高层建筑在我国的蓬勃发展，建筑高度不断刷新、结构体系复杂程度提升，这就对超高层建筑设计提出了更高的要求。

超限高层建筑的结构设计复杂性主要体现在以下三个方面：一是高度超限，其次是结构布置不规则，主要体现在平面布置不规则和竖向布置不规则^[4]。结构设计人员需要关注并重视设计中关键性的问题，才能保障设计的质量和效率。

表 1 我国超高层建筑数据（截止 2020 年底）

建筑名称	总高度(m)	地上楼层数	建筑面积(万 m ²)
上海中心	632	127 层	57.6
深圳平安金融中心	599	118 层	46
天津 117 大厦	596.5	117 层	85
广州周大福金融中心	530	111 层	37
天津周大福滨海中心	530	97 层	39
台北 101 大厦	509	101 层	29
上海环球金融中心	492	101 层	38
香港环球贸易广场大厦	484	118 层	27
长沙 IFS 大厦 T1	452	95 层	30

2、注重结构的概念设计

由于超限高层自身结构的复杂性，方案阶段的结构概念设计对整个设计过程有着十分重要的影响，选择合适合理的结构体系，对后期的初步设计和施工图设计具有极大的帮助。

结构设计人员应该重视方案阶段的概念设计，同时要与建筑师积极配合、理解建筑师的意图，提出并选择传力清晰、能够高效利用材料效率的结构体系。结构概念设计应注重以下几点：一是结构应具有良好的整体性和合理的耗能机制，二是尽可能保障结构的规则性（包括平面和竖向）和均匀性，三是选择合适的抗侧力体系，宜形成多道抗震防线，充分保障结构安全性。

3、选择合适的结构体系

选择合适的结构体系才能够保证结构发挥出最佳功能，结构体系选择需要综合考虑多方面因素，包括建筑功能需求、施工条件、经济等因素。高层建筑中通常采用的结构形式包括框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、筒体结构和巨型结构等。我国的超高层建筑大多数采用框架-核心筒结构，并且使用混合结构和组合构件成为主流。每一种结构体系都有自身的受力特点和适用条件，设计人员应该根据项目情况，选择合适的结构体系。通常，框架-核心筒体系适用于 300 米以下超高层，300 米以上超高层则需要选用筒中筒、巨型结构等其他结构体系^[3]。建筑不同高度常用的结构抗侧力体系如表 2 所示，其中高度超过 200 米以上的结构常用体系如图 1 所示^[1,4]。

表 2 不同高度常用的结构抗侧力体系

建筑高度(m)	常用的抗侧力体系
≤ 100	框架、框架-剪力墙、剪力墙
100-200	剪力墙、框架-核心筒
200-300	框架-核心筒、框架-核心筒-伸臂
300-400	框架-核心筒-伸臂、筒中筒
400-600	筒中筒-伸臂、巨型框架/巨型桁架/巨型斜撑、组合体

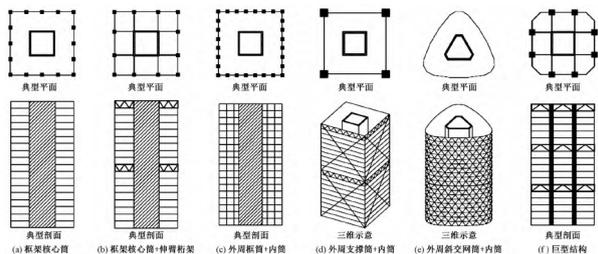


图 1 200 米以上超高层建筑常用结构体系

众所周知，钢筋混凝土结构和钢结构都有其各自的优缺点：钢筋混凝土结构具有可塑性强、造价较低等优势，但有自重大、结构延性低、施工速度慢等缺点；钢结构具有强度高、延性良好等优点，但其造价高、防火性能差。两种结构体系的不足都限值其应用的范围。当前，混合结构、组合结构成为了超高层建筑主流形式；据统计，已混合结构为主的超高层建筑占总量的 95% 以上，但需要关注混合结构的阻尼比、结构整体的协调工作性能等方面^[3,5]。

4、合理控制结构自重

对高度超过 250 米以上的超高层统计分析表明，其平均质量大约为 13 至 21kN/m²，平均质量随着高度的增加而增大，对于 400 米以上建筑，其平均质量大约分布在 17 至 21 kN/m²^[3]。设计中选择合适的轻质材料，可以有效降低结构自重、提高施工速度。

5、荷载的选取

5.1 地震荷载

地震荷载的正确选取，对结构分析具有至关重要的作用。确定地震荷载需要

关注以下几点内容：

(1) 由于超限高层高度往往较高，结构自身“较柔”，其结构自振周期往往较大，处于规范中地震影响系数曲线的下降段后的直线段，甚至超过规范曲线的最大值 6 秒，达到接近 9 秒。此时国内专家建议可在规范基础上直接将直线下降段延伸至 10 秒^[4]。

(2) 注意核实项目是否有安评要求。根据《地震安全性评价管理条例》（2017 年修正），对于国家重大建设工程，省、自治区、直辖市认为对本行政区域有重大价值或者有重大影响的其他建设工程须进行地震安全评价。对于须进行安评的项目，地震动有关参数须执行安评结果，对于安评结果小于抗震规范的，宜按抗规执行。

(3) 注意地震波的选取。超限高层往往需要进行时程分析，抗规中规定对于高度超限的建筑应采用时程分析法进行多遇地震的补充分析，高规中规定对于高度超过 200 米的建筑，应采用弹性时程分析法。时程分析是将实际地震实测得到的地震加速度数据输入结构，根据结构动力学方程求解结构的地震响应；因此选取地震波是时程分析的首要步骤，同时确定合适的输入地震波是保证结构时程分析结果准确性的重要前提。目前，结构分析软件大部分

都自带地震波库，如国产商业化软件 PKPM，YJK，可以比较便捷地进行选波；另外美国太平洋地震工程研究中心 Pacific Earthquake Engineering Research Center（简称 PEER 地震波数据库）中提供了大量的世界各地的地震记录，也可根据实际需求在其中选取合适的地震波。地震波选取过程需要注意以下几点：

①地震波的有效持续时间一般为结构基本周期的 5-10 倍；有效持续时间从首次到达该时程曲线最大峰值的 10% 算起，到最后一点达到最大峰值的 10% 为止。

②数量要求：一般可选用 3 条地震波或 7 条地震波，其中实际强震记录的数量不少于总数量的 2/3。

③统计意义上相符：多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线相比，在对应结构主要振型的周期点上相差不大于 20%。

④基底剪力：每条时程曲线计算所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法计算结果的 65%，多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%。计算结果也不能太大，每条地震波输入计算不大于 135%，平均不大于 120%。

5.2 风荷载

超限高层属于刚度小柔性大的结构，对于风荷载敏感，以此抗风设计也是超

高层建筑结构设计的重要方面。随着建筑高度的增加，风荷载有可能成为结构的控制水平荷载；对于高度超过 300 米、体型复杂及高宽比 > 6 的建筑，风荷载往往是控制水平荷载^[3]。超高层建筑的风荷载主要包括静态荷载（即平均风荷载）和动态风荷载（包含脉动风湍流荷载和风致结构振动引起的惯性力加速度）^[2]。抗风设计除了应关注风荷载作用下的承载力设计，还应该关注正常使用状态下的舒适度要求。对于风荷载的确定时应注意，《工程结构通用规范》GB55001-2021 中指出，体型复杂、周边干扰效应明显或风敏感的重要结构应进行风洞试验。利用风洞试验等方法，可以得到更为精确的结构风荷载数值。由于超限高层的高度较高，正常使用时，结构在风荷载作用下可能会产生较大摆动，会影响人们使用时的舒适感，因此对于风作用下的舒适度控制也十分必要。通常结构是通过增大抗侧刚度来满足舒适度要求，但对于超高层建筑往往不经济，另一种方式是通过设置减振装置，如调谐质量阻尼器 TMD、调谐液体阻尼器 TLD 等。上海中心大厦、台北 101 大厦都设置了调谐质量阻尼器 TMD，广州电视塔和苏州国金中心巧妙将消防水箱设计用于调谐液体阻尼器 TLD，此类抗风阻尼器可以有效减小结构在风荷载作用下的风致加速度，抵抗强风荷载，保证结构的舒适度。

6、重视对分析结果合理性的判断

目前结构分析可采用的软件比较多，如国产软件 PKPM 系列、YJK 系列，国际通用软件 ETABS、SAP2000、MIDAS、ABAQUS 等。对于软件分析结果，不能盲目采纳，应进行分析判断，确认其合理、有效后才能作为设计的依据。

对于超限高层建筑通常需要采用至少两种不同力学模型的结构进行整体分析,并相互校核。超高层建筑设计均需进行抗震性能化设计,对于确定的性能目标,需要一一判断结构是否满足小震、中震、大震下的抗震性能目标,从而保证结构的抗震安全性。

7、其他需要关注的问题

(1) 关注复杂结构部分(连体结构、大悬挑结构)竖向地震作用效应;对于大跨度悬挑、连体部分需要考虑竖向地震作用的影响。

(2) 关注大跨度楼板、大悬挑结构的竖向振动舒适度。楼盖结构应具有适宜的舒适度,高规中规定楼盖结构的竖向振动频率不宜小于3Hz,并给出了竖向振动加速度峰值限值;对于大跨度、大悬挑结构,其竖向自振频率较低,与人行走频率比较接近,容易产生楼面共振,引起人的不适,因此需要关注此类结构的楼板振动舒适度问题。

(3) 基于超限高层结构的复杂性,往往会出现比较复杂的节点,对于这些局部节点,整体分析模型通常无法计算分析,需要将这些复杂节点单独进行分析或进行节点试验研究,验证其可靠性和安全性。

(4) 对于高度>400米的或结构形式特别复杂的超限高层可以利用振动台试验来验证结构的抗震性能,通过振动台试验结果来判断计算模型是否准确合理、所采取的抗震措施是否能达到预期效果,同时也可以通过振动台试验来测定模型在小震、中震、大震下的阻尼比。例如,天津高银117大厦进行了1:40整体模型振动台试验,得到预期地震下的响应,从而验证结构的合理性和抗震性能^[6]。

(5) 考虑施工过程影响,进行施工模拟分析。超限高层竖向构件会产生较大的竖向变形,同时由于内外竖向构件(如核心筒和外框架柱)之间刚度差异较大引起的竖向变形差,会导致连接的水平构件产生较大的附加内力,因此需要根据施工过程进行合理的施工模拟分析,才能得到真实的构件内力。超高层建筑的混凝土收缩徐变造成的竖向变形占总变形的30%~40%^[7],应引起足够的重视。对于一些复杂关键构件可采用延迟安装技术来减缓构件的附加内力。例如CCTV新台址主楼因结构体系复杂(塔楼倾斜、空间连体及大悬臂),施工过程中结构的内力和变形复杂,因此对施工过程进行了全程跟踪模拟分析,并对大悬臂与塔楼相连部位的关键构件采取了延迟安装措施,有效的减小其成型后的内力^[8]。

(6) 合理运用消能减震装置。传统设计是通过增加结构刚度来抵抗地震作用,利用结构自身来耗散地震能量,容易造成结构损伤严重;减震技术是通过合理设置耗能减震装置来耗散地震能量、降低结构响应,从而保护主体结构。2021年国务院颁布的《建设工程抗震管理条例》规定,位于高烈度设防地区、地震重点监视防御区等需要按国家有关规定采取隔震减震等技术,这将进一步推动减震技术在超高层中的运用实践。例如,位于8度(0.2g)的云南省昆明市滇池会展中心(结构高度299.7m)组合运用速度相关性

阻尼器和位移相关性阻尼器,在多遇地震下通过速度阻尼器耗散能量,设防和罕遇地震下,速度阻尼器耗能能力降低,位移阻尼器开始逐步发挥作用;各类阻尼器分阶段发挥作用,有效地保护了主体结构,实现结构的抗震性能目标^[9]。

(7) 合理运用高性能材料减轻结构自重、提高结构强度。目前随着高强度混凝土泵送技术也不断进步,C60以上高强度混凝土已经广泛应用于超高层建筑;高性能钢材也不断应用于超限高层,如Q390,Q420,Q460钢材已成功应用于CCTV新台址主楼^[3,10]。

(8) 合理利用BIM等创新技术辅助超高层设计及施工。传统设计方法信息化和可视化水平均不高,而超高层的设计复杂、施工难度大,BIM技术作为现代建筑领域的新方式,可以通过高度可视化、可模拟等等优点,可以减少各专业之间的冲突、尽早发现并解决问题,辅助优化设计、施工。

结语:

综上所述,本文对超高层建筑设计的一些设计要点进行了阐述,由于超高层建筑具有超高、造型新奇、功能复杂等特点,需要设计人员对各方面因素进行充分考虑,根据实际项目特点落实到结构设计中,从而保证超高层建筑设计的质量。

参考文献:

- [1] 王雪艳. 基于性能要求的某超高层建筑抗震分析[D]. 山东: 山东建筑大学, 2021.
- [2] 何俊宏. 上海环球金融中心基于台风影响下的振动分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [3] 王大绥, 包联进. 我国超限高层建筑结构发展与展望[J]. 建筑结构, 2019, 49(19):11-24.
- [4] 刘进军, 肖从真等. 复杂高层与超高层建筑结构设计要点[J]. 建筑结构, 2011, 41(11):34-40.
- [5] 徐培福, 王翠坤, 肖从真. 中国高层建筑结构发展与展望[J]. 建筑结构, 2009, 39(9):28-32.
- [6] 张宏, 田春雨, 肖从真等. 天津高银117大厦巨型支撑框架-核心筒结构模型振动台试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(22):1-6.
- [7] 吴学松. 天交流探索超高层建造密码-2018超高层建造技术交流研讨会成功召开[J]. 建筑机械化, 2018, 8:8-13.
- [8] 刘学武, 郭彦林, 张庆林等. CCTV新台址主楼施工过程结构内力和变形分析[J]. 建筑工业, 2007, 37(9):22-29.
- [9] 吴宏磊, 丁洁民, 刘博. 超高层建筑基于性能的组合消能减震结构设计及其应用[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(3):14-24.
- [10] 尹新生, 杜芹芹, 李忠望. 高性能混凝土超高层泵送技术在超高层建筑中的应用[J]. 四川建材, 2017, 43(7):5-6.