

某综合体大悬挑结构设计研究

□ 王彦斌

[摘要] 本文以某综合体建筑工程项目为例，通过分析其结构体系和受力特点，详细阐述不对称大悬挑结构特点，并对结构体系整体验算和结构设计参数验算，分析大悬挑结构设计可行性，提出局部结构加固措施和施工顺序，以期同类工程设计及施工提供有益的参考。

[关键词] 综合体建筑；大悬挑结构；不对称；核心筒

某商业综合体项目为商业、办公综合体项目，建筑高度59m，地上13层，地上建筑面积66875m²；地下3层，地下建筑面积43158m²。首层及2层建筑层高5.1m，3层层高5.3m，其余标准层高4.3m。项目结构形式为核心筒大悬挑结构体系，采用单重竖向抗侧力核心筒结构体系，以两道悬臂桁架与环带桁架将3层以上悬挑结构受力传递给核心筒；3层及以下建筑及外围裙房采用框架结构。

本工程中，3层以上悬挑结构为不规则、不连续、不对称结构，与其他建筑设计中规整、矩形对称、桁架贯通自平衡结构存在较大的差异^[1]。由于工程悬挑结构面为梯形，在桁架设计时，需综合考虑外围框架柱对结构设计的影响，且由于框架柱不连贯，导致结构设计难度增大。在此背景下，本文深入研究了大悬挑结构体系设计受力特点，并对主要设计参数和结构整体分析等方面进行研究。

1 结构体系和受力特点

本工程中，为将办公区域与下部商业区域有效分隔，在结构设计时取消了3层外框架柱结构，在一定程度上保持了综合体下部空间的连续性。但同时，由于框架柱不连贯，造成3层以上结构均为悬挑结构，最大悬挑长度达19.2m。为满足结构刚度和稳定性要求，在结构体系设计时，以核心筒作为竖向抗侧力体系，借助两道悬臂桁架和环带桁架组合为悬挑转换体系，将3层以上楼层竖向荷载传递至核心筒。

1.1 悬挑转换体系

本工程悬挑楼层较多，悬挑跨度大，为确保结构体系稳定，分别在4层、9层布设一道悬挑转换体系。悬挑转换体系设计时，由核心筒延伸出“V”字形结构的悬

臂桁架，每层共计14道，桁架端部支承悬挑转换体系的上部楼层钢框架柱，将上部楼层的竖向荷载传递给核心筒。同时，为确保悬挑转换体系的稳定性，沿桁架外围设计环带桁架，降低悬臂桁架受到的水平拉应力。环带桁架端部相交，形成稳定的受力结构体系，满足上部悬挑结构端部支承要求。为平衡核心筒结构水平荷载，核心筒内部增设水平钢梁，抵消核心筒受到的水平拉应力。悬挑桁架上、下弦杆设计交叉水平支撑，以满足悬挑转换体系上部结构钢框架柱抗扭刚度要求。设计中，除交叉水平支撑采用Q345B钢材外，悬臂桁架、环带桁架和内部环通钢梁均采用Q390GJ钢材。悬挑转换体系中，GL1~GL2为内部环通钢梁，HHJ1~HHJ4为环带桁架，XHJ1~XHJ4为悬臂桁架，如图1所示。

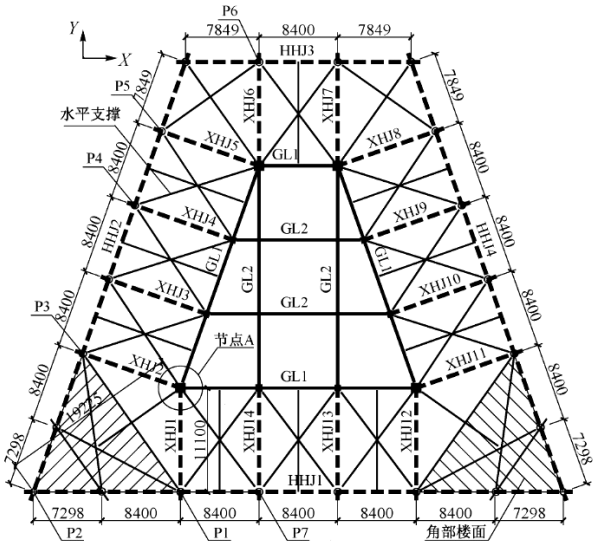


图1 悬挑结构转换体系平面图

[作者简介] 王彦斌，甘肃省建设设计咨询集团有限公司，硕士。

1.2 竖向抗侧力体系

本工程中，由核心筒承担悬挑结构竖向荷载，作为整个建筑竖向抗侧力体系，核心筒平面尺寸为25.20m×（8.40m～25.20m），X向高宽比为2.32～6.96，Y向高宽比为2.32。底层核心筒剪力墙厚度为700mm，次剪力墙厚度为300mm，混凝土强度为C60；上部核心筒剪力墙厚度为500mm，次剪力墙厚度为200mm，混凝土强度为C40。核心筒端柱截面尺寸1000mm×1000mm，非核心筒区域端柱截面尺寸为700mm×700mm。梁板厚度150mm，混凝土强度C40。

1.3 附属结构体系

悬挑附属结构体系设计时，钢梁与钢柱刚接，并与核心筒铰接。钢柱直径为800mm，厚度为30mm，钢梁采用HN600型钢。

2 结构设计参数

2.1 荷载作用

根据《住宅建筑规范》（GB 50368—2005），综合体设计使用年限为50年。建筑设计安全等级二级，抗震设防烈度为7°。经查询《中国地震动参数区划图》（GB 18306—2015），项目场地基本地震加速度峰值为0.10g，设计地震分组属于第二组，场地类别为第Ⅳ类场地。50年重现期基本风压0.55kN/m²，考虑到综合体风荷载增大效应和大悬挑结构造型特殊性，设计时综合体体型系数取1.4，风荷载效应放大系数取1.1^[2]。

2.2 抗震等级

综合体剪力墙结构抗震等级为三级。抗震作用设计时，设计综合体核心筒底部1～3层、悬臂转换层及相邻楼层的结构抗震等级为一级，其余区域抗震等级为二级。非核心筒结构根据结构部位设计抗震等级，悬臂桁架和环带桁架抗震等级一级，楼面价差水平支撑抗震等级为二级，上部钢框架梁抗震等级三级，底部两层框架结构抗震等级二级。

2.3 悬挑性能设计目标

按综合体抗震等级设计目标，明确综合体结构在不同抗震烈度情况下抗震性能水平，如表1所示。

3 悬挑结构整体分析

本次设计中，由于大悬挑结构较为复杂，且为非对称结构和核心筒竖向抗侧力体系，对地震作用敏感，弹性分析应选择P-Δ效应^[3]，竖向地震作用取反应谱分析和10%重力荷载值包络值。小震以上地震作用分析时，需以竖向地震作用为主的组合效应。此外，由于3层核心筒外围框架柱缺失，地震作用内力增大1.25倍，则应当充

表1 不同地震级别下抗震性能设计目标
（中震层间位移角限值的出处）

抗震烈度		小震	中震	大震
层间位移角限值		1/1000	1/500	1/120
核心筒	3层以下、悬挑转换层及相邻层	弹性	弹性	塑性
	其他区域	弹性	弹性	塑性
悬挑桁架、环带桁架、楼面交叉水平支撑		弹性	弹性	不屈服
框架梁、柱		弹性	弹性	塑性
悬臂桁架和核心筒连接节点		弹性	弹性	不屈服

分考虑在地震作用下核心筒地震剪力效应。

3.1 小震和风荷载作用下结构整体分析

在小震和风荷载作用下结构整体分析时，按场地特征周期0.7、阻尼比0.04、周期折减系数0.9、连梁刚度折减系数1.0，计算风荷载下X向和Y向最大层间位移角均为1/9999。小震作用下，最大层间位移角为1/1415（X向）、1/1457（Y向），均小于悬挑结构性能设计目标，表明结构设计性能与设计整体目标相符。在结构整体分析中，首层最大层间位移比最大，其原因是裙楼楼板开洞，表明悬挑结构结构性能良好，侧向刚度满足悬挑结构稳定性要求。

3.2 竖向地震作用分析

本工程悬挑结构为不规则结构，且跨度较大，对竖向地震作用影响敏感。为确保结构设计满足竖向地震作用下建筑结构安全性、稳定性要求，采用3条地震波进行结构设计验算。以XHJ1和XHJ6环带桁架受拉斜腹杆轴力，则在3条地震波作用下，阻尼比按0.04计算，则受拉斜腹杆轴力分别为7930kN、4946kN，竖向振型分解反应谱条件下最大轴力与重力荷载值比值为8.9%。以重力荷载在代表值的10%计算竖向地震效应可满足结构安全性要求。

3.3 中震弹性分析

在中震作用下，考虑到下部结构损伤问题，连梁刚度折减系数按0.5计算，阻尼比系数以0.065计算，周期折减系数按1.0计算，验算综合体结构在中震租用下的结构弹性。根据验算结果，4层以下结构最大层间位移角分别为1/670（X向）、1/666（Y向），均小于结构整体设计目标。3层及以下结构核心筒周围剪力墙内，增设厚度为25mm的Q345B钢板边缘构件内设置型钢加固。通过增设加固措施，墙肢剪压比可满足中震作用下结构性能要求。

3.4 大震不屈服分析

在大震不屈服分析时，按阻尼比0.05、周期折减系数0.9、场地特征周期0.9s计算，悬挑结构X向和Y向最大层间位移角分别为1/276、1/275，满足结构整体目标要求。经验算，核心筒墙肢剪压比满足规程要求。

3.5 悬挑转换体系承载力与变形分析

经计算悬挑转换体系在竖向荷载和地震组合效应下应力比，计算小震作用下，悬挑转换体系荷载主要为1.5活荷载+1.3恒载；计算中震作用下，荷载为1.3水平地质+1.2恒载+0.6活荷载+0.5竖向地震；计算大震作用下，荷载为1.0水平地震+1.0荷载+1.0恒载+0.5活荷载+0.4竖向荷载。因此，在小震作用下，悬挑转换体系受到的荷载主要为竖向荷载；中震和大震作用下，悬挑转换体系受到的荷载主要为水平地震作用。

3.6 大震动力弹塑性时程分析

大震动力弹塑性时程分析时，按1：0.85：0.65设计三向地震波比例，主方向峰值加速度参数取2000mm/s²，经计算，剪力包络值分别为91700kN（X向）、115700kN（Y向）。X向最大层间位移角为1/559～1/358，Y向最大层间位移角为1/408～1/277，均小于结构整体目标。X向和Y向最大位移包络值分别为0.123、0.163。计算结果表明，悬挑结构整体设计稳定性良好，遇到罕见大震时，剪力墙结构仅出现轻微或轻度损伤，4层以下角部剪力墙结构受损相对严重，损伤值为0.40～0.50，损伤分布宽度小于剪力墙15%，可通过剪力墙结构加固解决。核心筒周边剪力墙洞口和剪力

墙交接部位存在轻度损伤问题，通常在剪力墙内部增设型钢加固处理。

4 施工要点与变形控制

根据综合体大悬挑结构特点，在结构施工时，应避免局部结构受力变形，如地下柱网偏置、核心筒结构偏心等问题。

综合体施工中，由于悬挑结构为不对称结构，为避免上部结构受力偏向，在施工过程中应注意对称施工，以此补偿核心筒和悬挑结构体系竖向变形补偿。同时，在结构施工过程中，应注意结构变形监测，避免出现施工安全事故。

5 结语

结合综合体项目案例，深入研究了特殊悬挑结构综合体结构设计要点，并通过整体分析、弹性分析、地震作用分析等，验算了综合体悬挑结构受力稳定性。结果表明，在大震作用下，悬挑结构整体稳定性良好，局部受损，需通过加固处理改善结构性能。在施工过程中，应依次完成核心筒施工和悬挑转换体系施工，并按对称施工原则，合理控制综合体悬挑结构竖向变形。

[参考文献]

- [1]景剑,王永泉,郭正兴.高空超大悬挑混凝土结构模板支撑体系设计与施工关键技术[J].施工技术,2016,45(21):39-45.
- [2]王树,王明珠,张国军,等.多层大悬挑钢结构体系静力与抗震性能设计[J].建筑结构学报,2012,33(4):77-86.
- [3]方胜利.大型悬挑钢结构施工关键技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.