

淮安盐文化中心结构设计

朱希

华东建筑设计研究院有限公司

摘要：淮安盐文化中心采用钢筋混凝土框架结构，存在扭转不规则、凹凸不规则、尺寸突变和局部不规则等4个不规则项。根据规范要求及项目特点，确定结构的抗震性能目标为D级。本文主要介绍淮安盐文化中心的抗震性能设计，包括抗震加强措施、小震弹性计算、抗震性能化构件设计、大震弹塑性计算等。计算结果表明，主体结构能够满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标。

关键词：不规则结构；抗震性能化；大震弹塑性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.12.088

一、工程概况

淮安盐文化中心（工程名：淮安国联河西公园社区梦华庭A区项目1#商业楼）坐落于淮安市淮安区河西组团，位于里运河-京杭运河文化旅游带沿线，紧邻淮安生态文旅区，北与新城主中心相邻，东隔里运河文化长廊与淮安区相邻，至翔宇大道发展轴仅1公里。项目包括1栋商业楼，地上3层，地下1层，总高度17.150m（室外地面到主要屋面板顶）。±0.000为绝对标高9.350m。项目的效果图如图1所示。

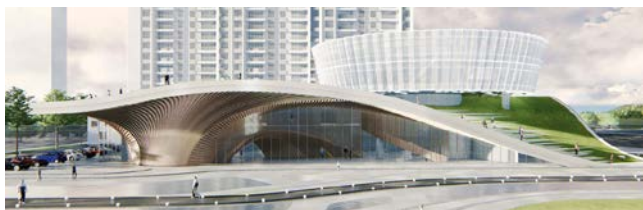


图1 项目整体效果图

本项目抗震设防烈度为6度，设计基本加速度为0.05g，建筑抗震设防类别为标准设防类（丙类），建筑场地类别为III类，设计地震分组为第三组，场地特征周期根据地勘报告为0.73s。

二、结构体系

本项目地上共3层，结构高度17.150米。设一层地下室，基础埋深6.1m。地上结构东西长度约80m，南北长度约42m。首层层高5.0m，二层层高4.6m/6.6m，三层层高5.5m。地下室典型柱网8.4m×5.6/6.6m。

地上结构采用钢筋混凝土框架。草坡屋面为异形钢筋混凝土结构，其标高贴合建筑的外形，结构大面标高为9.500m，西北角结构标高最高点为12.500m，东南角从9.500m标高逐步降低至±0.000标高，形成建筑要求的草坡效果。草坡屋面除了局部有弧形楼梯开洞外，整体为一块完整的楼板。草坡屋面东侧上方区域为一圆形商业空间，结构标高为11.500m，与草坡屋面的高差为2m，且存在一定范围为悬挑，因此结构计算中按2个自然层建模并统计整体指标。局部区域的地上柱位与地下室柱位不对齐，须在嵌固端（地下室顶板）进行竖向构

件的转换，转换结构采用多级转换梁的形式，转换梁高1500mm。结构三维模型如图2所示。

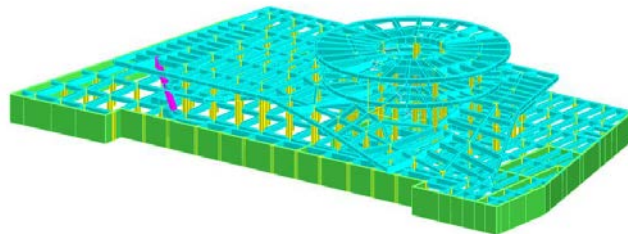


图2 结构三维模型示意图

根据地质条件、结合建筑物特点，拟采用桩-筏板基础形式。桩端以层3-1细砂层作为基础持力层。桩基形式采用预应力管桩，桩径600mm，桩长15m。抗压承载力特征值1200kN，抗拔承载力特征值450kN。

本项目为一层地下室，底板结构面标高为-5.750m，底板厚度500mm。根据嵌固条件，本工程取首层作为上部结构的嵌固端；按照首层嵌固的要求，首层楼板采用现浇混凝土框架梁板体系，楼板厚度为180mm，室外覆土区域，楼板厚度为250mm，室内外高差处采用框架梁加腋措施以保证水平力的有效传递。

三、结构不规则性分析及抗震设计性能目标

（一）结构不规则性分析

本项目高度小于24m，属于多层建筑，但存在扭转不规则（最大位移比：1.47，出现在3F的Y方向）、凹凸不规则（2F平面Y向局部凹入75%）、尺寸突变（9.5m标高以上局部收进）和局部不规则（局部穿层柱、斜柱）等4个不规则项。

（二）结构抗震性能目标

本工程根据结构的自身特殊性和超限情况，根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010抗震性能化设计，同时参考《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3-2010结构抗震性能设计规定，确定结构的抗震性能目标为D级。

抗震性能目标的细化如下。转换柱、转换梁、竖向收进位置外围竖向构件（范围为收进层的上下各一层，即2F楼层~屋面层）定义为关键构件，抗震性能目标为中震抗剪弹性、抗弯不屈服和大震抗剪不屈服；框架梁为耗能构件，中震允许进入塑性，大震部分构件出现塑性铰、比较严重损坏；普通框架柱为普通竖向构件，中震部分构件中度损伤、允许进入塑性，大震抗剪截面控制、部分构件比较严重损坏；楼板开洞后薄弱部位定位为关键部位，中震钢筋不屈服，材料强度采用标准值，大震允许部分破坏，但仍能传递水平力和协调变形。

（三）结构抗震加强措施

针对本项目的不规则项，设计从结构计算分析、结构抗震概念设计和构造几个方面，采取对策和措施确保

本工程的安全、可靠、经济。

1. 加强结构计算分析

考虑到结构的复杂性，计算分析采用两种符合实际情况的不同力学模型的空间有限元分析程序YJK和ETABS进行分析比较，并采用考虑扭转耦联的振型分解反应谱法，保证分析的准确性和完整性。

按现行规范要求，考虑结构的扭转效应，控制结构扭转周期与平动周期的比值在0.9以内；楼层最大位移与平均位移的比值在1.5以内。同时地震作用考虑了双向地震及偶然偏心的影响。

进行弹性时程的补充分析，计算两条人工波和五条天然波下的结构响应，取这七条地震波时程法计算结果的平均值与反应谱法的计算结果进行对比，以便在反应谱计算结果的基础上进行有针对性的加强设计。

对水平地震作用下和竖向荷载作用下的楼板进行应力分析，根据分析结果对特殊部位进行加强。

进行抗震性能化分析，保证构件能够达到中震的性能目标。通过罕遇地震下的弹塑性时程分析，复核罕遇地震下主体结构以及关键构件的承载能力，检验整体结构的抗震性能。根据罕遇地震下的结构表现，对于相对薄弱的部位有针对性的采取措施，提高延性和抗震性能。

2. 注重结构抗震概念设计与构造

为加强结构的抗震性能和提高结构的延性，采取如下措施。

(1) 结构布置方面。本工程在结构布置方面抗侧力结构尽量双向均匀布置，保证结构抗侧刚度与抗扭刚度的协调。在不影响建筑布置前提下，采取适当加大外圈梁、柱的截面等措施，以增加楼层的抗扭刚度；使得结构的周期比满足规范要求、减小楼层的扭转位移比。

(2) 针对凹凸不规则。2F楼板全层增加到150mm，采用弹性楼板假定进行详细的有限元应力分析，控制多遇地震作用混凝土主拉应力不大于混凝土抗拉强度设计值。楼板按双层双向配筋，构造配筋率不小于0.25%，保证水平力的传递。对楼板宽度较小部位的周边结构梁也考虑加强。

(3) 针对扭转不规则。加强结构的抗扭刚度。通过布置提高屋盖结构平面内刚度和整体稳定性。此外，通过合理布置抗侧力构件，确保质心与刚心基本重合，减小偏心影响，降低楼层位移比。

(4) 针对竖向立面收进。严格控制上部收进结构的底部楼层层间位移角小于相邻下部区段最大层间位移角的1.15倍；加强收进位置及其上下各一层的楼板（分别为2F、3F、3MF及屋面层楼板）构造措施，板厚加大到不小于150mm，按照双面双向进行配筋；加强收进位置上下各2层外围柱的构造，抗震等级在原有基础上提高一级，适当提高性能目标，进行抗震性能设计。

(5) 针对存在局部穿层柱。重点关注穿层柱的计算长度，确保按照穿层的层高确定相关计算参数及后续的构件设计校核。按同一楼层一般框架柱的剪力复核其承载力。适当加大与穿层柱上下相连框架梁的截面，提高穿层柱两端的约束能力。

四、主要分析结果及构件设计

(一) 弹性分析结果

结构主要周期如表1所示。其中，第1阶和第2阶振型为平动振型，第6阶振型为扭转振型。周期比均小于规范0.9的限值，满足规范要求。

表1 结构主要周期

振型	YJK				ETABS			
	周期	平动系数 (X+Y)	扭转系数	Tt/T1	周期	平动系数 (X+Y)	扭转系数	Tt/T1
1	0.64	0.23+0.40	0.38	0.43	0.65	0.13+0.40	0.47	0.41
2	0.60	0.72+0.04	0.24		0.61	0.83+0.03	0.14	
6	0.27	0.02+0.47	0.51		0.27	0.02+0.34	0.64	

图3为小震作用下的层间位移角。从图中可看出，结构在小震作用下的层间位移角均小于1/550，满足相关规范的要求。其中ETABS计算的X向地震作用下2F、3F的位移角比YJK相对较小，主要是两种程序在考虑草坡屋面的斜向构件、构件实际长度在位移角计算中有所差异。

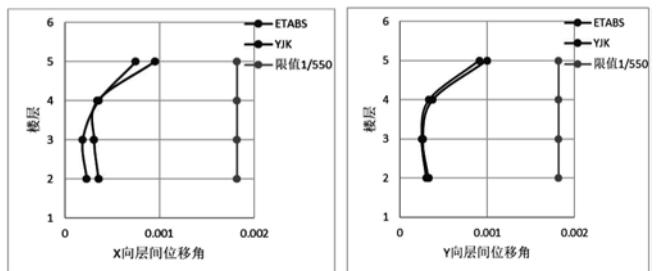


图3 小震层间位移角

选取5组天然波和2组人工波进行小震时程分析。所有楼层七条地震波平均楼层剪力除了X向2层略大于反应谱外，其余方向及楼层的层剪力均小于反应谱。施工图设计中，仅对X向2层的地震力进行放大，放大系数取1.03。

总体而言，结构在小震作用下，能保持了良好的抗侧性能和抗扭转能力，主要指标均满足极限状态设计和抗震设计第一阶段的结构性能目标要求。

(二) 构件设计

1. 抗震性能化设计

根据本工程对不同抗侧力构件提出的抗震性能设计目标，结合风荷载作用下构件受力性能特点，对不同水准地震作用以及非地震组合作用下各类构件在不同性能目标下进行校核。

计算结果表明，竖向收进位置塔楼与裙房相连的外围竖向构件、转换柱和转换梁正截面承载力可达到中震不屈服的性能目标，斜截面承载力可达到中震弹性的性能目标；后续施工图设计中采用小震及中震包络设计。

收进层及收进层的上下层楼板面内应力较大，洞口周边为应力集中部位，为了分析这些部位的楼板应力，为此采用ETABS程序建立弹性楼板的膜元进行计算分析。计算结果表明：在设防地震作用下，大部分区域内楼板面内拉应力约为0.01~0.15MPa之间，绝大部分区域都小于0.46MPa，在墙边、柱边、连梁周边、洞口

边附近存在应力集中,平均不超过1.08MPa。地上结构因为竖向体系收进的原因,楼板板厚均取150mm。考虑到这些楼层的重要性,对这些楼层按中震不屈服校核配筋,全部拉力由钢筋承担。实际楼板配筋中,须将重力荷载代表值下的钢筋量与上表中的钢筋量进行叠加。对于大面的楼板,地震作用下的附加钢筋采用平均应力1.08MPa下的钢筋用量,可满足中震不屈服的要求。综上所述,在中震作用下,楼板能保持较好整体性,同时对应力较大部位在施工图阶段加大配筋率,控制裂缝发展;对收进层及收进层上下层楼板配筋率加大。

总体而言,在中震作用下,构件均满足设定的性能目标要求。

2. 斜梁、与斜柱连接的梁

考虑轴力对斜梁、与斜柱相连的梁不利影响,计算时忽略楼板对承载力的贡献,即楼板厚度设0,楼板自重折算到附加恒载中。在静载工况作用下,与斜柱相连的梁呈2层受压、3层受拉状态;东侧草坡处斜梁大部分呈受压状态;在地震工况下,相关梁呈现拉压轴力往复的作用。选取这些斜梁及与斜柱相连的梁进行组合工况下压弯(拉弯)构件的验算。对于拉弯构件,在轴力分析的结果基础上,通过加大纵筋和腰筋配筋率,控制其裂缝宽度等措施,确保拉弯构件的安全。

(三) 罕遇地震弹塑性时程分析

采用PKPM-SAUSAGE进行本项目的动力弹塑性时程分析,所有楼层均采用弹塑性楼板模型。

罕遇地震波的输入均按两向输入(X:Y=1:0.85或0.85:1)。选取软件波库中的5条天然波(TH024、TH4、TH022、TH011、TH001)和2条人工波(RH1、RH2)。选取的地震波在对应结构主要振型的周期点上(T1、T2、T3),时程的平均反应谱数值与规范反应谱相近,均不大于20%,满足规范要求。

大震时程作用下,X、Y两个方向的平均基底剪力分别为14.8MN和17.2MN,对应的剪重比分别为10.6%和12.3%。与小震反应谱结果(X、Y向分别为3.8MN和3.4MN)相比,弹塑性时程基底剪力是小震反应谱的3.90倍和5.06倍。X、Y两个方向结构弹塑性基底剪力分别为弹性状态下基底剪力的61.79%和81.52%,可见罕遇地震作用下结构均出现一定的刚度退化,且X向刚度的退化相比Y向要来的大。

大震时程作用下,X向层间位移角平均值为1/198,出现在屋面层;Y向层间位移角平均值为1/171,出现在屋面层。7组地震波在X、Y方向层间位移角的最大值均满足 $\leq 1/50$ 的要求。X、Y两个主方向顶部位移平均值分别为39mm和46mm,分别为结构高度的1/435和1/369。

在对各工况罕遇地震波进行时程分析后,结构依然处于稳定状态,竖立不倒,主要抗侧力构件没有发生严重破坏,不至于引起局部倒塌和危机结构整体安全,满足“大震不倒”的抗震设防目标。

在罕遇地震波输入过程中,结构的破坏形态满足设计预期,整个框架在罕遇地震作用下基本处于轻微塑性状态。部分框架柱出现中度损坏,绝大多数框架柱为轻度损坏及以下的状态;少部分框架梁出现轻度损坏,绝

大部分框架梁为轻微损坏及以下。楼板绝大多数均未出现损坏,仅一小部分出现轻微损坏。

通过罕遇地震弹塑性的分析,发现整个结构的薄弱位置主要出现在草坡屋面,即9.5m标高的屋面东南角标高逐渐降低的位置,因其事实上形成了一定的斜撑作用,故相关位置的梁板柱在地震作用下出现了一定的损伤,如图4所示。施工图阶段,草坡屋面的楼板配筋率按不小0.5%双面双向配置,斜屋面东南角的框架梁配筋率按不小于2%进行配置。

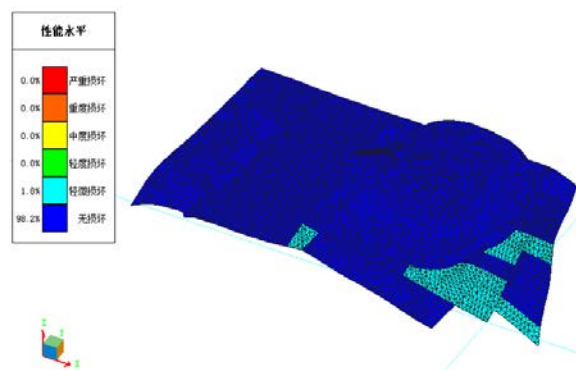


图4 楼板性能水平(以TH022-Y向波为例)

罕遇地震弹塑性分析中,对竖向收进位置的外围框架柱的配筋率进行了适当提高,按不小3%进行了计算,确保其在罕遇地震中性能,施工图阶段应按此配筋率进行配置。

综上所述,罕遇地震作用下抗震性能满足设计要求。

五、结论

结构设计采用YJK和ETABS进行了主体结构的弹性分析,采用YJK进行了主体结构多遇地震弹性时程分析以及抗震性能分析。分析结果表明,结构的主要计算指标:周期比、位移比、剪重比、刚度比、抗剪承载力比、层间位移角以及轴压比等均满足规范限值要求。结构构件验算满足抗震性能目标要求,通过弹塑性分析发现结构薄弱部位,采取相应的加强措施,满足预定的性能目标要求。

通过计算分析并采取针对性的加强措施和性能化设计等手段,可以确保主体结构满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标。

参考文献

- [1] 国联河西公园社区梦华庭A区规划设计方案[R]. 上海: 上海尤安建筑设计股份有限公司, 2020.
- [2] 朱希, 等. 淮安区国联河西公园社区梦华庭A区项目1#商业楼建筑结构抗震超限设计可行性论证报告[R]. 上海: 华东建筑设计研究院有限公司, 2021.
- [3] 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 2016年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [4] 淮安区国联河西公园社区梦华庭A区项目1#商业楼岩土工程勘察报告[R]. 淮安: 江苏华信勘测设计有限公司, 2020.

作者简介: 朱希, 1990.06.30, 汉族, 男, 江苏苏州, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 复杂结构。