大跨度空间框架结构设计探索

——以上海京剧院设计为例

杨阳

中国海诚工程科技股份有限公司 上海 200031

摘要: 本文通过结合上海京剧院设计实例, 探讨大跨度空间框架结构设计, 详细地给出了整个工程的设计思路以及所采取的设计技巧, 为同类工程提供有价值参考。

关键词: 结构设计; 大跨度结构; 空间框架结构; 设计措施

Abstract: this paper through the combined with Shanghai Peking Opera theater design example, discusses long-span space frame structure design, and presents the detailed design ideas of the project and to design skills, to the similar project to provide valuable reference.

Keywords: structure design; Big span structure; Space frame structure; Measures designed

中图分类号: TU318

文献标识码: A

文章编号:

1. 项目简介

本项目为上海京剧院迁建工程与上海朵云轩艺术中心组成的大跨度空间框架结构, 总高 23.10m。建筑结构的安全等级为二级, 地基基础等级为乙级, 设计使用年限 50 年, 抗震设防类别为丙类。地上建筑设抗震缝分为两部分, 大跨度结构单元抗震等级二级, 其余单元抗震等级三级。地下室(地上建筑投影范围以外)抗震等级三级, 地下室(地上建筑投影范围以内)抗震等级同地上建筑。

拟建场地土类型为软弱土。场地 20.00m 深度范围内分布⑤2 层饱和砂质粉土属轻微液化土层, 场地属轻微液化场地, 其平均液化指数 I_{le} 为 1.80, 平均液化强度比 F_{le} 为 0.66, 属抗震不利地段。综合判定拟建场地为稳定场地, 适宜建造本工程拟建建筑物。本工程拟建建筑距地铁 11 号线最小净距约为 15m, 根据“上海轨道交通申嘉线发展有限公司关于朵云轩与轨道交通 11 号线区间隧道相对关系及保护要求的事宜”中内容, 且京剧院与朵云轩的基础是连在一起, 地下室部分没有分开, 为减少基础工程对地铁隧道的影响, 消除挤土效应, 桩基础采用钻孔灌注桩。

2. 抗侧力结构体系设计

本工程上部结构由防震缝分为西侧结构和东侧结构两部分, 从地下室整体刚度经过计算分析, 地下室的剪切刚度应当大于地上一层剪切刚度的 2 倍, 故将地下室顶板作为上部结构的嵌固部位。主体结构地下室顶板-0.050m 标高与室外地下室顶板-1.800m 标高相差 1.75m, 采用在相交边缘设加腋支挡的措施保证水平力连续传递, 使地下室顶板成为有效嵌固端。

同时, 鉴于本工程上部六层, 总高度 24m, 通过规范可确定出结构类型采用现浇钢筋混凝土框架结构体系。同时通过地上部分建筑设抗震缝分为两个独立的结构体系, 东侧多功能排演厅部分由于采用大跨度框架结构体系, 抗震等级为二级; 西侧部分框架结构为三级。地下室部分抗震等级为同上部。本工程东侧多功能排演厅部部分为大跨度框架结构体系, 并采用倾角较大的斜柱, 为提高结构的整体性和抗震性能, 减小构件的断面尺寸, 该部分框架柱采用钢骨混凝土构件。

3. 楼盖体系设计

本工程地下、地上部分均采用现浇混凝土梁板结构体系。部分楼板开大洞的部位，在结构上采取加厚周边楼板（ $h=150\text{mm}$ ）和配筋率（ $\rho \geq 0.25\%$ ），加强洞口周边的梁配筋，以提高结构的整体性。本工程东侧多功能排演厅部分存在倾角较大的斜柱和 4m 左右长度的挑梁，为提高结构的整体性和抗震性能，减小构件的断面尺寸，大跨部分主梁及、邻框架柱及门厅处 24m 高斜柱采用钢筋混凝土构件。

另外，本工程的多功能排演厅结构体系较为复杂，其中存在较大的舞台空间造成结构楼板不连续，框架柱长细比较大，斜立面处设置的斜柱承受较大的竖向力和弯矩。以上建筑布局特点造成该单体扭转效应较大，如果仅仅采用普通混凝土梁柱很难满足设计需求。为了满足建筑使用功能的要求并且满足国家规范要求，本工程采用以下技术措施：

（1）框架柱及斜柱采用内置型钢的劲性混凝土柱，大跨度框架梁宜采用内置型钢的劲性混凝土梁。其中设计的柱中钢筋含钢率约为 4~5.5%，梁中钢筋含钢率约为 4~5%。

（2）加大楼板厚度及配筋，通过采用双层双向配筋来加强楼板的刚度。

（3）适当加大外围框架梁，来降低平面不规则造成的扭转效应。其中周圈框架梁中内置的型钢能较好地约束结构整体变形。

（4）适当降低框架柱的轴压比来提高框架柱的整体延性及抗变形能力。

本结构通过以上措施，加强了框架梁及框架柱的承载能力及抗变形能力，型钢节点也保证了节点的刚度。经过计算表明采用以上措施加强后该结构各项指标均能满足规范要求。同时鉴于本工程地上建筑平面布局不规则，为减少结构体系的扭转，地上建筑根据建筑使用功能的区划设缝分为两个单体建筑：一部分为西侧办公及辅助区域，一部分为大跨度多功能排演厅区域。第一部分：办公及辅助区域平面布局规则，上下结构布置均匀，竖向刚度无突变。第二部分：大跨度多功能排演厅部有以下结构特点：排演厅由于建筑使用功能要求局部取消楼板，造成大面积平面楼板不连续，在舞台位置由于舞台的高度要求，此处取消第三层高处两方向框架梁，使得该建筑在角部刚度较弱。由于建筑外立面要求，在该建筑舞台远端另一侧轴线处从±0.000 至屋顶有外飘式外立面，竖向最大倾角约为 10 度。斜柱在屋面处与最近框架柱轴线近 18m，承受较大的压力和弯矩。

4. 抗震缝、沉降缝、收缩缝设计

本工程结构体型复杂，考虑使用功能要求设缝，将上部结构分为两部分，并同时采取设置伸缩后浇带、加强梁板配筋等措施减少砼温度收缩应力。防震缝缝宽不小于 150mm。地下室沿长度每隔 30~40m 设一道贯通顶板、底板及墙板的施工后浇带，后浇带一侧的地下室底板应一次浇捣完成。后浇带应在两侧浇灌完成至少两个月后再进行浇灌，其强度等级应比原设计提高一级，并采用微膨胀混凝土。

5. 地基基础

本工程为多层建筑，拟建场地为上海市闹市区，濒临地铁 11 号线。设计时上海市隧道工程轨道交通设计院提供了《上海市轨道交通 11 号北段工程工作联系单》，其中提出施工期间应减少对已建地铁隧道的影响。该建筑位于闹市区，与周边已建建筑（构筑）物较近，且地下管线密集，特别是距地铁 11 号线（已建成）距离约 15 米，因此本工程不适于采用预制桩。

根据现场场地及相邻地铁隧道的特点，前期方案设计时咨询相关部门及专家设计后决定结构桩

基础采用钻孔桩以减少基础施工时地基土的土体应力变化。基础底板采用无梁板筏结构来消除由于基础施工对原状土层的扰动。采用以上措施后可最大限度地减少基础施工时对相邻隧道的影响。

6. 主体框架设计技巧

地上部位分缝分成四个单体，其中京剧院为单体最大空间结构较为复杂的结构。在 4.20m 标高部位应为影剧院阶梯位置的布置要求在影厅梁、板处出现了较大高差，通过局部调整板标高、梁板交界处加腋，加大框架梁断面，尽量使错层传力不畅通部位结构连续。中空夹层观众厅，原采用两边悬挑结构，为提高结构安全度在与各专业协调后在大厅一处增设框架柱。

轴外侧二层标高有外伸 4.2m 外飘悬挑，改悬挑处于中空影厅部位，底部因位于建筑室外通道无法设置框架柱，顶部由于中空影剧院该部位悬挑跨层，填充墙高达 9m，经过多轮计算悬挑部位在承担外部荷载下挠度及配筋均过大，在部位形成了薄弱环节。为解决该问题，在悬挑段部设置局部型钢柱，使得该部位底部悬挑梁与顶部型钢梁通过该型钢柱共同受力形成空间受力系统，较好的解决了该问题。同时在计算时将该跃层柱在工程受力计算时将该层级顶部及中间跨层结构设置为同一施工段。经比较该算法与将各层分开组装结构受力有较大的不同，前者更能从内力简图体现出上、下共同作用的结果。

主入口处外飘框架柱，该部位因建筑立面及大厅使用功能的要求，外飘斜柱在三层标高内不允许设置横向框架梁进行拉结。在结构计算中表明，该处成为层间位移角最大部位，成为影响整个建筑结构指标的重点，并且由于现有结构通用软件的局限在斜柱角度过大时，将其认定为无变形刚性杆无结构竖向变形。如果仅采用该软件计算无法较准确的体现该重要位置的准确变形及内力，通过采用三维空间软件 MIDAS 对比分析，该部位在不架设层间框架梁的情况下空间扭转较大，在于建筑及方案沟通后将外挂幕墙的钢结构支撑改为三层处设置层间框架梁，即解决了结构的受力不利问题也解决了外围幕墙结构支撑较大的问题。

7. 结论

本文通过结合上海京剧院设计实例，探讨大跨度空间框架结构设计。设计中考虑本工程的多功能排演厅结构体系较为复杂，其中存在较大的舞台空间造成结构楼板不连续，框架柱长细比较大，斜立面处设置的斜柱承受较大的竖向力和弯矩，为此采取劲性混凝土梁柱等设计措施，可为同类工程提供有价值参考。

参考文献：

- [1] 张永安. 32m 大跨度高效预应力混凝土多层框架设计与微振分析[J]. 四川建材, 2006, 27 (02): 74-75.
- [2] 孟琦, 赵春光. 钢筋混凝土带腋撑框架设计优化研究[J]. 价值工程, 2007, 29 (06): 101-103.
- [3] 林晓涵. 大跨度空腹桁架建筑结构技术[J]. 河南建材, 2011, 31 (02): 46-49.