

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.044

某剧院结构抗震性能分析与关键问题研究

徐颖¹, 翁君耀²

(1. 西安市建筑设计研究院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市住宅建筑设计研究院, 陕西 西安 710050)

摘要: 某剧院建筑地下水位浮力大于自重, 上部结构楼板不连续、弱连接、穿层柱、内部空旷、大跨度屋盖, 舞台上空设备通过屋面梁悬挂受力, 观众厅上部设备通过支承载牛腿上的网架来悬吊受力的这一结构体系, 利用两种软件建立力学模型对结构进行小震弹性分析, 对关键构件进行性能化设计, 嵌固端位置变化等各种情况进行配筋包络设计, 附属钢结构柔性连接于主体混凝土结构上, 确保结构整体和附属构件的安全性和合理性。

关键词: 抗浮设计; 复杂体型; 性能化设计; 细节处理; 整体分析

中图分类号: TU398

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)01-0242-05

Seismic Performance Analysis and Key Problems of a Theater Structure

XU Ying¹, WENG Junyao²

(1. Xi'an Institute of Architectural Design, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Xi'an Residential Building Design and Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710050, China)

Abstract: The underground water level of a theater is greater than its own therefore the upper structure floor is not continuous and has weak connection which has open large span roof of the column. The equipment over the stage is suspended by the roof beam, and the upper equipment of the auditorium is suspended by the structure of the space truss on the supporting bracket. Using two kinds of software, the mechanical model is developed to analyze the elastic elasticity of the structure, performance design of key components, the embedded end position change and other conditions, the reinforcement envelope design. The flexible connection of subsidiary steel structure is connected to the main concrete structure, which can ensure the safety and rationality of the overall structure and accessory components.

Keywords: anti-floating design; complex shape; performance-based design; detail treatment; integral analysis

1 工程概况

本工程位于延安市宝塔区枣园镇枣园村村南, 北起枣园路, 南至沿河公路, 东临中国延安干部学院, 西至枣园路和沿河公路的交汇处。主要由北侧商业街、南侧西翼商业、南侧东翼影院和南侧剧院四个部分构成。结构设计时, 四个单体之间单独设缝。效果图见图1。建筑面积约4.7万m², 本文主要介绍南侧居中剧院部分的结构设计。

剧院部分地上4层, 地下一层(一侧为下沉广场, 并非完全地下室), 结构高度23.80m, 大厅高度28.50m, 剧院主体部分划分为大厅、观众厅、舞台、

艺术学校(舞台下侧)4个区域, 前台大厅为单层通高且高于其它部分, 大厅部分所占整体面积不足20%, 其余主体部分不超过24m, 结构按多层建筑进行设计。



图1 整体建筑效果图

工程设计使用年限为 50 a,安全等级为二级,抗震设防烈度为 6 度^[1],基本地震加速度为 0.05 g,场地类别为 II 类,设计地震分组为第一组,特征周期为 0.35 s,考虑到剧院部分人流密集、且与两侧单体彼此连通,建筑设防类别定义为重点设防类,抗震等级按二级考虑。混凝土均为 C35,型钢材料取 Q345B 级钢材,基本风压取 0.35 kN/m²。

2 结构选型与布置

结构类型采用框架结构,下部主要柱网尺寸为 8.4 m×7.8 m,次梁采用井字梁,舞台屋顶单向型钢混凝土梁,观众厅和前厅采用井字型钢梁的布置形式。图中未注明的柱子截面主要为 600 mm×600 mm 的混凝土柱、支承大屋面为 800 mm×1 000 mm 和 1 200 mm×1 200 mm 的型钢混凝土;框架梁截面主要为 350 mm×700 mm、400 mm×800 mm 混凝土梁及 500 mm×1 200 mm 的型钢混凝土梁。马道为悬挑工字钢梁上铺钢格栅板,观众厅上空为双层球形网架通过竖向钢拉杆来悬挂观众厅马道和面光桥等,舞台两侧灯光吊笼采用铰接在型钢柱上的钢桁架。结构典型平面布置如图 2、图 3、图 4 所示。支承大跨度屋盖和灯光吊笼的梁为型钢混凝土梁,支承通高的屋盖大厅柱子和舞台台口、观众厅四周、舞台四周支撑屋顶大跨度屋盖的的竖向构件采用型钢混凝土柱^[2-3]。

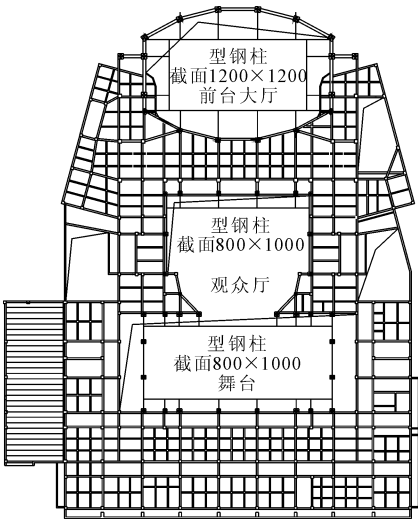


图 2 一层结构布置图

3 基础设计

基础采用独基(局部条基)+防水板方案,实际地下水位高于地面下沉广场 3 m 左右,基础设计时对基础顶面至建筑地面留有约 600 mm 厚的配重空

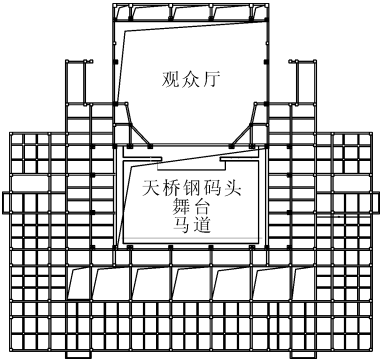


图 3 一层夹层结构布置图

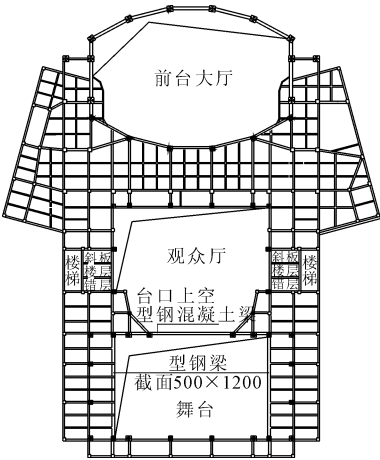


图 4 二层结构布置图

间,考虑到施工工期,施工中的降水周期不能过长,且采取配重方式不足以抵消水浮力,且防水板的配筋和厚度将会增加。根据地质报告提供的参数,地下岩层距基础底面中风化基岩约为 2.0 m~5.0 m 左右,工程采用抗浮锚杆进行抗浮设计。设计采用全长粘结型抗浮锚杆,孔径 D 取 150 mm,锚入中风化层深度为 2.0 m,钢筋采用 HRB400。按照 $R_l = \xi_1 \pi D l_a f_{rb} = 0.8 \times 3.14 \times 0.15 \times 2.0 \times 260 = 195.936$ kN 抗拔锚杆杆体的横截面 $A \geq N_{ld}/(\xi_2 f_y) = 1.35 R_l/\xi_2 f_y = 1.35 \times 200 \times 10^3/(0.69 \times 360) = 1\ 087$ mm²。锚杆钢筋与砂浆之间的锚固长度验算, $t_a \geq N_{ld}/(\xi_3 n_s \pi D f_b) = 1.35 R_l/(\xi_3 n_s \pi D f_b) = 1.35 \times 200 \times 10^3/(0.60 \times 3 \times 3.14 \times 22 \times 0.7 \times 2.4) = 1\ 292$ mm,实际用 3 根 22 等效直径为 38.1 mm,锚入岩层的长度应大于 $40 \times 38.1 = 1\ 524$ mm。实际单根锚杆抗拔承载力特征值取值不小于 200 kN。现场试验结果均满足设计要求。

4 结构分析

主体结构具有错层、大开洞、穿层柱、悬挂舞台设备、大跨度屋面、结构刚度和质量分布不均匀,整

体性较差、扭转成分大,薄弱部位多等许多不利因素。剧院北侧由于单层地下局部下沉广场的存在,在结构计算中嵌固部位不明确。整体计算时对嵌固位置选取基础顶和一层分别计算配筋取其包络。

考虑到结构体型的不规则性,计算模型不能准确模拟真实受力情况,采用 YJK 和 MIDAS 两种软件进行对比分析,考虑扭转耦联效应和双向地震效应、综合偶然偏心的影响,用刚性楼板假定来控制大指标,控制结构层间位移比限制在 1.4 以下;用符合楼板平面内实际刚度的弹性楼板模型来计算实际配筋和应力。保证结构薄弱构件不发生局部振动,发现结构内部相对薄弱构件加大截面和配筋。阻尼比按照材料来区分,混凝土取 0.05,钢结构取 0.02 进行动力分析。取两种软件前 12 阶自振周期计算结果见表 1、表 2。

表 1 结构的 YJK 自振周期

序号	1	2	3	4	5	6
周期/s	0.768	0.743	0.585	0.268	0.231	0.205
序号	7	8	9	10	11	12
周期/s	0.138	0.128	0.116	0.106	0.084	0.083

表 2 结构的 MIDAS 自振周期

序号	1	2	3	4	5	6
T/s	0.750	0.722	0.569	0.261	0.225	0.200
序号	7	8	9	10	11	12
T/s	0.132	0.125	0.112	0.103	0.081	0.080

表 3 小震下结构整体指标

软件类别	结构总质量/t	基底剪力/kN		基底弯矩/(kN·m)		剪重比/%		层间位移角/rad		层间位移比		最小刚度比	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
YJK	45489	7804	7748	136410	128407	1.818	1.805	1/2406	1/2713	1.34	1.21	1.29	1.24
MIDAS/Gen	45182	8048	7644	133289	121450	1.946	1.800	1/2455	1/2846	1.39	1.24	1.29	1.23

5.2 中震关键构件弹性分析

对局部竖向关键构件用 YJK 软件验算以中震弹性性能目标设计的构件,用弹性板进行分析,抗震承载力调整系数按《建筑抗震设计规范》^[1](GB 50011—2010)规定采用,放大地震力,地震影响系数按小震的 2.857 倍取值,刚度仍取小震时的弹性刚度,以中震弹性定义抗震性能目标设计的构件,抗震承载力调整系数取 1.0,内力调整系数不变,构件承载力取设计组合,进行计算配筋,抗震等级取 4 级,保证关键构件中震弹性。关键构件的计算结果与小震弹性分析结果进行包络设计。

通过自振特性可以看出:YJK 和 MIDAS 两种软件计算结果吻合度较好,第 1、2、4、5 周期具有明显的平动,第 3 周期为扭转并带有一定成分的平动,第 6 周期扭转中带有较大成分的扭转,阵型伴随较明显的扭转振动^[4]。YJK 计算出的 X、Y 向平动振型参与质量系数分别为:99.87%、92.07%,MIDAS 计算出的 X、Y 向平动振型参与质量系数分别为:94.01%、93.39%。

5 抗震分析

基于性能的抗震设计方法,选取合理的性能目标进行设计,将结构的整体性能目标定义为 B,对于第一设防水准(小震)下,保证所有结构构件处于弹性工作状态;对于第二设防水准(中震)下,对部分较为关键的构件,其破坏会引起结构局部坍塌,且其部分受力复杂,如观众厅支承大跨度屋盖的柱、舞台口的台口柱、穿层柱和台口支承桁架等,把这些构件作为关键构件,按照中震弹性进行设计^[5]。

5.1 小震整体结构弹性分析

在小震计算中,通过 YJK、MIDAS/Gen 两种软件进行对比分析,强制刚性楼板假定下,小震及风荷载作用下结构的层间位移角、剪重比、受剪承载力等均能满足规范要求,在全楼弹性楼板假定下,梁柱构件未出现超筋情况,计算结果见表 3。整体结构处于弹性工作状态。

6 关键问题处理

6.1 超长结构设计

结构整体超长,中间存在大开洞且不连续,错层部位楼板缺失,构造上除屋面外各个楼层采取厚度为 150 mm 的楼板,双层双向 0.25% 来进行配筋,正负零高度楼板厚度为 200 mm,增大框架梁和次梁腰筋;在平面大开洞后形成的薄弱位置加设后浇带,减小应力集中。施工中加强养护,材料上采用中、低水化热水泥,尽可能减少水泥用量,加强水泥终凝后的养护。设计上考虑温度应力的影响,通过弹性楼板

分析内力,分区域对楼板进行配筋,大开洞的位置周围对结构的水平剪力传递产生应力集中,洞口周围楼板钢筋局部再另行加大。

6.2 错层结构楼面设计

楼层错层的楼板间高差较小的位置,前厅与后台由于功能分区造成的错层位置通过斜板、斜梁及楼梯折板等措施,把整个楼板连成整体,使剪力能够连续传递,消除短柱带来的剪力集中。对于夹层部分和楼层局部增设功能房间的形成的短柱,将错层位置的抗剪箍筋加大一级来增强抗剪承载力和设型钢等措施进行加强处理。

6.3 台口大梁、立柱设计

剧院台口大梁既要承受舞台工艺的各种设备,又要承受马道、葡萄架、大屋面,舞台上空灯具、悬挂层所传递的荷载,采用了型钢混凝土钢桁架梁,与连接的柱子采用了型钢混凝土,型钢梁柱翼缘均设置抗剪栓钉,增加型钢构件的整体性,尽可能保证台口梁具有足够的安全度。台口柱支撑屋面荷载和台口梁传递过来的竖向荷载,竖向通高,在 Y 向连接薄弱,通过耳光室斜向梁、柱构件增加 Y 向约束,保证台口柱子具有较高的冗余度。台口上部距离屋顶距离较大,上部均为单片后期填充墙,台口大梁与屋顶大梁之间,在周边楼层高度位置加设连系梁,连系梁纵筋锚入台口柱,竖向后砌筑墙 3 m 间距加密构造柱,后墙墙体之间加设钢丝网,加强这个后砌墙体与周边构件的连接。

6.4 钢结构关键问题

舞台上空存在大量的钢结构构件,通过屋面型钢混凝土大梁埋件下挂竖向钢拉杆^[6],实现舞台灯光吊杆的自由升降,舞台上空格栅层与周围混凝土采取铰接水平连接,保证钢平台的稳定性和水平剪力的传递。

舞台侧翼存在 30 kN/m 的吊笼荷载,吊笼分布在长度 20 m 的舞台范围内,设计中采用钢桁架支撑在舞台前、后柱子上,由于钢桁架上放通过格栅层侧翼的型钢梁下部做限位装置保证桁架上弦侧向稳定,桁架下弦通过马道侧面后做钢结构平台与主体混凝土结构。具体如图 5 所示。钢桁架与主体构件铰接连接,减少主体混凝土结构对纯钢桁架的传递水平力,钢桁架具体布置如图 6 所示。

观众厅网架支座坐落于观众厅周围的型钢柱上设计的牛腿上,网架下马道平台较多,悬吊各种设备,马道下侧还存在 2 道面光桥、及平时的检修荷载和供演员表演等移动荷载,荷载大且具有不可确定

性,设计时通过网架下弦节点的下拉吊杆进行转换连接马道和面光桥,具体位置。典型节点见图 7。

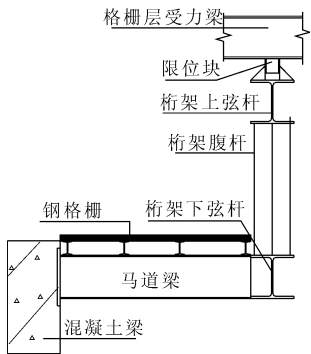


图 5 舞台吊笼桁架与周边构件连接方式

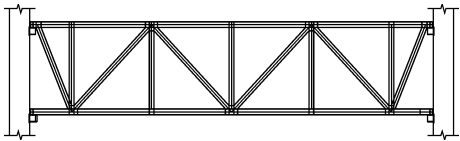


图 6 舞台两侧灯光吊笼钢桁架

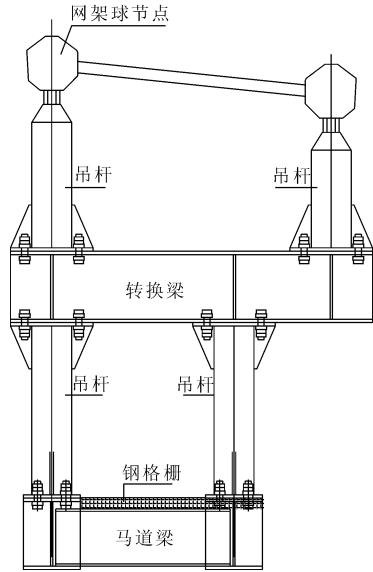


图 7 观众厅上空转换结构典型节点

6.5 大厅型钢柱设计

舞台和观众厅与前厅部分刚度差异明显,整个大厅位置通高,型钢柱在 Y 向薄弱,仅在柱中位置与外侧矩形造型通高钢柱进行构造性连接, X 向在层高位置通过水平连系弧梁连接,单排柱上部屋顶梁外面悬挑,减小屋顶梁对结构弯矩的影响。大厅部分通高柱与周围无连接,顶部承受大跨度的混凝土楼板和楼顶的钢结构桁架大屋面造型;由于通高柱所承担的屋盖面积较大在水平位移作用下引起的 P-Δ 效应相对会比较明显,可使结构内力增加。通长设置型钢混凝土柱,控制型钢柱长细比在 80 以

内,与大屋盖屋顶型钢梁刚性连接,控制结构在风或地震作用下引起的结构失稳。

7 结 论

(1) 对地下水浮力大于建筑物自重和大面积上部无建筑物的广场区域,采取抗浮锚杆能够减少防水板的厚度和配筋。

(2) 通过两种力学模型的软件对结构进行对比分析,能够对复杂体系的建筑物合理性进行客观评价。

(3) 采取小震弹性分析和关键构件性能化设计、嵌固端在基础顶和一层的各种情况包络设计,能够以最低代价解决复杂问题。

(4) 利用现有条件通过超长、弱连接部分加大板厚和配筋率,弹性楼板按实际分析,利用错层较小的楼层可通过斜板楼梯来传递水平剪力对结构构造

加强是必要的。

(5) 设计中应注重提高结构的抗震性能和加强关键部位构件的延性,对关键节点的研究应受力明确且方便施工。

参考文献:

- [1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] 型钢混凝土组合结构技术规程:JGJ 138—2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 钢骨混凝土结构设计规程:YB 9082—2006[S].北京:冶金工业出版社,2006.
- [4] Anil K C. 结构动力学—理论及其在地震工程中的应用[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [5] 周 斌,王启文,杨旺华,等.甘肃张掖大剧院抗震性能设计[J].建筑结构,2015,45(15):36-40.
- [6] 韩 巍,齐 欣,张学利,等.济南省会文化艺术中心(大剧院)结构设计[J].建筑结构,2013,43(17):48-53.

(上接第 241 页)

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑筏形与箱形基础技术规范: JGJ 6—2011[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2011: 16-17.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 8-54.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于印发《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》的通知: 建质[2010]109号[A]. 2010-07-16.
- [6] 住房和城乡建设部工程质量安全监管司. 中国建筑标准设计研究院. 全国民用建筑工程设计技术措施: 结构(混凝土结构)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012: 171-177.
- [7] 陈彬磊, 江磊鑫. 超高超限工程的规范条文及建议[J]. 建筑结构, 2014, 44(2): 8-12.
- [8] 罗若帆, 王仕成. 小高层塔式住宅三种结构体系抗震性能分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4): 223-227.
- [9] 黄鑫东, 朱承峰, 田启明, 等. 芜湖宝能时代广场超限高层的性能化设计及抗震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(1): 30-35.
- [10] 安东亚, 汪大绥, 周德源, 等. 高层建筑结构刚度退化与地震作用响应关系的理论分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 155-161.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 207-215.
- [12] 汪大绥, 安东亚, 崔家春. 动力弹塑性分析结果用于指导结构性能设计的若干问题[J]. 建筑结构, 2017, 47(12): 1-10.
- [13] 蒋媛, 刘开强. 成都某复杂高层结构设计可行性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 188-193.
- [14] 孟美莉, 吴兵, 傅学怡, 等. 沈阳宝能金融中心住宅塔楼结构设计[J]. 建筑结构, 2017, 47(5): 9-14.
- [15] 蔡世泽, 周煜. 高烈度区某B级高度高层建筑结构设计分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(S1): 227-229.
- [16] 俞洪元, 孙鸿恩, 韩超, 等. 双层预埋柱脚螺栓体系安装精度及减震效果分析[J]. 施工技术, 2015, 44(12): 73-75.