

中国动漫博物馆钢结构抗震设计与分析

王仪政¹, 李厚民¹, 舒展¹, 张卫²

(1. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院; 2. 中南建筑设计研究院股份有限公司, 武汉 430068)

摘要:在结构设计中, 抗震设计是必不可少的环节。以中国动漫博物馆为例, 一层采用钢网格筒-钢框架-支撑(钢板剪力墙)结构, 二层及以上采用钢框架-支撑(钢板剪力墙)+跨层桁架结构, 运用现行结构抗震理论和有限元模型, 进行了动力时程和静力弹塑性分析。分析表明: 该结构整体抗侧刚度较好, 具有较好的抗震性能。

关键词: 钢结构; 结构抗震; 有限元分析; 时程分析; 静力弹塑性分析

中图分类号: TU13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0093-05

Anti-seismic design and analysis of steel structure of the China Comic and Animation Museum

Wang Yizheng¹, Li Houmin¹, Shu Zhan¹, Zhang wei²

(1. Civil Engineering and Building Academy, Hubei University of Technology;

2. Central-Soclth Architectural Design Institute Co. LTD, Wuhan 430068, P. R. China)

Abstract: In structure design, Anti-seismic design is an indispensable step. This paper takes China Comic and Animation Museum as an example. First floor adopts steel mesh tube-steel frame-supporting (steel plate shear wall) structure. Second floor and above adopt the steel frame-support (steel plate shear wall) + cross layer truss structure. Existing structure Anti-seismic theory and finite element analysis were used for the structure of the dynamic and static elastoplastic analysis. Analysis shows that the structure is in a good lateral stiffness and has better seismic performance.

Key words: steel structure; anti-seismic structure; finite element analysis; time-procedure analysis; pushover analysis

中国动漫博物馆位于浙江省杭州市白马湖畔, 总建筑面积约为 30 382 m²。由于该工程跨度荷载相对较大, 局部单柱荷重标准值超过 19 000 kN, 设地下室一层, 底板位于淤泥质粘土软弱土层, 工程力学性能较差, 承载力和变形均不能满足设计要求, 因此采用桩基础。本工程结构体系: 一层采用钢网格筒-钢框架-支撑(钢板剪力墙)结构, 二层及以上采用钢框架-支撑(钢板剪力墙)+跨层桁架结构。

1 结构设计与分析

1.1 结构荷载与作用

1) 恒载: 屋面恒载 6.50 kN/m², 楼面恒载 4.50 kN/m²。

2) 活载: 楼(屋面)活荷载标准值见表 1, 当楼、屋面有大型设备时, 荷载按设备实际重量考虑。

表 1 楼(屋)面活荷载

荷载类别	标准值/(kN·m ⁻²)
一层展厅	8.0
二层及以上展厅	5.0
公共卫生间	2.5
办公、会议室	2.0
走廊、楼梯	3.5
不上人屋面	0.5
屋顶绿化草坪	3.0
设备机房、电梯机房	7.0

3)基本风压:0.50 kN/m²(取重现期为 100 年的基本风压);地面粗糙度为 B 类。

4)基本雪压:0.50 kN/m²(取重现期为 100 年的基本雪压)。

5)抗震设防烈度:根据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》^[1],抗震设防烈度为 6 度,其设计基本地震加速度为 0.05 g,Ⅲ类场地。

6)气候条件:工程场地位于亚热带季风气候区。年平均气温 16.2 ℃,夏季平均气温 28.6 ℃,冬季平均气温 3.8 ℃。历年极端气温最高 40.3 ℃,最低 -9.6 ℃。

1.2 结构设计

1.2.1 地下基础选型 由于该工程跨度荷载相对较大,局部单柱荷重标准值超过 19 000 kN,设地下室一层,底板位于淤泥质粘土软弱土层,工程力学性能较差,承载力和变形均不能满足设计要求,因此采用桩基础。

1.2.2 地上结构设计 该工程结构体系:一层采用钢格筒-钢框架-支撑(钢板剪力墙)结构,二层及以上采用钢框架-支撑(钢板剪力墙)+跨层桁架结构^[2]。

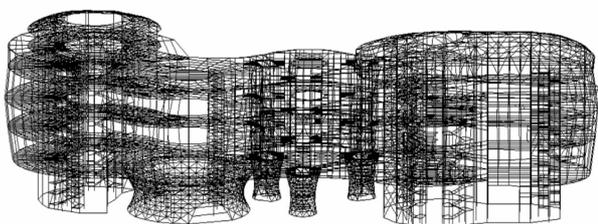


图 1 上部结构计算模型三维视图

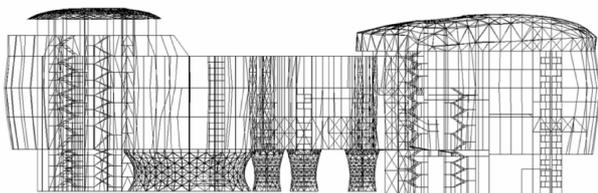


图 2 上部结构计算模型立面投影图

1.3 抗震性能分析及设计方法

1.3.1 设计方法 (1)先按现行规范进行小震阶段的结构设计;(2)中、大震下的等效弹性方法设计;(3)弹性时程分析校核小震下结构抗震性能水准;(4)静力弹塑性时程分析校核中、大震下结构抗震性能水准;(5)动力弹塑性时程分析校核大震下结构抗震性能水准^[3]。根据校核结果调整结构设计并进行二次设计,直至得到最后的结果。

本文采用 Sap2000 Ultimate 15.2.1 和 Midas GenVer. 800 进行设计及结构对比分析。

1.3.2 承载力设计 按照《高层建筑混凝土结构技术规程》^[4]的 3.11.3 条进行设计。针对本工程设定性能目标,各性能水准的具体要求如下。

C 级第 1 性能水准的结构,应满足弹性设计要求。在多遇地震作用下,其承载力和变形应符合规范的有关规定。

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{EH} S_{EHK}^* + \gamma_{EV} S_{EVK}^* \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (1-1)$$

式中: R_d 、 γ_{RE} 分别为构件承载力设计值和承载力抗震调整系数; S_{GE} 、 γ_G 、 γ_{EH} 、 γ_{EV} 分别为重力荷载代表值的效应、重力荷载、水平地震及竖向地震作用分项系数; S_{EHK}^* 为水平地震作用标准值的构件内力,不需要考虑与抗震等级有关的增大系数; S_{EVK}^* 为竖向地震作用标准值的构件内力,不需要考虑与抗震等级有关的增大系数。

第 2 性能水准的结构,在设防强度地震或预防的罕震地震作用下,关键构件及普通竖向构件的抗震承载力符合(1-1)的要求;耗能构件的受剪承载力符合(1-1)的要求,其正截面承载力应符合(1-2)的要求。

$$S_{GE} + S_{EHK}^* + 0.4 S_{EVK}^* \leq R_k \quad (1-2)$$

式中: R_k 为截面承载力标准值,按材料强度标准值计算。

C 级第 3 性能水准的结构应进行弹塑性计算分析。在设防烈度地震作用下,关键构件及普通竖向构件的正截面承载力应符合式(1-2)的规定,水平长悬臂结构和大跨结构中的关键构件正截面承载力应符合式(1-2)、(1-3)的规定,关键构件及普通竖向构件受剪承载力满足弹性设计要求,即符合式(1-1)的规定;部分耗能构件进入屈服阶段,但其受剪承载力应符合式(1-2)的规定。

$$S_{GE} + 0.4 S_{EHK}^* + S_{EVK}^* \leq R_k \quad (1-3)$$

第 4 性能水准的结构应进行弹塑性计算分析。在预估的罕遇地震作用下,关键构件的抗震承载力应符合式(1-2)的规定,水平长悬臂结构和大跨结构中的关键构件正截面承载力应符合式(1-2)、(1-3)的规定。

1.3.3 位移设计 根据 GB 50011—2010《建筑抗

震设计规范》,在多遇地震作用下,结构薄弱部位的层间位移角应符合小于 1/250 的要求;在预估的罕遇地震作用下,结构薄弱部位的层间位移角应符合小于 1/100 的要求。

在设防烈度地震作用下,参考《建筑抗震设计规范》附录 M 及其条文说明的有关性能设计方法,取结构在设防烈度地震作用下的结构薄弱部位的层间位移角限值为 1/200。

1.4 结构静力弹性分析

采用三维有限元分析与设计软件 Sap2000 Ultimate C 15. 2. 1 进行结构整体分析,采用 MidasGen Ver. 800 结构分析软件进行结构对比分析^[5]。在下述计算分析中,对于本工程,在小震下对结构整体计算的阻尼比采用 0.03。

1.4.1 计算分析及结果 结构分析采用空间有限

元模型,地下室顶板作为上部结构的嵌固端^[6],具体结果如下。

1) 建筑物总质量

a. Sap2000 计算结果为建筑物总质量(0.5 倍活荷载折减后)53 650. 93 t,其中活载产生的总质量(0.5 倍活荷载折减后)为 47 426. 81 t;恒载产生的总质量为 6 224. 127 t。

b. Midas Gen 计算结果为建筑物总质量(0.5 倍活荷载折减后)为 53 664. 64 t,其中活载产生的总质量(0.5 倍活荷载折减后)为 47 463. 57 t;恒载产生的总质量为 6 201. 072 t。

两款软件统计的结构荷载、活载及总质量基本相等,总质量误差率为 0.026%。

2) 振型与周期

a. Sap2000 计算结果见表 2。

表 2 振型与周期(Sap2000)

振型	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s	T_5/s	T_6/s
周期/s	1.587 594	1.422 985	1.267 293	0.649 213	0.622 288	0.571 851
平动系数	0.521 927	0.773 9	0.334 83	0.002 730 2	0.000 057 0	0.000 005 95
扭转系数	0.29	0.056 29	0.5	0.007 561	0.000 002 7	0.000 047 65

周期比: $T_2/T_1 = 1.267 293/1.587 594 = 0.798 < 0.90$, 满足要求。振型质量参与系数:

$99\% > 90\%$, 满足要求。

b. Midas Gen 计算结果见表 3。

表 3 振型与周期(Midas Gen)

振型	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s	T_5/s	T_6/s
周期/s	1.608 9	1.422 8	1.228 3	0.910 7	0.777	0.591 9
平动系数	49.375 6	74.043 6	26.714 3	0.005 7	0.000 1	0.000 1
转动系数	30.003 4	4.025 7	49.772 8	0.000 1	0.000 1	0.000 1

周期比: $T_3/T_1 = 1.228 3/1.608 9 = 0.763 < 0.90$, 满足要求。振型质量参与系数: $99\% > 90\%$, 满足要求。

从表 2 与表 3 中可以看出,两款软件对结构计算的周期与振型基本一致,相差较小。振型图如图 3。

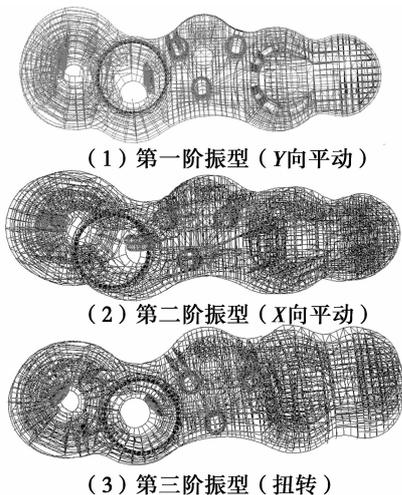


图 3 动漫馆前三阶振型

3) 上下楼层的刚度比、受剪承载力比
在后述线弹性静力分析中,为了便于表述计算结果,按照图 4 将本结构划分为 5 层。

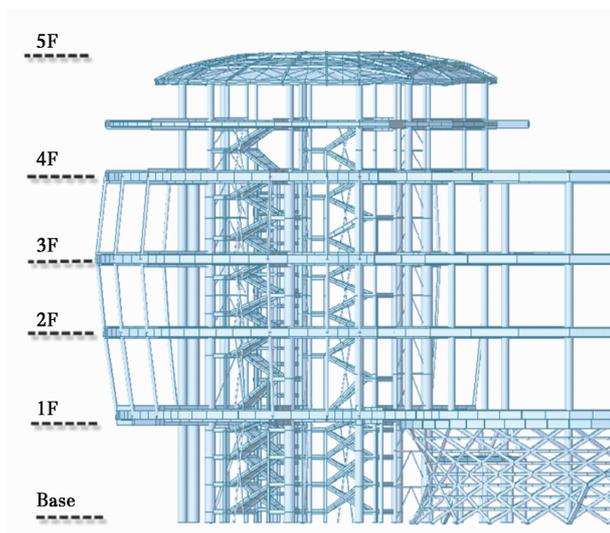


图 4 分层示意图

a. 楼层侧刚比

表 4 楼层侧刚比 (Sap2000)

楼层	X 方向	Y 方向
1 层	4.11	4.20
2 层	1.67	1.99
3 层	1.32	1.18
4 层	3.30	2.83

表 5 楼层侧刚比 (Midas Gen)

楼层	X 方向	Y 方向
1 层	4.29	4.52
2 层	1.63	2.02
3 层	1.52	1.37
4 层	3.02	2.92

以上数值为下一层侧向刚度与上一层比值。GB 50011—2010 限值为 70%，JGJ 3—2010 限值为 0.9。以上结果均满足要求。

b. 楼层受剪承载力比

表 5 楼层受剪承载力比 (Sap2000)

楼层	X 方向	Y 方向
1 层	0.962	0.975
2 层	1.101	1.103
3 层	1.063	1.062
4 层	2.459	2.483

表 6 楼层受剪承载力比 (Midas)

楼层	X 方向	Y 方向
1 层	0.951 0	0.963 2
2 层	1.092 0	1.083 2
3 层	1.074 7	1.069 3
4 层	3.649 8	3.668 0

以上数值为下一层受剪承载力与上一层比值。GB 50011—2010 限值为 0.65，以上结果均满足要求。

4) 有效质量系数与基底地震作用效应

a. 有效质量系数与基底地震作用 (Sap2000)

表 7 有效质量系数与基底地震作用效应 (Sap2000)

重力荷载代表值		525 913.493 kN
	有效质量系数(24 阶振型)	99%
X 方向	总地震基底剪力 Q _{ox}	13 200.429 kN
	基底剪重比 Q _{ox} /G _e	2.51%
	有效质量系数(24 阶振型)	99%
Y 方向	总地震基底剪力 Q _{oy}	9 834.582 kN
	基底剪重比 Q _{oy} /G _e	1.87%

b. 有效质量系数与基底地震作用 (Midas Gen)

表 8 有效质量系数与基底地震作用效应 (Midas Gen)

重力荷载代表值		525 779.701 7 kN
	有效质量系数(24 阶振型)	99%
X 方向	总地震基底剪力 Q _{ox}	13 775.428 kN
	基底剪重比 Q _{ox} /G _e	2.62%
	有效质量系数(24 阶振型)	99%
Y 方向	总地震基底剪力 Q _{oy}	10 200.13 kN
	基底剪重比 Q _{oy} /G _e	1.94%

5) 层剪重比

a. Sap2000 计算结果

底层 X 方向的剪重比 $\lambda_x = 2.51\%$ ，底层 Y 方向的剪重比 $\lambda_y = 1.87\%$ 。

b. MIDAS GEN 计算结果

底层 X 方向的剪重比 $\lambda_x = 2.62\%$ ，底层 Y 方向的剪重比 $\lambda_y = 1.94\%$ ，最小剪重比 $\lambda = 0.2 \times 0.08 = 0.016 = 1.60\%$ ，以上结果均满足要求。

6) 地震作用和风荷载下的结构位移参数

按照规范，计算层间最大位移与层高之比(层间位移角)限值为 1/250。地震作用时，层间位移角不考虑偶然偏心影响。地震作用时，考虑偶然偏心作用规定水平力地震作用下层间最大位移与层间平均位移之比(层间位移比)、层最大位移与层平均位移之比(层位移比)大于 1.2，不应大于 1.5。在地震作用和风荷载下，结构层间位移角、层间位移比、层位移比最大值如下。

表 9 结构层间位移角、层间位移比、层位移比 (Sap2000)

作用	层间位移角、位移比最大值	Sap2000 计算结果
X 向地震作用	层间位移角	1/134 3(3 层)
	层位移比	1.27(1 层)
	层间位移比	1.38(5 层)
Y 向地震作用	层间位移角	1/911(2 层)
	层位移比	1.48(1 层)
	层间位移比	1.52(3 层)
X 向风荷载	层间位移角	1/239 1(3 层)
	层间位移角	1/190 2(2 层)

表 10 结构层间位移角、层间位移比、层位移比(Midas Gen)

作用	层间位移角、位移比最大值	Midas Gen 计算结果
X 向地震作用	层间位移角	1/142.4(3层)
	层位移比	1.325(1层)
	层间位移比	1.25(5层)
Y 向地震作用	层间位移角	1/953(2层)
	层位移比	1.52(1层)
	层间位移比	1.55(3层)
X 向风荷载	层间位移角	1/250.6(3层)
Y 向风荷载	层间位移角	1/203.9(2层)

所有楼层最大层间位移角小于 1/250, 满足规范要求; 所有楼层扭转位移比均小于 1.6, 满足规范要求。根据 GB50011—2010《抗规》3.4.4 条 1 款 1) 和参考 JGJ3—2010《高规》3.4.5 条的条文说明, 当计算的楼层最大层间位移角不大于本楼层层间位移角限制的 40% 时, 该楼层的扭转位移比的上限可适当放松, 但不应大于 1.6。

7) 关键部位挠度

表 11 结构关键部位挠度

具体位置	工况		对应跨度/m	挠跨比	
	1.0 恒+ 1.0 活/mm	重力荷载代表值+ 竖向地震标准值/mm		1.0 恒+ 1.0 活/mm	重力荷载代表值+ 竖向地震标准值
屋盖中心(A点)	30.17	27.15	7.30(悬挑)	1/242	1/269
跨层桁架悬挑端点(C点)	4.35	4.70	10.515(悬挑)	1/241.7	1/223.7

规范限制挠度为 L1/400 (L1 为构件短向跨度), 悬挑结构为 L2/200 (L2 为悬挑跨度)。因此均满足有关规范限值要求。

质量系数与基底地震作用效应、层剪重比、地震作用和风荷载下的结构位移参数、关键部位挠度进行了对比分析, 得出结构的抗震性能能够满足刚度要求。

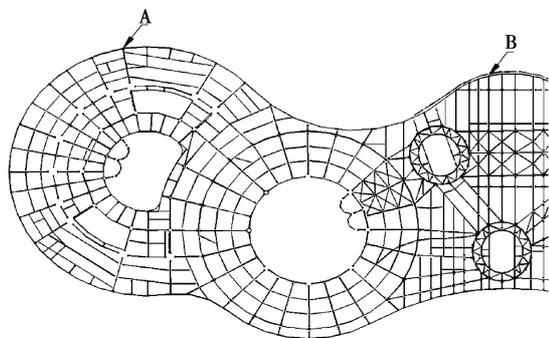


图 5 挠度取值点分布图

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2001.
 [2] 张志宏, 傅学怡, 董石麟, 等. 济南奥体中心体育馆弦支穹顶结构设计[J]. 空间结构, 2008, 14(4): 8-13.
 [3] 任俊超. 大跨空间斜拉结构的抗震反应分析与设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
 [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 2010.
 [5] 梁建平, 黄刚. 大悬臂梁预应力施工空间影响系数探讨[J]. 低温建筑技术. 2006(3): 76-78.
 [6] 张毅刚, 蓝侗恩. 网架结构在竖向地震作用下的实用分析方法[J]. 建筑结构学报; 1985(5): 2-15.

(编辑 梁远华)

2 结论

1) 通过 sap2000 和 MIDAS GEN 对结构进行了抗震计算分析, 得出两种软件的计算分析结果相似, 计算结果具有可靠性。

2) 根据计算的结果, 按照规范的要求对结构的振型周期、上下楼层的刚度比、受剪承载力比、有效