目录

1 项目概况

1.1 建筑方案

本项目选自第十届高校木结构设计邀请赛赛题，要求主要使用木材作为结构材料，设计一建筑面积约为1850平方米的展览馆。方案中，建筑场地位于上海市。该建筑为主体三层，建筑总体及周围环境渲染图见图1.1。

图 1.1 建筑总体及周围环境渲染图

1.2 技术参数

设计使用年限：50 年；

建筑结构重要性等级：二级；

建筑抗震设防类别：丙类；

结构形式：框架结构；

当地基本风压：0.55 kN/m^2；

基本雪压：0.20 kN/m^2；

抗震设防烈度 7 度，设计基本地震加速度值为 0.10g，设计地震分组为第一组。

1.3 结构方案

运用软件 RFEM6.1 建立结构模型如下图 1.2 所示。

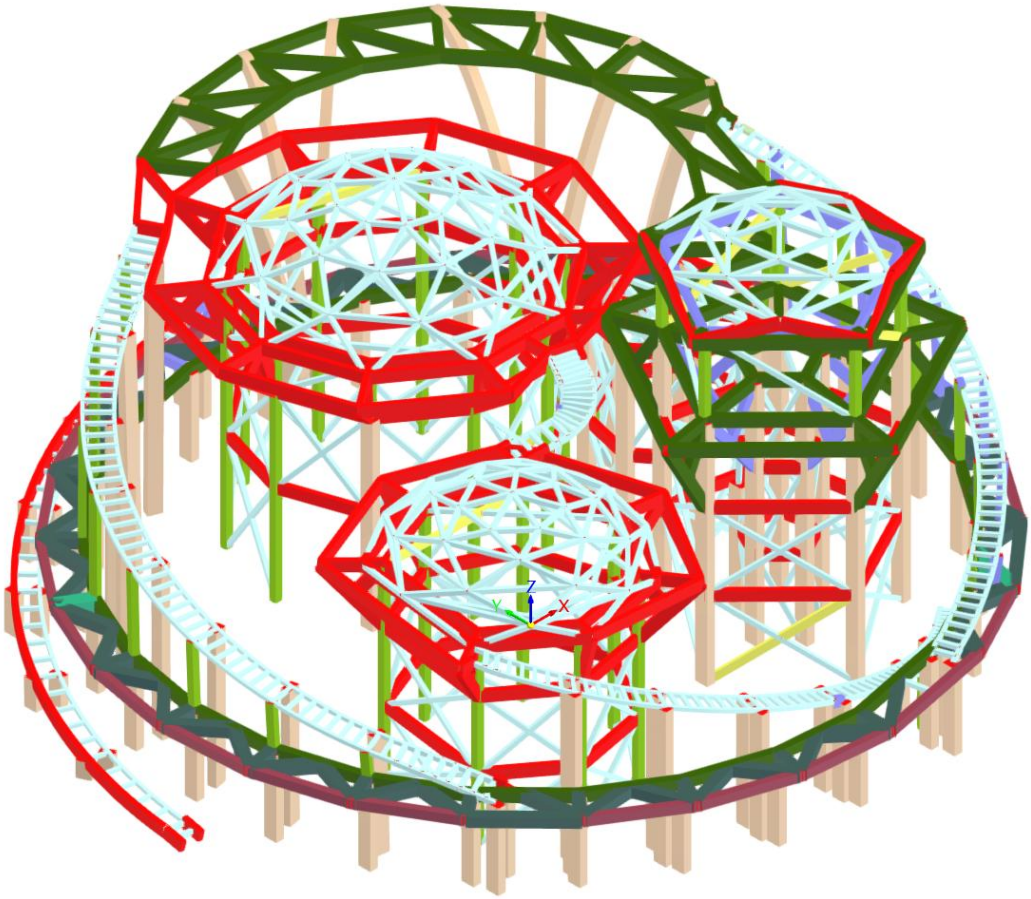


图 1.2 结构模型图

2 设计依据

1.1 主要设计及施工验收规范及规程

《建筑结构可靠度设计统一标准》	(LC1B 50068-2018)
《工程结构可靠性设计统一标准》	(LC1B 50153-2008)
《建筑结构荷载规范》	(LC1B 50009-2016)
《工程结构通用规范》	（LC1B 55001-2021）
《木结构设计标准》	（LC1B 50005-2017）
《木结构通用规范》	（LC1B 55005-2021）
《木结构工程施工规范》	（LC1B/T 50772-2012）
《木结构防火设计标准》	（T/CECS 1104-2022）
《建筑抗震设计规范》（2024 年版）	（LC1B 50011-2010）
《建筑与市政工程抗震通用规范》	（LC1B 55002-2021）
《胶合木结构技术规范》	（LC1B/T 50708-2012）
《钢结构设计规范》	（LC1B/50017-2017）
《木结构工程施工质量验收规范》	(LC1B 50206-2012)

国家和上海省的其他相关设计及施工验收规范及规程。

2.1 其他文件

竞赛主办方提供的设计用地图片。

3 荷载计算与内力分析

3.1 恒荷载

3.1.1 线荷载

本项目的梁、柱和隅撑所用材料均为同等组合胶合木，根据使用功能不同分别选用不同等级胶合木。所有胶合木自重为 7kN/m^3，截面尺寸如表 3.1 所示。使用结构计算软件 RFEM 6.1，计算构件线荷载，再分配到相应的杆件上。

表 3.1构件截面尺寸

构件类型	梁	柱	隅撑
截面尺寸	300×550 300×650 300×450 450×600 200×400 400×550	200×450 400×500	400×400 200×200

3.1.2 面荷载

楼面板为正交胶合木（CLT）板材，厚度为 175mm，胶合木重度为 7kN/m^3，面荷载 LC 1_1=7×0.175=1.225 kN/m^2

屋面玻璃部分均采用 12 双层中空玻璃，玻璃重度为 25.6kN/m’，自重面荷载 LC1_2=25.6×0.012=0.307 kN/m^2。

3.2 活荷载

结构中，不上人屋面荷载取 0.5kN/m^2，楼面荷载取 3.0kN/m^2，走廊、室外露台处活荷载取 3.5kN/m^2。

3.3 风荷载

根据《建筑结构荷载规范》LC1B50009-2012，计算结构表面的风压标准值：

$$w_k = \beta_z \times \mu_z \times \mu_s \times w_0$$

式中，β_z为风振系数；μ_z为风压高度变化系数；μ_s为体型系数；w_0为基本风压。结构所在地基本风压 w_0=0.55kN/m^2，场地类型为 B 类，运用 RFEM6.1 荷载向导功能，得到风荷载大小，施加到杆件上。

3.4 雪荷载

根据《建筑结构荷载规范》（LC1B 50009-2016）和《工程结构通用规范》（LC1B

55001-2021），对于不上人屋面可以单独考虑活荷载或雪荷载，并取两者中最大值进行设计。本项目结构所在地为上海，基本雪压S_0=0.20kN/m²，小于屋面活荷载，所以结构设计时忽略。

3.5 地震荷载

项目所在地位于上海，根据《建筑抗震设计规范》(2024 年版)(LC1B50011-2010)场地抗震设防烈度为 7 度，地面加速度 0.10g。将以上系数输入到 RFEM6.1 中，由程序根据振型分解反应谱法进行计算。

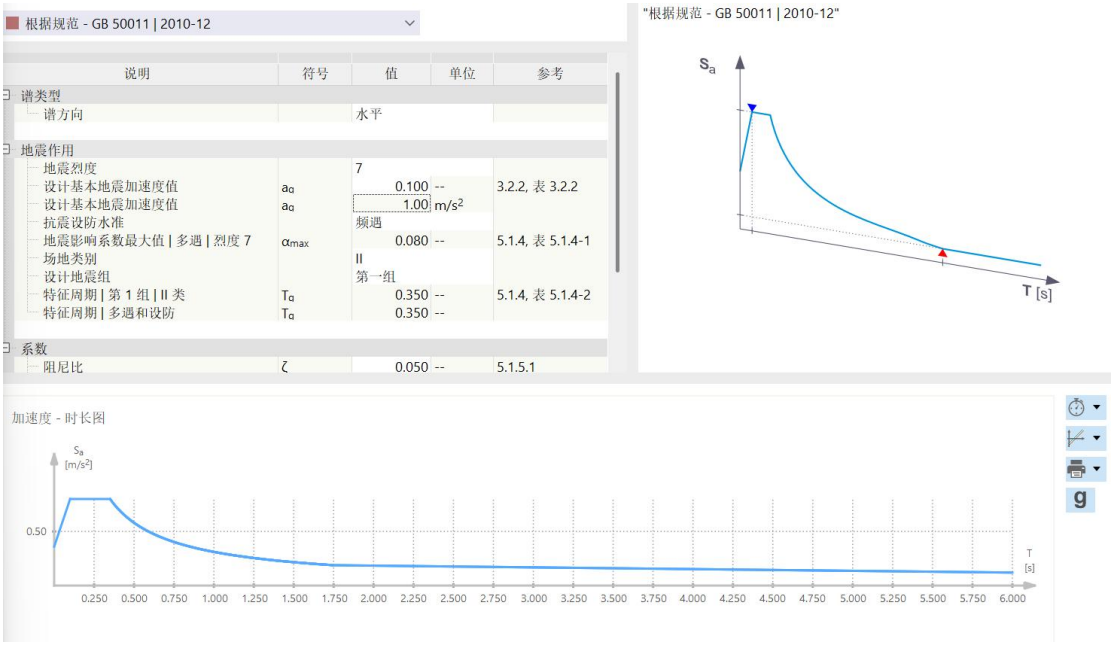


图 3.1 反应谱参数

3.6 荷载组合

3.6.1 基本组合

承载力计算中，选取了以下荷载基本组合进行计算。其中，LC1 为恒荷载；LC2 为活荷载；LC3 为 X 方向风荷载；LC4 为 Y 方向风荷载；

1.30LC1

1.30LC1+1.50LC2

1.30LC1+1.50LC4

1.30LC1+1.50LC3+1.05LC2

1.30LC1+1.50LC4+1.05LC2

1.30LC1+1.50LC3

1.30LC1+0.9LC3+1.50LC2

1.30LC1+0.9LC4+1.50LC2

3.6.2 标准组合

正常使用极限状态下，选取了以下 8 种荷载标准组合进行计算：

LC1

LC1+LC2

LC1+LC3

LC1+LC4+0.70LC2

LC1+LC3+0.70LC2

LC1+LC4

LC1+0.60LC3+LC2

LC1+0.60LC4+LC2

3.6.3 偶然组合

对构件进行防火验算时，选取以下 6 种荷载偶然组合进行计算：

1.0LC1

1.0LC1+0.4LC3

1.0LC1+0.4LC4

1.0LC1+0.4LC3+0.50LC2

1.0LC1+0.4LC4+0.50LC2

1.0LC1+0.60LC2

3.7 施加荷载

在 RFEM6.1 结构计算软件中，将上述荷载分别施加到对应杆件上，结构整体模型如下图 3.2 所示。恒荷载、活荷载加载如图 3.3 和图 3.4 所示。

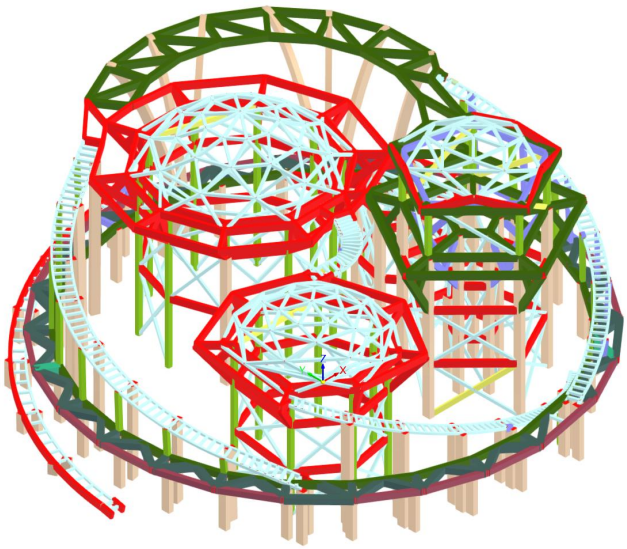


图 3.2 结构整体模型

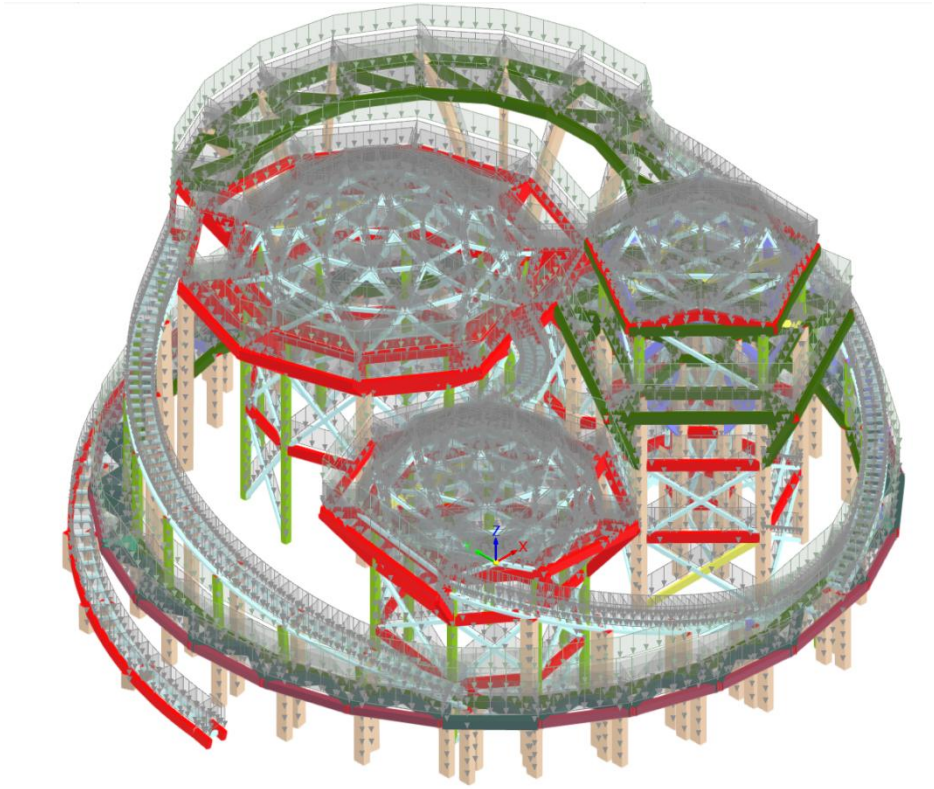


图 3.3恒荷载加载图

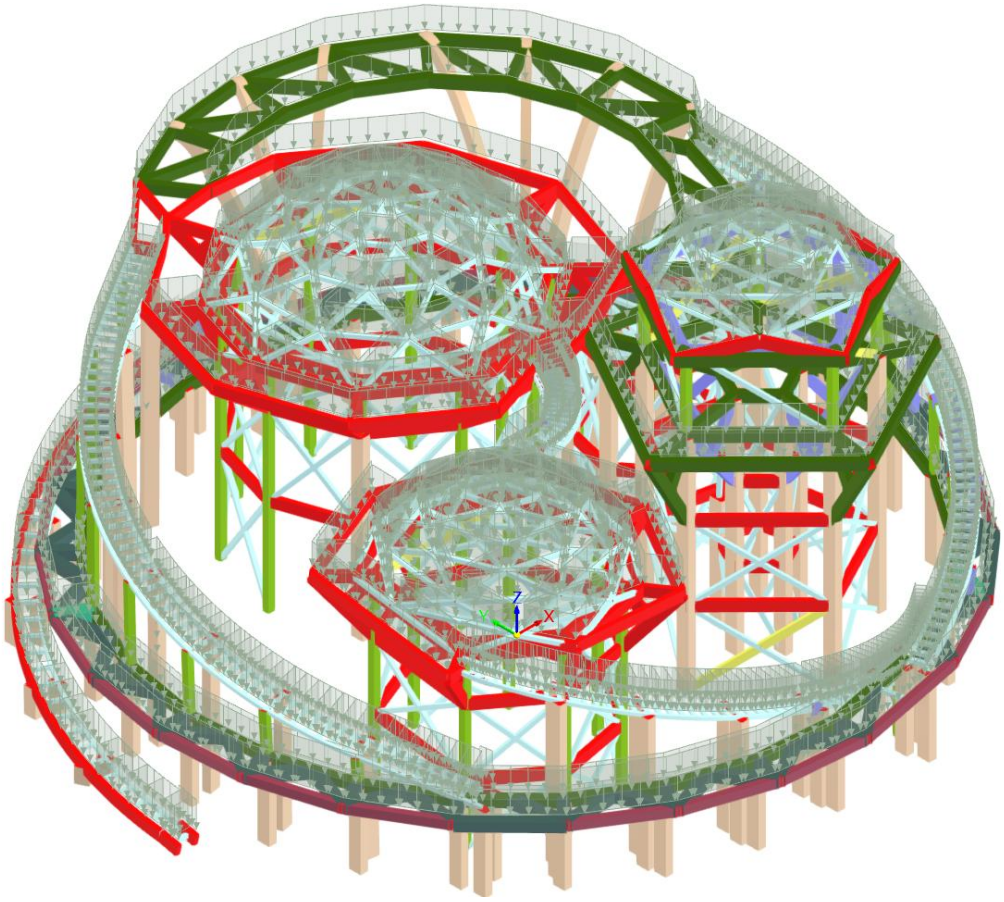


图 3.4活荷载加载图

3.8 构件内力分析

在 RFEM6.1 结构计算软件中，完成模型建立与荷载输入后，使用分析功能对结构再进行计算，得到各工况下各杆件的内力与弯矩数值。

根据内力结果，进行分析，1.30LC1+1.50LC4+1.05LC2 作用组合为最不利作用组合，考虑到该结构所受活载为 0.50 kN/m^2，场地基本风压为 0.40 kN/m^2，分析结果可信度较高。下面给出结构在这种工况下的主要内力分布以及弯矩图，如图 3.5-图 3.9 所示。

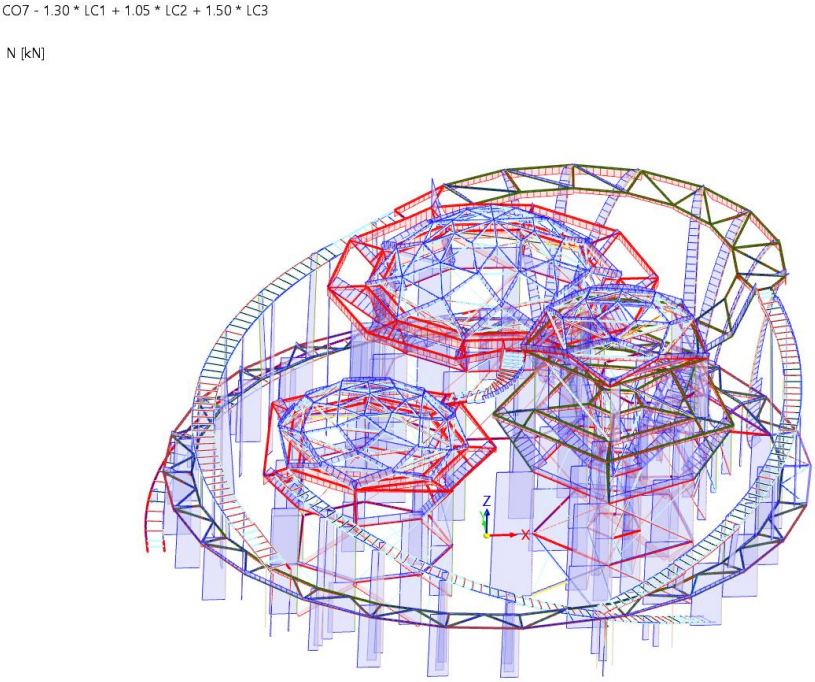


图 3.5轴力N分布图

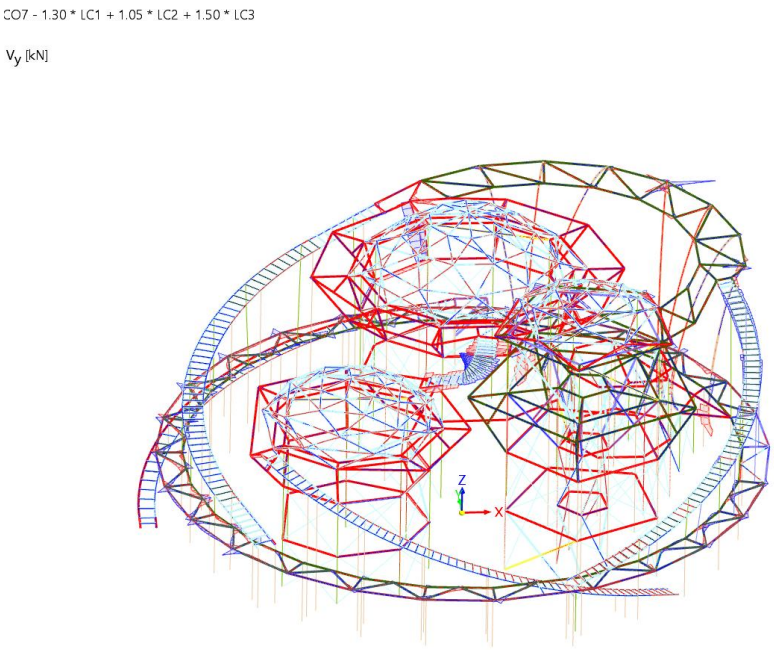


图 3.6剪力Vy分布图

CO7 - 1.30 * LC1 + 1.05 * LC2 + 1.50 * LC3

V_z [kN]

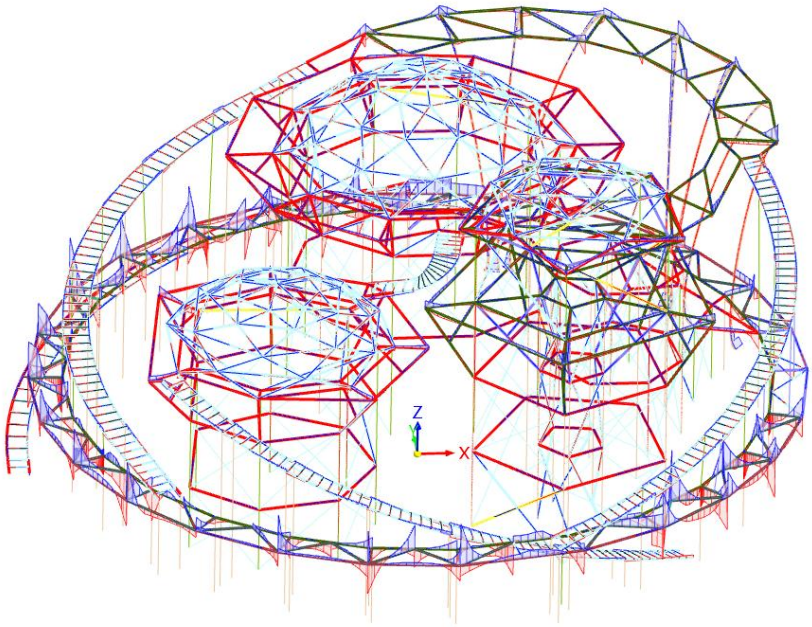


图 3.7剪力Vz分布图

CO7 - 1.30 * LC1 + 1.05 * LC2 + 1.50 * LC3

V_z [kN]

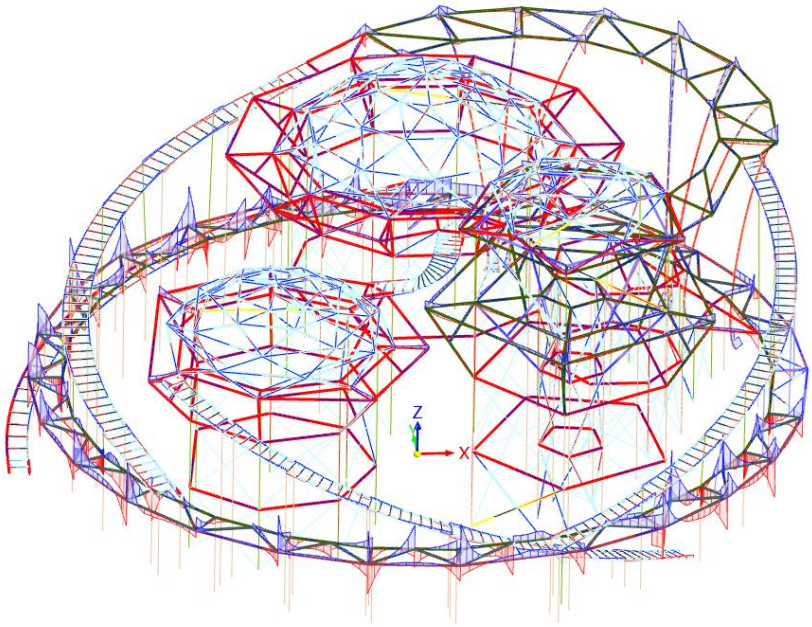


图 3.8弯矩My分布图

CO7 - 1.30 * LC1 + 1.05 * LC2 + 1.50 * LC3

M_Z [kNm]

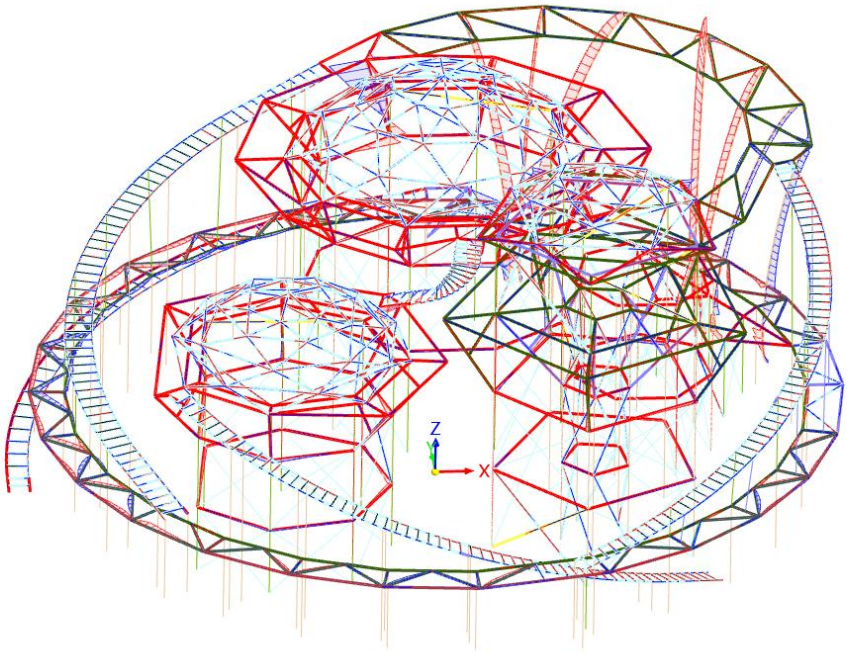


图 3.9弯矩Mz分布图

4 构件设计与验算

4.1 构件最大内力汇总

根据软件 RFEM6.1 的初步运行结果，获得杆件在 CO4 荷载工况的最大内力如表 4.1 所示。其中，N 为杆件轴力，V_y为沿 y 轴的剪力，V_z为沿 z 轴的剪力， M_y为绕 y 轴的弯矩，M_z为绕 z 轴的弯矩，杆件所受的扭矩均较小，暂不考虑。

表 4.1最大内力表

类型	杆件编号	力 [kN]			弯矩[Knm]	
		N	Vy	Vz	My	Mz
N 最大值	2220	122.30	4.69	-24.23	12.27	0.85
N 最小值	1410	-351.89	0.00	0.00	0.00	0.00
Vy 最大值	1848	-20.08	48.30	-133.98	2.53	0.45
Vy 最小值	1851	2.64	-76.05	81.40	0.83	-2.79
Vz 最大值	252	3.07	-14.80	413.16	4.05	-0.60
Vz 最小值	288	-56.92	1.20	-512.72	-109.90	0.03
MT 最大值	217	-15.09	-3.63	-96.10	2.24	4.37
MT 最小值	230	-10.34	1.99	301.56	-0.76	-0.25
My 最大值	230	-11.61	-0.12	-11.27	255.10	-0.79

My 最小值	205	-11 32	-0.08	18.66	-299.85	1.54
Mz 最大值	1944	-69.89	3.37	-12.45	6.65	99.59
Mz 最小值	1938	45.30	-28.72	1.42	49.70	-96.10

考虑到沿 x 轴的内力与绕 y 轴的弯矩较大，宜将 x 轴方向的截面尺寸增大，同时考虑到建筑跨度较大，应加大设计构件的截面高度（即 z 轴方向的截面尺寸）。

4.2 梁设计与验算

4.2.1材料性能

梁材料树种选用对称异等组合胶合木，树种级别 SZ1，强度等级为 TC_T30，强度设计值与弹性模量见表 4.2。

材料基本属性单位（N/mm^2）		
弹性模量	E	14000.0
剪切模量	LC1	1050.0
承压强度 (横纹，全表面)	fc,90,total	3.000
承压强度 (横纹，局部表面)	fc,90,local	6.000
承压强度 (横纹，垫板)	fc,90,bolster plate	7.500
纵向抗剪承载力	fv	2.200
顺纹抗拉承载力	ft	20.000
顺纹抗压承载力	fc	25.000
抗弯强度设计值	fm	30.000

4.2.2 主体结构梁设计

4.2.2.1(1) 按照高度从底到高将三个展览室分为1、2、3号展览室，一层平台外侧梁截面强度验算：

$$
\begin{aligned}
f_c &= f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 25.000\,N/mm^2 \\
\eta &= \frac{N_c}{A_n \cdot f_c} \\
&= \frac{15.13\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} \\
&= 0.002 \\
\eta &= 0.002 \le 1 \checkmark
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
f_v &= f_{v,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 2.200\,N/mm^2 \\
\eta &= \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v} \\
&= \frac{23.85\,kN \cdot 20250.00\,cm^3}{810000.00\,cm^4 \cdot 450.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2} \\
&= 0.060 \\
\eta &= 0.060 \le 1 \checkmark
\end{aligned}
$$

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{V_y \cdot S_z}{I_z \cdot h \cdot f_v}$$
$$= \frac{1.72\,kN \cdot 15187.50\,cm^3}{455625.00\,cm^4 \cdot 600.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.004$$
$$\eta = 0.004 \leq 1$$ ✓

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$
$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$
$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y$$
$$= 1.000 \cdot 4.662\,m$$
$$= 4.662\,m$$
$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h}$$
$$= \frac{4.662\,m}{600.0\,mm}$$
$$= 7.77$$
$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(7.77)^2}$$
$$= 108.972\,N/mm^2$$
$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{108.972\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{108.972\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{108.972\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}}{0.9}}$$
$$= 0.972$$
$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{15.13\,kN}{0.972 \cdot 2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.002$$
$$\eta = 0.002 \leq 1$$ ✓

挠度验算：

正常使用极限状态SLS，挠度可忽略不计

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{11.61\,kN}{2494.80\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$

$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1$$ ✔

满足要求。

4.2.2.2（2）一层平台中间梁

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{2.22\,kN}{400.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1$$ ✔

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y = 1.000 \cdot 3.237\,m = 3.237\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h} = \frac{3.237\,m}{200.0\,mm} = 16.18$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(16.18)^2} = 25.125\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{25.125\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{25.125\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$

$$= 0.762$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{2.22\,kN}{0.762 \cdot 400.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.003$$

$$\eta = 0.003 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,\text{mm/分钟}}{(1.00\,\text{小时})^{0.187}}$$

$$= 0.76\,\text{mm/分钟}$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,\text{小时} \cdot 0.76\,\text{mm/分钟}$$

$$= 45.6\,\text{mm}$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,\text{N/mm}^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,\text{N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{1.70\,\text{kN}}{308.80\,\text{cm}^2 \cdot 37.820\,\text{N/mm}^2}$$

$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.3（3）一层平台内侧梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 20.000\,\text{N/mm}^2 \cdot 1.00$$

$$= 20.000\,\text{N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$

$$= \frac{12.92\,\text{kN}}{1650.00\,\text{cm}^2 \cdot 20.000\,\text{N/mm}^2}$$

$$= 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算:

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{9.92\,kN}{1513.20\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.4（4）三层平台外侧梁

截面强度验算:

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 20.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$

$$= \frac{49.43\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.009$$

$$\eta = 0.009 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算:

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{38.11\,kN}{2494.80\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.5（5）三层平台中间梁

截面强度验算:

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{9.09\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y = 1.000 \cdot 3.440\,m = 3.440\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h} = \frac{3.440\,m}{600.0\,mm} = 5.73$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(5.73)^2} = 200.174\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{200.174\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{200.174\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)}$$

$$= 0.986$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{9.09\,kN}{0.986 \cdot 2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

$$\eta = \frac{M_y}{\varphi_{ly} \cdot W_{ny} \cdot f_{my}} = \frac{16.64\,kNm}{0.961 \cdot 21125.00\,cm^3 \cdot 21.310\,N/mm^2} = 0.038$$

抗火验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$
$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$
$$= \frac{17.70\,kN \cdot 17289.00\,cm^3}{639000.00\,cm^4 \cdot 450.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.048$$
$$\eta = 0.048 \le 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.6（6）三层平台内侧梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 20.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$
$$= \frac{23.85\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.004$$
$$\eta = 0.004 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{18.26\,kN}{2494.80\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.7（7）三层平台与楼梯连梁

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{49.15\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.007$$

$$\eta = 0.007 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y$$
$$= 1.000 \cdot 6.942\,m$$
$$= 6.942\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h}$$
$$= \frac{6.942\,m}{600.0\,mm}$$
$$= 11.57$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(11.57)^2}$$
$$= 49.151\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{49.151\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{49.151\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$
$$= 0.919$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{49.15\,kN}{0.919 \cdot 2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$
$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$
$$= 37.820\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$
$$= \frac{37.79\,kN}{2494.80\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$
$$= 0.004$$
$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.8（8）1号展览室平台外侧梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 20.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$
$$= \frac{22.30\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.006$$
$$\eta = 0.006 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{17.15\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.003$$

$$\eta = 0.003 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.9（9）1号展览室平台中部梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 20.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$

$$= \frac{32.56\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{25.05\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.10（10）1号展览室平台内侧梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 20.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$

$$= \frac{11.06\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.003$$

$$\eta = 0.003 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$
$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$
$$= 36.720\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$
$$= \frac{8.51\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$
$$= 0.001$$
$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.11（11）2号展览室平台外侧梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 20.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$
$$= \frac{17.94\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.005$$
$$\eta = 0.005 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{13.77\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1 \checkmark$$

4.2.2.12（12）2号展览室平台中间梁

截面强度验算:

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 20.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$

$$= \frac{23.89\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.006$$

$$\eta = 0.006 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算:

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$
$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$
$$= 36.720\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$
$$= \frac{18.37\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$
$$= 0.003$$
$$\eta = 0.003 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.13（13）2号展览室平台内侧梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 20.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$
$$= \frac{32.39\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.008$$
$$\eta = 0.008 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$
$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$
$$= 36.720\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$
$$= \frac{24.95\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$
$$= 0.004$$
$$\eta = 0.004 \le 1$$ ✓

满足要求。

4.2.2.14（14）3号展览室平台外侧梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 20.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$
$$= \frac{10.14\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.002$$
$$\eta = 0.002 \le 1$$ ✓

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$
$$= \frac{2.06\,kN \cdot 20250.00\,cm^3}{810000.00\,cm^4 \cdot 450.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.005$$
$$\eta = 0.005 \le 1$$ ✓

抗火验算：

$$
\begin{aligned}
f_v &= f_{v,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 2.200\,N/mm^2 \\
\beta_e &= 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}} \\
&= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}} \\
&= 0.76\,mm/分钟 \\
T &= t \cdot \beta_e \\
&= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟 \\
&= 45.6\,mm
\end{aligned}
$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$
\begin{aligned}
\eta &= \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v} \\
&= \frac{1.59\,kN \cdot 17289.00\,cm^3}{639000.00\,cm^4 \cdot 450.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2} \\
&= 0.004 \\
\eta &= 0.004 \leq 1 \checkmark
\end{aligned}
$$

满足要求。

4.2.2.15（15）3号展览室平台中间梁

截面强度验算：

$$
\begin{aligned}
f_t &= f_{t,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 20.000\,N/mm^2 \\
\eta &= \frac{N_t}{A_n \cdot f_t} \\
&= \frac{18.50\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2} \\
&= 0.003 \\
\eta &= 0.003 \leq 1 \checkmark
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
f_v &= f_{v,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 2.200\,N/mm^2 \\
\eta &= \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v} \\
&= \frac{10.83\,kN \cdot 20250.00\,cm^3}{810000.00\,cm^4 \cdot 450.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2} \\
&= 0.027 \\
\eta &= 0.027 \leq 1 \checkmark
\end{aligned}
$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{14.23\,kN}{2494.80\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1$$ ✔

4.2.2.16（16）3号展览室平台内侧梁

截面强度验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 2.200\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$

$$= \frac{10.83\,kN \cdot 20250.00\,cm^3}{810000.00\,cm^4 \cdot 450.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$

$$= 0.027$$

$$\eta = 0.027 \leq 1$$ ✔

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{14.23\,kN}{2494.80\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.17（17）1号展览室柱间横梁

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{3.26\,kN}{400.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.003$$

$$\eta = 0.003 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y$$
$$= 1.000 \cdot 2.550\,m$$
$$= 2.550\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h}$$
$$= \frac{2.550\,m}{200.0\,mm}$$
$$= 12.75$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(12.75)^2}$$
$$= 40.492\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{40.492\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{40.492\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$
$$= 0.891$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{3.26\,kN}{0.891 \cdot 400.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{2.50\,kN}{308.80\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.18（18）2号展览室柱间横梁

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{7.61\,kN}{400.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y$$
$$= 1.000 \cdot 3.105\,m$$
$$= 3.105\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h}$$
$$= \frac{3.105\,m}{200.0\,mm}$$
$$= 15.52$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(15.52)^2}$$
$$= 27.302\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{27.302\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{27.302\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$
$$= 0.792$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{7.61\,kN}{0.792 \cdot 400.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.010$$

$$\eta = 0.010 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$
$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$
$$= 37.820\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$
$$= \frac{5.85\,kN}{308.80\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$
$$= 0.005$$
$$\eta = 0.005 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.19（19）3号展览室柱间横梁

截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 20.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$
$$= \frac{2.65\,kN}{400.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.003$$
$$\eta = 0.003 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,N/mm^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

$$= \frac{2.04\,kN}{308.80\,cm^2 \cdot 36.720\,N/mm^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.20（20）1号展览室屋顶处斜梁

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{5.17\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y = 1.000 \cdot 7.182\,m = 7.182\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h} = \frac{7.182\,m}{650.0\,mm} = 11.05$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(11.05)^2} = 53.902\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{53.902\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{53.902\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$

$$= 0.930$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{5.17\,kN}{0.930 \cdot 1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.001$$

$$\eta = 0.001 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f} = 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 2.200\,N/mm^2$$

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}} = 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}} = 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e = 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟 = 45.6\,mm$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v} = \frac{3.50\,kN \cdot 13698.70\,cm^3}{551967.00\,cm^4 \cdot 300.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2} = 0.013$$

$$\eta = 0.013 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.21（21）2号展览室屋顶处斜梁

截面强度验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f} = 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 2.200\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v} = \frac{3.07\,kN \cdot 15843.80\,cm^3}{686563.00\,cm^4 \cdot 300.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2} = 0.011$$

$$\eta = 0.011 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$
$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$
$$= \frac{2.36\,kN \cdot 13698.70\,cm^3}{551967.00\,cm^4 \cdot 300.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.009$$
$$\eta = 0.009 \le 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.22（22）2号展览室屋顶处斜梁

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$
$$= \frac{26.41\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.005$$
$$\eta = 0.005 \le 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y$$
$$= 1.000 \cdot 7.557\,m$$
$$= 7.557\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h}$$
$$= \frac{7.557\,m}{650.0\,mm}$$
$$= 11.63$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(11.63)^2}$$
$$= 48.681\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{48.681\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{48.681\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$
$$= 0.918$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{26.41\,kN}{0.918 \cdot 1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.006$$

$$\eta = 0.006 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$
$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$
$$= 37.820\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$
$$= \frac{20.30\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$
$$= 0.003$$
$$\eta = 0.003 \le 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.23（23）3号展览室屋顶处斜梁

截面强度验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$
$$= \frac{1.38\,kN \cdot 15843.80\,cm^3}{686563.00\,cm^4 \cdot 300.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.005$$
$$\eta = 0.005 \le 1 \checkmark$$

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{V_y \cdot S_z}{I_z \cdot h \cdot f_v}$$
$$= \frac{0.41\,kN \cdot 7312.50\,cm^3}{146250.00\,cm^4 \cdot 650.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.001$$
$$\eta = 0.001 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$
\begin{aligned}
f_v &= f_{v,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 2.200\,N/mm^2 \\
\beta_e &= 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}} \\
&= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}} \\
&= 0.76\,mm/分钟 \\
T &= t \cdot \beta_e \\
&= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟 \\
&= 45.6\,mm
\end{aligned}
$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$
\begin{aligned}
\eta &= \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v} \\
&= \frac{1.06\,kN \cdot 13698.70\,cm^3}{551967.00\,cm^4 \cdot 300.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2} \\
&= 0.004
\end{aligned}
$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.24（24）1号展览室平台处耦撑

截面强度验算：

$$
\begin{aligned}
f_c &= f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 25.000\,N/mm^2 \\
\eta &= \frac{N_c}{A_n \cdot f_c} \\
&= \frac{44.90\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} \\
&= 0.009
\end{aligned}
$$

$$\eta = 0.009 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y = 1.000 \cdot 4.610\,m = 4.610\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h} = \frac{4.610\,m}{650.0\,mm} = 7.09$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(7.09)^2} = 130.826\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{130.826\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{130.826\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)} = 0.978$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{44.90\,kN}{0.978 \cdot 1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.009$$

$$\eta = 0.009 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{34.54\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$

$$= 0.005$$

$$\eta = 0.005 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.2.2.25（25）2号展览室平台处耦撑

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{38.52\,kN}{1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y = 1.000 \cdot 4.813\,m = 4.813\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h} = \frac{4.813\,m}{650.0\,mm} = 7.40$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(7.40)^2} = 120.036\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{120.036\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{120.036\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)} = 0.975$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{38.52\,kN}{0.975 \cdot 1950.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.008$$

$$\eta = 0.008 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{29.63\,kN}{1813.20\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$

$$= 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1$$ ✓

满足要求。

4.2.2.26（26）3号展览室平台处耦撑

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{56.18\,kN}{2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \leq 1$$ ✓

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y = 1.000 \cdot 5.831\,m = 5.831\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h} = \frac{5.831\,m}{600.0\,mm} = 9.72$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(9.72)^2} = 69.671\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{69.671\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{69.671\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2} = 0.951$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{56.18\,kN}{0.951 \cdot 2700.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.009$$

$$\eta = 0.009 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$
$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$
$$= 37.820\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$
$$= \frac{43.21\,kN}{2494.80\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$
$$= 0.005$$
$$\eta = 0.005 \le 1 \checkmark$$

满足要求。

4.3柱设计

柱子与梁相同材料，由两根200mm×450mm柱组合而成，间距为200mm，中间部分由垫块进行连接，每1.5m设置一个垫块。在设计计算时，将两根分支柱简化为一根柱子进行计算，简化后柱截面尺寸为400mm×450mm。

4.3.1.1（1）一层外侧柱

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$
$$= \frac{76.68\,kN}{4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.008$$
$$\eta = 0.008 \le 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,z} = k_{l,z} \cdot l_z = 1.000 \cdot 5.000\,m = 5.000\,m$$

$$l_{0,z}/b = \frac{l_{0,z}}{b} = \frac{5.000\,m}{800.0\,mm} = 6.25$$

$$f_{cE,z} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,z}/b)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(6.25)^2} = 168.448\,N/mm^2$$

$$\varphi_z = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,z}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{168.448\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{168.448\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)}$$

$$= 0.983$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_z \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{76.68\,kN}{0.983 \cdot 4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.008$$

$$\eta = 0.008 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{58.98\,kN}{3635.20\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$

$$= 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.3.1.2（2）1号展览室柱

截面稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{108.62\,kN}{1800.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.024$$

$$\eta = 0.024 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y$$
$$= 1.000 \cdot 12.000\,m$$
$$= 12.000\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h}$$
$$= \frac{12.000\,m}{450.0\,mm}$$
$$= 26.67$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(26.67)^2}$$
$$= 9.253\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{9.253\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{9.253\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$
$$= 0.351$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{108.62\,kN}{0.351 \cdot 1800.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.069$$

$$\eta = 0.069 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$
$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$
$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$
$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$
$$= 37.820\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$
$$= \frac{83.55\,kN}{1617.60\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$
$$= 0.014$$
$$\eta = 0.014 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.3.1.3（3）2号展览室柱

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$
$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$
$$= \frac{148.94\,kN}{4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.015$$
$$\eta = 0.015 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y = 1.000 \cdot 12.000\,m = 12.000\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h} = \frac{12.000\,m}{500.0\,mm} = 24.00$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(24.00)^2} = 11.424\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{11.424\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{11.424\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2} = 0.425$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{148.94\,kN}{0.425 \cdot 4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.035$$

$$\eta = 0.035 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{114.57\,kN}{3635.20\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$

$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.3.1.4（4）3号展览室柱

截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{174.95\,kN}{4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$

$$= 0.017$$

$$\eta = 0.017 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,z} = k_{l,z} \cdot l_z$$
$$= 1.000 \cdot 15.000\,m$$
$$= 15.000\,m$$

$$l_{0,z}/b = \frac{l_{0,z}}{b}$$
$$= \frac{15.000\,m}{800.0\,mm}$$
$$= 18.75$$

$$f_{cE,z} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,z}/b)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(18.75)^2}$$
$$= 18.716\,N/mm^2$$

$$\varphi_z = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,z}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{18.716\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{18.716\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2}$$
$$= 0.637$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_z \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{174.95\,kN}{0.637 \cdot 4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.027$$

$$\eta = 0.027 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,\text{mm/分钟}}{(1.00\,\text{小时})^{0.187}}$$

$$= 0.76\,\text{mm/分钟}$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,\text{小时} \cdot 0.76\,\text{mm/分钟}$$

$$= 45.6\,\text{mm}$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,\text{N/mm}^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,\text{N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{134.57\,\text{kN}}{3635.20\,\text{cm}^2 \cdot 37.820\,\text{N/mm}^2}$$

$$= 0.010$$

$$\eta = 0.010 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.3.1.5（5）一层楼梯柱

始端截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 25.000\,\text{N/mm}^2 \cdot 1.00$$

$$= 25.000\,\text{N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$

$$= \frac{10.09\,\text{kN}}{4000.00\,\text{cm}^2 \cdot 25.000\,\text{N/mm}^2}$$

$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,z} = k_{l,z} \cdot l_z = 1.000 \cdot 1.000\,m = 1.000\,m$$

$$l_{0,z}/b = \frac{l_{0,z}}{b} = \frac{1.000\,m}{800.0\,mm} = 1.25$$

$$f_{cE,z} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,z}/b)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(1.25)^2} = 4211.200\,N/mm^2$$

$$\varphi_z = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,z}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{4211.200\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{4211.200\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)}$$

$$= 0.999$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_z \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{10.09\,kN}{0.999 \cdot 4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_V 进行计算。

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$
$$= \frac{0.61\,kN \cdot 20647.90\,cm^3}{625495.00\,cm^4 \cdot 800.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \le 1 \checkmark$$

满足要求。

末端截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$
$$= \frac{10.09\,kN}{4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \le 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} = 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} = 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 = 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,z} = k_{l,z} \cdot l_z = 1.000 \cdot 1.000\,m = 1.000\,m$$

$$l_{0,z}/b = \frac{l_{0,z}}{b} = \frac{1.000\,m}{800.0\,mm} = 1.25$$

$$f_{cE,z} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,z}/b)^2} = 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(1.25)^2} = 4211.200\,N/mm^2$$

$$\varphi_z = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,z}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,z}}{f_c}}{0.9}}$$

$$= \frac{1 + \left(\frac{4211.200\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{4211.200\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{4211.200\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}}{0.9}} = 0.999$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_z \cdot A_0 \cdot f_c} = \frac{10.09\,kN}{0.999 \cdot 4000.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} = 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$
$$= \frac{0.61\,kN \cdot 20647.90\,cm^3}{625495.00\,cm^4 \cdot 800.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.001$$

$$\eta = 0.001 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

4.3.1.6（6）一层至2号展览室楼梯柱

始端截面强度验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_c}$$
$$= \frac{36.59\,kN}{1800.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \leq 1 \checkmark$$

稳定性验算：

$$f_c = f_{c,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 25.000\,N/mm^2$$

$$E = E_{k,tab} \cdot k_{lt,E}$$
$$= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 14000.000\,N/mm^2$$

$$l_{0,y} = k_{l,y} \cdot l_y$$
$$= 1.000 \cdot 1.618\,m$$
$$= 1.618\,m$$

$$l_{0,y}/h = \frac{l_{0,y}}{h}$$
$$= \frac{1.618\,m}{450.0\,mm}$$
$$= 3.60$$

$$f_{cE,y} = 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2}$$
$$= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(3.60)^2}$$
$$= 508.706\,N/mm^2$$

$$\varphi_y = \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{\frac{f_{cE,y}}{f_c}}{0.9}}$$
$$= \frac{1 + \left(\frac{508.706\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{508.706\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)}$$
$$= 0.995$$

$$\eta = \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c}$$
$$= \frac{36.59\,kN}{0.995 \cdot 1800.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.008$$

$$\eta = 0.008 \le 1 \checkmark$$

抗火验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$

$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$

$$= 45.6\,mm$$

$$f_{c,fi} = f_{ck,tab} \cdot k_{fc,fi}$$

$$= 31.000\,N/mm^2 \cdot 1.22$$

$$= 37.820\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_c}{A_n \cdot f_{c,fi}}$$

$$= \frac{27.96\,kN}{1617.60\,cm^2 \cdot 37.820\,N/mm^2}$$

$$= 0.005$$

$$\eta = 0.005 \leq 1 \checkmark$$

满足要求。

末端截面强度验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$

$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$

$$= 2.200\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$

$$= \frac{12.05\,kN \cdot 10125.00\,cm^3}{303750.00\,cm^4 \cdot 400.0\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$

$$= 0.046$$

$$\eta = 0.046 \leq 1 \checkmark$$

稳定性计算：

$$k_v = \left[\left(\frac{130}{b}\right)\cdot\left(\frac{305}{h}\right)\cdot\left(\frac{6400}{L}\right)\right]^{\frac{1}{c}}$$

$$= \left[\left(\frac{130}{400.0\,\text{mm}}\right)\cdot\left(\frac{305}{450.0\,\text{mm}}\right)\cdot\left(\frac{6400}{8.509\,\text{m}}\right)\right]^{\frac{1}{10.00}}$$

$$= 0.84$$

$$f_{m,y} = f_{my,tab}\cdot k_v\cdot k_{lt,f}\cdot k_{dim}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 0.84\cdot 1.00\cdot 1.15$$

$$= 28.823\,\text{N/mm}^2$$

$$f_{m,z} = f_{mz,tab}\cdot k_{sg,f}\cdot k_{dim}\cdot k_{lt,f}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 0.70\cdot 1.15\cdot 1.00$$

$$= 24.150\,\text{N/mm}^2$$

$$f'_{m,y} = f_{my,tab}\cdot k_{dim}\cdot k_{lt,f}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 1.15\cdot 1.00$$

$$= 34.500\,\text{N/mm}^2$$

$$f'_{m,z} = f_{mz,tab}\cdot k_{sg,f}\cdot k_{dim}\cdot k_{lt,f}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 0.70\cdot 1.15\cdot 1.00$$

$$= 24.150\,\text{N/mm}^2$$

$$E = E_{k,tab}\cdot k_{lt,E}$$

$$= 14000.000\,\text{N/mm}^2\cdot 1.00$$

$$= 14000.000\,\text{N/mm}^2$$

$$l_{e,y} = k_{ltb}\cdot l_u$$

$$= 1.000\cdot 9.521\,\text{m}$$

$$= 9.521\,\text{m}$$

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{l_{e,y}\cdot h}{(b)^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{9.521\,\text{m}\cdot 0.45}{(0.4)^2}}$$

$$= 5.175$$

$$f_{mE,y} = 0.67\cdot\frac{E}{(\lambda_y)^2}$$

$$= 0.67\cdot\frac{14000.000\,\text{N/mm}^2}{(5.175)^2}$$

$$= 350.279\,\text{N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{M_y}{W_{ny} \cdot f_{m,y}} + \frac{M_z}{W_{nz} \cdot f_{m,z} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_y}{W_{ny} \cdot f_{mE,y}}\right)^2\right]}$$

$$= \frac{104.12\,\text{kNm}}{13500.00\,\text{cm}^3 \cdot 28.823\,\text{N/mm}^2} + \frac{}{12000.00\,\text{cm}^3 \cdot 24.150\,\text{N}}$$

$$= 0.525$$

$$\eta = 0.525 \leq 1 \checkmark$$

抗火性验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,\text{N/mm}^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,\text{N/mm}^2$$

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,\text{mm/分钟}}{(1.00\,\text{小时})^{0.187}}$$
$$= 0.76\,\text{mm/分钟}$$

$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,\text{小时} \cdot 0.76\,\text{mm/分钟}$$
$$= 45.6\,\text{mm}$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$\eta = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot b \cdot f_v}$$
$$= \frac{9.26\,\text{kN} \cdot 8176.97\,\text{cm}^3}{220451.00\,\text{cm}^4 \cdot 400.0\,\text{mm} \cdot 2.200\,\text{N/mm}^2}$$
$$= 0.039$$

$$\eta = 0.039 \leq 1 \checkmark$$

4.3.1.7（7）一层至3号展览室楼梯柱

始端截面强度验算：

$$
\begin{aligned}
f_c &= f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 25.000\,N/mm^2 \\
\eta &= \frac{N_c}{A_n \cdot f_c} \\
&= \frac{5.18\,kN}{1650.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} \\
&= 0.001 \\
\eta &= 0.001 \leq 1 \checkmark
\end{aligned}
$$

稳定性验算：

$$
\begin{aligned}
f_c &= f_{c,tab} \cdot k_{lt,f} \\
&= 25.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 25.000\,N/mm^2 \\
E &= E_{k,tab} \cdot k_{lt,E} \\
&= 14000.000\,N/mm^2 \cdot 1.00 \\
&= 14000.000\,N/mm^2 \\
l_{0,y} &= k_{l,y} \cdot l_y \\
&= 1.000 \cdot 1.846\,m \\
&= 1.846\,m \\
l_{0,y}/h &= \frac{l_{0,y}}{h} \\
&= \frac{1.846\,m}{550.0\,mm} \\
&= 3.36 \\
f_{cE,y} &= 0.47 \cdot \frac{E}{(l_{0,y}/h)^2} \\
&= 0.47 \cdot \frac{14000.000\,N/mm^2}{(3.36)^2} \\
&= 584.148\,N/mm^2 \\
\varphi_y &= \frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{f_{cE,y}}{f_c}\right)}{1.8}\right)^2 - \frac{f_{cE,y}}{f_c}/0.9} \\
&= \frac{1 + \left(\frac{584.148\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + \left(\frac{584.148\,N/mm^2}{25.000\,N/mm^2}\right)}{1.8}\right)} \\
&= 0.996 \\
\eta &= \frac{N_c}{\varphi_y \cdot A_0 \cdot f_c} \\
&= \frac{5.18\,kN}{0.996 \cdot 1650.00\,cm^2 \cdot 25.000\,N/mm^2} \\
&= 0.001 \\
\eta &= 0.001 \leq 1 \checkmark
\end{aligned}
$$

抗火性验算：

$$f_v = f_{v,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 2.200\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 2.200\,N/mm^2$$

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$
$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,mm/分钟}{(1.00\,小时)^{0.187}}$$
$$= 0.76\,mm/分钟$$

$$T = t \cdot \beta_e$$
$$= 1.00\,小时 \cdot 0.76\,mm/分钟$$
$$= 45.6\,mm$$

抗火设计时由于规范未给出抗剪强度平均值，出于更加保守考虑采用抗剪强度设计值 f_v 进行计算。

$$\eta = \frac{V_y \cdot S_z}{I_z \cdot h \cdot f_v}$$
$$= \frac{0.60\,kN \cdot 5674.50\,cm^3}{113490.00\,cm^4 \cdot 504.4\,mm \cdot 2.200\,N/mm^2}$$
$$= 0.003$$

$$\eta = 0.003 \leq 1$$ ✓

末端截面强度验算：

$$f_t = f_{t,tab} \cdot k_{lt,f}$$
$$= 20.000\,N/mm^2 \cdot 1.00$$
$$= 20.000\,N/mm^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_t}$$
$$= \frac{11.03\,kN}{1650.00\,cm^2 \cdot 20.000\,N/mm^2}$$
$$= 0.003$$

$$\eta = 0.003 \leq 1$$ ✓

稳定性验算：

$$k_v = \left[\left(\frac{130}{b}\right)\cdot\left(\frac{305}{h}\right)\cdot\left(\frac{6400}{L}\right)\right]^{\frac{1}{c}}$$

$$= \left[\left(\frac{130}{300.0\,\text{mm}}\right)\cdot\left(\frac{305}{550.0\,\text{mm}}\right)\cdot\left(\frac{6400}{8.956\,\text{m}}\right)\right]^{\frac{1}{10.00}}$$

$$= 0.84$$

$$f_{m,y} = f_{my,tab}\cdot k_v\cdot k_{lt,f}\cdot k_{dim}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 0.84\cdot 1.00\cdot 1.10$$

$$= 27.669\,\text{N/mm}^2$$

$$f_{m,z} = f_{mz,tab}\cdot k_{sg,f}\cdot k_{dim}\cdot k_{lt,f}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 0.70\cdot 1.10\cdot 1.00$$

$$= 23.100\,\text{N/mm}^2$$

$$f'_{m,y} = f_{my,tab}\cdot k_{dim}\cdot k_{lt,f}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 1.10\cdot 1.00$$

$$= 33.000\,\text{N/mm}^2$$

$$f'_{m,z} = f_{mz,tab}\cdot k_{sg,f}\cdot k_{dim}\cdot k_{lt,f}$$

$$= 30.000\,\text{N/mm}^2\cdot 0.70\cdot 1.10\cdot 1.00$$

$$= 23.100\,\text{N/mm}^2$$

$$E = E_{k,tab}\cdot k_{lt,E}$$

$$= 14000.000\,\text{N/mm}^2\cdot 1.00$$

$$= 14000.000\,\text{N/mm}^2$$

$$l_{e,y} = k_{ltb}\cdot l_u$$

$$= 1.000\cdot 9.010\,\text{m}$$

$$= 9.010\,\text{m}$$

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{l_{e,y}\cdot h}{(b)^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{9.010\,\text{m}\cdot 0.55}{(0.3)^2}}$$

$$= 7.420$$

$$f_{mE,y} = 0.67\cdot\frac{E}{(\lambda_y)^2}$$

$$= 0.67\cdot\frac{14000.000\,\text{N/mm}^2}{(7.420)^2}$$

$$= 170.352\,\text{N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{M_y}{W_{ny} \cdot f_{m,y}} + \frac{M_z}{W_{nz} \cdot f_{m,z} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_y}{W_{ny} \cdot f_{mE,y}}\right)^2\right]}$$

$$= \frac{14.96\,\text{kNm}}{15125.00\,\text{cm}^3 \cdot 27.669\,\text{N/mm}^2} + \frac{}{8250.00\,\text{cm}^3 \cdot 23.100\,\text{N/}}$$

$$= 0.085$$

$$\eta = 0.085 \leq 1 \checkmark$$

抗火性验算：

$$\beta_e = 1.2 \cdot \frac{\beta_n}{(t)^{0.187}}$$

$$= 1.2 \cdot \frac{0.63\,\text{mm/分钟}}{(1.00\,\text{小时})^{0.187}}$$

$$= 0.76\,\text{mm/分钟}$$

$$T = t \cdot \beta_e$$

$$= 1.00\,\text{小时} \cdot 0.76\,\text{mm/分钟}$$

$$= 45.6\,\text{mm}$$

$$f_{t,fi} = f_{tk,tab} \cdot k_{ft,fi}$$

$$= 27.000\,\text{N/mm}^2 \cdot 1.36$$

$$= 36.720\,\text{N/mm}^2$$

$$\eta = \frac{N_t}{A_n \cdot f_{t,fi}}$$

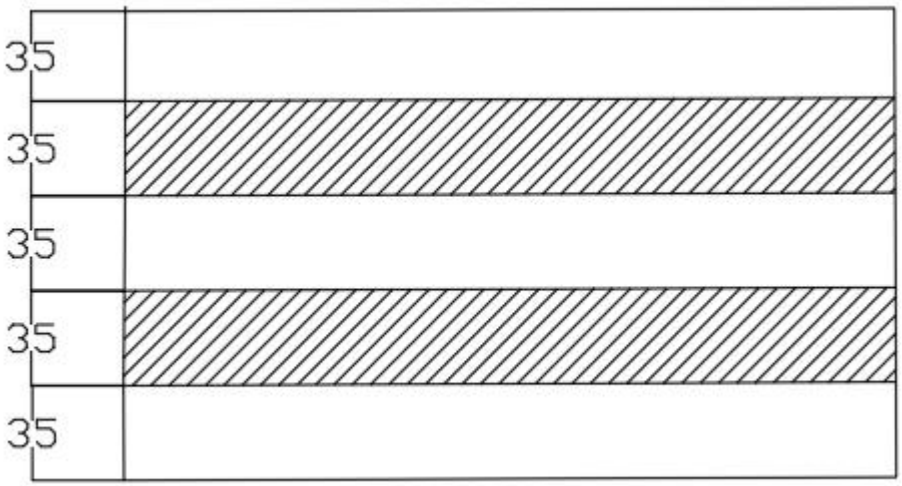
$$= \frac{8.46\,\text{kN}}{1513.20\,\text{cm}^2 \cdot 36.720\,\text{N/mm}^2}$$

$$= 0.002$$

$$\eta = 0.002 \leq 1 \checkmark$$

5 楼板设计

楼板采用CLT材料，厚度为175mm，5层单板组成，宽度为0.6m，长度为7.5m，因此不利情况为楼板简支于主梁上，对其进行验算。



5.1材料性能

本工程中CLT使用的木材为进口北美地区规格材云杉-松-冷杉类，材质等级为Ⅱc级，截面最大尺寸285mm，抗弯强度设计值f_m为9.8 N/mm^2，顺纹抗压强度设计值f_c为11.5 N/mm^2，顺纹抗拉强度设计值f_t为4.0 N/mm^2，顺纹抗剪强度设计值f_v为1.4 N/mm^2，横纹承压强度设计值$f_{c,90}$为4.9 N/mm2，弹性模量E为10000 N/mm^2。

根据《木结构设计标准》LC1B50005-2017，CLT抗弯强度设计值为表层木材强度应乘以组合系数K_c，见下式。并且，组合系数K_c不应大于1.2。

$$K_c = 1 + 0.02n$$

式中，n-最外侧层板并排布置的层板数量。

正交胶合木构件的有效抗弯刚度（EI）应按下列公式计算：

$$（EI）= \sum_{i=1}^{n_i} \left(E_i I_i + E_i A_i e_i^2\right)^n$$

$$I_i = \frac{bt_i^3}{12}$$

$$A_i = bt_i$$

式中：

E-- 参加计算的第 i 层顺纹层板的弹性模量(N/mm^2);

I_i --参加计算的第 i 层顺纹层板的截面惯性矩(mm^4);

A_i --参加计算的第 i 层顺纹层板的截面面积 bt_i(mm^2);

b--构件的截面宽度(mm);

t_i--参加计算的第i层顺纹层板的截面高度(mm);

n_i-- 参加计算的顺纹层板的层数;

e_i--参加计算的第i层顺纹层板的重心至截面重心的距离

根据以上规定，CLT力学性能指标计算为f_m=9.8×1=9.8 N/mm^2，EI=1.77×10^{12} N·mm^2。

5.2 荷载组合

（1）恒载：

7厚实木复合木地板 7.0kN/m^3

175mm厚正交胶合木板 7.0kN/m^3

（2）活载：

荷载取值参照办公楼活荷载 2kN/m^2

自重线荷载：0.7×9.8×0.175×0.6=0.72 kN/m；

木地板自重产生的线荷载：0.7×9.8×0.007×0.4=0.019 kN/m；

活载：3×0.4=1.2 kN/m。

简支板跨中最大弯矩标准值为：

M_{max}=[(0.48+0.019)×1.3+1.2×1.5]×7.5×7.5/2-[(0.48+0.019+0.0012)×1.3+0.8×1.5]×3.75×3.75/2=51.65 kN·m

5.3 设计与验算

5.3.1 强度验算

当CLT受弯构件的跨度大于构件截面高度h的10倍时，构件的受弯承载能力应按下式验算：

$$\pm\frac{ME_I\hbar}{2(EI)}\leq f_m$$

式中：

E_i--最外侧顺纹层板的弹性模量(N/mm^2);

f_m--最外侧层板的抗弯强度设计值(N/mm^2);

M--受弯构件弯矩设计值(N.mm);

(EI)--构件的有效抗弯刚度(N.mm);

h--构件的截面高度(mm)。

计算可得f=3.98MPa<0.9f_m=8.82MPa 验算合格。

楼上活荷载为3 kN/m^2 ,楼板面积为2m×5m，总荷载为P=3×2×5=30kN

剪应力计算公式：

$$\tau = \frac{3V}{2bd}$$

剪力V=P/2=15kN

因此，

$$\tau = \frac{3V}{2bd} = \frac{3 \times 15}{2 \times 0.4 \times 0.175} = 0.321\text{N/mm}^2$$

$$\tau = 0.321\text{N/mm}^2 < 1.4\text{N/mm}$$

5.3.2 挠度检验

CLT受弯构件的弯曲挠度按下式计算：

$$W = \frac{5qbl^4}{384(EI)}$$

W_{max}=5×5.17×10^7×5000^2/(48×1.77×10^{12})=7.607mm<l/250=5000/250=20 mm 验算合格。

因此，175mm厚的CLT楼板在强度、挠度和滚动剪切方面均能满足稳定性和强度要求。

6 节点设计与验算

6.1 梁端节点计算

梁端头均采用M16对穿螺栓连接，连接方式均采用钢填板，连接板采用10mm厚Q235B镀锌铁板，螺栓采用8.8级普通螺栓；

每个销的每个剪切面承载力设计值计算：$Z = k_{min}t_m d f_{es}$

较薄构件厚度t_s=10mm；较厚构件厚度t_m=150mm；销轴类紧固件直径d=16mm。

根据木结构设计规范，紧固件在钢材上的销槽承压强度f_{es}应按现行国家标准《钢结构设计规范》LC1B50017规定的螺栓连接的构件销槽承压强度设计值的1.1倍计算

$$f_{es} = 160\text{MPa}\times 1.1 = 176\ \text{MPa}$$

计算时较厚构件销槽承压强度值f_{em}取为销轴类紧固件销槽横纹承压强度，根据《木结构设计标准》（LC1B50005-2017），全干相对密度取0.42。

$$f_{em} = f_{e,90} = \frac{212G^{1.45}}{\sqrt{d}} = 32.34\ N/mm^2$$

则$R_e = \frac{f_{em}}{f_{es}}$=0.1837，$R_t = \frac{t_m}{t_s} = \frac{150}{10} = 15$

（1）有效长度系数计算

最小有效长度系数计算：$k_{min} = \min[k_1, k_2, k_3, k_4]$

屈服模式I时，

$$k_I = \frac{R_e R_t}{\gamma_I} = 0.2756$$

屈服模式II时，

$$k_{sII} = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2(1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 R_e^3} - R_e(1 + R_t)}{1 + R_e}$$

$$k_{II} = \frac{k_{sII}}{\gamma_{II}} = 0.5919$$

屈服模式III时，k_{ep}取1.0，销轴类紧固件屈服强度标准值f_{yk}取235 N/mm^2

$$k_{IIIm} = \frac{R_t R_e}{1 + 2R_e}\left[\sqrt{2(1 + R_e) + \frac{1.647(1 + 2R_e)k_{ep}f_{yk}d^2}{3R_e R_t^2 f_{es} t_s^2}} - 1\right]$$

$$k_{IIIm} = \frac{k_{IIIm}}{\gamma_{III}} = 0.5816$$

屈服模式III$_s$时，

$$k_{IIIs} = \frac{R_e}{2 + R_e}\left[\sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{1.647(2 + R_e)k_{ep}f_{yk}d^2}{3R_e R_t^2 f_{es} t_s^2}} - 1\right]$$

$$k_{III} = \frac{k_{IIIs}}{\gamma_{III}} = 0.2756$$

屈服模式IV时，

$$k_{IVs}=\frac{d}{t_s}\sqrt{\frac{1.647R_e k_{ep} f_{yk}}{3(1+R_e)f_{es}}}$$

$$k_{Ⅳ}=\frac{k_{IVs}}{\gamma_{Ⅳ}}=0.3470$$

（2）承载力计算

螺栓受剪承载力计算，依据《钢结构设计规范》（LC1B/50017-2017），在普通螺栓或铆钉抗剪连接中，每个螺栓的承载力设计值应取受剪和承压承载力设计值中的较小者。受剪和承压承载力设计值应分别按下式计算。

普通螺栓：

$$N_v^b=n_v\frac{\pi d^2}{4}f_v^b$$

铆钉：

$$N_v^r=n_v\frac{\pi d_0^2}{4}f_v^r$$

普通螺栓：

$$N_c^b=d\sum t\,f_c^b$$

铆钉：

$$N_c^r=d_0\sum t\,f_c^r$$

式中，

n_v——受剪面数目；

d——螺杆直径(mm)；

d_0——铆钉孔直径(mm)；

$\sum t$——在不同受力方向中一个受力方向承压构件总厚度的较小值(mm)；

f_{bv}、f_{bc}——螺栓的抗剪和承压强度设计值(N/mm^2)；

f_{rv}、f_{rc}——铆钉的抗剪和承压强度设计值(N/mm^2)。

螺栓的剪切强度：Q235钢材的抗剪强度约为210 MPa，

螺栓的截面积:

$$A=\frac{\pi d^2}{4}=200.96mm^2$$

螺栓的单面剪切承载力:

$$F=210MPa\times 200.96mm^2=42.2kN$$

螺栓材料本身的承载力远超木材的承载力，所以这里重点考虑木材的承载力。该连接为钢填板，故只需考虑屈服模式Is、IIIs与IV，在不考虑销屈服情况下K_{min}=0.2756

单个销的每个剪面承载力参考设计值：

$$Z = k_{min} t_s d f_{es} = 0.2756 \times 10 \times 16 \times 176 = 7.76kN$$

每个剪面的承载力设计值：

$$Z_d = C_m C_n C_t k_g Z = 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 7.76 = 7.76kN$$

每根螺栓与梁端产生两个剪力面，因此一根螺栓在梁端的承载力为7.76×2=15.52kN。

6.2 柱端节点计算

柱端头采用8.8级M16对穿螺栓连接，每根螺栓产生一个顺纹单剪面。

每个销的每个剪面承载力设计值计算：$Z = k_{min} t_m d f_{es}$

边部构件厚度t_s=20mm；中部构件厚度t_m=240mm；销轴类紧固件直径d=16mm。

根据木结构设计规范，紧固件在钢材上的销槽承压强度f_{es}应按现行国家标准《钢结构设计规范》LC1B50017规定的螺栓连接的构件销槽承压强度设计值的1.1倍计算

$$f_{es} = 160\text{MPa} \times 1.1 = 176\ \text{MPa}$$

计算时较厚构件销槽承压强度值f_{em}取为销轴类紧固件销槽横纹承压强度，全干相对密度根据《木结构设计标准》（LC1B50005-2017）取0.42。

$$f_{em} = f_{e,0} = 77G = 77 \times 0.42 = 32.34N/mm^2$$

则$R_e = \frac{f_{em}}{f_{es}} = 0.1326$，$R_t = \frac{t_m}{t_s} = \frac{240}{20} = 12$

（1）有效长度系数计算

最小有效长度系数计算：$k_{min} = \min[k_1, k_2, k_3, k_4]$

屈服模式I时，

$$k_{\text{I}} = \frac{R_e R_t}{\gamma_{\text{I}}} = 0.1989$$

屈服模式II时，

$$k_{\text{sII}} = \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2(1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 R_e^3} - R_e(1 + R_t)}{1 + R_e}$$

$$k_{\text{II}} = \frac{k_{s\,\text{II}}}{\gamma_{\text{II}}} = 0.4982$$

屈服模式III时，k_{ep}取1.0，销轴类紧固件屈服强度标准值f_{yk}取235 N/mm^2

$$k_{\text{IIIm}} = \frac{R_t R_e}{1 + 2R_e}\left[\sqrt{2(1 + R_e) + \frac{1.647(1 + 2R_e)k_{ep} f_{yk} d^2}{3R_e R_t^2 f_{es} t_s^2}} - 1\right]$$

$$k_{\text{IIIm}} = \frac{k_{\text{IIIm}}}{\gamma_{\text{III}}} = 0.2795$$

屈服模式III$_s$时，

$$k_{\text{IIIs}} = \frac{R_e}{2 + R_e}\left[\sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{1.647(2 + R_e)k_{ep} f_{yk} d^2}{3R_e R_t^2 f_{es} t_s^2}} - 1\right]$$

$k_{III}=\frac{k_{IIIs}}{\gamma_{III}}=0.1989$

屈服模式IV时，

$$k_{IVs}=\frac{d}{t_s}\sqrt{\frac{1.647R_e k_{ep} f_{yk}}{3(1+R_e)f_{es}}}$$

$$k_{IV}=\frac{k_{IVs}}{\gamma_{IV}}=0.2871$$

（2）承载力计算

柱端为钢夹板的单剪连接只需考虑屈服模式Is、IIIs以及IV，在不考虑螺栓屈服条件下，则$K_{min}=0.1989$。

单个销的每个剪面承载力参考设计值：

$$Z=k_{min}t_s df_{es}=0.1989\times 20\times 16\times 176=11.20kN$$

每个剪面的承载力设计值：

$$Z_d=C_m C_n C_t k_g Z=1\times 1\times 1\times 1\times 11.20=11.20kN$$

每根螺栓与柱端产生一个剪力面，因此一根螺栓在柱端的承载力为11.20kN。

6.3 节点设计

6.3.1 I号节点螺栓设计

（1）恒载：

屋面自重：7×0.175×7×3=25.725 kN

梁自重：7kN/m^3×0.45×0.6×5×3=28.35 kN

荷载组合：1.3恒载+1.5活载

柱端所受总剪力：62.79 kN

I号节点设计图如下。

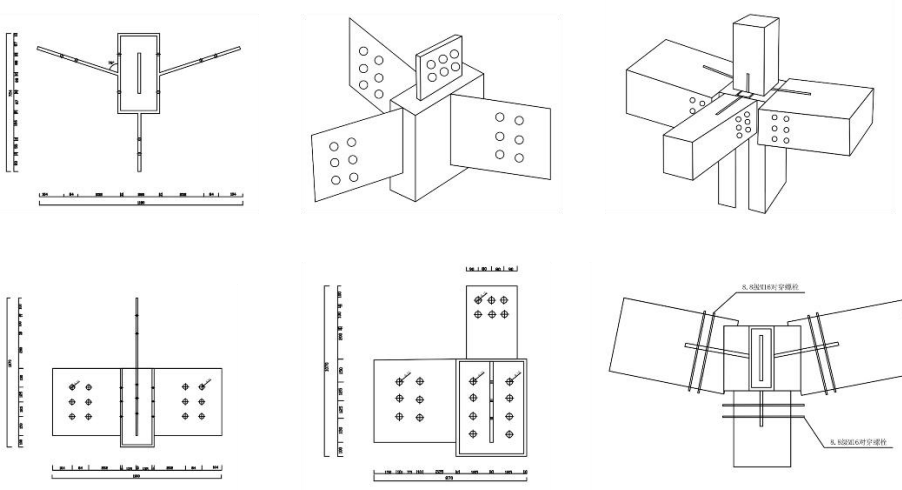


图 6.1 I号节点设计图

6.3.2 II号节点螺栓设计

（1）恒载：

屋面自重：7×0.175×7×3=25.725 kN

梁自重：7kN/m^3×0.45×0.6×5×2=18.9 kN

荷载组合：1.3恒载+1.5活载

柱端所受总剪力：72.19 kN

II号节点设计图如下。

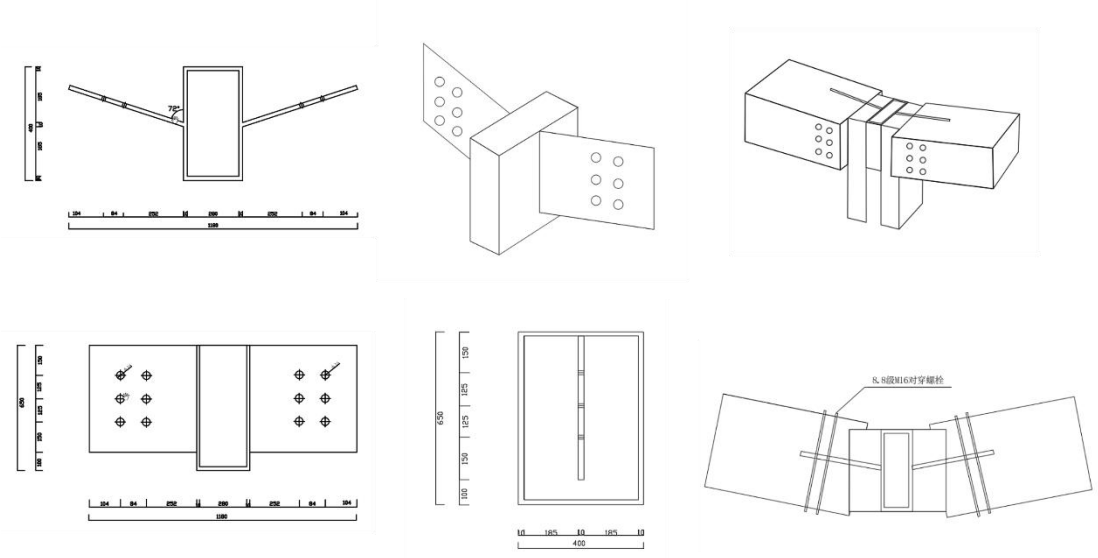


图 6.2 II号节点设计图

6.3.3 III号节点螺栓设计

（1）恒载：

屋面自重：7×0.175×7×3=25.725 kN

梁自重：7kN/m^3×（0.6×0.45×7×2+0.6×0.45×2）=17.01 kN

荷载组合：1.3恒载+1.5活载

柱端所受总剪力：30.85 kN

III号节点设计图如下。

节点详图III

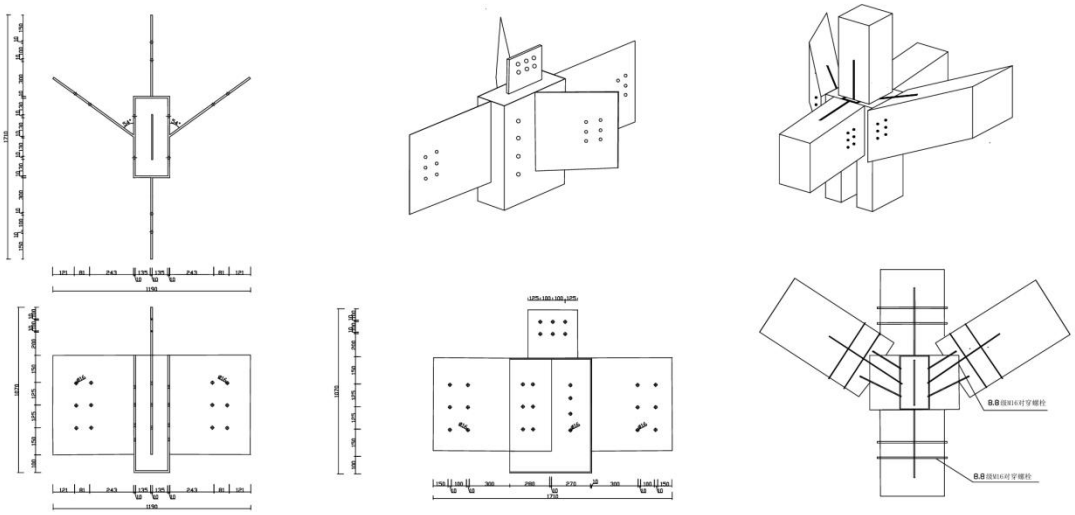


图 6.3III号节点设计图

6.3.4 IV号节点螺栓设计

（1）恒载：

屋面自重：7×0.175×5×2=12.25 kN

梁自重：7kN/m^3×5×0.45×0.6×3=18.9 kN

荷载组合：1.3恒载+1.5活载=18.61 kN

IV号节点设计图如下。

节点详图IV

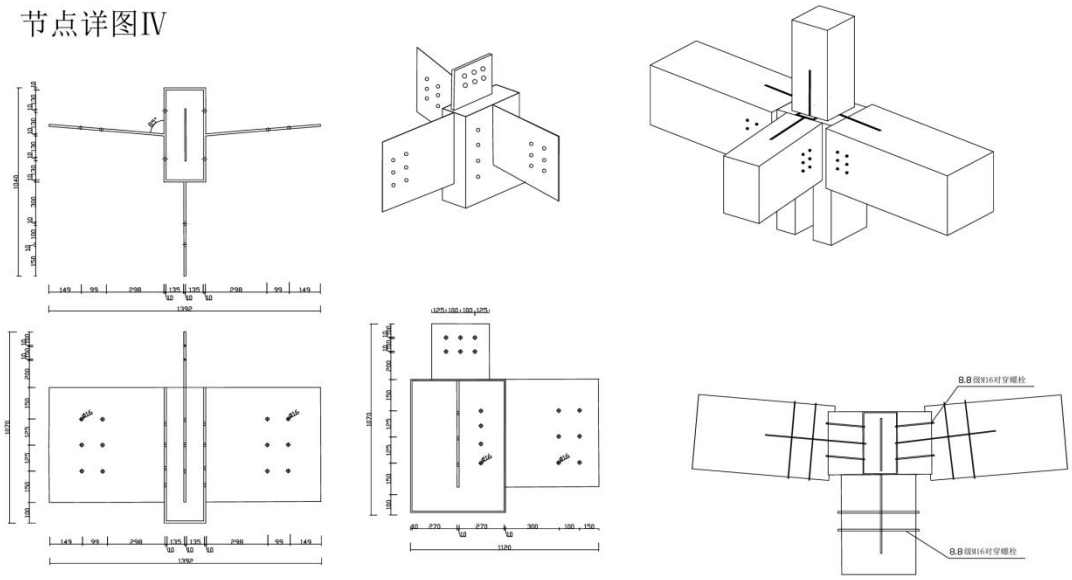


图 6.4IV号节点设计图

6.3.5 V号节点螺栓设计

（1）恒载：

屋面自重：7×0.175×5×2=12.25 kN

梁自重：7kN/m^3×5×0.45×0.6×3=18.9 kN

荷载组合：1.3恒载+1.5活载=19.34 kN

V号节点设计图如下。

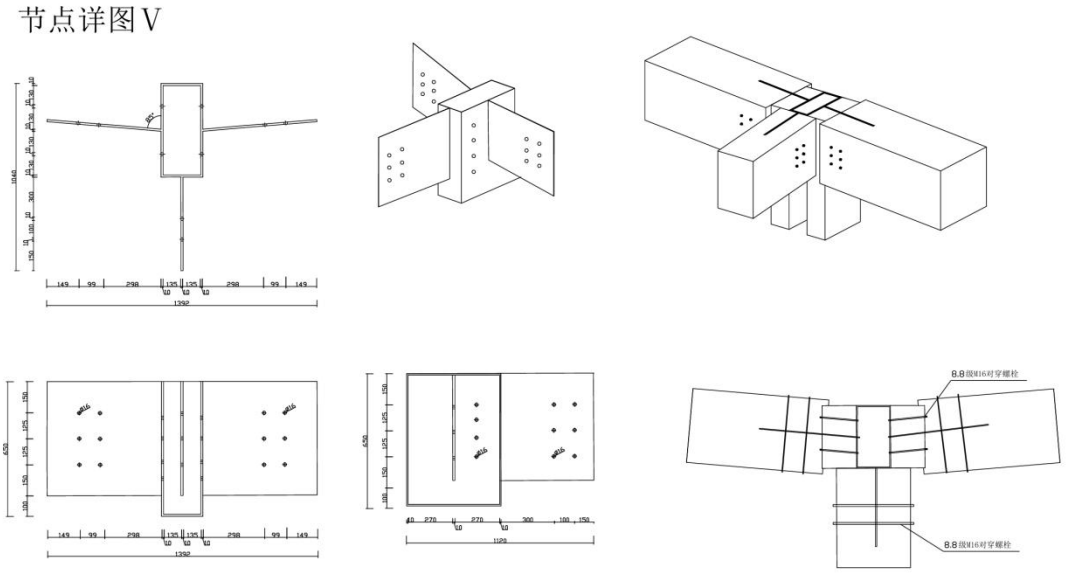


图 6.5Ⅴ号节点设计图