

# 上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

## 学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



设计题目：浙江省丽水市体育中心网球场  
钢结构设计计算与抗风研究

学生姓名：陈怡然

学生学号：5090109051

专    业：土木工程

指导教师：周岱 教授

学院(系)：船舶海洋与建筑工程学院

# 浙江丽水市体育中心网球场钢结构设计计算与抗风研究

## 摘 要

本毕业设计（论文）针对浙江丽水市体育中心网球场钢结构工程开展设计计算与抗风研究，该工程为轻钢薄膜结构，总长度 84 米，跨度 42 米，位于浙江省丽水市。

本文分为两部分：第一部分为设计与计算；第二部分为抗风问题专题研究，直接将本人获批承担的第五期上海交通大学创新实践项目“湍流二维和三维钝体绕流数值模拟”项目研究成果应用于该工程项目，开展结构抗风专题研究，进行结构物数值风洞模拟。

在第一部分的设计与计算中，钢结构体系的计算主要运用大型软件 SPA2000，完成了模型的建立与杆件布置，不仅进行了结构线弹性分析，而且开展了结构（包括索结构）的非线性分析。计算了结构在地震荷载和风荷载下作用的结构响应，参照荷载规范进行荷载取值。研究了结构长、短期荷载在不同组合下的响应与结构变形，获得结构的最大应力与最大位移。最大应力满足设计要求，最大位移满足建筑使用要求。进行了结构的截面尺寸设计、构件长度设计，节点构造设计等。在完成上部结构设计计算后，利用计算所得的基础反力，完成了地基基础设计。

该工程为轻钢薄膜结构，结构风致效应较为突出，为此开展了结构抗风问题专题研究。本文运用 FLUENT 软件及标准  $k-\varepsilon$  湍流模型，进行数值风洞模拟，对模型施加不同方向的风荷载，计算得到不同工况下的结构表面风压分布，获得风压取值，并阐明其分布规律。这些成果直接应用于该工程的抗风设计。

关键词：大跨轻钢结构，SPA2000 软件，结构设计，风压特性，标准  $k-\varepsilon$  湍流模型

# LISHUI CITY SPORTS CENTER TENNIS STEEL DESIGN CALCULATIONS AND WIND RESEARCH

## ABSTRACT

Based on the design of steel structure for the tennis court in Lishui stadium, the numerical analysis of the above structure has been performed for the wind resistance in this paper.

The structure is mainly computed in SPA2000. Not only simply do linear analysis for the frames of the structure, but also do the non-linear analysis for the cabals and the whole structure. Computing is focused on the response with seismic and wind load, load values are refer to Load Code for the Design of Building Structure. We study the structure of long term and short term load combination of stress and deformation. The maximum stress in the structure meet the design requirements, the maximum displacement does not affect the use of the building.

The structure which is made of light steel is 84 meters long and 42 meters wide. The earthquake has little impact on the structure since it is located within the region of 6 degrees. However, the wind effect on the structure cannot be ignored due to its flexibility.

The numerical wind tunnel experiment has been implemented in the final chapter, using FLUENT software that can provide the standard  $k-\varepsilon$  turbulence model. By applying the wind load to the structure in different ways, various pressure distributions on the structure's surface are detected. Wind pressure values are summarized for the structural design.

Key words: long-span spatial structures, SPA2000, structural design, air pressure characteristics, standard  $k-\varepsilon$  turbulence model

## 目 录

<b>第一章 设计总说明</b> .....	<b>1</b>
1.1 工程概况 .....	1
1.2 设计依据 .....	2
1.3 建筑结构可靠度设计标准 .....	2
1.4 建筑结构抗震设防标准 .....	2
1.5 材料 .....	2
1.5.1 混凝土 .....	2
1.5.2 钢材 .....	2
1.5.3 隔墙、围护墙材料 .....	2
1.6 场地地基土层 .....	2
1.6.1 场地概貌 .....	2
1.6.2 场地各层地基土物理特性 .....	2
1.6.3 地基基础设计 .....	3
1.7 计算说明 .....	3
1.7.1 荷载工况及作用效应组合 .....	3
1.7.2 结构体系介绍 .....	3
1.8 本章小结 .....	3
<b>第二章 结构计算与设计</b> .....	<b>4</b>
2.1 结构布置 .....	4
2.2 梁柱截面的尺寸的确定 .....	6
2.3 荷载计算 .....	6
2.3.1 恒载 .....	6
2.3.2 风荷载 .....	6
2.3.3 活荷载 .....	6
2.3.4 地震荷载 .....	6
2.3.5 荷载组合 .....	7
2.3.6 荷载示意图 .....	7
2.4 内力计算 .....	8
2.4.1 内力计算简图 .....	8
2.4.2 内力计算结果 .....	8
2.4.3 位移计算结果 .....	10
2.5 截面验算与设计 .....	11
2.6 基础设计 .....	13
2.6.1 柱下扩展基础：基础—1 .....	13
2.6.2 柱下扩展基础：基础—2 .....	17
2.7 本章小结 .....	17

<b>第三章 数值风洞模拟</b> .....	<b>21</b>
3.1 引言 .....	21
3.2 雷诺平均方程湍流模型的应用—标准 $k-\varepsilon$ 模型 .....	22
3.3 网球场三维风场数值模拟与分析 .....	22
3.3.1 简述 .....	22
3.3.2 风的特性 .....	22
3.3.3 计算区域和边界条件 .....	23
3.3.4 计算结果与分析 .....	25
3.3 结论 .....	27
3.4 工程应用 .....	28
3.5 补充说明 .....	28
<b>参考文献</b> .....	<b>29</b>
<b>致谢</b> .....	<b>31</b>
<b>附录 1</b> .....	<b>32</b>
附录 1-1 .....	32
附录 1-2 .....	34
附录 1-3 .....	36
附录 1-4 .....	41
<b>附录 2 毕业设计图纸</b>	
建筑总说明	
建筑平面图 (2)	
结构平面图 (2)	
结构立面图	
节点大样图	
基础图	

# 第一章 设计总说明

## 1.1 工程概况

丽水市体育中心位于市中心区莲都区，城市主干道紫金路以西、人民路以北、宇雷路以东、城北路以南的体育建筑规划区域内。该体育中心四面环路、交通便捷，紧邻丽水市行政中心。地块中间位置已建有主体育场，建筑面积 24230 平方米，座席数约 18000 席。

此次设计为网球场迁建项目，位于体育中心西北角规划用地内。总用地面积为 16249 平方米，总建筑面积为 1874 平方米。网球场设计定位是以训练和全民健身为主，兼顾小型比赛和市民日常休闲、设施先进的综合性体育设施。



图 1-1 整体项目效果图

本工程网球场拆建项目分为综合服务楼，网球场罩棚和入口扇状雨棚三个结构单体。综合服务楼为地上二层钢筋混凝土框架结构，抗震等级为四级，为近似边长约为 45 米的三角形建筑，屋顶设有屋顶花园；网球场罩棚为空间网格状的构架，顶盖采用桅杆钢拉索膜结构；入口雨棚采用钢构索膜结构。

## 1.2 设计依据

- 1、建筑结构可靠度设计统一标准（GB50068-2001）
- 2、建筑工程抗震设防分类标准（GB50223-2004）
- 3、建筑结构荷载规范（GB50009-2012）
- 4、混凝土结构设计规范（GB50010-2010）
- 5、建筑抗震设计规范（GB50011-2010）
- 6、建筑地基基础设计规范（GB50007-2011）
- 7、高层建筑混凝土结构技术规程（JGJ3-2010）
- 8、钢结构设计规范（GB50017-2003）

## 1.3 建筑结构可靠度设计标准

按 GB50068-2001 设计统一标准，本工程设计使用年限为 50 年。建筑结构安全等级为二级，部分结构构件的安全等级将根据相应规范作调整。

## 1.4 建筑结构抗震设防标准

本工程建筑抗震设防类别为丙类，设防烈度为 6 度，II 类场地，特征周期为 0.35 秒，设计基本地震加速度值为 0.05g。

## 1.5 材料

### 1.5.1 混凝土

本工程上部结构采用 C30 混凝土。

构造柱、过梁混凝土 C25 级。

基础垫层 C15 级。

### 1.5.2 钢材

本工程采用国家标准热轧钢筋和余热处理钢筋 HPB300（符号  $\varphi$ ）、HRB335（符号  $\Phi$ ）、HRB400（符号  $\Phi$ ）。

埋件用 HPB300、HPB335 钢板，吊钩用 HPB235（不得冷拉）。

网球场罩棚及入口伞状雨棚采用 Q345 钢材。

钢材连接用焊条及方式按相应标准及规范要求。

### 1.5.3 隔墙、围护墙材料

本工程围护墙，隔墙采用符合环保和节能要求的砌体材料，材料强度应符合 GB50011-2010 规范要求。

## 1.6 场地地基土层概述

### 1.6.1 场地概貌

根据勘察报告，本工程场地属 II 级阶地地貌单元。场地土层起伏变化较大，分布不均。

### 1.6.2 场地各层地基土物理特性概述

第①层	杂填土	
第②层	碎石土	承载力 $f_{ak}=300\text{kPa}$
第③层	强风化砂岩	承载力 $f_{ak}=250\text{kPa}$
第④层	中微风化砂岩	承载力 $f_{ak}=1000\text{kPa}$

### 1.6.3 地基基础设计

根据地基土分布情况和建筑物结构重量以及埋深状况，本工程采用天然独立基础。选择持力层为：2层碎石土。

## 1.7 计算说明

### 1.7.1 荷载工况及作用效应组合

序号	荷载描述	荷载效应代号
Load 1	恒载（屋面恒载，包括结构自重）	DL
Load 2	屋面活荷载	LL
Load 3	X 向风荷载	WX
Load 4	Y 向风荷载	WY
Load 5	地震作用（X 向）	Q <sub>x</sub>
Load 6	地震作用（Y 向）	Q <sub>y</sub>

注：雪荷载和活荷载不同时取，且雪荷载远小于活载，所以不考虑雪荷载。

### 1.7.2 结构体系介绍

本计算书围绕网球场罩棚以及入口设计计算编写。网球场罩棚跨度 42m，采用空间网格状构架，顶盖采用桅杆钢拉索膜结构。

膜结构中所使用的膜材料面密度为  $1\text{kg/m}^2$  左右，自重相对于传统结构来说非常轻巧，加上钢索、钢结构高强度材料的采用，力大部分以轴力传递，受力体系简洁合理。所以膜结构适合跨越大空间，形成开阔的无柱大跨度结构体系。

本工程中基础间距离相距较远，且受力相互作用较小，故采用基础采用天然独立基础。

## 1.8 本章小结

本章针对次建筑物的状况进行了详细的阐述。首先介绍了工程概况，周边环境较为良好，使用功能简单。接着列出了参考的设计规范，再提出了设计的可靠度标准与抗震设防标准。然后介绍此次设计中使用的材料，主要以钢材和混凝土为主。此次设计的地质情况良好，虽然场地土层起伏变化较大，分布不均，但是其所处第二地质层承载力足够大，只需平整地面，不用再做过多的地基处理。最后对此次设计的计算进行了说明，先介绍了 6 种荷载的工况，再介绍了结构体系。网球场罩棚采用空间网格状构架，顶盖采用桅杆钢拉索膜结构。

## 第二章 结构计算与设计

### 2.1 结构布置

#### 2.1.1 结构布置图。

结构平面布置图如图 2-1，立面布置图如图 2-2。

图中所示编号为杆件截面型号。

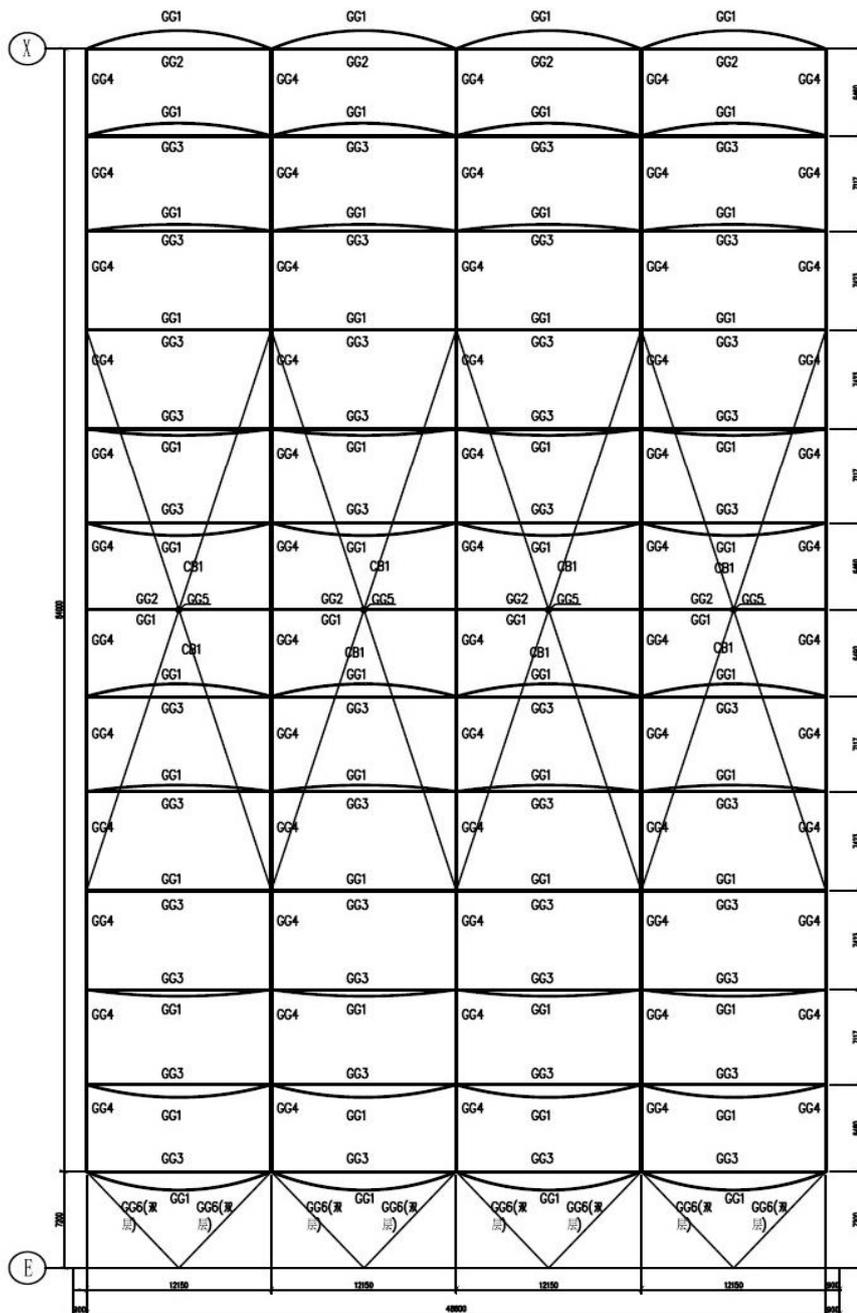


图 2-1 网球场平面布置图

网球场纵向为两跨 42 米的大拱，中间没有支撑体系，左侧搭接在网球场综合服务楼上，中间 4 跟柱子置于独立基础上，左边 4 跟柱子则作用于挡土墙上。每跨大拱被平均分为 6 段，由横向 4 跨小拱连接，且在平行于小拱方向设有横向支撑。

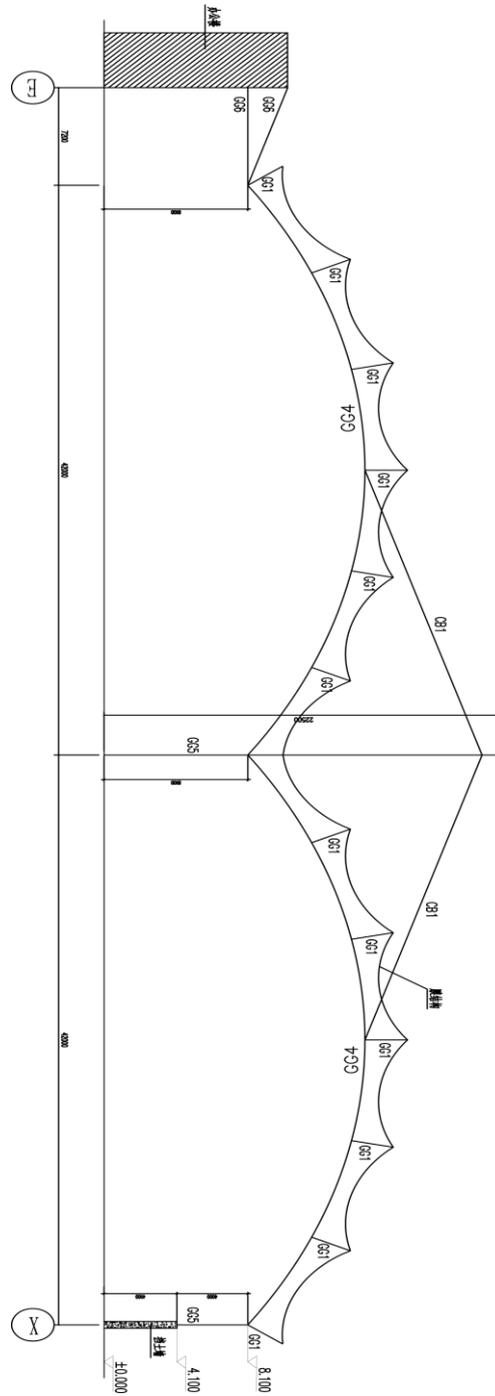


图 2-2 网球场立面布置图

## 2.2 梁柱截面的尺寸的确定

空间网壳的结构没有一个大概的经验计算公式，需要经过反复的试算调整得到。鉴于本工程所在区域地震设防烈度只有 6 度，并且其使用功能较为简单，受控荷载主要为风荷载，所以一开始确定尺寸按照钢结构设计规范的最大长细比来确定。

表 2 杆件信息

杆件名称	材料	形状	直径 mm	壁厚 mm	面积 mm <sup>2</sup>	TorsConst mm <sup>4</sup>	I33 mm <sup>4</sup>	I22 mm <sup>4</sup>
gg1 100x6	Q345	Pipe	100	6.00	1772	3.93E+06	1.965E+06	1.965E+06
gg2 450x15	Q345	Pipe	450	15.00	20499	971E+06	485 E+06	485 E+06
gg3 195x6.35	Q345	Pipe	195	6.35	3763	34 E+06	17 E+06	17 E+06
gg4 210x6.35	Q345	Pipe	210	6.35	4063	42 E+06	21 E+06	21 E+06
gg5 750x35	Q345	Pipe	750	35.00	78618	10072 E+06	5036 E+06	5036 E+06
gg6 350x10	Q345	Pipe	350	10.00	10681	309 E+06	154 E+06	154 E+06

表 3 拉索信息

索名称	材料	直径(m)	面积 m <sup>2</sup>	TorsConst m <sup>4</sup>	I m <sup>4</sup>	A <sub>s</sub> m <sup>2</sup>
CB1 20	Q345	0.020000	0.000314	1.571E-08	7.854E-09	0.000283

注：标号与图中管件对应

## 2.3 荷载计算

### 2.3.1 恒载

钢结构构件自重由程序自动导入；

### 2.3.2 风荷载

查找荷载规范（GB50009-2012）附录 D，丽水地区基本风压为 0.35kN/m<sup>2</sup>；考虑本结构为风敏感结构，在规定风压上乘以 1.1 的风效应敏感放大系数后取值 0.4kN/m<sup>2</sup>，体形系数按照雨棚取值 2.0，风振系数取 2.0。

### 2.3.3 活荷载

根据建筑的用途，以及偏安全考虑，膜面均取  $q=0.5\text{kN/m}^2$ ；

### 2.3.4 地震荷载

地震荷载采用程序的反应谱法进行分析，本工程建筑抗震设防类别为丙类，设防烈度为 6 度，II 类场地，特征周期为 0.35 秒，设计基本地震加速度值为 0.05g。计算结果与其它荷载组合。（地震反应谱数据详见附录 1）

### 2.3.5 荷载组合

1. 永久荷载分项系数	$\gamma_{G1}$	1.35
	$\gamma_{G2}$	1.2/1.0
2. 活荷载分项系数	$\gamma_R$	1.4
3. 雪荷载分项系数	$\gamma_S$	1.4
4. 风荷载分项系数	$\gamma_W$	1.4
5. 活荷载组合系数	$\varphi_{R1}$	1.0
	$\varphi_{R2}$	0.7
6. 风荷载组合系数	$\varphi_{W1}$	1.0
	$\varphi_{W2}$	0.6
7. 地震荷载组合系数	$\varphi_{Eh}$	0.5

荷载组合选取钢结构规范所需的所有组合（见附录 2）

### 2.3.6 荷载示意图

对于此结构，活荷载与风荷载按照覆膜面积计算大小，由于膜面形状较为复杂，现将面荷载折算为线荷载施加在小拱上，由小拱传递到大拱上。风荷载主要按照 X 向，Y 向，45 度角三种工况进行施加，然后折算为线荷载。活荷载主要考虑全跨荷载以及半跨这两种工况。

图 3-3，3-4 分别为为 X 向风荷载和全跨活载分布图：

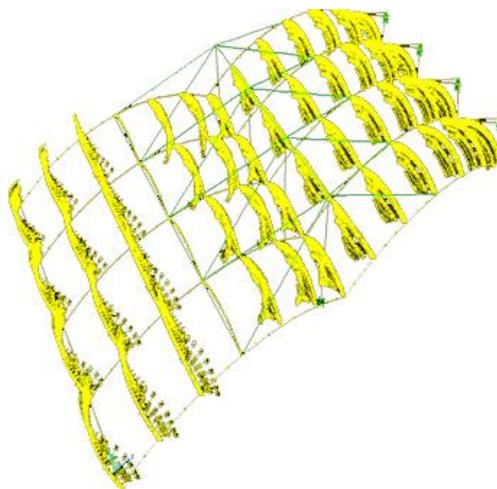


图 2-3 X 向风荷载

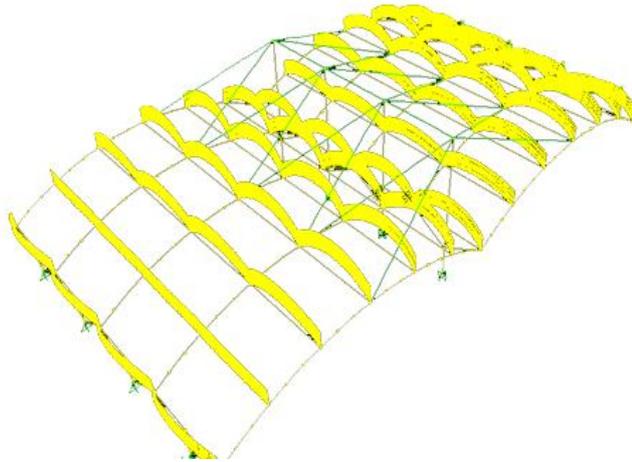


图 2-4 全跨活载分布图

## 2.4 内力计算

### 2.4.1 内力计算简图

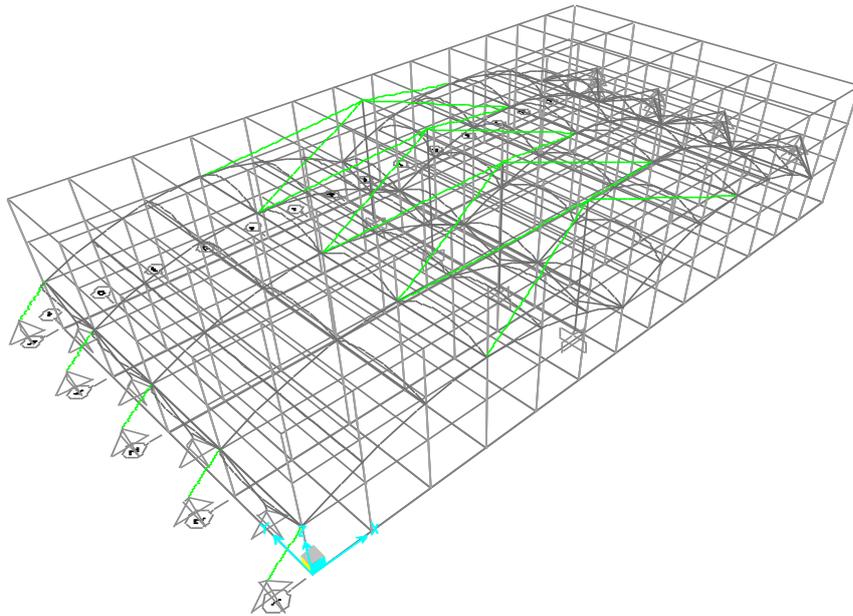
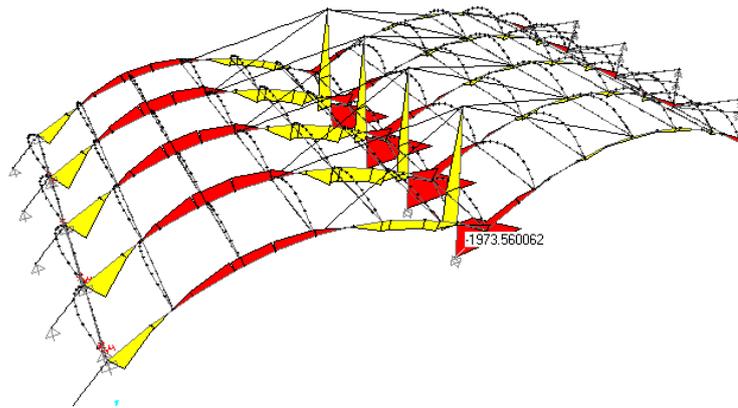


图 2-5 内力计算简图

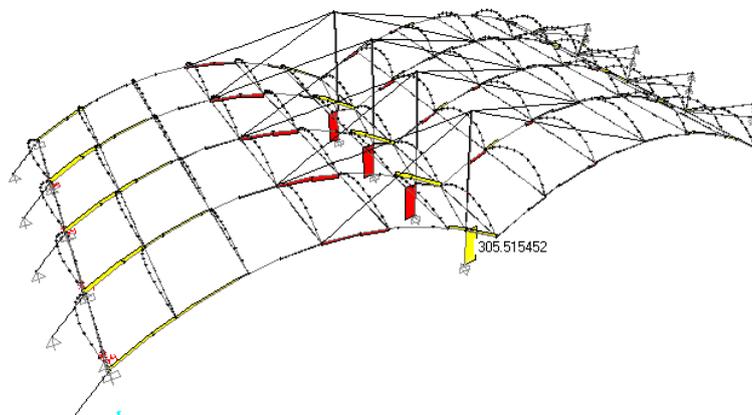
### 2.4.2 内力计算结果

通过计算发现，第 25 个内力组合（-1.4 WIND+0.98 LIVE）较大。可作为控制组合进行分析。图 3-6，3-7，3-8 分别为此组合下的弯矩图，剪力图和轴力图。

图 2-6 组合 25 弯矩图(单位  $\text{kN}\cdot\text{m}$ )

结构在左跨表现出钢架的性质，跨中产生了较大的弯矩，而且在横向拱处产生了反弯现象。相对而言，右跨则比价符合拱的受力特性。结构的剪力基本上由中间 4 根柱子承担。边柱相对承担较少。

此结构的平面内跨度较大，其稳定性需要加强，所以在结构横向进行了加强，既有覆膜所用的小拱提供一些支撑，还在横向增加了支撑，从计算结果来看，支撑并没有承担弯矩，与之前设计中的假定是符合的。

图 2-7 组合 25 剪力图 (单位  $\text{kN}$ )

搭接在综合服务楼上的钢架有较大的轴力，虽然对于网球场产生了很好的约束作用，但是对搭接的结构也作用极大的力，这使两个结构的受力体系变得不够清晰，对结构的分析来说是不利的。

从总体上看，结构的计算基本符合真实情况，节点的处理基本按照主结构杆件刚接，支撑杆件铰接来计算。传力也基本上按照预先设计的路径进行，即膜面到小拱在传到大拱，再传到主柱上。

地震荷载效应经过计算，得到的应力非常小，最大弯矩仅为  $15\text{kN}\cdot\text{m}$ ，与其他应力比较，相差两个数量级，工程上可以忽略不计。

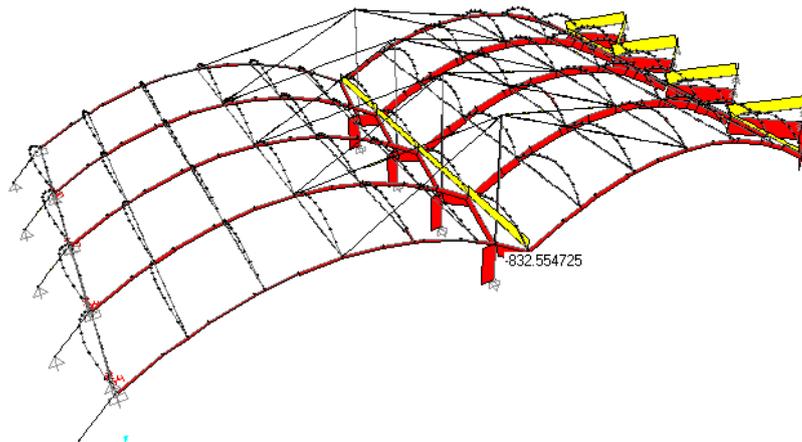


图 2-8 组合 25 轴力图 (单位 kN)

### 2.4.3 位移计算结果

以下几个组合位移较大

图中，红色为变形后的杆件，白色为变形前的杆件，通过查阅数据显示，各工况下顶点的位移最大为 73.21mm，最大位移比为 1/300，虽然相对于规范来说略有超出的地方，不过对于使用来说并无太大的影响。经过专家的论证，这个位移是适用于工程实际的。

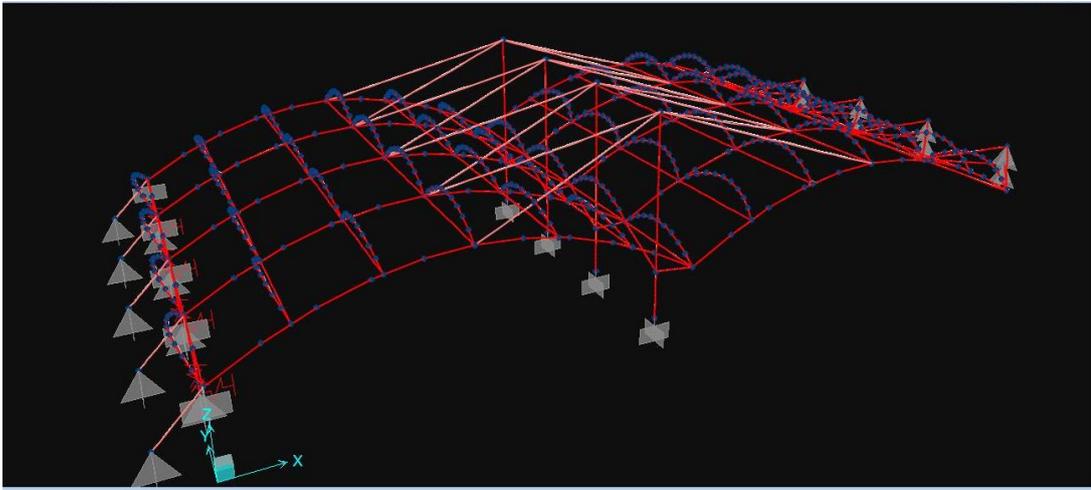


图 2-9 活载位移

对于这几种荷载组合，横向最大位移出现在拉索的顶端。纵向最大位移出现在纵向大拱的跨中处，此处也是弯矩最大处，对于此结构来说，侧向刚度相对较弱，为了建筑形式的需要，在不替换杆件布置形式的情况下，横向杆件截面相对较大，以增加结构的侧向刚度，提高结构整体稳定性。

拉索在结构中起到很好的作用，从变形图上来看，拉索中间的大拱刚度很大，变形以整体平动和转动为主，自身并没有出现局部变形。

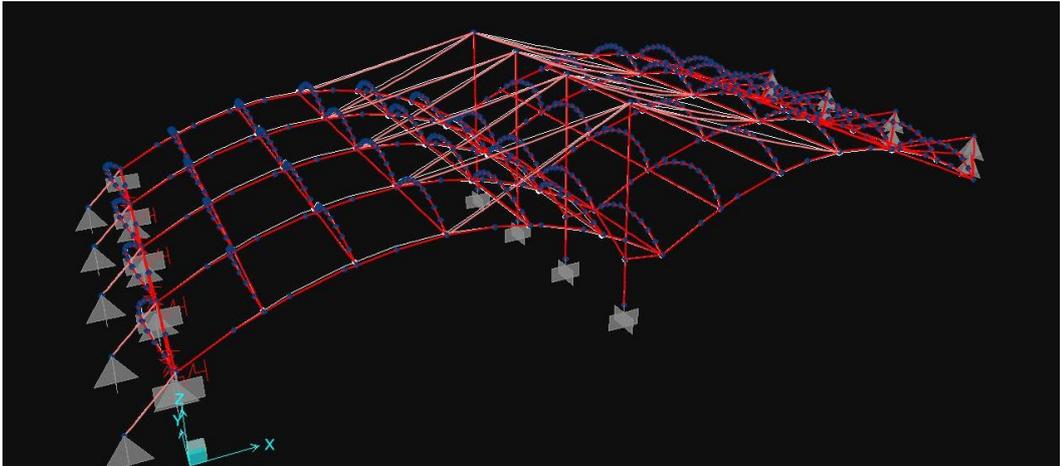


图 2-10 X 向风载位移图

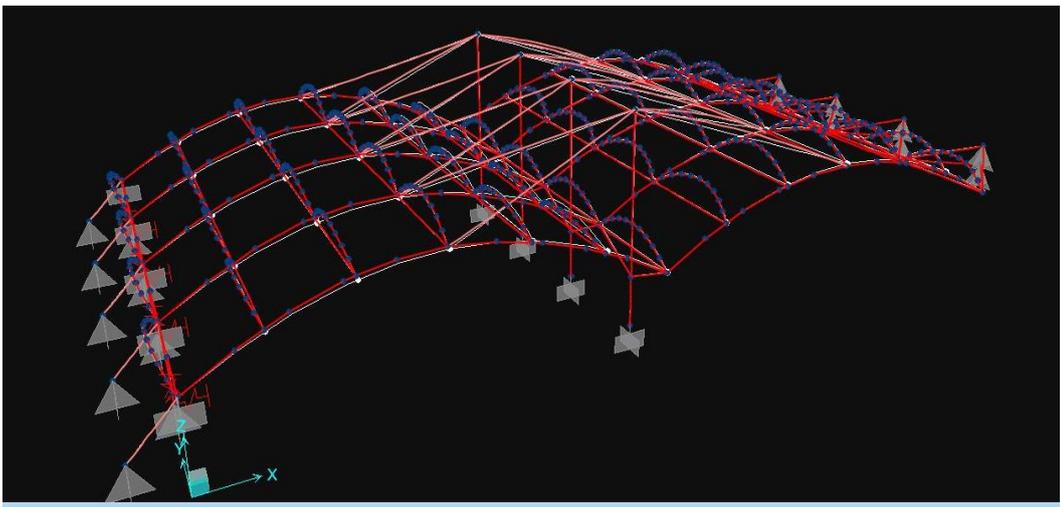


图 2-11 组合 25 位移图

## 2.5 截面验算与设计

表 5 为每种型号的杆件在所有工况及内力组合情况下的最大应力比，而图 3-12 则为所有杆件的应力比统计图，从图中可以得到杆件的应力比均小于 0.95，满足规范要求。杆件具体验算过程详见附录 3，节点具体验算过程详见附录 4。

表-5 各杆件最大应力比

杆件	位置 m	组合	杆件型号	计算模型	应力比	RatioType
52	0	UDSTL20	gg2 450x15	Column	0.767458	PMM
133	0	UDSTL21	gg5 750x35	Column	0.857632	PMM
153	9.68546	UDSTL10	gg6 350x10	Brace </td <td>0.651977</td> <td>PMM</td>	0.651977	PMM
269	12.15	UDSTL19	gg3 195x6.35	Beam	0.915327	PMM

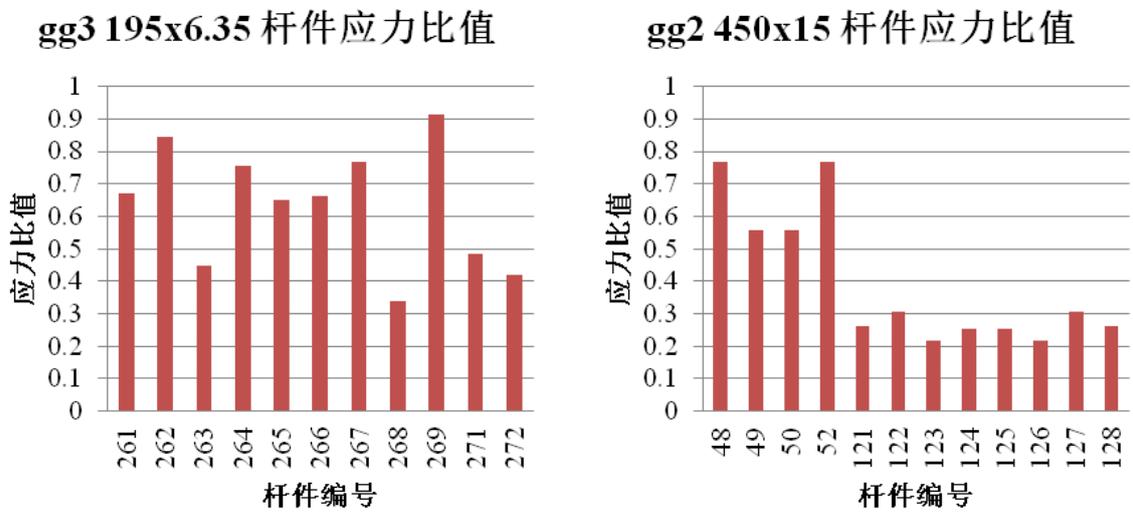


图 2-12 (a) 杆件应力比统计图

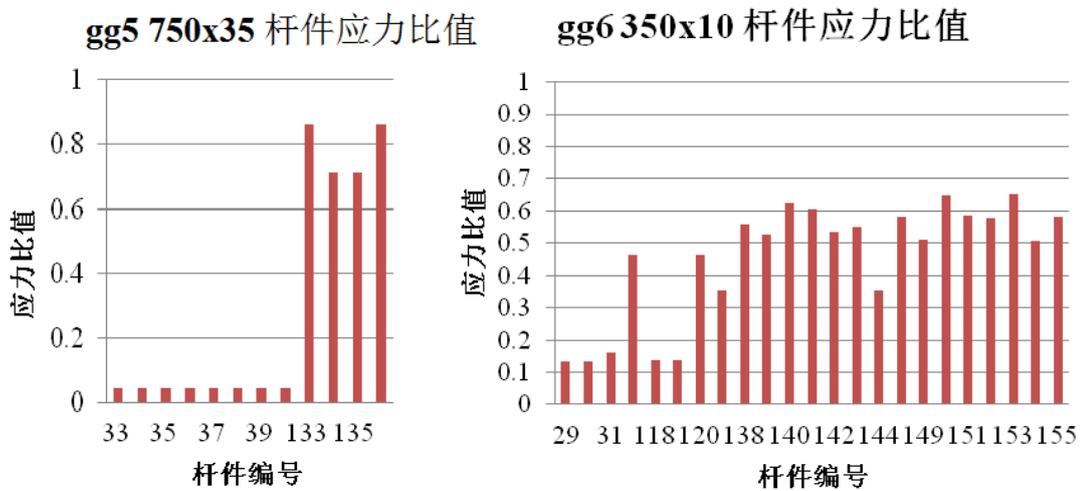


图 2-12 (b) 杆件应力统计图

## 2.6 基础设计

此建筑物只有两种类型的柱子，且受力情况相似，所以对两种柱子的基础分别进行设计，都为独立基础。

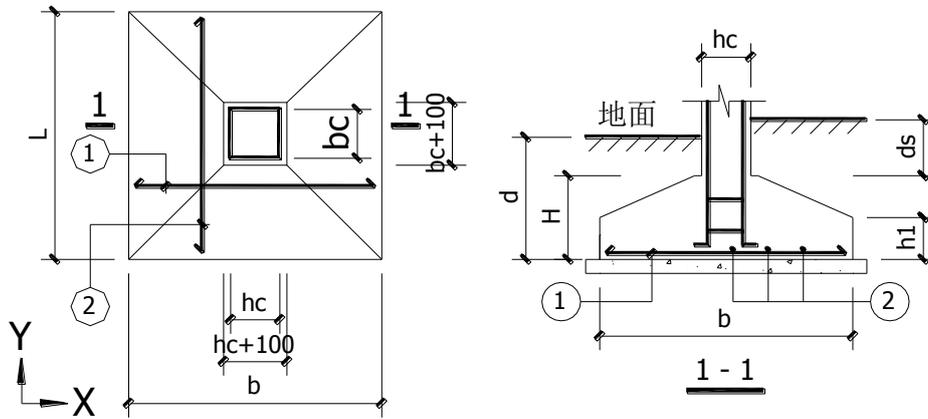


图2-13 基础示意图

### 2.6.1 柱下扩展基础：基础--1

工程名称：浙江丽水市体育中心网球场钢结构

地基承载力特征值

计算公式：《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \cdot \gamma \cdot (b - 3) + \eta_d \cdot \gamma_m \cdot (d - 0.5) \quad (\text{式 } 5.2.4)$$

地基承载力特征值  $f_{ak} = 300kPa$       基础宽度的地基承载力修正系数  $\eta_b = 0$

基础埋深的地基承载力修正系数  $\eta_d = 1$       基础底面以下土的重度  $\gamma = 18kN/m^3$

基础底面以上土的加权平均重度  $\gamma_m = 18kN/m^3$       基础底面宽度  $b = 3.8m$

基础埋置深度  $d = 2.9m$

$$f_a = 300 + 0 \cdot 18 \cdot (3.8 - 3) + 1 \cdot 18 \cdot (2.9 - 0.5) = 343.2kPa$$

修正后的地基承载力特征值  $f_a = 343.2kPa$

基本资料

柱子高度  $hc = 750mm$ （X 方向）      柱子宽度  $bc = 750mm$ （Y 方向）

基础底面宽度  $b = 3800mm$ （X 方向）      底面长度  $l = 10100mm$ （Y 方向）

基础根部高度  $H = 1900mm$       端部高度  $h_1 = 1250mm$

柱边基础截面面积

$$X \text{ 轴方向截面面积 } A_{cb} = h_1 \cdot b + (b + hc + 2 \times 0.05) \cdot (H - h_1) / 2 = 6.26m^2$$

$$Y \text{ 轴方向截面面积 } A_{cl} = h_1 \cdot l + (l + bc + 2 \times 0.05) \cdot (H - h_1) / 2 = 16.18m^2$$

基础顶面坡度斜率  $i = 1 / 2.3$       坡度  $\alpha_x = 23.8^\circ$        $\alpha_y = 8^\circ$

基础宽高比

$$\text{基础柱边宽高比: } (b - hc) / 2H = 0.8; \quad (l - bc) / 2H = 2.5$$

混凝土强度等级为 C20       $f_c = 9.554N/mm^2$        $f_t = 1.101N/mm^2$

钢筋强度设计值  $f_y = 300N/mm^2$       纵筋合力点至近边距离  $a_s = 50mm$

荷载的综合分项系数  $\gamma_z=1.35$       永久荷载的分项系数  $\gamma_G=1.35$

基础底面积  $A=l \cdot b=10.1 \cdot 3.8=38.38\text{m}$

顶部面积  $A_t=(hc + 2 \cdot 0.05)^2=(0.75+2 \cdot 0.05)^2=0.72\text{m}$

底部体积  $V_{jc1}=A_b \cdot h_1=38.38 \cdot 1.25=47.975\text{m}$

顶部体积  $V_{jc2}=[b \cdot l + (b + hc + 2 \cdot 0.05) \cdot (l + bc + 2 \cdot 0.05) + (hc + 2 \cdot 0.05) \cdot (bc + 2 \cdot 0.05)] \cdot (H - h_1) / 6=9.752\text{m}$

基础体积  $V_{jc}=V_{jc1} + V_{jc2}=47.975+9.752=57.727\text{m}$

基础自重和基础上的土重

基础混凝土的容重  $\gamma_c=25\text{kN/m}$       基础顶面以上土的容重  $\gamma_s=18\text{kN/m}$

顶面上覆土厚度  $ds=1000\text{mm}$

$G_k=V_{jc} \cdot \gamma_c + [A \cdot (H + ds) - V_{jc} - bc \cdot hc \cdot ds] \cdot \gamma_s=2397.4\text{kN}$

基础自重和基础上的土重设计值  $G=\gamma_G \cdot G_k=3236.5\text{kN}$

基础上的竖向附加荷载标准值  $F_k'=0\text{ kN}$

控制内力

$N_k$  ----- 相应于荷载效应标准组合时，柱底轴向力值 (kN) ；

$F_k$  ----- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础顶面的竖向力值 (kN) ；

$$F_k=N_k + F_k'$$

$V_{kx}$  、  $V_{ky}$  ---- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础顶面的剪力值 (kN) ；

$M_{kx}'$ 、  $M_{ky}'$  ---- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础顶面的弯矩值 (kN m) ；

$M_{kx}$  、  $M_{ky}$  --- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础底面的弯矩值 (kN m) ；

$$M_{kx}=M_{kx}' - V_{ky} \cdot H、 \quad M_{ky}=M_{ky}' + V_{kx} \cdot H$$

$F$ 、  $M_x$  、  $M_y$  --- 相应于荷载效应基本组合时，竖向力、弯矩设计值 (kN、kN m) ；

$$F=\gamma_z \cdot F_k、 \quad M_x=\gamma_z \cdot M_{kx}、 \quad M_y=\gamma_z \cdot M_{ky}$$

$N_k=300$ ；  $M_{kx}=1437$ ；  $M_{ky}=142$ ；  $V_{kx}=290$ ；  $V_{ky}=6.8$

$F_k=300$ ；  $M_{kx}=1424$ ；  $M_{ky}=693$

$F=405$ ；  $M_x=1922.4$ ；  $M_y=935.6$

轴心荷载作用下

$$pk=(F_k + G_k) / A \quad (\text{式 } 5.2.2-1)$$

$pk=(300+2397.4)/38.38=70.3\text{kPa} \leq fa=343.2\text{kPa}$ ，满足要求。

偏心荷载作用下

$$pk_{\max}=(F_k + G_k) / A + M_k / W \quad (\text{式 } 5.2.2-2)$$

$$pk_{\min}=(F_k + G_k) / A - M_k / W \quad (\text{式 } 5.2.2-3)$$

双向偏心荷载作用下

$$pk_{\max}=(F_k + G_k) / A + M_{kx} / W_x + M_{ky} / W_y$$

$$pk_{\min}=(F_k + G_k) / A - M_{kx} / W_x - M_{ky} / W_y$$

基础底面抵抗矩  $W_x=b \cdot l^3 / 6=3.8 \cdot 10.1^3 / 6=64.606\text{m}$

基础底面抵抗矩  $W_y=l \cdot b^3 / 6=10.1 \cdot 3.8^3 / 6=24.307\text{m}$

$M_{kx}=1424.0\text{kN m}$        $M_{ky}=693.0\text{kN m}$

$pk_{\max}=(300+2397.4)/38.38+1424/64.606+693/24.307$

$=120.8\text{kPa} \leq 1.2fa=411.8\text{kPa}$ ，满足要求。

$pk_{\min}=(300+2397.4)/38.38-1424/64.606-693/24.307=19.7\text{kPa} \geq 0$ ，满足要求。

偏心矩  $e_x=M_{ky} / (F_k + G_k)=693/(300+2397.4)=0.257\text{m}$

$$pk_{\max}X=(300+2397.4)/38.38+693/24.307$$

$$=98.8\text{kPa} \leq 1.2f_a=411.8\text{kPa}, \text{ 满足要求。}$$

$$pk_{\min}X=(300+2397.4)/38.38-693/24.307=41.8\text{kPa}$$

$$\text{偏心矩 } e_y=M_{kx} / (F_k + G_k)=1424/(300+2397.4)=0.528\text{m}$$

$$pk_{\max}Y=(300+2397.4)/38.38+1424/64.606$$

$$=92.3\text{kPa} \leq 1.2f_a=411.8\text{kPa}, \text{ 满足要求。}$$

$$pk_{\min}Y=(300+2397.4)/38.38-1424/64.606=48.2\text{kPa}$$

冲切验算

$$F_l \leq 0.7 \cdot \beta_{hp} \cdot f_t \cdot a_m \cdot H_0 \quad (\text{式 } 8.2.7-1)$$

$$a_m=(a_t + a_b) / 2 \quad (\text{式 } 8.2.7-2)$$

$$F_l=p_j \cdot A_l \quad (\text{式 } 8.2.7-3)$$

基底净反力  $p_j$

$$p_{\max}=\gamma Z \cdot 120.8=163.1\text{kPa}$$

$$p_j=p_{\max} - G / A=163.1-3236.5/38.38=78.8\text{kPa}$$

X 方向 (b 方向)

$$b \leq 2H_0 + hc, \text{ X 方向不需要验算抗冲切。}$$

Y 方向 (l 方向)

$$\text{因 } l > bc + 2H_0, b \leq hc + 2H_0 \text{ 且 } b - hc \leq l - bc \text{ 有:}$$

$$A_{ly}=b \cdot (l/2 - bc/2 - H_0)=3.8 \cdot (10.1/2 - 0.75/2 - 1.85)=10.74\text{m}$$

$$ab=\text{Min}\{hc + 2H_0, b\}=\text{Min}\{0.75+2 \cdot 1.85, 3.8\}=3.800\text{m}$$

$$a_{my}=(hc + ab) / 2=(0.75+3.8)/2=2.275\text{m}$$

$$F_{ly}=p_j \cdot A_{ly}=78.8 \cdot 10.74=845.9\text{kN}$$

$$0.7 \cdot \beta_{hp} \cdot f_t \cdot a_{my} \cdot H_0=0.7 \cdot 0.908 \cdot 1101 \cdot 2.275 \cdot 1.85=2947.1\text{kN}$$

$$\geq F_{ly}=845.9\text{kN}, \text{ 满足要求。}$$

剪切验算

$$V \leq 0.7 \cdot \beta_h \cdot f_t \cdot b_0 \cdot H_0 \quad (\text{混凝土规范式 } 7.5.3-1)$$

X 方向 (b 方向)

$$\text{计算宽度 } L_0=\{1 - 0.5 \cdot [1 - (bc + 2 \cdot 50) / l] \cdot (H_0 - h_l) / H_0\} \cdot l=8600\text{mm}$$

$$V_x=p_j \cdot A_x=p_j \cdot (b - hc) \cdot 2l$$

$$V_x=78.8 \cdot (3.8-0.75) \cdot 10.1/2=1213.7\text{kN}$$

$$0.7 \cdot \beta_h \cdot f_t \cdot L_0 \cdot H_0=0.7 \cdot 0.81 \cdot 1101 \cdot 8.6 \cdot 1.85$$

$$=9945.9\text{kN} \geq V_x=1213.7\text{kN}, \text{ 满足要求。}$$

Y 方向 (l 方向)

$$\text{计算宽度 } B_0=\{1 - 0.5 \cdot [1 - (hc + 2 \cdot 50) / b] \cdot (H_0 - h_l) / H_0\} \cdot b=3322\text{mm}$$

$$V_y=p_j \cdot A_y=p_j \cdot (l - bc) \cdot 2b$$

$$V_y=78.8 \cdot (10.1-0.75) \cdot 3.8/2=1399.8\text{kN}$$

$$0.7 \cdot \beta_h \cdot f_t \cdot B_0 \cdot H_0=0.7 \cdot 0.81 \cdot 1101 \cdot 3.322 \cdot 1.85$$

$$=3841.5\text{kN} \geq V_y=1399.8\text{kN}, \text{ 满足要求。}$$

抗弯计算

弯矩计算

$M_I$  按地基规范式 8.2.7-4 计算:

$$M_I=a_l^2 \cdot [(2l + a) \cdot (p_{\max} + p - 2G / A) + (p_{\max} - p) \cdot l] / 12$$

X 方向 (b 方向) 柱边 (绕 Y 轴):

$$M_I = (b - hc)^2 \cdot [(2l + bc) \cdot (p_{\max}X + pX - 2G / A) + (p_{\max}X - pX) \cdot l] / 48$$

$$pX = p_{\min}X + (p_{\max}X - p_{\min}X) \cdot (b + hc) / 2b$$

$$= 56.4 + (133.4 - 56.4) \cdot (3.8 + 0.75) / 3.8 / 2 = 102.5 \text{ kPa}$$

$$M_I = (3.8 - 0.75)^2 \cdot [(2 \cdot 10.1 + 0.75) \cdot (133.4 + 102.5 - 2 \cdot 3236.5 / 38.38) + (133.4 - 102.5) \cdot 10.1] / 48 = 333.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Y 方向 (I 方向) 柱边 (绕 X 轴) :

$$M_{II} = (l - bc)^2 \cdot [(2b + hc) \cdot (p_{\max}Y + pY - 2G / A) + (p_{\max}Y - pY) \cdot b] / 48$$

$$pY = p_{\min}Y + (p_{\max}Y - p_{\min}Y) \cdot (l + bc) / 2l$$

$$= 65.1 + (124.6 - 65.1) \cdot (10.1 + 0.75) / 10.1 / 2 = 97.1 \text{ kPa}$$

$$M_{II} = (10.1 - 0.75)^2 \cdot [(2 \cdot 3.8 + 0.75) \cdot (124.6 + 97.1 - 2 \cdot 3236.5 / 38.38) + (124.6 - 97.1) \cdot 3.8] / 48 = 997.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

配筋计算

$$M_{I \max} = 333.3 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_{II \max} = 997.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

①号筋  $A_{sI} = 608 \text{ mm}^2$  ( $x = 19 \text{ mm}$ ) 相对受压区高度  $\xi = 0.011$

$$a_s = 62 \text{ mm} \quad \text{配筋率 } \rho = 0.00\%$$

$$\rho_{\min} = 0.15\% \quad A_{sI \min} = 24276 \text{ mm}^2 \quad 100\Phi 18 @ 100 \quad (A_s = 25447)$$

②号筋  $A_{sII} = 1827 \text{ mm}^2$  ( $x = 58 \text{ mm}$ ) 相对受压区高度  $\xi = 0.032$

$$a_s = 50 \text{ mm} \quad \text{配筋率 } \rho = 0.03\%$$

$$\rho_{\min} = 0.15\% \quad A_{sII \min} = 9392 \text{ mm}^2 \quad 37\Phi 18 @ 100 \quad (A_s = 9415)$$

柱下局部受压承载力计算

$$F_l \leq \omega \cdot \beta_l \cdot f_{cc} \cdot A_l \quad (\text{混凝土规范式 A.5.1-1})$$

$$\text{局部荷载设计值 } F_l = 405.0 \text{ kN}$$

$$\text{混凝土局部受压面积 } A_l = bc \cdot hc = 562500 \text{ mm}^2$$

基础在柱下局部受压时的计算底面积按下列公式计算:

$$A_b = (bx + 2c) \cdot (by + 2c)$$

$$c = \text{Min}\{C_x, C_y, b_x, b_y\} = \text{Min}\{50, 50, 750, 750\} = 50 \text{ mm}$$

$$A_b = (750 + 2 \cdot 50) \cdot (750 + 2 \cdot 50) = 722500 \text{ mm}^2$$

$$\text{混凝土局部受压时的强度提高系数 } \beta_l = (A_b / A_l)^{0.5} = (0.723 / 0.563)^{0.5} = 1.133$$

$$\omega \cdot \beta_l \cdot f_{cc} \cdot A_l = 1.0 \cdot 1.133 \cdot 0.85 \cdot 9554 \cdot 0.563 = 5177.2 \text{ kN}$$

$$\geq F_l = 405.0 \text{ kN}, \text{ 满足要求。}$$

## 2.6.2 柱下扩展基础：基础--2

工程名称：浙江丽水市体育中心网球场钢结构

地基承载力特征值

计算公式：《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \cdot \gamma \cdot (b - 3) + \eta_d \cdot \gamma_m \cdot (d - 0.5) \quad (\text{式 } 5.2.4)$$

地基承载力特征值  $f_{ak} = 300\text{kPa}$       基础宽度的地基承载力修正系数  $\eta_b = 0$   
 基础埋深的地基承载力修正系数  $\eta_d = 1$       基础底面以下土的重度  $\gamma = 18\text{kN/m}^3$   
 基础底面以上土的加权平均重度  $\gamma_m = 18\text{kN/m}$       基础底面宽度  $b = 6.1\text{m}$   
 基础埋置深度  $d = 2.3\text{m}$

当  $b = 6.1\text{m} > 6\text{m}$  时，按  $b = 6\text{m}$

$$f_a = 300 + 0 \cdot 18 \cdot (6 - 3) + 1 \cdot 18 \cdot (2.3 - 0.5) = 332.4\text{kPa}$$

修正后的地基承载力特征值  $f_a = 332.4\text{kPa}$

基本资料

柱子高度  $hc = 450\text{mm}$ （X 方向）      柱子宽度  $bc = 450\text{mm}$ （Y 方向）

基础底面宽度  $b = 6100\text{mm}$ （X 方向）      底面长度  $l = 6800\text{mm}$ （Y 方向）

基础根部高度  $H = 1300\text{mm}$       端部高度  $h_1 = 200\text{mm}$

柱边基础截面面积

$$X \text{ 轴方向截面面积 } A_{cb} = h_1 \cdot b + (b + hc + 2 \cdot 0.05) \cdot (H - h_1) / 2 = 4.88\text{m}$$

$$Y \text{ 轴方向截面面积 } A_{cl} = h_1 \cdot l + (l + bc + 2 \cdot 0.05) \cdot (H - h_1) / 2 = 5.40\text{m}$$

基础顶面坡度斜率  $i = 1 / 2.5$       坡度  $\alpha_x = 21.6^\circ$        $\alpha_y = 19.4^\circ$

基础宽高比

$$\text{基础柱边宽高比: } (b - hc) / 2H = 2.2; \quad (l - bc) / 2H = 2.4$$

混凝土强度等级为 C20       $f_c = 9.554\text{N/mm}^2$        $f_t = 1.101\text{N/mm}^2$

钢筋强度设计值  $f_y = 300\text{N/mm}^2$       纵筋合力点至近边距离  $a_s = 50\text{mm}$

荷载的综合分项系数  $\gamma_z = 1.35$       永久荷载的分项系数  $\gamma_G = 1.35$

基础底面积  $A = l \cdot b = 6.8 \cdot 6.1 = 41.48\text{m}^2$

$$\text{顶部面积 } A_t = (hc + 2 \cdot 0.05)^2 = (0.45 + 2 \cdot 0.05)^2 = 0.30\text{m}^2$$

$$\text{底部体积 } V_{jc1} = A \cdot h_1 = 41.48 \cdot 0.2 = 8.296\text{m}^3$$

$$\text{顶部体积 } V_{jc2} = [b \cdot l + (b + hc + 2 \cdot 0.05) \cdot (l + bc + 2 \cdot 0.05) + (hc + 2 \cdot 0.05) \cdot (bc + 2 \cdot 0.05)] \cdot (H - h_1) / 6 = 16.621\text{m}^3$$

$$\text{基础体积 } V_{jc} = V_{jc1} + V_{jc2} = 8.296 + 16.621 = 24.917\text{m}^3$$

基础自重和基础上的土重

基础混凝土的容重  $\gamma_c = 25\text{kN/m}^3$       基础顶面以上土的容重  $\gamma_s = 18\text{kN/m}^3$

顶面上覆土厚度  $d_s = 1000\text{mm}$

$$G_k = V_{jc} \cdot \gamma_c + [A \cdot (H + d_s) - V_{jc} - bc \cdot hc \cdot d_s] \cdot \gamma_s = 1888.0\text{kN}$$

基础自重和基础上的土重设计值  $G = \gamma_G \cdot G_k = 2548.9\text{kN}$

基础上的竖向附加荷载标准值  $F_k' = 0\text{kN}$

控制内力

$N_k$  ----- 相应于荷载效应标准组合时，柱底轴向力值 (kN)；

$F_k$  ----- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础顶面的竖向力值 (kN)；

$$F_k = N_k + F_k'$$

$V_{kx}$ 、 $V_{ky}$  ---- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础顶面的剪力值 (kN)；

$M_{kx}'$ 、 $M_{ky}'$  --- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础顶面的弯矩值 (kN m)；

$M_{kx}$ 、 $M_{ky}$  ---- 相应于荷载效应标准组合时，作用于基础底面的弯矩值 (kN m)；

$$M_{kx} = M_{kx}' - V_{ky} \cdot H, \quad M_{ky} = M_{ky}' + V_{kx} \cdot H$$

$F$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  --- 相应于荷载效应基本组合时，竖向力、弯矩设计值 (kN、kN m)；

$$F = \gamma_z \cdot F_k, \quad M_x = \gamma_z \cdot M_{kx}, \quad M_y = \gamma_z \cdot M_{ky}$$

$N_k=1027$ ；  $M_{kx}'=1225.2$ ；  $M_{ky}'=884.5$ ；  $V_{kx}=306.3$ ；  $V_{ky}=221.1$

$F_k=1027$ ；  $M_{kx}=937.7$ ；  $M_{ky}=1282.7$

$F=1386.5$ ；  $M_x=1265.9$ ；  $M_y=1731.7$

轴心荷载作用下

$$p_k = (F_k + G_k) / A \quad (\text{式 } 5.2.2-1)$$

$p_k = (1027 + 1888) / 41.48 = 70.3 \text{ kPa} \leq f_a = 332.4 \text{ kPa}$ ，满足要求。

偏心荷载作用下

$$p_{k\max} = (F_k + G_k) / A + M_k / W \quad (\text{式 } 5.2.2-2)$$

$$p_{k\min} = (F_k + G_k) / A - M_k / W \quad (\text{式 } 5.2.2-3)$$

双向偏心荷载作用下

$$p_{k\max} = (F_k + G_k) / A + M_{kx} / W_x + M_{ky} / W_y$$

$$p_{k\min} = (F_k + G_k) / A - M_{kx} / W_x - M_{ky} / W_y$$

基础底面抵抗矩  $W_x = b \cdot l \cdot l / 6 = 6.1 \cdot 6.8 \cdot 6.8 / 6 = 47.011 \text{ m}$

基础底面抵抗矩  $W_y = l \cdot b \cdot b / 6 = 6.8 \cdot 6.1 \cdot 6.1 / 6 = 42.171 \text{ m}$

$M_{kx} = 937.7 \text{ kN m}$       $M_{ky} = 1282.7 \text{ kN m}$

$$p_{k\max} = (1027 + 1888) / 41.48 + 937.7 / 47.011 + 1282.7 / 42.171$$

$$= 120.6 \text{ kPa} \leq 1.2 f_a = 398.9 \text{ kPa}$$
，满足要求。

$$p_{k\min} = (1027 + 1888) / 41.48 - 937.7 / 47.011 - 1282.7 / 42.171$$

$$= 19.9 \text{ kPa} \geq 0$$
，满足要求。

偏心矩  $e_x = M_{ky} / (F_k + G_k) = 1282.7 / (1027 + 1888) = 0.44 \text{ m}$

$$p_{k\max X} = (1027 + 1888) / 41.48 + 1282.7 / 42.171$$

$$= 100.7 \text{ kPa} \leq 1.2 f_a = 398.9 \text{ kPa}$$
，满足要求。

$$p_{k\min X} = (1027 + 1888) / 41.48 - 1282.7 / 42.171 = 39.9 \text{ kPa}$$

偏心矩  $e_y = M_{kx} / (F_k + G_k) = 937.7 / (1027 + 1888) = 0.322 \text{ m}$

$$p_{k\max Y} = (1027 + 1888) / 41.48 + 937.7 / 47.011$$

$$= 90.2 \text{ kPa} \leq 1.2 f_a = 398.9 \text{ kPa}$$
，满足要求。

$$p_{k\min Y} = (1027 + 1888) / 41.48 - 937.7 / 47.011 = 50.3 \text{ kPa}$$

冲切验算

$$F_l \leq 0.7 \cdot \beta_{hp} \cdot f_t \cdot a_m \cdot H_0 \quad (\text{式 } 8.2.7-1)$$

$$a_m = (a + ab) / 2 \quad (\text{式 } 8.2.7-2)$$

$$F_l = p_j \cdot A_l \quad (\text{式 } 8.2.7-3)$$

基底净反力  $p_j$

$$p_{\max} = \gamma Z \cdot 120.6 = 162.9 \text{ kPa}$$

$$p_j = p_{\max} - G / A = 162.9 - 2548.9 / 41.48 = 101.4 \text{ kPa}$$

X 方向 (b 方向)

因  $b > hc + 2H_0$  且  $1 - bc > b - hc$  有:

$$A_{lx} = 0.5 \cdot (b - hc + 2bc + 2H_0) \cdot [(b - hc) / 2 - H_0]$$

$$= 0.5 \cdot (6.1 - 0.45 + 2 \cdot 0.45 + 2 \cdot 1.25) \cdot [(1 - 12) / 2 - 1.25] = 7.13 \text{ m}$$

$$ab = \text{Min}\{bc + 2H_0, l\} = \text{Min}\{0.45 + 2 \cdot 1.25, 6.8\} = 2.950 \text{ m}$$

$$a_{mx} = (bc + ab) / 2 = (0.45 + 2.95) / 2 = 1.700 \text{ m}$$

$$F_{lx} = p_j \cdot A_{lx} = 101.4 \cdot 7.13 = 722.8 \text{ kN}$$

$$0.7 \cdot \beta_{hp} \cdot f_t \cdot a_{mx} \cdot H_0 = 0.7 \cdot 0.958 \cdot 1101 \cdot 1.7 \cdot 1.25 = 1569.9 \text{ kN}$$

$$\geq F_{lx} = 722.8 \text{ kN}, \text{ 满足要求。}$$

Y 方向 (l 方向)

因  $l > bc + 2H_0$ 、 $b > hc + 2H_0$  且  $b - hc \leq l - bc$  有:

$$A_{ly} = 0.5(b + hc + 2H_0) \cdot (b - hc - 2H_0) / 2 + b \cdot (l - bc - b + hc) / 2$$

$$= 0.5 \cdot (6.1 + 0.45 + 2 \cdot 1.25) \cdot (6.1 - 0.45 - 2 \cdot 1.25) / 2 + 6.1 \cdot (6.8 - 0.45 - 6.1 + 0.45) / 2$$

$$= 9.26 \text{ m}$$

$$ab = \text{Min}\{hc + 2H_0, b\} = \text{Min}\{0.45 + 2 \cdot 1.25, 6.1\} = 2.950 \text{ m}$$

$$a_{my} = (hc + ab) / 2 = (0.45 + 2.95) / 2 = 1.700 \text{ m}$$

$$F_{ly} = p_j \cdot A_{ly} = 101.4 \cdot 9.26 = 939.3 \text{ kN}$$

$$0.7 \cdot \beta_{hp} \cdot f_t \cdot a_{my} \cdot H_0 = 0.7 \cdot 0.958 \cdot 1101 \cdot 1.7 \cdot 1.25 = 1569.9 \text{ kN}$$

$$\geq F_{ly} = 939.3 \text{ kN}, \text{ 满足要求。}$$

剪切验算

$$V \leq 0.7 \cdot \beta_h \cdot f_t \cdot b_0 \cdot H_0 \quad (\text{混凝土规范式 } 7.5.3-1)$$

X 方向 (b 方向)

$$\text{计算宽度 } L_0 = \{1 - 0.5 \cdot [1 - (bc + 2 \cdot 50) / l] \cdot (H_0 - h_1) / H_0\} \cdot l = 4175 \text{ mm}$$

$$V_x = p_j \cdot A_x = p_j \cdot (b - hc) \cdot 2l$$

$$V_x = 101.4 \cdot (6.1 - 0.45) \cdot 6.8 / 2 = 1948.2 \text{ kN}$$

$$0.7 \cdot \beta_h \cdot f_t \cdot L_0 \cdot H_0 = 0.7 \cdot 0.89 \cdot 1101 \cdot 4.175 \cdot 1.25$$

$$= 3598.4 \text{ kN} \geq V_x = 1948.2 \text{ kN}, \text{ 满足要求。}$$

Y 方向 (l 方向)

$$\text{计算宽度 } B_0 = \{1 - 0.5 \cdot [1 - (hc + 2 \cdot 50) / b] \cdot (H_0 - h_1) / H_0\} \cdot b = 3769 \text{ mm}$$

$$V_y = p_j \cdot A_y = p_j \cdot (l - bc) \cdot 2b$$

$$V_y = 101.4 \cdot (6.8 - 0.45) \cdot 6.1 / 2 = 1964.2 \text{ kN}$$

$$0.7 \cdot \beta_h \cdot f_t \cdot B_0 \cdot H_0 = 0.7 \cdot 0.89 \cdot 1101 \cdot 3.769 \cdot 1.25$$

$$= 3248.5 \text{ kN} \geq V_y = 1964.2 \text{ kN}, \text{ 满足要求。}$$

抗弯计算

弯矩计算

$M_l$  按地基规范式 8.2.7-4 计算:

$$M_I = a_1^2 \cdot [(2l + a) \cdot (p_{\max} + p - 2G / A) + (p_{\max} - p) \cdot l] / 12$$

X 方向 (b 方向) 柱边 (绕 Y 轴) :

$$M_I = (b - hc)^2 \cdot [(2l + bc) \cdot (p_{\max} X + pX - 2G / A) + (p_{\max} X - pX) \cdot l] / 48$$

$$pX = p_{\min} X + (p_{\max} X - p_{\min} X) \cdot (b + hc) / 2b$$

$$= 53.8 + (135.9 - 53.8) \cdot (6.1 + 0.45) / 6.1 / 2 = 97.9 \text{ kPa}$$

$$M_I = (6.1 - 0.45)^2 \cdot [(2 \cdot 6.8 + 0.45) \cdot (135.9 + 97.9 - 2 \cdot 2548.9 / 41.48) + (135.9 - 97.9) \cdot 6.8] / 48 = 1208.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Y 方向 (l 方向) 柱边 (绕 X 轴) :

$$M_{II} = (l - bc)^2 \cdot [(2b + hc) \cdot (p_{\max} Y + pY - 2G / A) + (p_{\max} Y - pY) \cdot b] / 48$$

$$pY = p_{\min} Y + (p_{\max} Y - p_{\min} Y) \cdot (l + bc) / 2l$$

$$= 67.9 + (121.8 - 67.9) \cdot (6.8 + 0.45) / 6.8 / 2 = 96.7 \text{ kPa}$$

$$M_{II} = (6.8 - 0.45)^2 \cdot [(2 \cdot 6.1 + 0.45) \cdot (121.8 + 96.7 - 2 \cdot 2548.9 / 41.48) + (121.8 - 96.7) \cdot 6.1] / 48 = 1144.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

配筋计算

$$M_I \max = 1208.6 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_{II} \max = 1144.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

①号筋  $A_s I = 3407 \text{ mm}^2$  (x=120mm) 相对受压区高度  $\xi = 0.096$

$$a_s = 50 \text{ mm} \quad \text{配筋率 } \rho = 0.07\%$$

$$\rho_{\min} = 0.15\% \quad A_{sI} \min = 8104 \text{ mm}^2 \quad 56\Phi 14 @ 120 \quad (A_s = 8621)$$

②号筋  $A_s II = 3256 \text{ mm}^2$  (x=120mm) 相对受压区高度  $\xi = 0.097$

$$a_s = 62 \text{ mm} \quad \text{配筋率 } \rho = 0.07\%$$

$$\rho_{\min} = 0.15\% \quad A_{sII} \min = 7316 \text{ mm}^2 \quad 50\Phi 14 @ 120 \quad (A_s = 7697)$$

柱下局部受压承载力计算

$$F_l \leq \omega \cdot \beta_l \cdot f_{cc} \cdot A_l \quad (\text{混凝土规范式 A.5.1-1})$$

$$\text{局部荷载设计值 } F_l = 1386.5 \text{ kN}$$

$$\text{混凝土局部受压面积 } A_l = bc \cdot hc = 202500 \text{ mm}^2$$

基础在柱下局部受压时的计算底面积按下列公式计算:

$$A_b = (b_x + 2c) \cdot (b_y + 2c)$$

$$c = \text{Min}\{C_x, C_y, b_x, b_y\} = \text{Min}\{50, 50, 450, 450\} = 50 \text{ mm}$$

$$A_b = (450 + 2 \cdot 50) \cdot (450 + 2 \cdot 50) = 302500 \text{ mm}^2$$

$$\text{混凝土局部受压时的强度提高系数 } \beta_l = (A_b / A_l)^{0.5} = (0.303 / 0.203)^{0.5} = 1.222$$

$$\omega \cdot \beta_l \cdot f_{cc} \cdot A_l = 1.0 \cdot 1.222 \cdot 0.85 \cdot 9554 \cdot 0.203 = 2010.0 \text{ kN}$$

$$\geq F_l = 1386.5 \text{ kN}, \text{ 满足要求。}$$

## 2.7 本章小结

网球场罩棚设计简洁、优美、大气，但是由于其跨度较大，杆件布置相对简单，其受力情况难以做较大的调整，为设计工作增加了不少的困难，但是由于搭接结构的设计，优化了受力性能，提高了结构的稳定性，减少了扭转效应。

## 第三章 数值风洞模拟

### 3.1 引言

近几十年来,大跨度空间结构在国内外发展迅速,广泛应用于体育场馆、影剧院、大型机库等诸多大型建筑中。如今随着材料与技术的不断发展,大跨度结构也日趋复杂多样,该结构体系的运用成功与否,往往可反映一个国家的整体建筑科技水平。正因为如此,面向于该结构体系的分析技术也得到了较快的发展(CAD/CAM技术、有限元分析方法、数值分析理论等)。

结构风工程的研究方法主要分以下三种:现场实测方法、风洞试验方法及数值模拟方法<sup>[1-2]</sup>。

大气边界层现场实测法是研究结构抗风问题的最直接手段。Hoexy<sup>[3]</sup>等人针对不同的屋面房屋进行了实尺度模型风压试验,结果表明建筑结构的几何外型对结构的风效应

有较明显的影响。美国德州理工大学风工程研究实验室的TTU建筑模型是以真实原型建筑为背景的一种标准模型,对其进行的现场测量提供了大量珍贵的数据。英国的Silsoe研究中心的方块模型实验结果常被用来进行湍流模型的验证。现场实测法虽然仍旧将是今后的研究热点,但其试验方法费时费力,无法在建筑建成前实施的特点还是制约了其发展。

风洞试验方法是目前风工程研究领域不可替代的研究手段。Kassem(1992)进行了空间膜结构建筑的气弹模型试验,比较了一系列相关参数对结构风振响应的影响;Kawamura<sup>[4]</sup>等(1986)对系列空间膜结构的刚性和弹性模型进行了风洞试验研究;李元齐等<sup>[5]</sup>(2005)对球面网壳风压特性的风洞试验研究。风洞试验分析方法非常有效,但是在模型制作和实验过程中要满足几何相似、雷诺数、阻尼数等参数的一致性条件存在这较大的困难。

经过近50年的发展,在基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的领域出现了多种数值算法,根据对控制方程的离散方法的不同,可以分成三个分方面:有限差分法(Finite Difference Method, FDM)、有限体积方法(Finite Volume Method, FVM)和有限元方法(Finite Element Method, FEM)<sup>[6]</sup>。

建筑结构的风绕流和风效应分析与风场湍流的数值模拟密切相关。上世纪80年代后期起,在CFD体系中发展了各种湍流模拟方法。湍流数值模拟方法包括直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS),雷诺平均方法(Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS)和大涡模拟方法(Large Eddy Simulation, LES)<sup>[7]</sup>。

工程中湍流的数值模拟中最常用的是雷诺平均方法。雷诺平均方法通过求解时均化的Navier-Stokes方程实现,脉动值与时均值的关系通过引入湍流模型来考虑。常用湍流模型包括零方程模型:C-S模型;B-L模型。一方程模型:Spalart-Allmaras(S-A)模型;B-B模型。二方程模型:标准 $k-\varepsilon$ 模型,SST $k-\varepsilon$ 模型。零方程模型计算量小,不需考虑边界层厚度,但对分离区的流动模拟效果不佳;二方程模型精度较高,工程应用广,但计算量大,收敛困难。一方程S-A湍流模型,对网格质量的要求较低,计算量较小。雷诺平均方法是目前使用最为广泛的湍流数值模拟方法<sup>[8]</sup>。

## 3.2 雷诺平均方程湍流模型的应用--标准 $k-\varepsilon$ 模型

标准  $k-\varepsilon$  模型只要求解湍动能及其耗散率方程。湍动能输运方程是通过精确的方程推导得到，但耗散率方程是通过物理推理，数学上模拟相似原形方程得到的。该模型假设流动为完全湍流，分子粘性的影响可以忽略。因此，对于标准  $k-\varepsilon$  模型来说，只能模拟完全湍流的流动过程。

标准  $k-\varepsilon$  模型的湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  方程为如下形式：

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3-1)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-2)$$

在上述方程中， $G_k$  表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生， $G_b$  是用于浮力影响引起的湍动能产生； $Y_M$  可压速湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响。湍流粘性系数

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}。$$

在 FLUENT 中，作为默认值常数， $C_{1\varepsilon}=1.44$ ， $C_{2\varepsilon}=1.92$ ， $C_\mu=0.09$ ，湍动能  $k$  与耗散率  $\varepsilon$  的湍流普朗特数分别为  $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。可以通过调节“粘性模型”面板来调节这些常数值。

## 3.3 网球场三维风场数值模拟与分析

### 3.3.1 简述

本网球场虽然不是一个非常大的工程，但是由于设计简洁，形态优美，使上部结构单拱跨度达到 42 米，按照规范要求，理应进行风洞实验分析，但是考虑到其使用功能较为单纯，周边环境良好，甲方不予提供实验预算。

本着为工程负责的态度，结合本人获批的上海交通大学本科生创新实践项目“湍流二维和三维钝体绕流数值模拟”的研究成果，本章将基于计算流体软件 FLUENT，运用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型，对此网球场就行补充分析。

### 3.3.2 风的特性

#### 3.3.2.1 平均风

平均风是在给定时间段内，风的大小和方向不随时间改变的量。作用于结构上的平均风引起的风荷载，称为平均风荷载或静力风荷载。我国荷载规范规定计算静力风压的公式为：

$$\overline{w} = \mu_s \mu_z \mu_r \omega_0 \quad (3-3)$$

其中， $\omega_0$  为建筑物所在地区的基本风压； $\mu_r$  为重现期调整系数； $\mu_s$  为风荷载体型系数，由我国荷载规范确定； $\mu_z$  为风压高度变化系数，考虑了地面粗糙度及风速随高度变化的影响。平均风随高度变化的规律一般有对数风剖面 and 指数风剖面两种表达形式。

根据空气动力学理论，风速与其在结构单位面积上产生的风压的关系为：

$$W = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} v^2 \quad (3-4)$$

其中， $\gamma$  为空气容重， $g$  为重力加速度该式中  $\gamma$  为空气容重 ( $\text{kN/m}^3$ )。  $g$  为重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。

在不同的地理位置和不同的条件下，其  $\gamma$  和  $g$  是不相同的，因而式中的系数  $\gamma/g$  不是一个常数。在标准大气压情况下，设  $\gamma=0.012018 \text{ kN/m}^3$ ， $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 。则

$$\frac{\gamma}{2g} = \frac{0.012018}{2 \times 9.81} \approx \frac{1}{1630} \quad (3-5)$$

在一般情况下，为方便起见常取

$$\frac{\gamma}{2g} = \frac{1}{1600} \quad (3-6)$$

由式 (4-5) 和式 (4-6) 的换算关系式和系数，可将基本风速  $v_0$  换算为基本风压  $w_0$ ，即

$$w_0 = \frac{1}{1600} v_0^2 \quad (3-7)$$

基本风压系以当地比较空旷平坦地面上离地 10m 高统计所得的 50 年一遇 10min 平均最大风速  $v_0$  (m/s) 为标准确定的风压，基本风压值不得小于  $0.3 \text{ KN/m}^2$ 。

我国不同城市和地区的基本风压直接查用《建筑结构荷载规范》的全国基本风压分布图。当城市或建设点的基本风压不能查用时，基本风压值可根据当地最大风速资料，按基本风压定义，通过统计分析确定。

对于本算例来说，默认的基本风压为  $w_0 = 0.35 \text{ kN/m}^2$ ，即  $v_0 = 23.7 \text{ m/s}$ 。

### 3.3.3 计算区域和边界条件

以网球场钢架为原型，建模过程如下。首先在网格划分软件 GAMBIT 中简历起结构模型，如图 4-1，该结构全长 84 米，宽度为 42 米，矢高为 6.4 米。

流场计算域长 5000 米，宽 2000 米，高 100 米。如图 4-2 所示。计算域大体上划分为 9 块，按照离模型由近到远逐渐稀疏。网格单元数为 501881，节点数为 91991。

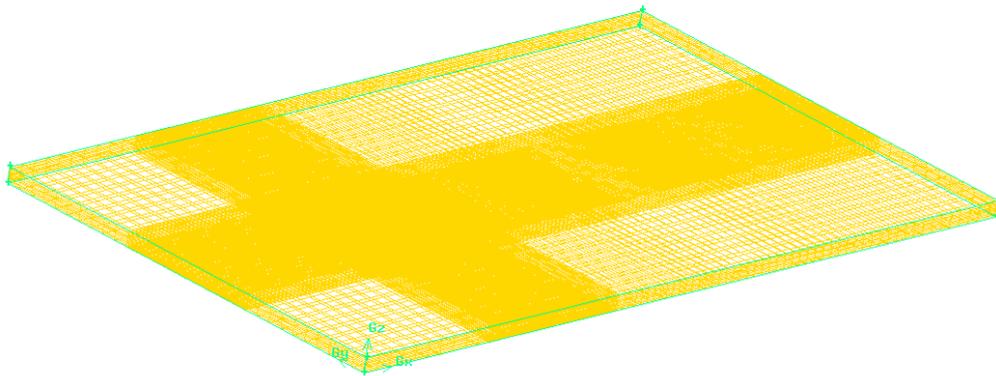


图 4-1 计算域划分图

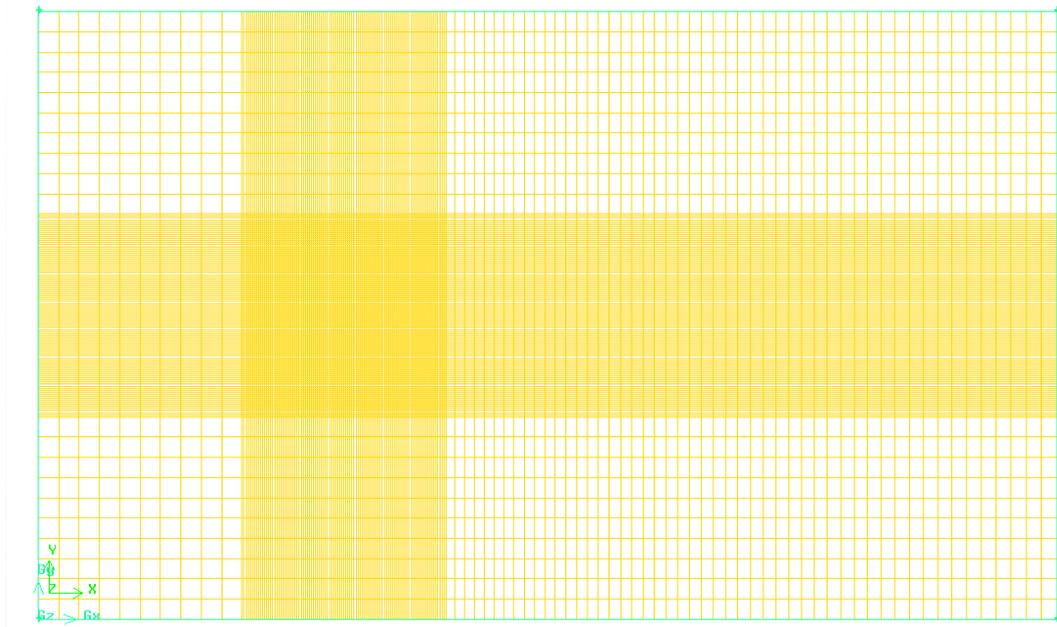


图 4-2 计算域 xy 平面的网格划分图



图 4-3 计算域 yz 平面的网格划分图



图 4-4 计算域 xz 平面的网格划分图

本算例所用的计算域是在进风处将面定义为速度进口边界条件（velocity-inlet），出口条件设置为自由流出（outflow），计算顶面和侧面设置为对称边界（symmetry），无题表面和计算域底面设定为固壁（wall）。

计算域的建立和确定都在 GAMBIT 软件里面进行，完成上述步骤后，可将网格导入 fluent 软件中计算。

- 1、速度进口（velocity-inlet）：给出进口速度及需要计算的所有标量值。该边界条件适用于不可压缩流动问题，对可压缩问题不适用，否则该入口边界条件会使入口处的总温或总压有一定的波动
- 2、自由流出（outflow）：该边界条件用以模拟在求解问题之前，无法知道出口速度或者压力；出口流动符合完全发展条件，出口处，除了压力之外，其他参量梯度为零，但并不是所有问题都适合，有三种情况不能用自由出流边界条件：包含压力进口条件；可压缩流动问题；有密度

变化的非稳定流动（即使是不可压缩流动）。

- 3、对称边界（symmetry）：对称边界条件适用于流动及传热场是对称的情况。
- 4、固壁边界（wall）：对于粘性流动问题，FLUENT 默认设置是壁面无滑移条件。对于壁面有平移运动或者旋转运动时，可以指定壁面切向速度分量，也可以给出壁面切应力从而模拟壁面滑移。

### 3.2.4 计算结果与分析

本工程中考虑了三种情况的来风对建筑物的影响，分别为 X 向来风，Y 向来风，以及 45 度角向来风。建筑物为左右对称和中心对称，三个方向的来风基本上能够满足工程中设计的需要。

为了便于分析，将分别展示三种风向下结构的 45 度轴测风压图以及 xy 平面俯视风压图。

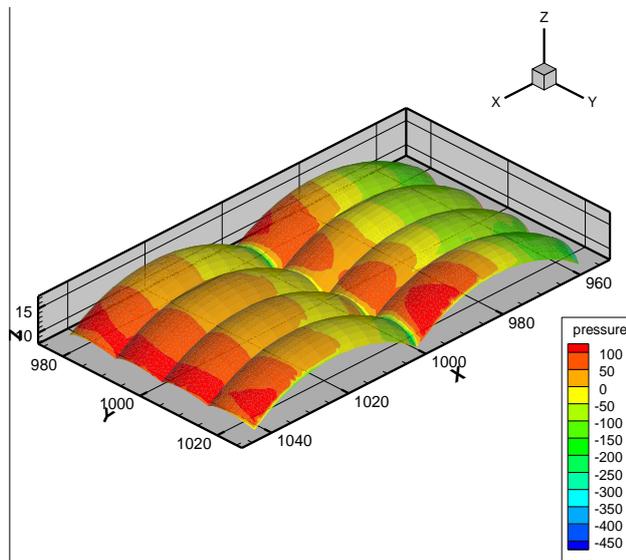


图 4-5 (a) X 向来风风压分布轴测图

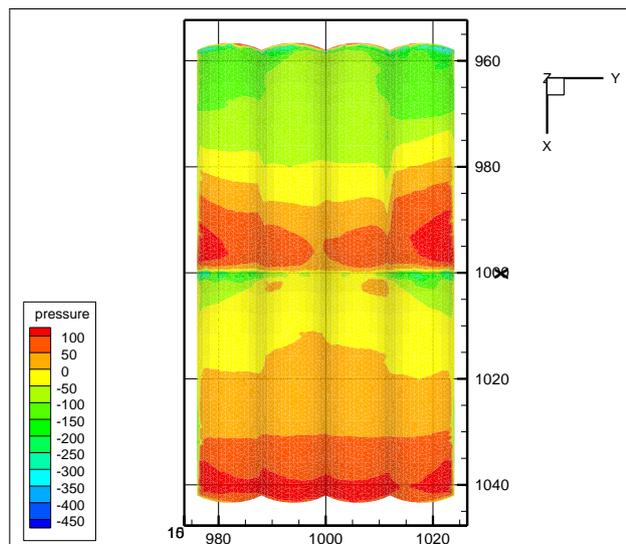


图 4-5(b) X 向来风风压分布 xy 平面图

X 正向来风主要以，第一纵向拱和第二纵向拱迎风面受压为主，受压区集中在坡角为正的面上，而背风面基本上都是负压区。并且第一个拱的受压区要大于第二个拱，第二个拱在迎风面就已经出现了负压区，随着斜率的减小，负压区的数值越来越大。这与规范所示的四面有墙连续拱有一定的相似性。不过在数值上有一些差异。在第二拱上规范里是没有出现正压区的，这里第二拱上出现了负压区并且值还是比较大的，这与规范相比有一定的不同。

但是规范里只有关于四面有墙的结构，而不是四面开场的结构，这应该是造成差异的原因。

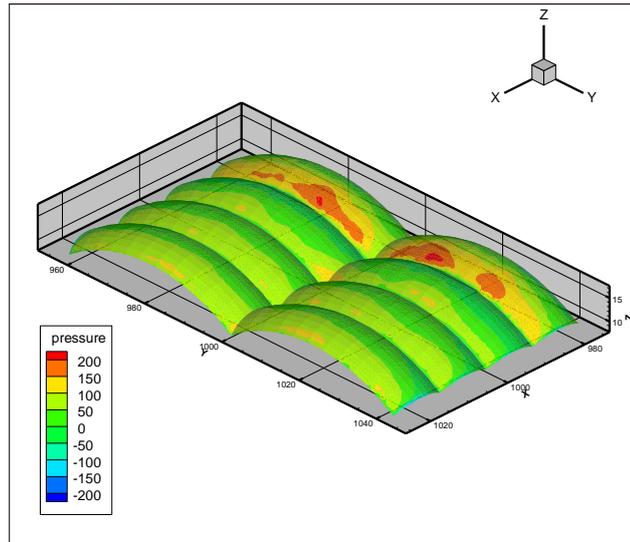


图 4-6(a) Y 向来风风压分布轴测图

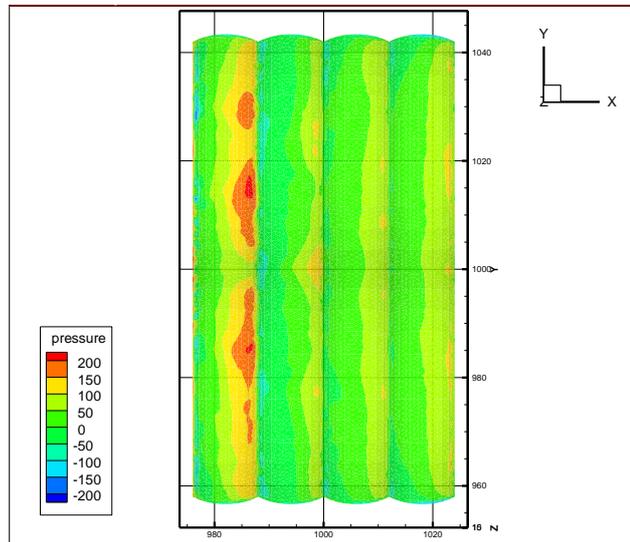


图 4-6(b) X 向来风风压分布轴 xy 平面图

Y 向来风对于结构来说相对 X 向来风整体风压较小，主要以负压为主，直到第四个迎风面出现了正压，其余迎风面都以负压出现，这与规范中类似的模型有所不同。不过大致的分布还是有相似性地，规范中的迎风角的线性取值与计算数据有一定的差距，但是分布规律有极高的吻合。

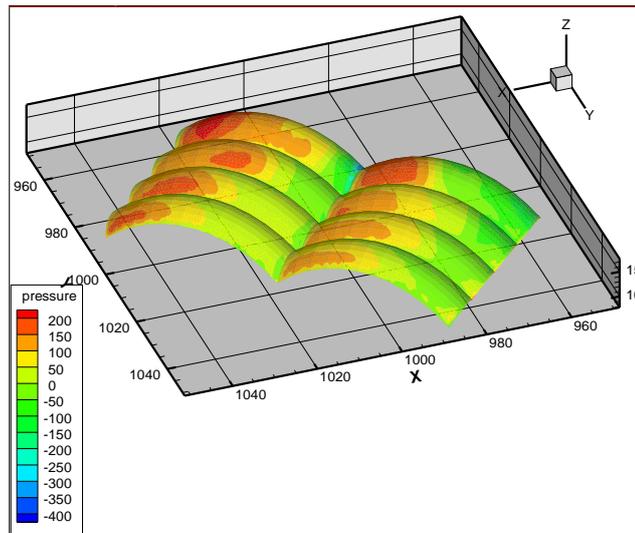


图 4-7(a) 45 度向来风风压分布轴测图

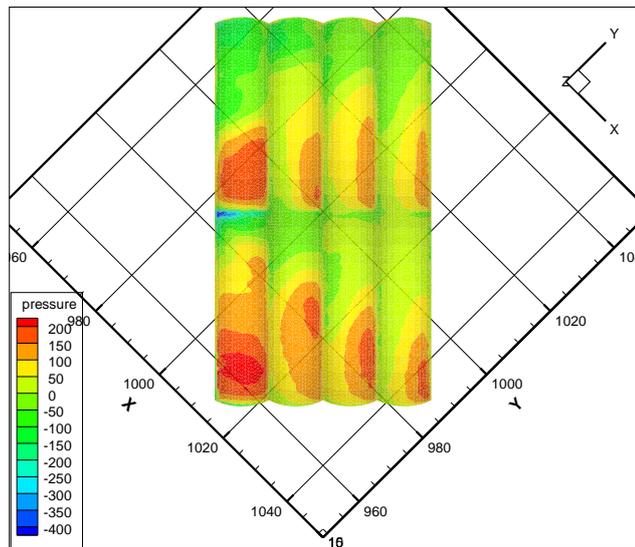


图 4-7(b) 45 度向来风风压分布轴 xy 平面图

45 度风向角时，迎风面上出现锥形角，这对风压有一定的放大作用。由于锥形区的出现，其后部产生涡脱落，导致在迎风面上出现负压区，呈现出前压后吸的分布形态。并且在横向四个拱中，由右向左其正压分布面积逐渐增加。

### 3.3 结论

本章基于 FLUENT 软件，使用标准  $k-\varepsilon$  模型、对网球场架进行了风荷载的模拟，通过改变风向角，得到了不动情况下的基本风压分布图，经过分析结构风压图，得到了以下几点结论：

(1) 在 23.7m/s 的风速下，对本结构无的风压在不考虑风振的情况下，风压基本上在 0.5kPa 以下。在相对较大的区域里，风压最大为 0.2kPa，局部很小的区域可能超过上限值达到约 0.45kPa。

(2) 风压的分布情况与规范上的有一定的区别, 出现负压的区域比规范中的区域更大, 而且在第

一大跨的迎风面出现了负压, 而在第二跨的迎风面出现了正压, 这与规范上的方向正好相反。考虑到规范里面不是四面开敞的情况, 而与实际建立模型建立模型时是以四面开敞的情况进行建立, 得到的结果应更加接近实际情况。

(3) 对于此结构来说, 迎风面为正压区, 背风面为负压区。

(4) 在结构物的边角上, 出现很多微小区域的应力放大现象, 并且数值较大。

### 3.4 工程应用

通过数值模拟可以提出以下几点具有指导意义的意见:

(1) 风压取值上可按规范取值, 在不考虑风振的情况下取  $0.8\text{kN/m}^2$ , 这样提供了 1.6 倍的安全储备。

(2) 考虑到每种工况下风荷载的分布不同, 施加荷载时应按照不同风向角, 按不同工况进行施加, 大体可分为, X 向风、Y 向风以及 45 度角方向风。其中迎风面应按照正压取值, 背风面应按照负压取值。

(3) 对于膜面的边界应该予以更多的安全储备, 不过由于边界处都有钢结构网架, 可对膜面进行比较的好的约束。不过在节点处的连接需要注意构造。

### 3.5 补充说明

对于此结构的模拟仍然存在一些不足, 希望在以后的研究中找到更加适合的方法加以改善。具体有以下几个方面:

(1) 由于结构体型复杂, 在网格划分时, 边界的处理相对困难, 特别是在非常接近物体表面的地方, 不得不使用四面体网格代替六面体网格, 导致这一区域网格较为杂乱, 网格质量有所下降, 影响计算精度。

(2) 设置来风时采用的是剖面风, 风的情况相对实际情况较为简单, 如果能够进行脉动风的时程分析将会更加接近真实情况。

(3) 对于此结构, 没有考虑振动的情况, 风振系数仍然按照经验进行取值。

希望此建筑的甲方能够做一次风洞试验, 以便得到更加真实的数据, 既是对结构物的安全负责, 也是对设计提供极大的帮助, 以免设计时存在更多的未知情况, 导致截面取得过大, 增加结构造价。

## 参考文献

- [1] 董石麟, 姚谏. 网壳结构的未来与展望. 空间结构[J], 1994, 1: 3-10.
- [2] 董石麟, 赵阳, 周岱. 我国空间钢结构发展中的新技术、新结构[J]. 土木工程学报, 1998, 31(6): 3-14.
- [3] Hoxey R P, Rubertson A P. Pressure coefficients for low-rise building envelopes driven from full-scale experiments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53: 283-297
- [4] Kawamura S, Kiuchi T. An experimental study of a one-membrane type pneumatic structure wind load and response [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 23: 127-140.
- [5] 李元齐, 田村幸雄, 沈祖炎. 球面壳体表面风压分布特性风洞实验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 104-111.
- [6] Davenport A G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. Civil Eng Proc. Inst 1961, 19(3): 449-472.
- [7] 汪从军, 黄本才, 徐晓明, 林高. 环状悬挑屋盖平均风压与风环境数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 711-715.
- [8] 汪从军, 黄本才, 徐晓明, 林高. 体育场环状悬挑屋盖脉动风压数值模拟, 《力学季刊》-2005, 4
- [9] 中华人民共和国行业标准: 建筑结构可靠度设计统一标准(GB50068-2001) [S]
- [10] 中华人民共和国行业标准: 建筑工程抗震设防分类标准(GB50223-2004) [S]
- [11] 中华人民共和国行业标准: 建筑结构荷载规范(GB50009-2012) [S]
- [12] 中华人民共和国行业标准: 混凝土结构设计规范(GB50010-2010) [S]
- [13] 中华人民共和国行业标准: 建筑抗震设计规范(GB50011-2010) [S]
- [14] 中华人民共和国行业标准: 建筑地基基础设计规范(GB50007-2011) [S]
- [15] 中华人民共和国行业标准: 钢结构设计规范(GB50017-2003) [S]
- [16] 李峰, 窦鹏, 王磊. 风荷载模拟方法探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 22(4): 57-59.
- [17] 崔家春. 世博轴阳光谷整体稳定性分析研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 3(1): 73-78.
- [18] 周岱, 马骏, 李华峰, 等. 大跨柔性空间结构风压和耦合风效应分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 17-22.
- [19] 马骏. 大跨空间结构的风场和流固耦合风效应研究与精细识别[博士论文]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [20] V. Shankar, H. Ide. Aeroelastic Computations of Flexible Configurations[J]. J. Computer and Structures. 1988, 30: 15-28.
- [21] L. Demkowicz. Some Remarks on Moving Finite Element Methods[J]. J. Computer methods in Application Mechanics and Engineering. 1984, 46: 339-349.
- [22] V. Kalro, T.E. Tezduyar. A Parallel 3D Computational Method for Fluid-Structure Interactions in

- Parachute Systems[J]. J. Computer methods in Application Mechanics and Engineering, 2000, 190: 321-332.
- [23] Y. Bao, D. Zhou, Y.Z. Zhao. A two-step Taylor-characteristic-based Galerkin method for incompressible flows and its application to flow over triangular cylinder with different incidence angles[J]. J. Numerical Methods in Fluids, 2010, 62(11): 1181-1208.
- [24] Y. Bao, D. Zhou, C. Huang. Numerical simulation of flow over three circular cylinders in equilateral arrangements at low Reynolds number by a second-order characteristic-based split finite element method[J]. J. Computers and Fluids, 2010, 39(5): 882-899.
- [25] E. Oñate. Derivation of stabilized equations for advective-diffusive transport and fluid flow problems[J]. J. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 151(1-2): 233-267.

## 致 谢

经过长达三个月的时间，我完成了自己的毕业设计及其研究。这是一段充满意义的旅程。

在这段旅途中，我首先要感谢我敬爱的周岱老师。他不仅为我找到一个好的设计单位，让我圆满的完成设计任务，而且在设计和论文研究的过程中为我答疑解惑。论文的完成离不开周老师的严格要求，以及对时间节点的良好把握，既让我的工作丰富多彩，又让我的工作保质保量。这对我今后的学习与研究都提供了良好的指导。

同时我要感谢设计院带领我的姚总、张工、于工，他们在我的设计过程中给予我最大的帮助，对于他们来说，我是一个对于设计行业的门外汉，但是他们并没有因为我的无知而感到不耐烦，对我的一些基础的问题也给出了非常仔细的回答和指导，对于设计过程中的知识，他们倾囊相授，让我感到土木这个行业前辈们对后辈们的关心爱护，也感到现代集团的优良传统。

我还要感谢课题组的韩兆龙师兄，涂佳黄师兄，何涛师兄，乔帅斌师兄，李如地师兄，以及已经毕业的李俊龙师兄和孙颖昊学姐。你们对我的研究进行了全方位的指导。从一开始的入门，指明我的研究方向，到软件中各种细节问题，再到论文的撰写，每一个过程都与你们的帮助密不可分，让我从一个什么都不懂的本科生，初步建立起一定的科研素养，为我今后的研究打下了坚实的基础。

我还要感谢我的土木专业的同学，你们在学习和生活中给予我帮助和鼓励，带给我不一样的大学生活，让我的生活和学习充实，使我变得更加自信，这对我来说是一笔宝贵的财富，生命中有你们而变得精彩万分。

最后我要感谢上海交通大学，我亲爱的母校给了我所有的一切，没有交大这么优秀的平台，我也就没办法认识这些良师益友，希望母校能发展的更好。

陈怡然

2013.6.9

# 附录

## 附录 1

附表 1 地震反应谱曲线数据

Name	Period Sec	Accel	FuncDamp
UNIFRS	0.000000	1.000000	0.050000
UNIFRS	1.000000	1.000000	
FUNC1	0.000000	0.018000	0.050000
FUNC1	0.100000	0.040000	
FUNC1	0.350000	0.040000	
FUNC1	0.525000	0.027800	
FUNC1	0.700000	0.021400	
FUNC1	0.875000	0.017500	
FUNC1	1.050000	0.014900	
FUNC1	1.225000	0.013000	
FUNC1	1.400000	0.011500	
FUNC1	1.575000	0.010300	
FUNC1	1.750000	0.009397	
FUNC1	1.925000	0.009257	
FUNC1	2.100000	0.009117	
FUNC1	2.275000	0.008977	
FUNC1	2.450000	0.008837	
FUNC1	2.625000	0.008697	
FUNC1	2.800000	0.008557	
FUNC1	2.975000	0.008417	
FUNC1	3.150000	0.008277	
FUNC1	3.325000	0.008137	
FUNC1	3.500000	0.007997	
FUNC1	2.675000	0.007857	
FUNC1	3.850000	0.007717	
FUNC1	4.025000	0.007577	
FUNC1	4.200000	0.007437	
FUNC1	4.375000	0.007297	
FUNC1	4.550000	0.007157	
FUNC1	4.725000	0.007017	
FUNC1	4.900000	0.006877	
FUNC1	5.075000	0.006737	

附表 1 地震反应谱曲线数据

Name	Period Sec	Accel	FuncDamp
FUNC1	5.250000	0.006597	
FUNC1	5.425000	0.006457	
FUNC1	5.600000	0.006317	
FUNC1	5.775000	0.006177	
FUNC1	5.950000	0.006037	
FUNC1	6.000000	0.005997	

附录 2

附表 2 内力组合

ComboName	ComboType	CaseName	ScaleFactor
UDSTL1	Linear Add	DEAD	1.350000
UDSTL1		LIVE	0.980000
UDSTL2	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL2		LIVE	1.400000
UDSTL3	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL3		LIVE	1.400000
UDSTL4	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL4		WINDX	1.400000
UDSTL5	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL5		WINDX	-1.400000
UDSTL6	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL6		WINDY	1.400000
UDSTL7	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL7		WINDY	-1.400000
UDSTL8	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL8		WINDX	1.400000
UDSTL9	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL9		WINDX	-1.400000
UDSTL10	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL10		WINDY	1.400000
UDSTL11	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL11		WINDY	-1.400000
UDSTL12	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL12		LIVE	1.400000
UDSTL12		WINDX	0.840000
UDSTL13	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL13		LIVE	1.400000
UDSTL13		WINDX	-0.840000
UDSTL14	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL14		LIVE	1.400000
UDSTL14		WINDY	0.840000
UDSTL15	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL15		LIVE	1.400000
UDSTL15		WINDY	-0.840000
UDSTL16	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL16		LIVE	1.400000

附表 2 内力组合

ComboName	ComboType	CaseName	ScaleFactor
UDSTL16		WINDX	0.840000
UDSTL17	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL17		LIVE	1.400000
UDSTL17		WINDX	-0.840000
UDSTL18	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL18		LIVE	1.400000
UDSTL18		WINDY	0.840000
UDSTL19	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL19		LIVE	1.400000
UDSTL19		WINDY	-0.840000
UDSTL20	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL20		LIVE	0.980000
UDSTL20		WINDX	1.400000
UDSTL21	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL21		LIVE	0.980000
UDSTL21		WINDX	-1.400000
UDSTL22	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL22		LIVE	0.980000
UDSTL22		WINDY	1.400000
UDSTL23	Linear Add	DEAD	1.200000
UDSTL23		LIVE	0.980000
UDSTL23		WINDY	-1.400000
UDSTL24	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL24		LIVE	0.980000
UDSTL24		WINDX	1.400000
UDSTL25	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL25		LIVE	0.980000
UDSTL25		WINDX	-1.400000
UDSTL26	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL26		LIVE	0.980000
UDSTL26		WINDY	1.400000
UDSTL27	Linear Add	DEAD	1.000000
UDSTL27		LIVE	0.980000
UDSTL27		WINDY	-1.400000
DSTL4	Linear Add	SPECTRUM 1	1.300000
DSTL5	Linear Add	SPECTRUM 1	1.300000

### 附录 3

Chinese 2002 钢截面检查 单位: KN, mm, C (组合与测站的细节)

Element: 269 测站位置: 12150.000 Length: 48600.000

Section ID: **gg3 195x6.35** 类型: Nonsway Moment Frame **Combo ID: UDSTL1**

Orientation: Beam Design Element Type: Beam

A=3763.400 I<sub>33</sub>=16760841.58 W<sub>33</sub>=171906.067 z<sub>33</sub>=226074.372 i<sub>33</sub>=66.736

J=33521683.2 I<sub>22</sub>=16760841.58 W<sub>22</sub>=171906.067 z<sub>22</sub>=226074.372 i<sub>22</sub>=66.736

E=200.000 RLLF=1.000 Ae/A=0.900

f<sub>y</sub>=0.345 SI : Nonseismic Gamma<sub>RE</sub> : 无

f=0.310 Gamma<sub>0</sub> : 1.000 Seismic MF : 无 Dual System SMF : 无

f<sub>v</sub>=0.180

Tall Building : Yes Rolled : No Gas Cut : No

Two End Pinned : No Cantilever : No Top Loaded : Yes

Flexo-Comp : No Ignore B/T : Yes Point Load : Yes

应力检查 — 力和弯矩 (系数化组合) (GB50017 5.2.5)

	N	M <sub>33</sub>	M <sub>22</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>
Combo UDSTL19	0.000	44964.511	18908.751	-3.179	-2.825

拉弯构件和压弯构件设计

N-M33-M22 应力比

控制方程	总数	N 比率	M 主 比率	M 次 比率	比率 限制	状态 检查
(4.2.3)	0.915 =	0.000 +	0.844 +	0.355	0.950	OK

弯曲失稳轴向放大系数

截面类别	λ <sub>n</sub> 比率	α <sub>1</sub> 系数	α <sub>2</sub> 系数	α <sub>2</sub> 系数	φ 系数
主 B	2.407	0.650	0.965	0.300	0.151
次 B	2.407	0.650	0.965	0.300	0.151

Euler 屈曲承载力和相关的弯矩系数

	μ 系数	L 系数	λ 比率	Euler N 力	M 系数
主抗弯	1.000	0.250	182.062	203.742	1.000
次抗弯	1.000	0.250	182.062	203.742	1.000

其它弯矩系数

	γ	β <sub>m</sub>	β <sub>t</sub>	η	φ <sub>b</sub>
主抗弯	1.000	1.000	1.000	0.700	1.000
次抗弯	1.000	1.000	1.000	0.700	1.000

应力比 --- 控制截面 (4.2.3)

	力/弯矩	实际应力	允许应力	应力比率	比例系数
轴向	0.000	0.000	0.310	0.000	0.000
主抗弯	44964.511	0.262	0.310	0.844	1.000
次抗弯	18908.751	0.110	0.310	0.355	1.000
剪力设计	--- 控制截面(主 5.1.6, 次 5.1.6)				
	V 力	$\tau$ 应力	fv 允许	应力比率	假想剪力
主剪力	11.328	0.009	0.180	0.047	Yes
次剪力	11.328	0.000	0.180	0.000	Yes

Chinese 2002 钢截面检查 单位: KN, mm, C (组合与测站的细节)

Element: 153 测站位置: 9685.459 Length: 9685.459

Section ID: **gg6 350x10** 类型: Nonsway Moment Frame **Combo ID: UDSTL10**

Orientation: Brace Design Element Type: Brace

A=10681.415  $I_{33}=154479964.8$   $W_{33}=882742.656$   $z_{33}=1156333.333$   $i_{33}=120.260$   
 $J=308959929.5$   $I_{22}=154479964.8$   $W_{22}=882742.656$   $z_{22}=1156333.333$   $i_{22}=120.260$   
 $E=200.000$   $RLLF=1.000$   $A_e/A=0.900$

$f_y=0.345$  SI : Nonseismic  $\Gamma_{RE}$  : 无

$f=0.310$   $\Gamma_{0}$  : 1.000 Seismic MF : 无 Dual System SMF : 无

$f_v=0.180$

Tall Building : Yes Rolled : No Gas Cut : No

Transfer Column: No Ignore B/T : Yes

应力检查 — 力和弯矩 (系数化组合) (GB50017 5.2.5)

	N	$M_{33}$	$M_{22}$	$V_2$	$V_3$
Combo UDSTL10	-1211.569	-53695.270	1734.951	15.498	0.062

拉弯构件和压弯构件设计

N-M33-M22 应力比

控制方程	总数	N 比率	M 主 比率	M 次 比率	比率限制	状态检查
JGJ99 6.4.6	0.652 =	0.652 +	0.000 +	0.000	0.950	OK

弯曲失稳轴向放大系数

截面类别	$\lambda_n$ 比率	$\alpha_1$ 系数	$\alpha_2$ 系数	$\alpha_2$ 系数	$\varphi$ 系数
主 B	1.065	0.650	0.965	0.300	0.561
次 B	1.065	0.650	0.965	0.300	0.561

Euler 屈曲承载力和相关的弯矩系数

	$\mu$	L	$\lambda$	Euler N M	
	系数	系数	比率	力	系数
主抗弯	1.000	1.000	80.538	2955.077	1.488
次抗弯	1.000	1.000	80.538	2955.077	1.488
其它弯矩系数					
	$\gamma$	$\beta_m$	$\beta_t$	$\eta$	$\varphi_b$
主抗弯	1.000	0.850	0.850	0.700	1.000
次抗弯	1.000	1.000	1.000	0.700	1.000
应力比 --- 控制截面 JGJ99 6.4.6					
	力/弯矩	实际应力	允许应力	应力比率	比例系数
轴向	-1211.569	0.113	0.310	0.366	1.782
主抗弯	-53695.270	0.061	0.310	0.196	0.000
次抗弯	1734.951	0.002	0.310	0.006	0.000
剪力设计 --- 控制截面(主 4.1.2, 次 5.1.6)					
	V 力	$\tau$ 应力	$f_v$ 允许	应力比率	假想剪力
主剪力	15.498	0.003	0.180	0.016	No
次剪力	0.000	0.000	0.180	0.000	Yes

Chinese 2002 钢截面检查 单位: KN, mm, C (组合与测站的细节)

Element: 48 测站位置: 0.000 Length: 1000.00

Section ID: **gg2 450x15** 类型: Nonsway Moment Frame **Combo ID: UDSTL20**

Orientation: Column Design Element Type: Column

A=20498.892 I<sub>33</sub>=485439388. W<sub>33</sub>=2157508.390 z<sub>33</sub>=2839500.000 i<sub>33</sub>=153.887  
 J=970878775. I<sub>22</sub>=485439388. W<sub>22</sub>=2157508.390 z<sub>22</sub>=2839500.000 i<sub>22</sub>=153.887  
 E=200.000 RLLF=1.000 Ae/A=0.900

f<sub>y</sub>=0.345 SI : Nonseismic Gamma\_RE : 无

f=0.310 Gamma\_0 : 1.000 Seismic MF : 无 Dual System SMF : 无

f<sub>v</sub>=0.180

Tall Building : Yes Rolled : No Gas Cut : No

Transfer Column: No Ignore B/T : Yes

应力检查 — 力和弯矩 (系数化组合) (GB50017 5.2.5)

	N	M33	M22	V2	V3
Combo UDSTL20	-1018.617	325513.563	-222234.426	325.474	-222.234

拉弯构件和压弯构件设计

N-M33-M22 应力比

控制方程	总数	N	M 主	M 次	比率	状态
(5.2.1)	0.767 =	0.178 +	0.487 +	0.332	0.950	OK

弯曲失稳轴向放大系数

截面类别	$\lambda_n$ 比率	$\alpha_1$ 系数	$\alpha_2$ 系数	$\alpha_2$ 系数	$\varphi$ 系数
主 B	0.086	0.650	0.965	0.300	0.995
次 B	0.086	0.650	0.965	0.300	0.995

Euler 屈曲承载力和相关的弯矩系数

	$\mu$ 系数	L 系数	$\lambda$ 比率	Euler N 力	M 系数
主抗弯	1.000	1.000	6.498	871108.130	1.001
次抗弯	1.000	1.000	6.498	871108.130	1.001

其它弯矩系数

	$\gamma$	$\beta_m$	$\beta_t$	$\eta$	$\varphi_b$
主抗弯	1.000	0.650	0.650	0.700	1.000
次抗弯	1.000	0.650	0.650	0.700	1.000

应力比 --- 控制截面 (5.2.1)

	力/弯矩	实际应力	允许应力	应力比率	比例系数
轴向	-1018.617	0.050	0.310	0.160	1.000
主抗弯	325513.563	0.151	0.310	0.487	1.000
次抗弯	-222234.426	0.103	0.310	0.332	1.000

剪力设计 --- 控制截面(主 4.1.2, 次 5.1.6)

	V 力	$\tau$ 应力	$f_v$ 允许	应力比率	假想剪力
主剪力	325.474	0.038	0.180	0.214	No
次剪力	61.702	0.000	0.180	0.000	Yes

Chinese 2002 钢截面检查 单位: KN, mm, C (组合与测站的细节)

Element: 133 测站位置: 0.000 Length: 21300.000

Section ID: **gg5 750x35** 类型: Nonsway Moment Frame **Combo ID: UDSTL21**

Orientation: Column Design Element Type: Column

A=78618.356 I<sub>33</sub>=5035997077 W<sub>33</sub>=13429325.54 z<sub>33</sub>=17907166.67 i<sub>33</sub>=253.093  
 J=1.007E+10 I<sub>22</sub>=5035997077 W<sub>22</sub>=13429325.54 z<sub>22</sub>=17907166.67 i<sub>22</sub>=253.093  
 E=200.000 RLLF=1.000 Ae/A=0.900

f<sub>y</sub>=0.345 SI : Nonseismic Gamma\_RE : 无

f=0.295 Gamma\_0 : 1.000 Seismic MF : 无 Dual System SMF : 无

f<sub>v</sub>=0.170

Tall Building : Yes Rolled : No Gas Cut : No

Transfer Column: No Ignore B/T : Yes

应力检查 — 力和弯矩 (系数化组合) (GB50017 5.2.5)

	N	M <sub>33</sub>	M <sub>22</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>
Combo UDSTL21	-829.337	-3217245.4	-385271.223	-381.596	-63.384

拉弯构件和压弯构件设计

N-M33-M22 应力比

控制	总数	N	M 主	M 次	比率	状态
方程	比率	比率	比率	比率	限制	检查
(5.2.1)	0.858 =	0.040 +	0.812 +	0.097	0.950	OK

弯曲失稳轴向放大系数

截面	$\lambda_n$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_2$	$\varphi$
类别	比率	系数	系数	系数	系数
主 B	1.113	0.650	0.965	0.300	0.533
次 B	0.564	0.650	0.965	0.300	0.845

Euler 屈曲承载力和相关的弯矩系数

	$\mu$	L	$\lambda$	Euler N	M
	系数	系数	比率	力	系数
主抗弯	1.000	1.000	84.159	19918.807	1.034
次抗弯	1.000	0.507	42.672	77477.396	1.009

其它弯矩系数

	$\gamma$	$\beta_m$	$\beta_t$	$\eta$	$\varphi_b$
主抗弯	1.000	0.850	0.850	0.700	1.000
次抗弯	1.000	0.850	1.000	0.700	1.000

应力比 --- 控制截面 (5.2.1)

	力/实际	允许	应力	比例	
	弯矩	应力	应力	比率	系数
轴向	-829.337	0.011	0.295	0.036	1.000
主抗弯	-3217245.4	0.240	0.295	0.812	1.000
次抗弯	-385271.223	0.029	0.295	0.097	1.000

剪力设计 --- 控制截面(主 4.1.2, 次 5.1.6)

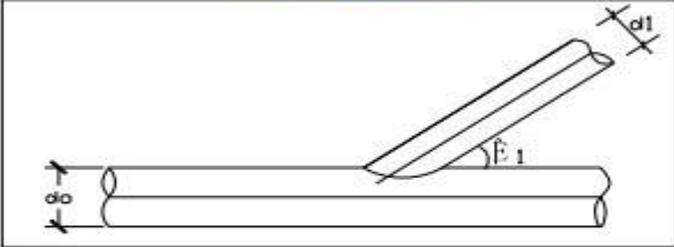
	V	$\tau$	f <sub>v</sub>	应力	假想
	力	应力	允许	比率	剪力
主剪力	381.596	0.010	0.170	0.058	No
次剪力	225.191	0.000	0.170	0.000	Yes

附录 4

<b>ATKINS</b>		JOB: 丽水	JOB NO.	208	
				page	1
Section				made by	
Subject	相贯节点计算		Date	2013/5/23 14:33	

**T、Y型节点计算**



**1. 基本数据输入**

N=	0 kN	$f_y =$	310 N/mm <sup>2</sup>
d0=	195 mm	$f_0 =$	310 N/mm <sup>2</sup>
t0=	6.25 mm	$f_v =$	200 N/mm <sup>2</sup>
A=	3706 mm <sup>2</sup>	$\theta =$	30 °
d1=	150 mm	$\sigma =$	-129.00 N/mm <sup>2</sup>
t1=	6.25 mm	$f_t^w =$	160 N/mm <sup>2</sup>
M1=	7 kN.m	$N' =$	41 kN
M2=	15 kN.m		

**2. 计算系数**

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} = 0.769$$

$$\psi_\sigma = 1 + 0.3 \frac{\sigma}{f_y} - 0.3 \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^2 = 0.823$$

$\beta \leq 0.7$ 时,  $\psi_d = 0.069 + 0.93\beta$   
 $\beta > 0.7$ 时,  $\psi_d = 2\beta - 0.68$

由上可得:  
 $\psi_d = 0.858$

**3. 容许腹杆承载力**

受压腹杆

$$N_c^* = \frac{12.12 t_0^2 f_0}{\sin \theta_1} \left( \frac{d_0}{t_0} \right)^{0.2} \psi_\sigma \psi_d = 412.78 \text{ kN} \geq N \quad \text{OK!}$$

受拉腹杆

$\beta \leq 0.6$ 时,  $N_a^* = 1.4 N_{ic}^*$   
 $\beta > 0.6$ 时,  $N_a^* = (2 - \beta) N_c^*$

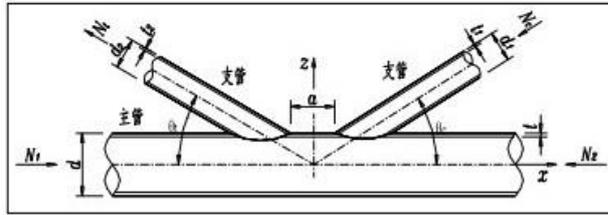
由上得:  $N_a^* = 508 \text{ kN} \geq N \quad \text{OK!}$

Checked by	Drawing No.
------------	-------------

<b>ATKINS</b>		<b>JOB:</b> 丽水	<b>JOB NO.</b>	208
			<b>page</b>	2
<b>Section</b>	BUILDING STRUCTURE		<b>made by</b>	
<b>Subject</b>	相贯节点计算	<b>Date</b>	2013/5/23 14:33	
<p><b>4. 冲切剪力(主管抗剪力)</b></p> $N_i^* = t_o f_v \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i} = 1767 \quad \text{kN} \geq N \quad \text{OK!}$ <p><b>5. 节点焊缝设计计算</b></p> $\frac{d_i}{d_o} = 0.769 > 0.65$ <p>当 <math>d_i/d_o \leq 0.65</math> 时,</p> $l_w = (3.25d_i - 0.025d_o) \left( \frac{0.534}{\sin \theta_i} + 0.466 \right)$ <p>当 <math>d_i/d_o &gt; 0.65</math> 时,</p> $l_w = (3.81d_i - 0.389d_o) \left( \frac{0.534}{\sin \theta_i} + 0.466 \right)$ <p>由上可得:</p> $l_w = 760.3 \quad \text{mm}$ $h_f = 0.5 \quad \text{mm}$ <p>采用 <math>h_f = 12.0 \quad \text{mm}</math></p> $\sigma_f = \frac{N_s}{h_f l_{w0}} \leq f_f^w \quad \text{OK!}$ <p><b>6. 按日本规范计算</b></p> $\gamma = 15.60$ $M_{1a} = 21.3 \quad \text{kN.m} \quad Pa = 59 \quad (\text{for TP2})$ $M_{2a} = 7.7 \quad \text{kN.m} \quad M_{1a}' = 3.31 \quad (\text{for TP2})$ $\frac{P_r}{P_o} + \frac{M_1}{M_{1o}} + \frac{M_2}{M_{2o}} = 2.38$ <p>受弯焊缝高度计算如下:</p> $\frac{N}{0.7 h_f l_w} + \frac{M}{W} = 38.932 \leq f_t^w = 160 \text{N/mm}^2$ <p>其中:</p> $W = \frac{0.7 \frac{\pi}{64} [(d_s - t_s + h_f)^4 - (d_s - t_s - h_f)^4]}{d_s/2} \left( \frac{0.534}{\sin \theta} + 0.466 \right) = 201810.0 \quad \text{mm}^3$ $l_w' = l_w + d_r - 2t_r = 897.8 \quad \text{mm}$ $W' = \frac{0.7 h_f}{6} (d_s - 2t_s)^2 + W = 474701 \quad \text{mm}^3$ <p>加劲钢板长度 <math>L = d_i - 2t_i = 442 \quad \text{mm}</math></p>				
<b>Checked by</b>		<b>Drawing No.</b>		

### K型节点计算

节点号: 17



#### 1. 基本数据输入

内力		截面尺寸		材料属性		支管和主管夹角	
N1=	0 kN	d=	400 mm	E=	206000 N/mm <sup>2</sup>	theta_t=	27
N2=	0 kN	t=	10 mm	f_y=	345 N/mm <sup>2</sup>	theta_c=	27
N_t=	92.5 kN	d1=	350 mm	f=	200 N/mm <sup>2</sup>	a=	20 mm
N_c=	-92.5 kN	t1=	6 mm	f_v=	125 N/mm <sup>2</sup>		
		d2=	350 mm	f_r^w=	160 N/mm <sup>2</sup>		
		t2=	6 mm				
		A=	122.52 cm <sup>2</sup>				

#### 2. 基本参数计算

$$\frac{d}{t} = 40.00 \quad \frac{d_1}{t_1} = 56.00 \quad \frac{d_2}{t_2} = 56.00$$

$$\beta_1 = \frac{d_1}{d} = 0.88 \quad \beta_2 = \frac{d_2}{d} = 0.88 \quad \sigma = \min \left| \frac{N_i}{A_i} \right| = 0.0$$

$$\psi_n = 1 - 0.3 \left( \frac{\sigma}{f_y} \right) - 0.3 \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^2 = 1$$

$$\psi_d = \begin{cases} 0.069 + 0.93\beta & \beta \leq 0.7 \\ 2\beta - 0.68 & \beta > 0.7 \end{cases} = 1.07$$

$$\psi_a = 1 + \frac{2.19}{1 + \frac{7.5a}{d}} \left[ 1 - \frac{20.1}{6.6 + \frac{d}{t}} \right] 1 - 0.77\beta = 1.2955$$

#### 3. 支管节点处承载力设计值

##### 受压支管

$$N_{ck}^{pj} = \frac{11.51}{\sin \theta_c} \left( \frac{d}{t} \right)^{0.2} \psi_n \psi_d \psi_a t^2 f = 1469.91 \text{ kN} > -92.5 \text{ kN}$$

##### 受拉支管

$$N_{tk}^{pj} = \frac{\sin \theta_c}{\sin \theta_t} N_{ck}^{pj} = 1469.9 \text{ kN} > 92.5 \text{ kN}$$

#### 4. 节点焊缝设计计算

##### 支管与主管相交线长度

$$l_w = \begin{cases} (3.25d_i - 0.025d) \left( \frac{0.534}{\sin \theta_i} + 0.466 \right) & d_i/d \leq 0.65 \\ (3.81d_i - 0.389d) \left( \frac{0.534}{\sin \theta_i} + 0.466 \right) & d_i/d > 0.65 \end{cases}$$

$$l_{wc} = 1572 \quad \text{mm}$$

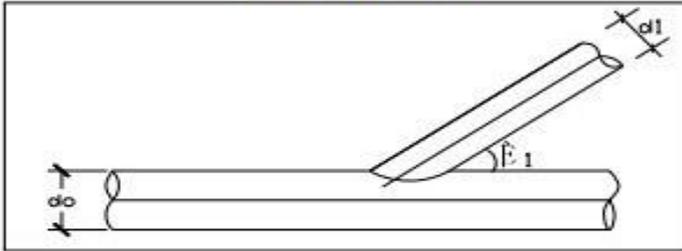
$$l_{wt} = 1572 \quad \text{mm}$$

选取  $h_f = 6 \quad \text{mm}$

##### 焊缝承载力

$$0.7 * h_f * l_{wc} * f_f^w = 1056.6 \quad \text{kN} < 1469.9 \quad \text{kN}$$

$$0.7 * h_f * l_{wt} * f_f^w = 1056.6 \quad \text{kN} < 1469.9 \quad \text{kN}$$

<h1 style="margin: 0;">ATKINS</h1>		JOB: 丽水	JOB NO.	17	
				page	1
Section				made by	
Subject	相贯节点计算	Date	2013/5/23 13:57		
<b>T、Y型节点计算</b>					
					
<b>1. 基本数据输入</b>					
N=	0 kN	$f_y=$	310 N/mm <sup>2</sup>		
d0=	400 mm	$f_0=$	310 N/mm <sup>2</sup>		
t0=	10 mm	$f_v=$	200 N/mm <sup>2</sup>		
A=	12252 mm <sup>2</sup>	$\theta_c=$	90 °		
d1=	350 mm	$\sigma =$	-129.00 N/mm <sup>2</sup>		
t1=	6.25 mm	$f_t^w=$	160 N/mm <sup>2</sup>		
M1=	510 kN.m	$N_c=$	75 kN		
M2=	17 kN.m				
<b>2. 计算系数</b>					
$\beta = \frac{d_1}{d_0} = 0.875$					
$\psi_s = 1 + 0.3 \frac{\sigma}{f_y} - 0.3 \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^2 = 0.823$					
$\beta \leq 0.7$ 时, $\psi_d = 0.069 + 0.93\beta$					
$\beta > 0.7$ 时, $\psi_d = 2\beta - 0.68$					
由上可得:					
$\psi_d = 1.070$					
<b>3. 容许腹杆承载力</b>					
受压腹杆					
$N_c^* = \frac{12 I_0^2 f_0}{\sin \theta_1} \left( \frac{d_0}{t_0} \right)^{0.2} \psi_s \psi_d = 692.1 \text{ kN} \geq N \quad \text{OK!}$					
受拉腹杆					
$\beta \leq 0.6$ 时, $N_d^* = 1.4 N_c^*$					
$\beta > 0.6$ 时, $N_d^* = (2 - \beta) N_c^*$					
由上得: $N_d^* = 779 \text{ kN} \geq N \quad \text{OK!}$					
Checked by			Drawing No.		

<b>ATKINS</b>		<b>JOB:</b> 丽水	<b>JOB NO.</b>	17
			<b>page</b>	2
<b>Section</b>	BUILDING STRUCTURE		<b>made by</b>	
<b>Subject</b>	相贯节点计算	<b>Date</b>	2013/5/23 14:26	
<p><b>4. 冲切剪力(主管抗剪力)</b></p> $N_i^* = t_o f_v \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i} = 2199 \quad \text{kN} \geq N \quad \text{OK!}$ <p><b>5. 节点焊缝设计计算</b></p> $\frac{d_1}{d_o} = 0.875 > 0.65$ <p>当 <math>d_1/d_o \leq 0.65</math> 时,</p> $l_w = (3.25d_i - 0.025d_o) \left( \frac{0.534}{\sin \theta_i} + 0.466 \right)$ <p>当 <math>d_1/d_o &gt; 0.65</math> 时,</p> $l_w = (3.81d_i - 0.389d_o) \left( \frac{0.534}{\sin \theta_i} + 0.466 \right)$ <p>由上可得:</p> $l_w = 1177.9 \text{ mm}$ $h_f = 0.6 \text{ mm}$ <p>采用 <math>h_f = 12.0 \text{ mm}</math></p> $\sigma_f = \frac{N_s}{h_e l_{w0}} \leq f_f^w \quad \text{OK!}$ <p><b>6. 按日本规范计算</b></p> $\gamma = 20.00$ $M_{1a} = 160.4 \text{ kN.m} \quad Pa = 126 \quad (\text{for TP2})$ $M_{2a} = 58.0 \text{ kN.m} \quad M_{1a}' = 21.03 \quad (\text{for TP2})$ $\frac{P_r}{P_o} + \frac{M_1}{M_{1o}} + \frac{M_2}{M_{2o}} = 3.58$ <p>受弯焊缝高度计算如下:</p> $\frac{N}{0.7 h_f l_w} + \frac{M}{W} = 384.95 > f_t^w = 160 \text{ N/mm}^2$ <p>其中:</p> $W = \frac{0.7 \frac{\pi}{64} [(d_s - t_s + h_f)^4 - (d_s - t_s - h_f)^4]}{\frac{d_s}{2}} \left( \frac{0.534}{\sin \theta} + 0.466 \right) = 766581.2 \text{ mm}^3$ $l_w' = l_w + d_r - 2t_r = 1515 \text{ mm}$ $W' = \frac{0.7 h_f}{6} (d_s - 2t_s)^2 + W = 1\text{E}+06 \text{ mm}^3$ <p>加劲钢板长度 <math>L = d_r - 2t_r = 642 \text{ mm}</math></p>				
<b>Checked by</b>		<b>Drawing No.</b>		

# LISHUI CITY SPORTS CENTER TENNIS STEEL DESIGN CALCULATIONS AND WIND RESEARCH

## ABSTRACT

With rapid development in long-span flexible spatial structure, more and more problems have been come into view. Not only the seismic load makes the structure unsafe, but with the increase in span and the decrease in weight, wind load come to dominate. The wind resistant research of long-span structure draws our attention these years. high-rise structure and long-span spatial structure are both wind sensitive structure, but they are almost different anyway.

In this paper we pay more attention on long-span spatial structure, because high-rise structures always have a simple shape, but long-span spatial structures have much more complex shape forms, as well as structure system. In fact, the building forms of long-span spatial structure represent a country's building technology level. That's why how fast the analysis of long-span spatial structure quickly developed recent years.

This paper is based on a project named Lishui City stadium demolition and reconstruction. The structure is 84 meters long, and the vertical span is 42 meters. According to China Building Load Code this structure should do wind tunnel test, but this building has a good surrounding environment and an easy using function, furthermore people won't get on the building. Investor refused to do the test, we are not confident in the wind load value we applied on the building, so we do a numerical wind tunnel experiment in the final chapter as a supplement. And this paper can be divided in two parts, one is calculation for the steel space structure, and another is numerical wind tunnel experiment.

In chapter one, we give general information of construction design. First, we introduce the surrounding environment of the project, including ground, fundament and the nearby buildings. Second, we list the material that used in the structure. That's concrete, steel, membrane and etc. Third, listing the standers and criterion we should meet in this project.

Chapter two explain some tips in calculation, making a shot explanation about this project's structure system, also mentioned load cases and load combinations.

Chapter three is the one of the most important parts in this paper, it's the main part of structure calculation.

The first sub-chapter is structure arrangement, which shows what the structure's plans and elevations look like. And the models we put in the software program.

The second sub-chapter is about the sizes of the frames and cables, which determined by the slenderness ratio.

The third sub-chapter calculates the load of this structure. It's a little complex to determinate the value that we put on the structure, cause the force transmission path is not the same way we hope

perfectly. We should set the force transmission path separately.

The fourth sub-chapter is force calculation. Calculation progress is mostly done by computer, using structure computing software SPA2000. We find out the most unfavorable section in all the load cases and combinations. Also find out maximum displacement of the structure, and the base reaction forces correspond.

The fifth sub-chapter is section checking and node checking. According to the results in sub-chapter four, section checking is complete in SPA2000. All the frames and cables meet the restrictions. For this software can't check the nodes automatically, we check nodes independently, using two EXCEL spreadsheets based on standards and criterion. We filter the most important and dangerous nodes, import their force values in the sheets, check whether they meet or not.

The last sub-chapter is foundation design. This part is using MORGEN software to check and design. All the foundation is up to the grade.

Above all, we finish the structure design.

Chapter four is the numerical wind tunnel experiment for this project.

Firstly, this dissertation introduced the study of numerical wind tunnel experiment at home and abroad. Wind flow around the building structure and wind effects analysis and numerical simulation of turbulent wind field is closely related. Since the late 1980s, a variety of CFD turbulence simulation methods have been developed in the system. Numerical Simulation of Turbulent methods include Direct Numerical Simulation, Reynolds Averaging Navier-Stokes Method and Large Eddy Simulation.

Secondly, this dissertation is focus on RANS turbulence model. Reynolds averaging method is the most widely used numerical method turbulence currently. Reynolds averaging method realize by solving the time-averaged Navier-Stokes equations, considering the mean value and the fluctuating relationship by introducing turbulence model. Including zero-equation turbulence model commonly used models: C-S model; B-L model. One equation models: Spalart-Allmaras (S-A) model; B-B model. Two equation model: the standard  $k-\varepsilon$  model, SST  $k-\varepsilon$  model. A small amount of zero-equation model, without considering the boundary layer thickness, but the separation zone flow simulation results are poor; two-equation model is high precision engineering applications broad, but computationally intensive, and difficult in convergence. One equation S-A turbulence model has lower requirements for mesh quality, asking less computation. This project chose the standard  $k-\varepsilon$  turbulence model.

Thirdly, this dissertation is using FLUENT to compute the model, and GMABIT to mesh. Grid cells number is 501,881, the number of nodes is 91,991. The project considered three cases to the influence of wind on buildings, namely X direction of the wind, Y direction of the wind, 45 degree angle direction of the wind. By analyzing the calculation data, we draw following conclusions:

(1) In the 23.7m / s wind speed, without considering the case of wind-induced vibration, air pressure is substantially less at 0.5Kpa.

(2) the distribution of pressure has a certain distinction with the Load Code for the Design of Building Structure, negative pressure area is larger than it shown on the code, but in the first span of the windward side of the emergence appeared negative pressure, while in the second span windward appeared positive, which is the opposite direction on the code. Considering all sides of the structure should be close on the code, but the actual model is entirely open all sides, which may lead these differences.

(3) In general, as the windward side is positive zone, leeward side is negative pressure zone.

(4) In the corners of the structure, there is much small stress amplification in the region, which is

caused by the boundary flow mutation.

By numerical simulation we get some conclusions, for this project, we can propose the following instructive comments:

(a) Air pressure value can be chose on the code, taking  $0.8\text{KN/m}^2$  without considering wind-induced vibration, provides a 1.6-fold safety margin.

(b) Taking into account the distribution of wind load conditions for each different, applying loads should be in accordance with the different wind directions at different working conditions imposed, can be roughly divided into, X direction of the wind, Y direction of the wind, 45 degree angle direction of the wind, Which should be in accordance with the positive values on the windward and negative values on the leeward.

(c) For the membrane surface boundary should have more safety margin, but due to boundary has steel grid, which can give the membrane surface a better constraint. However, the connection at the node of the structure needs more attention.

For the simulation of this structure, there are still some deficiencies. I hope to find a more suitable approach to be improved in future studies. Specifically aspects are as the follows:

(1) Due to the structure has a complex shape, meshing is very difficult with the boundary, especially in the place very close to the surface, has to use tetrahedral mesh instead of hexahedral mesh, which makes grids in the region clutter and the grids quality has declined, that's affecting the calculation accuracy.

(2) Wind condition was set to be , is relatively simple with the actual situation, it will be more close to the real situation if we can carry on fluctuating wind time history analysis.

(3) For this structure, without considering the case of vibration, wind load factors are still in accordance with the value of experience.

We hope that this building can do a wind tunnel test, in order to obtain a more realistic data, both responsible for the safety on the structures, but also provide great help to the design. In order to avoid design unknowns, resulting in cross-section to obtain is too large, increase the cost structure.

## 本科期间发表期刊论文

- [1]陈怡然, 周岱, 归洛圣.大跨组合形体空间结构风压分布与抗风优化分析.振动与冲击, 已录用。
- [2]陈亚楠, 陈怡然, 周岱, 孙颖昊, 马晋.典型组合形体空间膜结构风振响应的数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2012,46 (10): 1587-1593.
- [3]李俊龙, 周岱, 季清, 陈怡然. 低矮带檐口曲面四坡建筑屋面风压数值模拟和抗风优化.上海交通大学学报, 2013,47 (6): .46-52.