

南京工业大学土木工程学院2022年度科学报告会

# 大跨木张弦结构工程实践与创新

孙小鸾

建筑工程系

2022-12-28

**一 大跨木张弦结构工程应用情况**

**二 贵州省黔东南州榕江游泳馆**

# 大跨木张弦结构工程应用情况

## 背景：

- 胶合木受弯时，**受拉侧木材缺陷所造成构件过早破坏**，而此时**受压侧强度未充分发挥**，增加构件尺寸后，缺陷出现概率增加（**尺寸效应**），加大木构件截面已不再经济；
- 木材弹模低、纯木结构刚度小，为实现木结构更大跨度，提升结构刚度、控制变形及木材蠕变是关键；
- 张弦梁是一种有效的解决方式。

## 胶合木张弦梁：

20 世纪 80 年代，日本人斋藤公南 等首先尝试胶合木张弦梁体系的研究和应用，**发现该结构腹杆可为上弦刚性子结构提供多个弹性支点，有效减少子结构的跨度，从而减小上弦截面的高度。**

对预应力筋加强木梁，分别进行了预应力梁、单(双)腹杆木梁以及普通木梁的受力性能对比研究，结果发现预应力木梁、单腹杆、双腹杆木梁的承载能力及刚度依次提高。**可见，张弦木梁有着显著的优势。**

我校木结构团队在科学研究的基础上在**扬州园博会科技馆、苏州第二文化宫、吉林长春市民中心游泳馆以及贵州省黔东南州榕江游泳馆**等项目中成功应用了木结构张弦梁体系。







第十届江苏省园艺博览会  
10th Jiangsu Horticultural Expo

- 2018年9月在扬州枣林湾举办**第十届江苏省园艺博览会**，其中**主展馆**、南游客中心，西南侧游客中心等三栋建筑为现代胶合木建筑。
- 2021年世界园艺博览会也将在扬州枣林湾举办，该主展馆将成为中国园的主要展馆向世界展示。



2020年度江苏省第十九届优秀工程设计一等奖

### 方案设计:

东南大学 王建国院士 团队

### 木结构设计:

南京工业大学

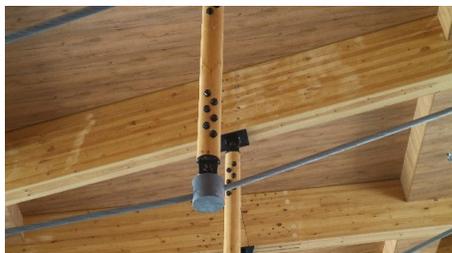
建筑面积: 13750 m<sup>2</sup>

木结构部分: 4750m<sup>2</sup>

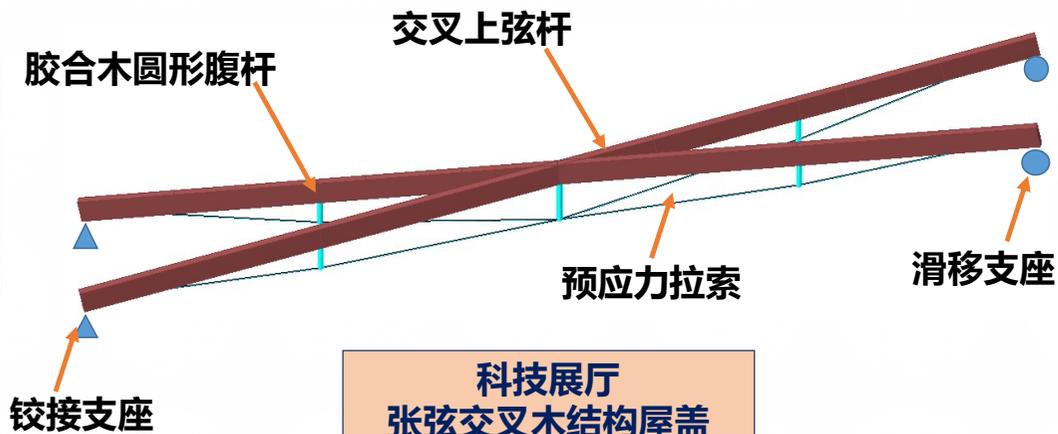
层数: 地上1-2层; 局部地下1层

建筑总高度: 约26m

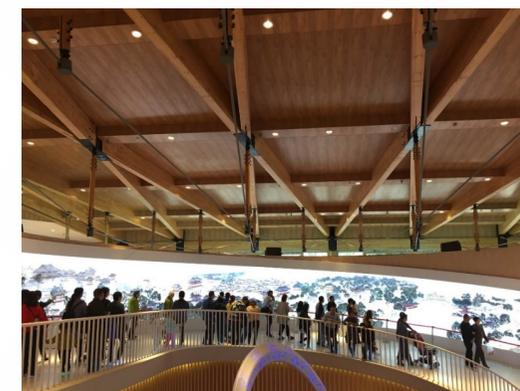
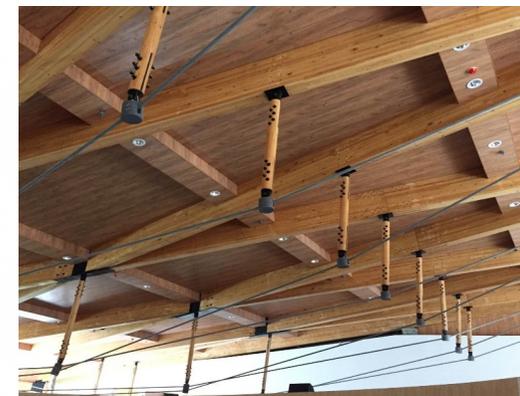




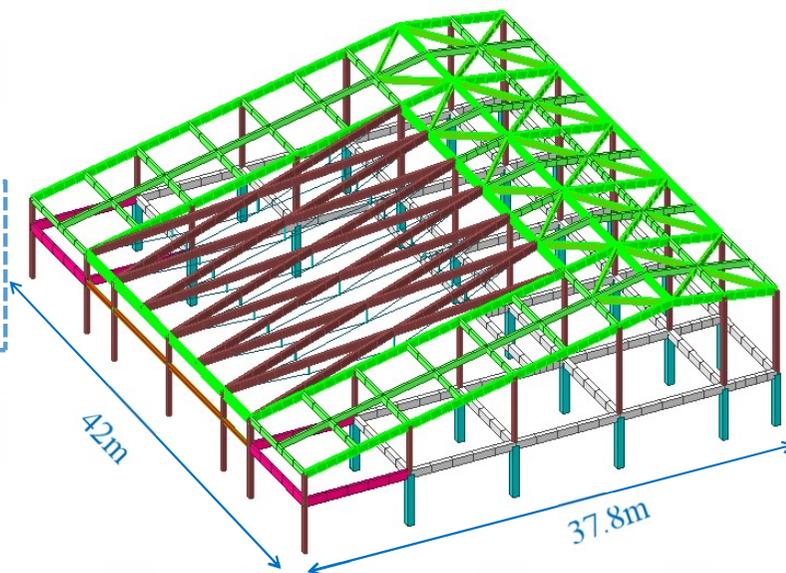
胶合木圆形腹杆

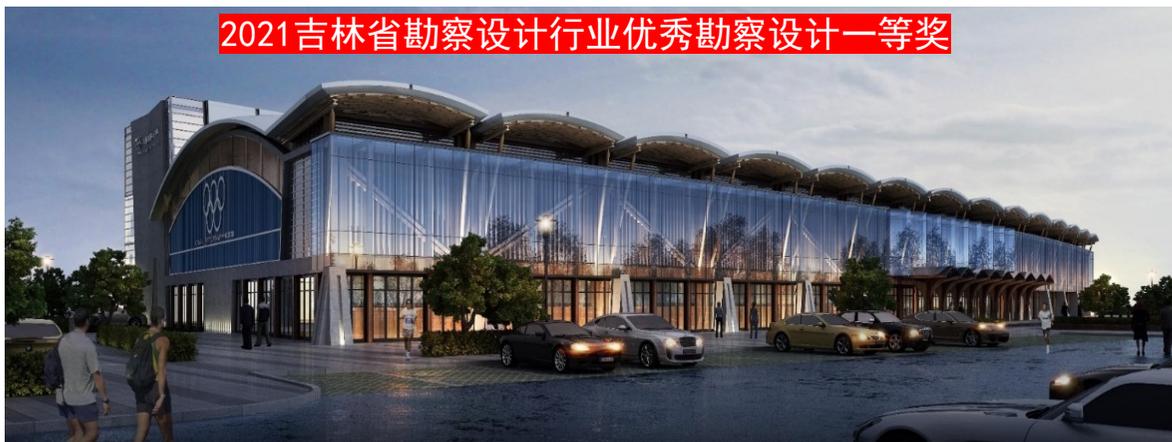


铰接支座



- 屋盖采用张弦交叉木结构;
- 上弦交叉梁构造有效提升屋盖平面内刚度。





■ **长春市民中心游泳馆**：木结构屋盖投影面积约4470m<sup>2</sup>，采用15道跨度40m，呈散形分布的胶合木张弦曲梁结构，上弦采用两根平行胶合木曲梁，腹杆采用V型钢腹杆（双索）。

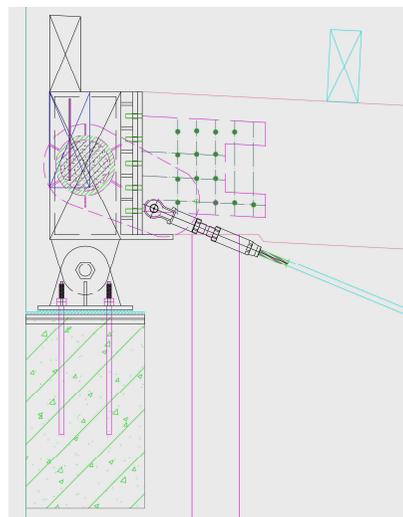
### 主要难点：

- 既有建筑的改造，受原支撑混凝土结构限制；
- 净空有要求，腹杆高度受限制，单索索力较大；

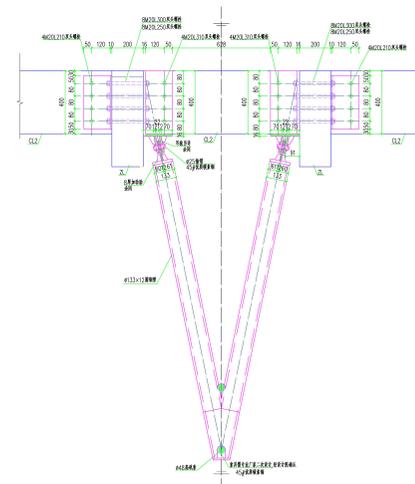
### 解决思路：

- 按阶段施工，并设置弹性支座，预应力张拉只平衡部分恒载；
- V型钢腹杆，双索的方式，同时利于替换。

委托方：吉林省建苑设计集团有限公司(原吉林省建筑设计院)  
结构设计：南京工业大学



支座构造



V型钢腹杆

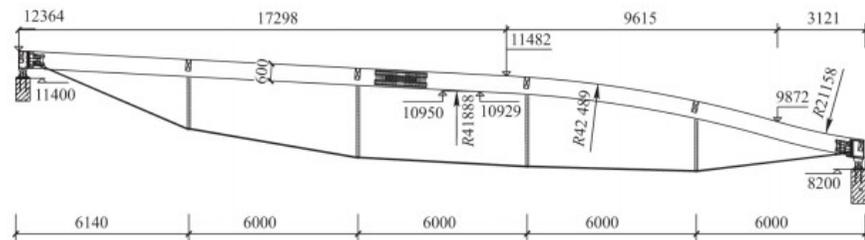


图5 曲梁试件立面图(单位: mm)



张弦屋盖



门厅



侧面弧形构件

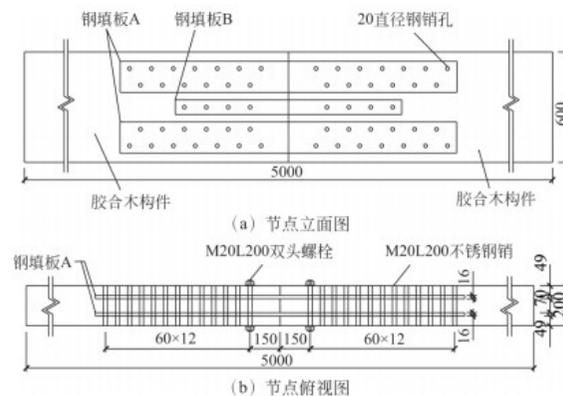
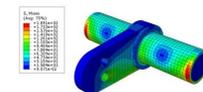


图2 拼接节点试件示意图(单位: mm)



加载试验







## 一 大跨木张弦结构工程应用情况

## 二 贵州省黔东南州榕江游泳馆



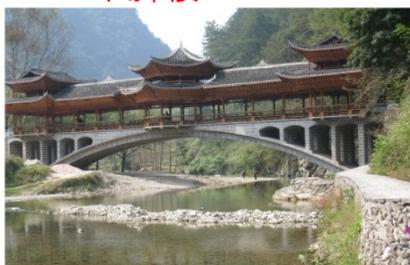
项目位于贵州省黔东南苗族侗族自治州榕江县，内设50×50m正式比赛池和25×25m训练池，总建筑面积11455m<sup>2</sup>，占地面积6180m<sup>2</sup>，建筑地下一层，地上两层，建筑高度为20.05m。二层以上采用木结构体系。

- 游泳馆中部花桥和鼓楼采用传统木结构，充分体现了民族特色和地域特点。
- 泳池上部屋盖采用张弦曲梁体系，跨度50.4m。
- 木拱采用2-170×1000mm双拼胶合木构件，沿弧长三段拼接。木拱采用6根木撑杆与主索形成张弦结构；

- 提取黔东南州特有的民族特色元素，将其融入到设计中，是对民族特色的继承和发扬。
- 项目难点在于解决50米跨度的屋盖。



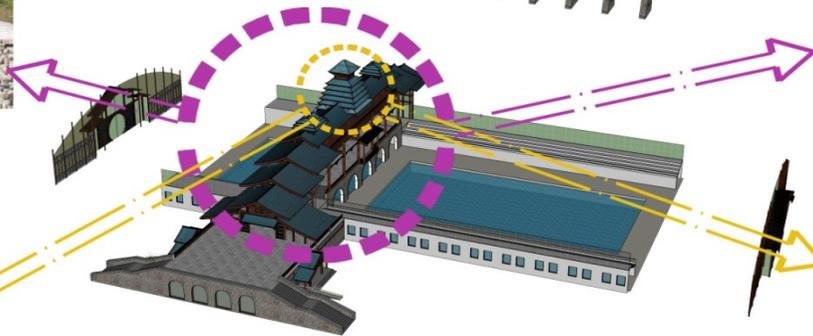
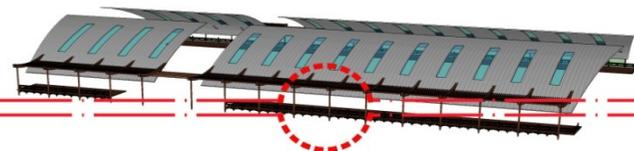
吊脚楼



风雨桥



鼓楼



吊脚楼



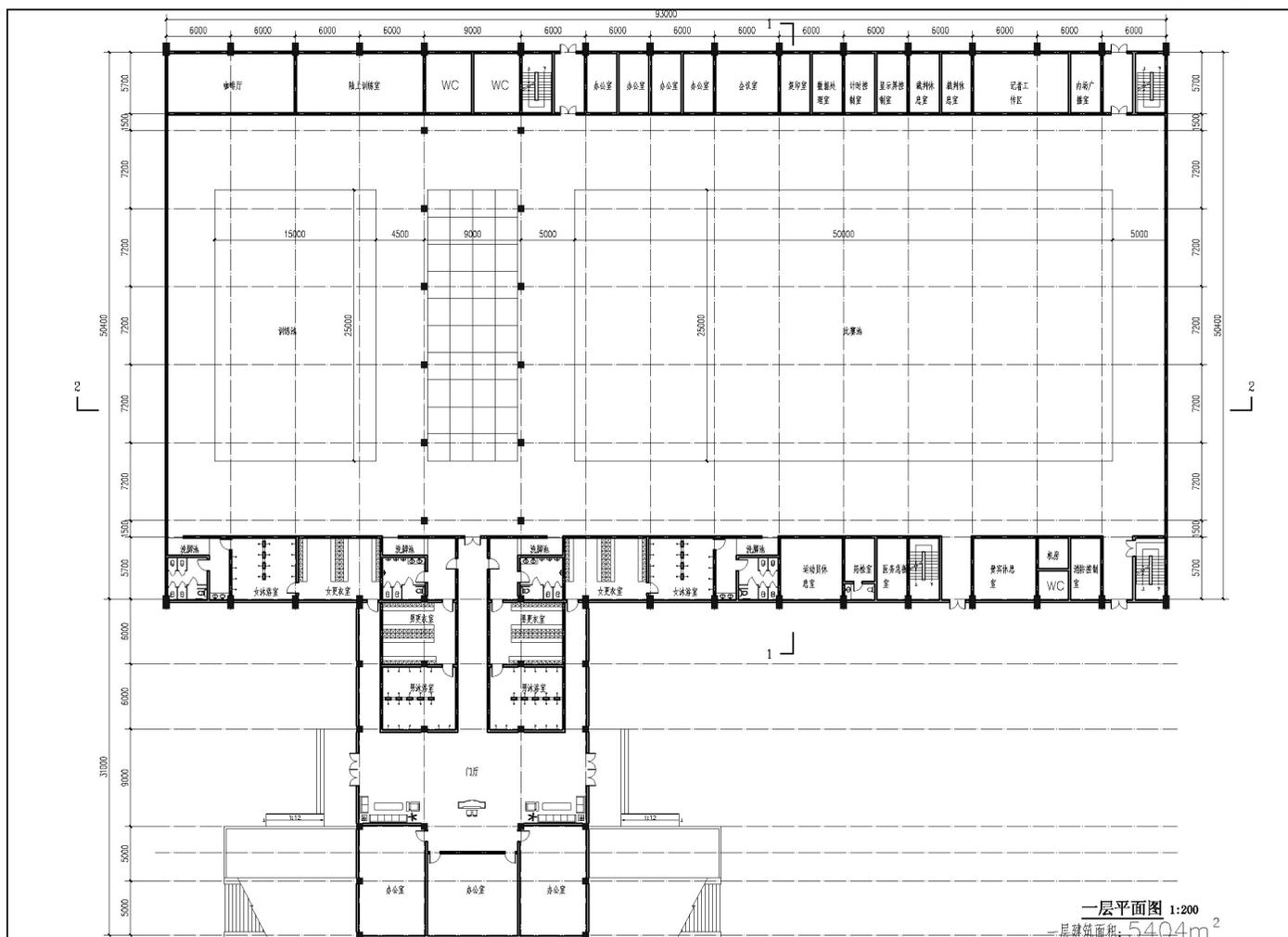
风雨桥

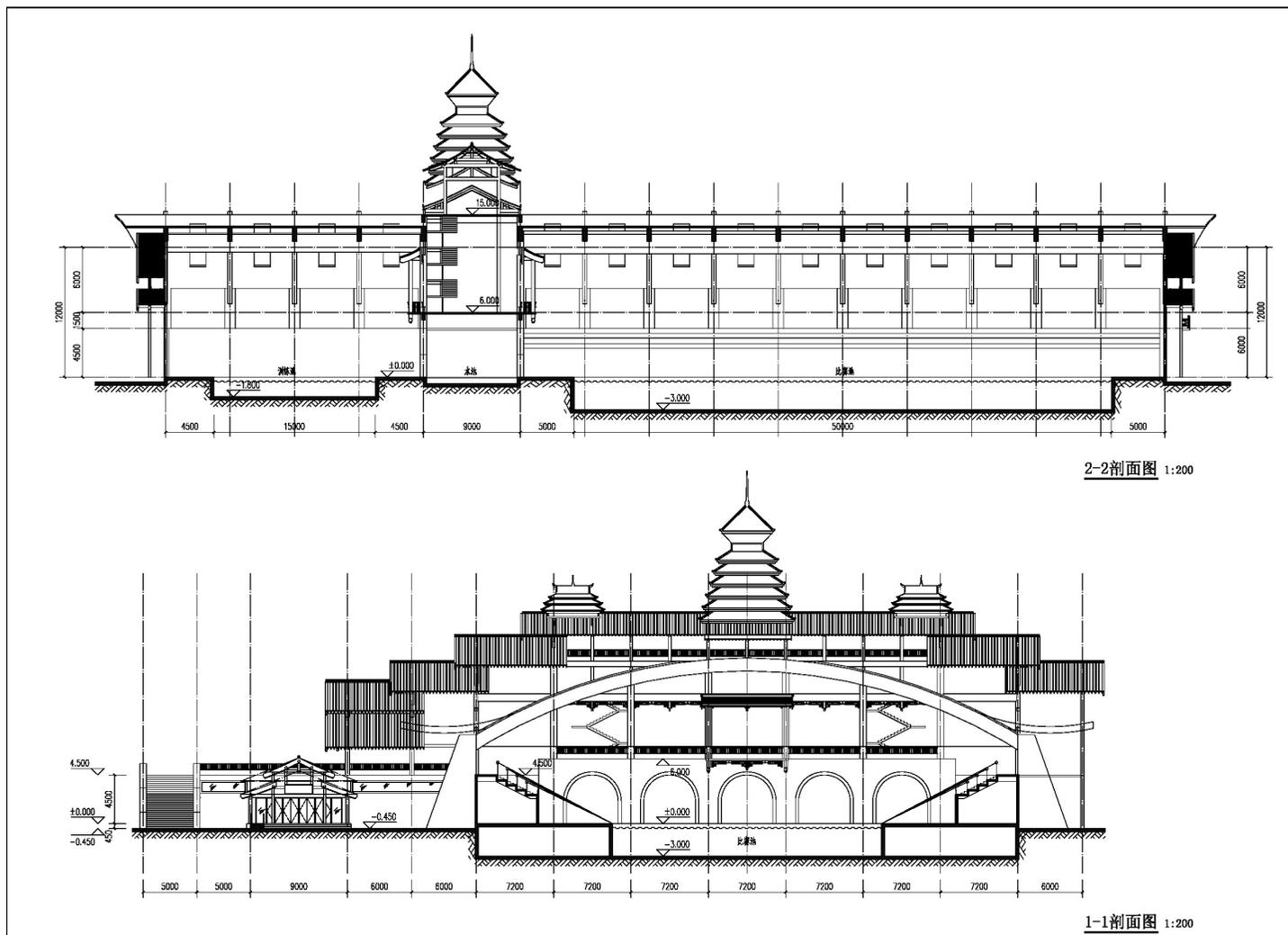


鼓楼

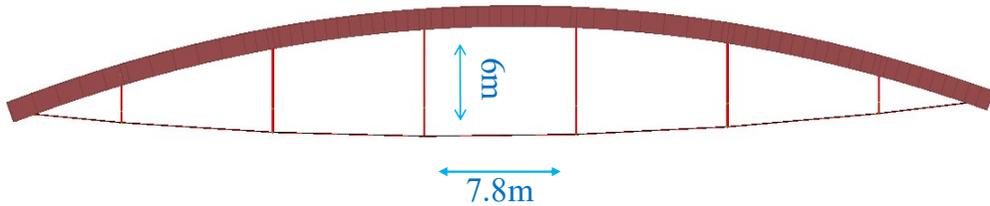


# 平面布置



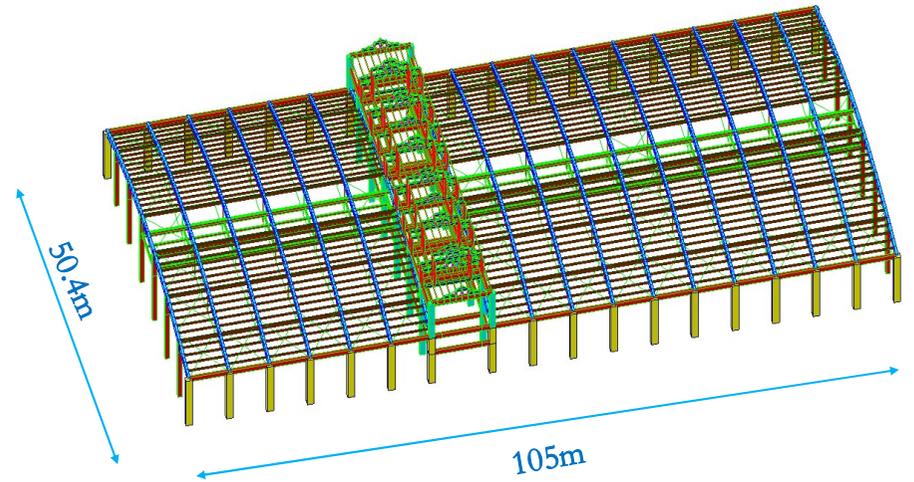


- 主跨50.4m采用张弦曲梁体系，上弦杆在断点处的刚度如何考虑？
- 腹杆采用6根变截面梭形木撑杆，下弦采用直径50mm的预应力钢绞线，如何合理模拟？
- 张弦曲梁如何保证面外稳定问题？（设置纵向索、屋面索，形成完整稳定体系）
- 张弦曲梁如何合理考虑几何非线性问题？



基本受力单元

拱的跨度: 50.4m  
 矢高: 4.5m  
 下弦垂度: 1.5m  
 撑杆间距: 5.7m (两端)、7.8m



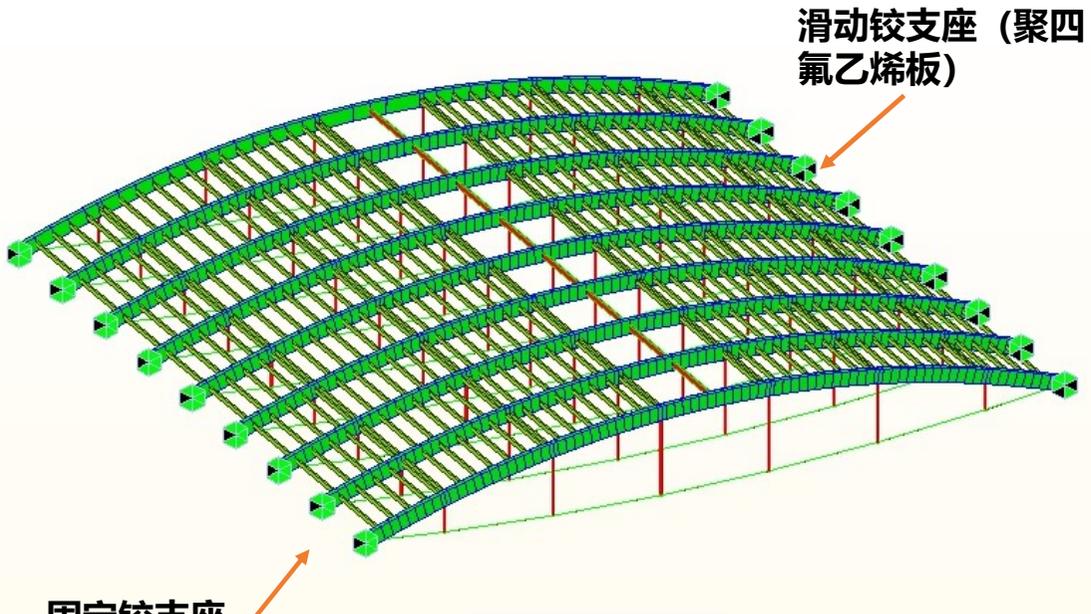
整体分析模型

- 如何选取初始预应力：过大的初始预应力会影响上弦拱的稳定，预应力过小将无法解决结构挠度问题？
- 柔性体系如何进行反映谱分析？

- 屋盖结构在标准组合下，最大挠度与跨度之比（初始预应力状态后）小于**1/400**；
- 索最大拉力小于索**最小破断力**的1/2，且在任何工况下不出现应力松弛；；
- 承载能力极限状态下，木构件在基本组合作用下的**应力比**控制在0.7以内；
- **防火**设计时，按炭化后有效净截面计算构件应力比控制在1.0以内；
- **抗连续倒塌**设计时，采用拆除构件方法对剩余构件进行弹性静力分析，在考虑断索情况下主拱应力比控制在1.0以内；

构件材料表

| 构件类型    | 模拟单元类型 | 材料要求        | 性能指标               |
|---------|--------|-------------|--------------------|
| 上弦拱（双拼） | 梁单元    | 胶合木         | TC <sub>T</sub> 24 |
| 撑杆      | 桁架单元   | 胶合木         | TC <sub>T</sub> 18 |
| 下弦拉索    | 只受拉索单元 | 高强度低松弛镀锌钢丝束 | 1770MPa            |



基本分析模型

材料数据

一般  
材料号: [ ] 名称: GLI

弹性数据  
设计类型: 用户定义  
用户定义  
规范: 无  
数据库: [ ]  
产品: [ ]  
混凝土  
规范: [ ]  
数据库: [ ]

材料类型  
 各向同性  各向异性

用户定义

|        | 局部-x        | 局部-y        | 局部-z        |                   |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| 弹性模量:  | 9.0000e+003 | 7.2000e+003 | 7.2000e+003 | N/mm <sup>2</sup> |
| 线膨胀系数: | 1.2000e-006 | 1.2000e-006 | 1.2000e-006 | 1/[C]             |

弹性数据  
设计类型: 钢材  
钢材  
规范: 无  
数据库: [ ]  
产品: [ ]  
混凝土  
规范: [ ]  
数据库: [ ]

材料类型  
 各向同性  各向异性

钢材  
弹性模量: 1.8500e+005 N/mm<sup>2</sup>  
泊松比: 0.3  
线膨胀系数: 1.2000e-005 1/[C]  
容重: 7.698e-005 N/mm<sup>3</sup>  
 使用质量密度: 7.85e-009 N/mm<sup>3</sup>/g

支承条件类型(局部方向)

D-ALL  
Dx  Dy  Dz

R-ALL  
Rx  Ry  Rz   
Rw

滑动铰支座

支承条件类型(局部方向)

D-ALL  
Dx  Dy  Dz

R-ALL  
Rx  Ry  Rz   
Rw

固定铰支座

H: 1000 mm  
B: 340 mm

拱截面

D: 50 mm

预应力索截面

## 结构形态

### 1.零状态:

构架**加工**和**放样状态**，也称为放样态，**结构张拉后形状发生偏离**，加工时要考虑这一因素。

### 2.初始状态阶段:

张拉完毕后，结构安装就位的形态，也称预应力态，是**建筑施工图中所明确的结构外形**。初始预应力考虑结构自重（或自重加少量活荷载）作用下结构形成反拱，抵消部分荷载；

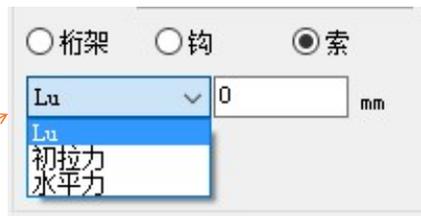
### 3.荷载态:

**外部荷载作用（使用阶段）**在初始态结构上发生变形后的平衡状态。

## 索单元初拉力的施加方法:

### ■ 建立索单元时直接处理:

将“单元类型”选择为索单元, 使用无应力长度Lu、初拉力及水平力;



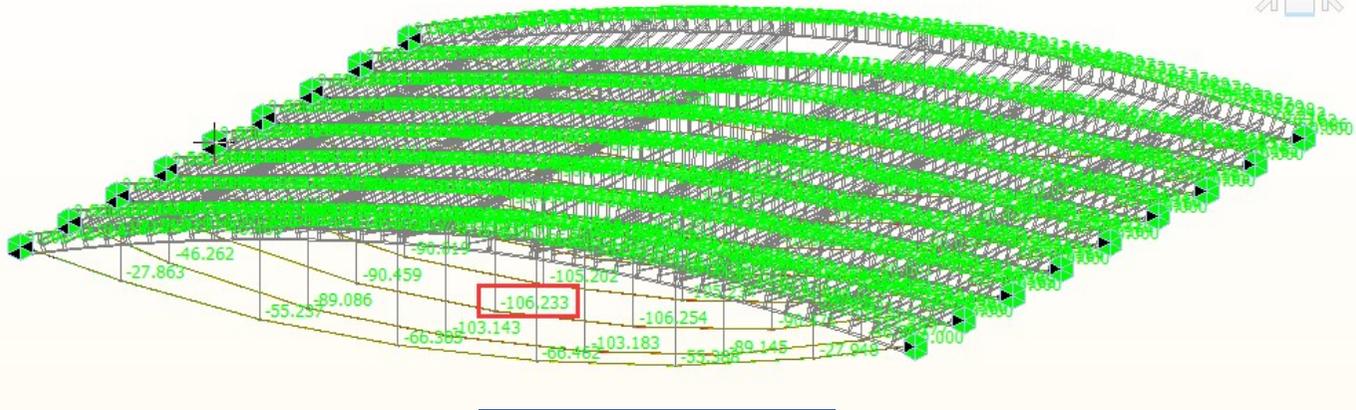
### ■ 选择建立的索或者桁架单元, 通过“修改单元参数”处理;

### ■ 先建立桁架单元, 再通过单元表格修改类型及初拉力。 (推荐)

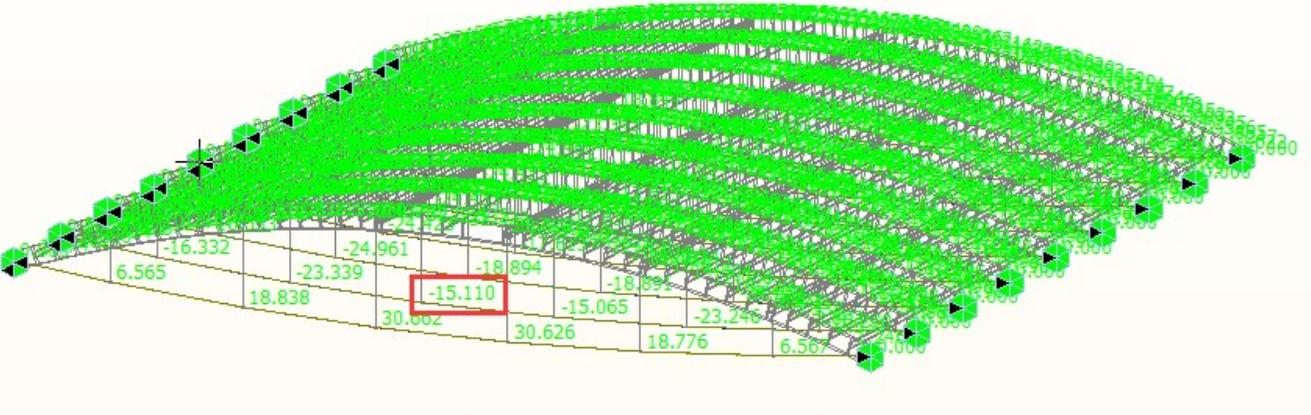


| 单元   | 类型      | 墙类 | 辅助类型 |
|------|---------|----|------|
| 5656 | 受拉桁架单元  |    | 索单元  |
| 5658 | 桁架单元    |    |      |
| 5660 | 只受拉桁架单元 |    |      |
| 5662 | 只受压桁架单元 |    |      |
| 5664 | 梁单元     |    |      |
| 5666 | 板单元     |    |      |
| 5666 | 平面应力单元  |    |      |
| 5675 | 平面应变单元  |    |      |
| 5677 | 轴对称单元   |    |      |
| 5679 | 实体单元    |    |      |
| 5681 | 墙单元     |    |      |
| 5683 | 剪力墙洞口   |    |      |
| 5685 | 桁架单元    |    |      |

初拉力的调试:



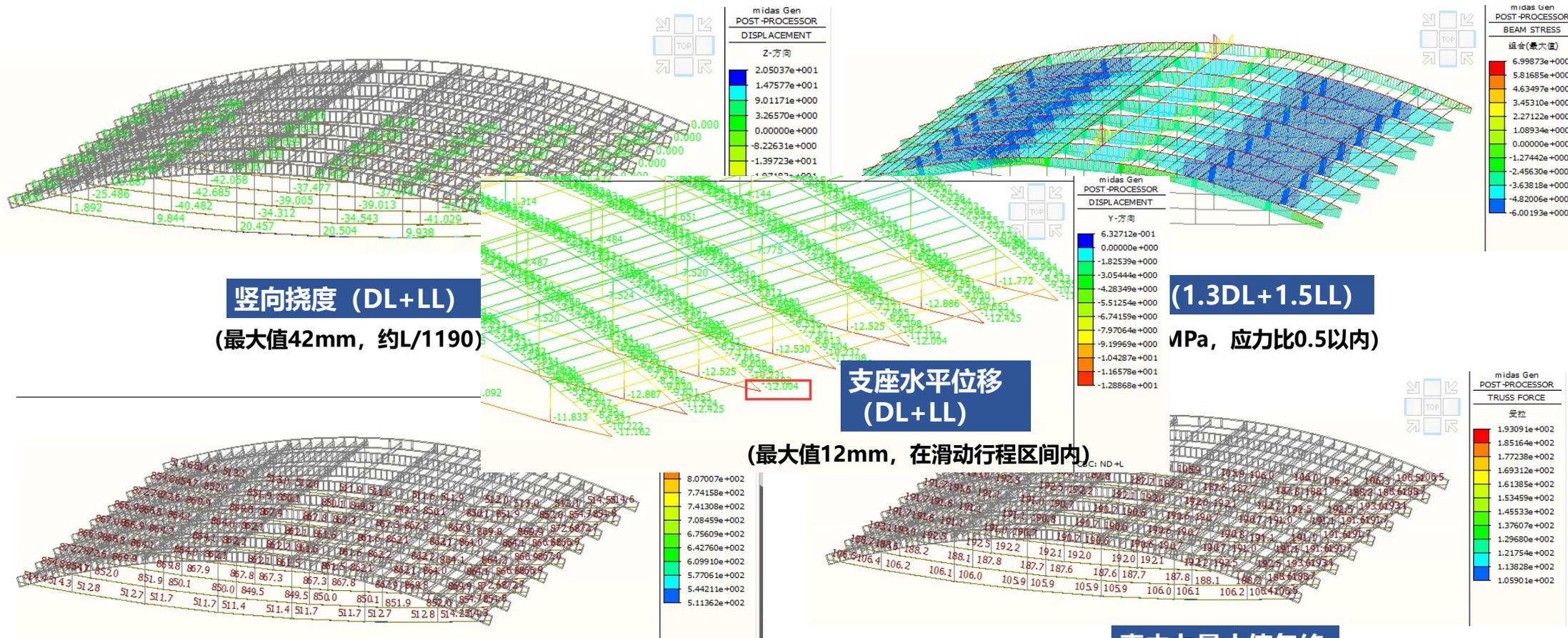
索拉力设置为10kN



索拉力设置为500kN

- 上部荷载取值**G+0.5L**调试
- 通过选择索单元, 修改单元类型输入不同的**索初拉力**。
- 索初始拉力作用下, 结构的**起拱值**控制在跨度的 **$l/600$** 以内, 约80mm。
- 最终确定**初拉力为500kN**。

## 分析结果:



**竖向挠度 (DL+LL)**  
(最大值42mm, 约L/1190)

**(1.3DL+1.5LL)**  
MPa, 应力比0.5以内)

**支座水平位移 (DL+LL)**  
(最大值12mm, 在滑动行程区内)

**索内力值 (1.3DL+1.5LL)**

**索内力最小值包络 (最小值105kN, 无松弛)**

(最大值877kN, 应力444MPa, 选用高强度低松弛镀锌钢丝束应力值为1770MPa, 应力比为0.3)

## 确定初始单元内力:

- 反映谱分析属于线弹性分析，**索单元**需要转换为**等效桁架单元**进行计算。
- 反应谱分析时，**索考虑处于恒载DL作用下的初始内力状态**，需要把输入初始单元内力。



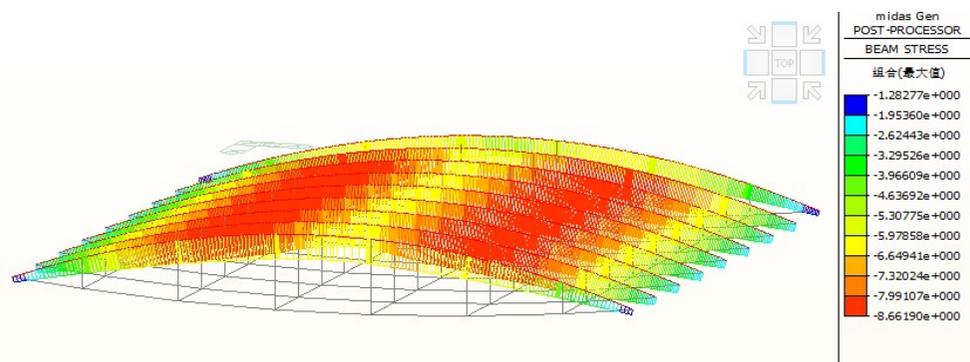
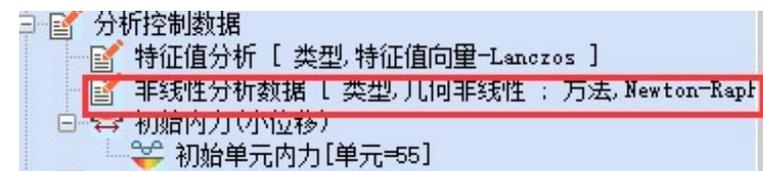
激活纪录  
节点或单元  
全部 无 反转 前次  
Element 5649to5656 5658to5772by19  
选择类型  
单元类型 添加  
删除  
替换  
交叉  
荷载工况/荷载组合  
DL(ST)  
LL(ST)  
W(ST)  
W90(ST)  
T(ST)  
N1.3D+1.5L(ST)  
ND+0.5L(ST)  
ND+L(ST)  
位不移利(CBS:全部)  
位不移利(CBS:最大)  
位不移利(CBS:最小)  
ND+0.5L(CBC)  
N1.3D+1.5L(CBC)  
ND+L(CBC)  
索力(CBC:全部)  
索力(CBC:最大)  
索力(CBC:最小)  
确定 取消

| 单元   | 荷载 | 内力-i       | 内力-j       |
|------|----|------------|------------|
| 5668 | DL | 462.349031 | 462.256929 |
| 5669 | DL | 461.05116  | 460.964624 |
| 5670 | DL | 460.127884 | 460.086019 |
| 5671 | DL | 459.83825  | 459.838244 |
| 5672 | DL | 460.127533 | 460.16939  |
| 5673 | DL | 461.072525 | 461.159073 |
| 5674 | DL | 462.467088 | 462.559192 |
| 5687 | DL | 470.988373 | 470.896236 |
| 5688 | DL | 469.659419 | 469.572705 |
| 5689 | DL | 468.711082 | 468.668969 |
| 5690 | DL | 468.41142  | 468.411428 |
| 5691 | DL | 468.708303 | 468.750426 |
| 5692 | DL | 469.669313 | 469.756026 |
| 5693 | DL | 471.083396 | 471.175515 |
| 5706 | DL | 468.143289 | 468.05116  |
| 5707 | DL | 466.824152 | 466.737497 |
| 5708 | DL | 465.883903 | 465.841879 |
| 5709 | DL | 465.587854 | 465.587859 |
| 5710 | DL | 465.882305 | 465.924336 |
| 5711 | DL | 466.837925 | 466.924583 |
| 5712 | DL | 468.245495 | 468.337609 |
| 5725 | DL | 468.189053 | 468.096923 |
| 5726 | DL | 466.869751 | 466.783095 |

| 类型 | 单元   | 轴力-i (kN)   | 剪力 (y)-i | 剪力 (y)-j | 扭矩   | 弯矩 (y)-i | 弯矩 (z)-i | 轴力-j (kN)   |
|----|------|-------------|----------|----------|------|----------|----------|-------------|
| 桁架 | 5668 | 4.6235e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6226e+002 |
| 桁架 | 5669 | 4.6105e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6096e+002 |
| 桁架 | 5670 | 4.6013e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6009e+002 |
| 桁架 | 5671 | 4.5984e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.5984e+002 |
| 桁架 | 5672 | 4.6013e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6017e+002 |
| 桁架 | 5673 | 4.6107e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6116e+002 |
| 桁架 | 5674 | 4.6247e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6256e+002 |
| 桁架 | 5687 | 4.7099e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.7090e+002 |
| 桁架 | 5688 | 4.6966e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6957e+002 |
| 桁架 | 5689 | 4.6871e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6867e+002 |
| 桁架 | 5690 | 4.6841e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6841e+002 |
| 桁架 | 5691 | 4.6871e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6875e+002 |
| 桁架 | 5692 | 4.6967e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6976e+002 |
| 桁架 | 5693 | 4.7108e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.7118e+002 |
| 桁架 | 5706 | 4.6814e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6805e+002 |
| 桁架 | 5707 | 4.6682e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6674e+002 |
| 桁架 | 5708 | 4.6588e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6584e+002 |
| 桁架 | 5709 | 4.6559e+002 | 0.00     | 0.00     | 0.00 | 0.00     | 0.00     | 4.6559e+002 |

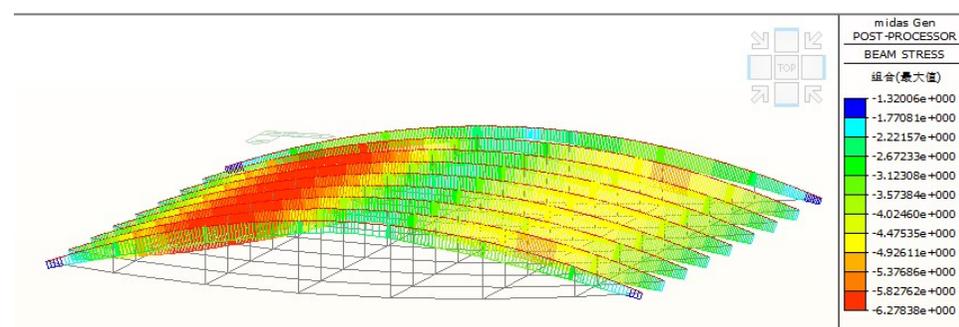
## 运行分析并查看结果:

➤ 分析之前先确定“非线性分析数据”已经删除。



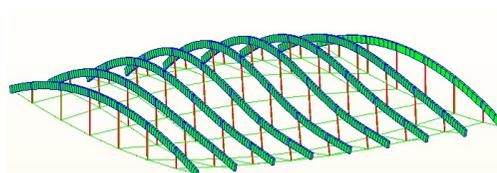
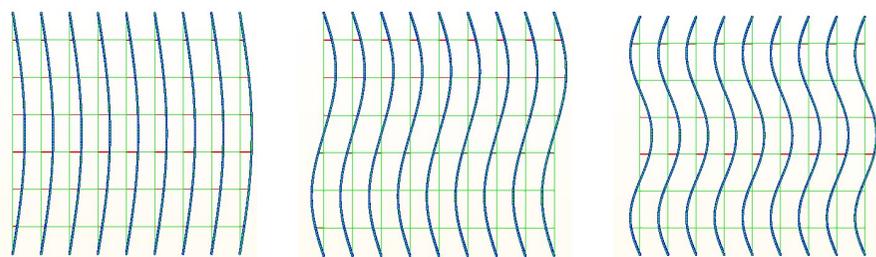
拱应力值1.3(DL+0.5LL) + 1.4RX

(最大值8.66MPa)

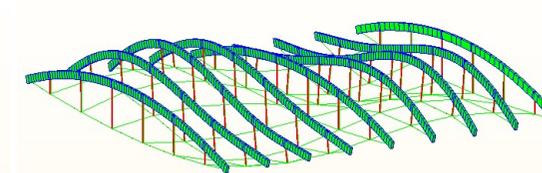


拱应力值1.3(DL+0.5LL) + 1.4Ry

(最大值6.27MPa)

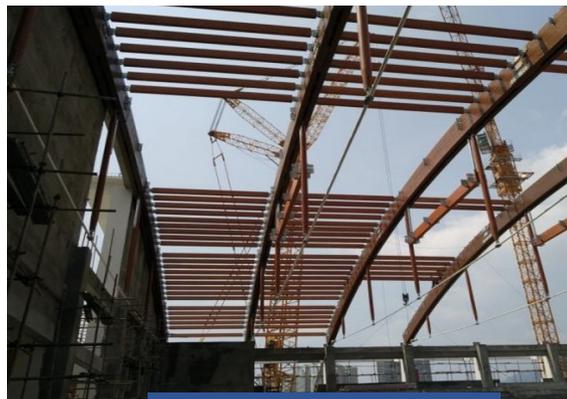


各阶振型





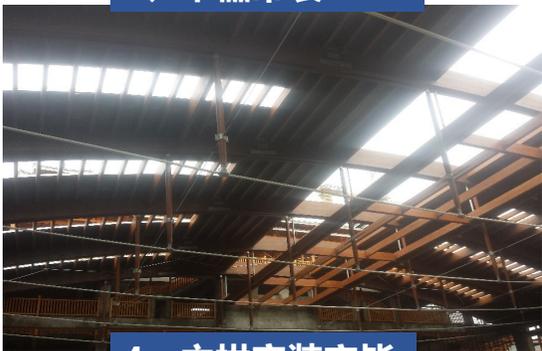
1、单榀吊装



2、相邻榀间拉结



3、安装腹杆纵向水平索



4、主拱安装完毕



5、安装屋面檩条

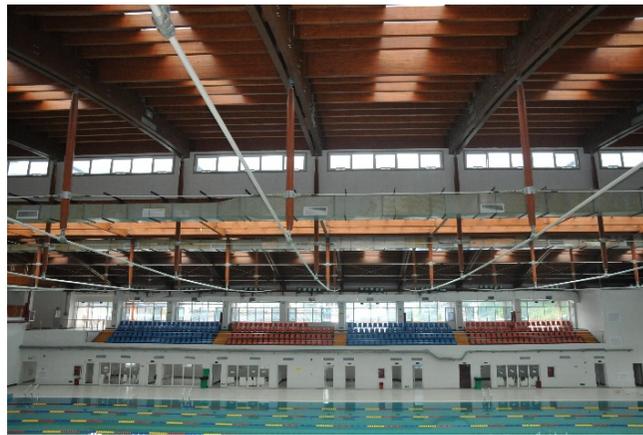


6、铺设屋面水泥压力板



7、铺设屋面结构板及金属屋面板

- 待屋面建筑层铺设完毕后，必要时对拉索最终张拉，以满足建筑和受力要求



□ 国内**单跨最大**的胶合木曲梁游泳馆屋盖

□ 国内**第一座**预应力张弦曲线木梁结构工程

□ 国内**第一座**自主设计建成的木结构游泳馆

## 近年来其他典型案例



**溧水康复医院**

木-混凝土混合结构

**恒大鸡蛋博物馆**

连续曲线拱

**山东鼎驰木业研发中心**

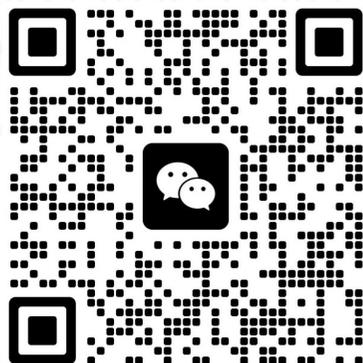
胶合木-CLT剪力墙结构

**山东滨州北海木桥**

大跨桁架拱



# 谢谢大家！ 欢迎批评指正！



孙小鸾

博士、副教授、国家一级注册结构工程师

Email: [Xiaoluan81118@njtech.edu.cn](mailto:Xiaoluan81118@njtech.edu.cn)