

# 建筑与结构设计的深度融合

 中国建筑设计院有限公司  
任庆英结构设计工作室

2018-04-23

内部讲义，请勿扩散，版权归演讲者所有

# 报告主要内容

---

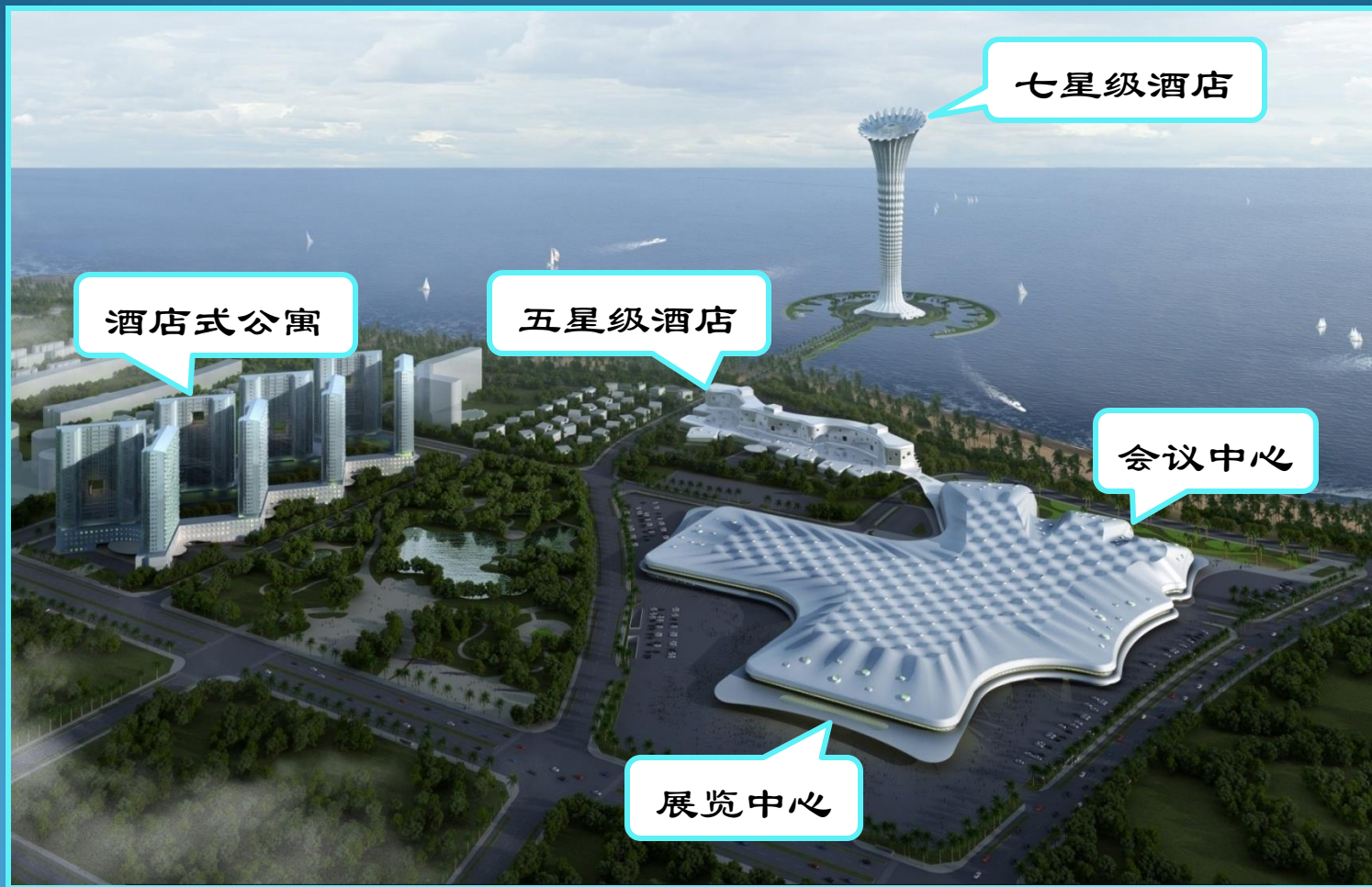
第一部分 海南国际会展中心

第二部分 吕梁体育中心—体育馆

第三部分 玉环博物馆、图书馆

# 海南国际会展中心

## 建筑概况



# 海南国际会展中心

## 建筑概况



建筑面积：77130m<sup>2</sup>

檐口高度：15.64m

风荷载：

$W_0=0.75\text{kN/m}^2$  (50年)

$W_0=0.90\text{kN/m}^2$  (100年)

设防烈度：8度 (0.30g)

设计地震分组：第一组

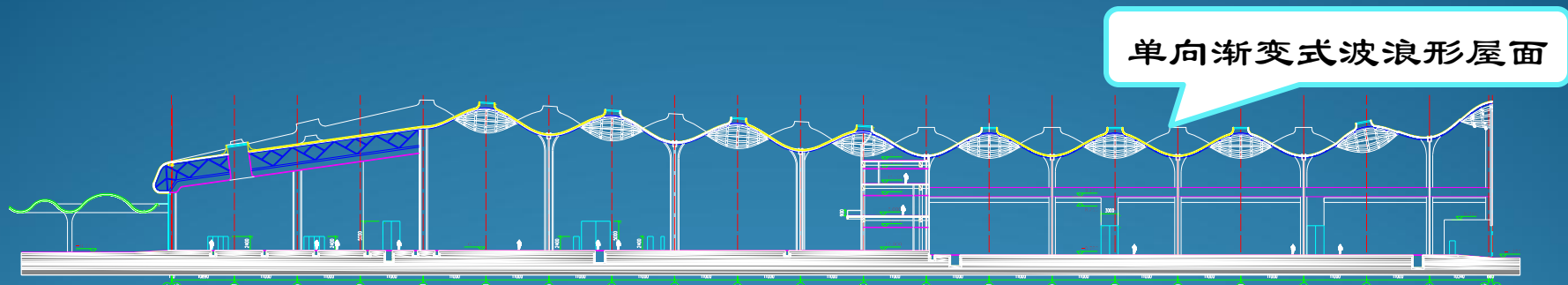
建筑场地类别：II类

抗震设防类别：乙类

- 展览
- 配套/服务式
- 配套/办公式
- 交通核
- 万人集会广场

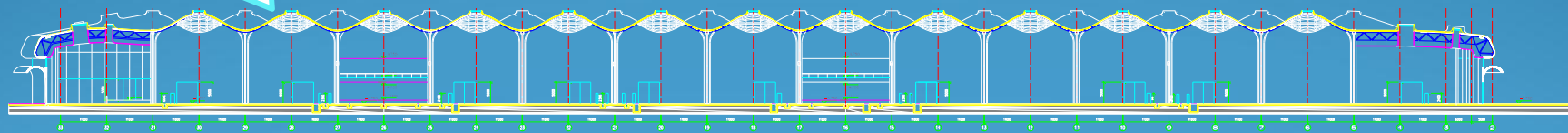
# 海南国际会展中心

## 建筑概况



1-1剖面（南北向）

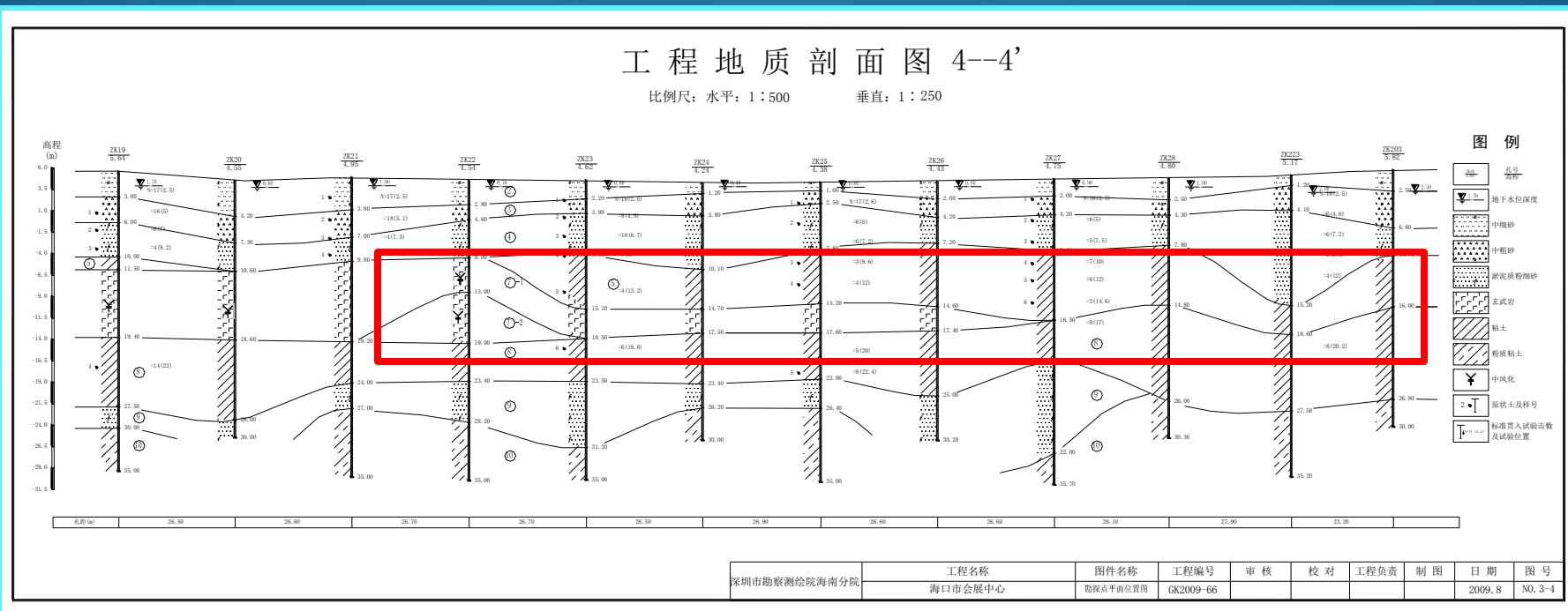
双向波浪形屋面



2-2剖面（东西向）

# 海南国际会展中心

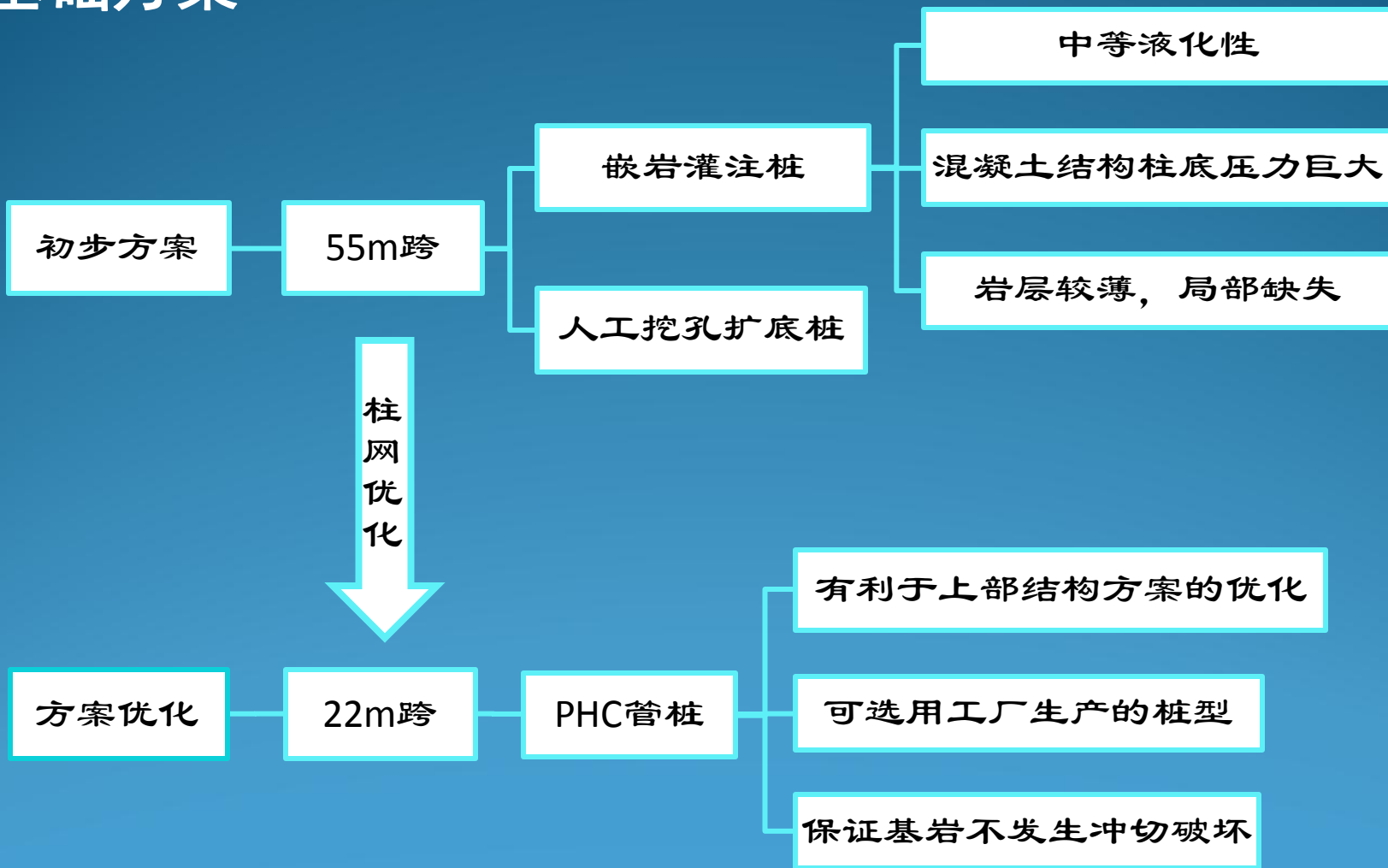
## 自然条件



- ②、④层具有饱和砂土中等液化性，属抗震不利地段。
- ⑦-1层基岩层起伏较大，厚度不均，且局部缺失。

# 海南国际会展中心

## 基础方案



# 海南国际会展中心

## 基础方案

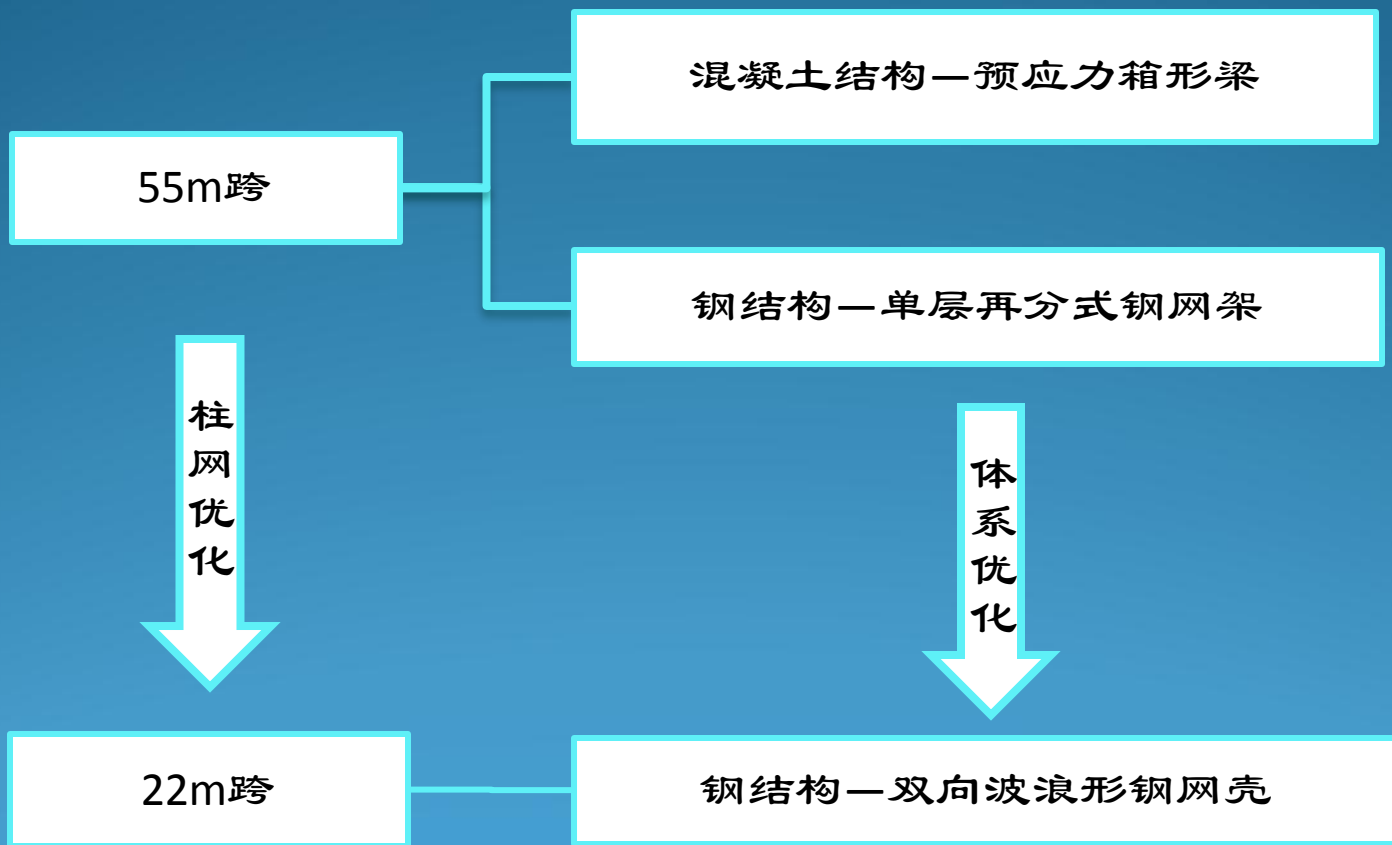
### 最终的基础方案：

- 基础选用管径为500的**高强度预应力管桩**
- **以⑦-1层为持力层**
- 对承台周围**②层土进行换填处理**
- 钢柱采用**埋入式柱脚**



# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化



# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化

建筑方案：双向55m跨，双向波浪形屋面

结构方案：混凝土结构—预应力箱形梁+现浇波浪形屋面板



- 耐火性好，抗腐蚀能力强
- 构件截面巨大，自较大，地震作用也较大
- 地基条件不好，基础设计和施工难度较大
- 双向曲面屋面造型对模板和施工技术要求很高

# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化

建筑方案：双向55m跨，双向波浪形屋面

结构方案：混凝土结构—预应力箱形梁+**混凝土预制叠合板**

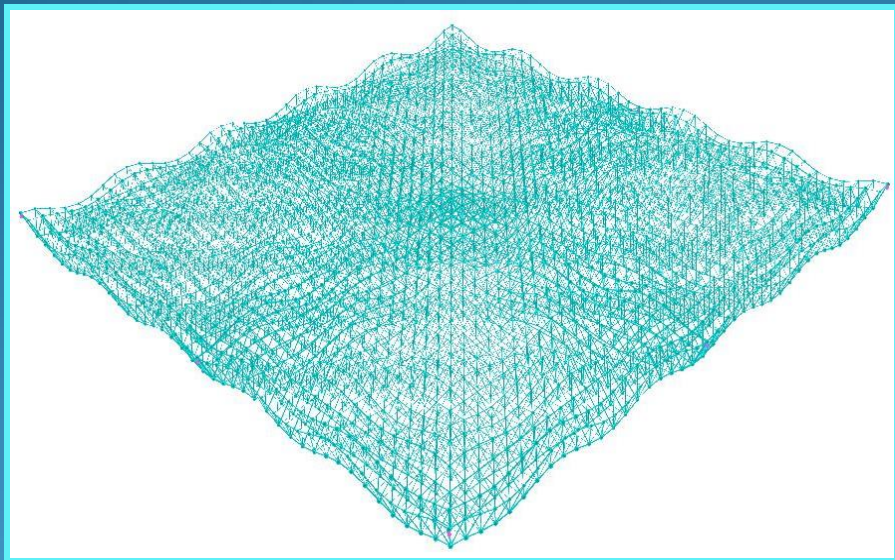
- 以梁格为单元，地面制作预制板，吊装就位后再现浇一定厚度的叠合层
- 满足建筑对室内清水混凝土效果的要求
- 现场不必支模，大大降低了施工难度
- 节省工期，综合效益好

# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化

建筑方案：双向55m跨，双向波浪形屋面

结构方案：钢结构—单层再分式钢网架



曲面网架透视图



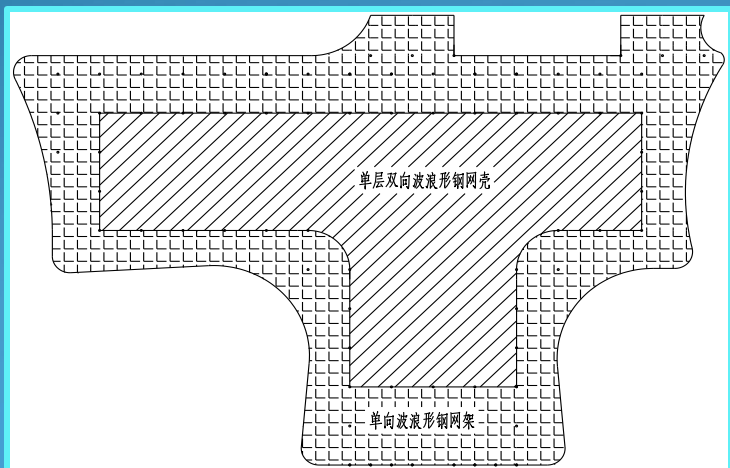
曲面网架透视图

- 适应复杂屋面形式能力强
- 采用自重轻，基础造价低
- 地震作用较小
- 材料防腐蚀和防火造价高
- 现场焊接量大
- 对风荷载反应敏感

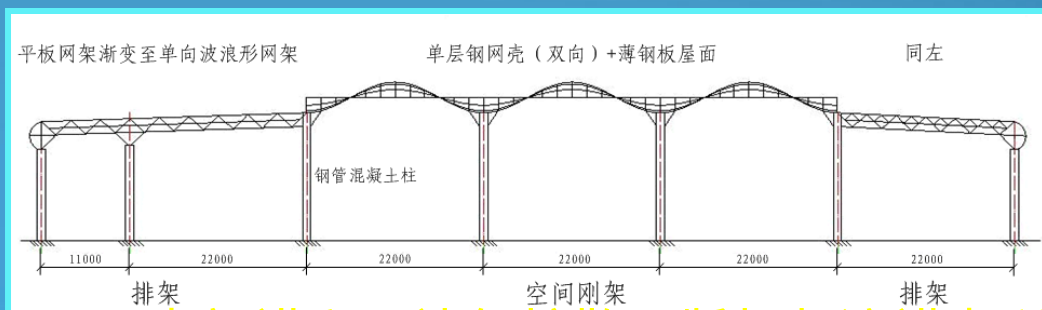
# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化

22m跨钢网壳+周边网架+预制叠合板

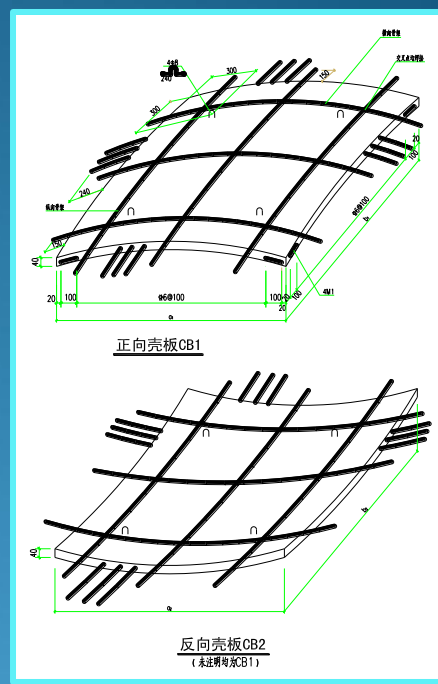
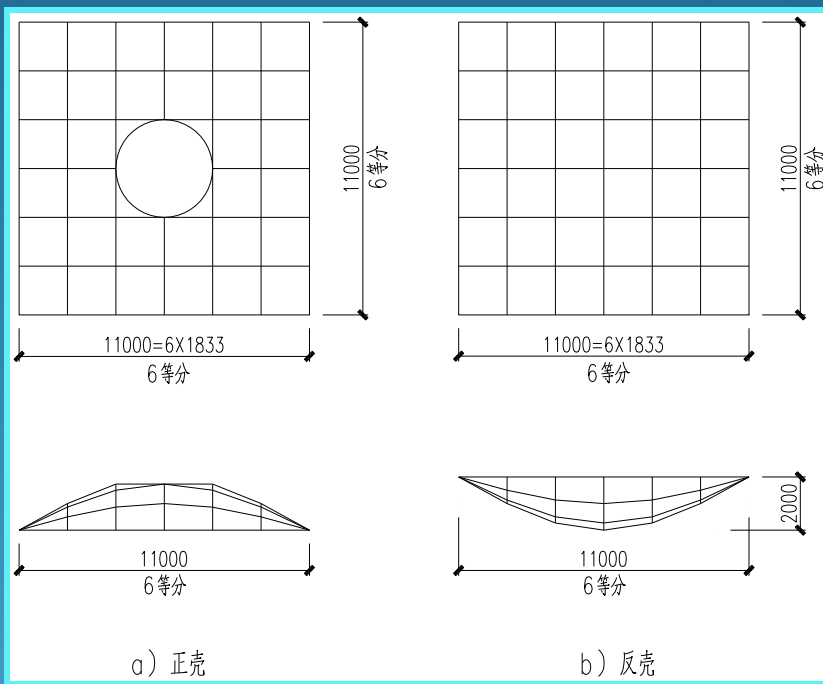
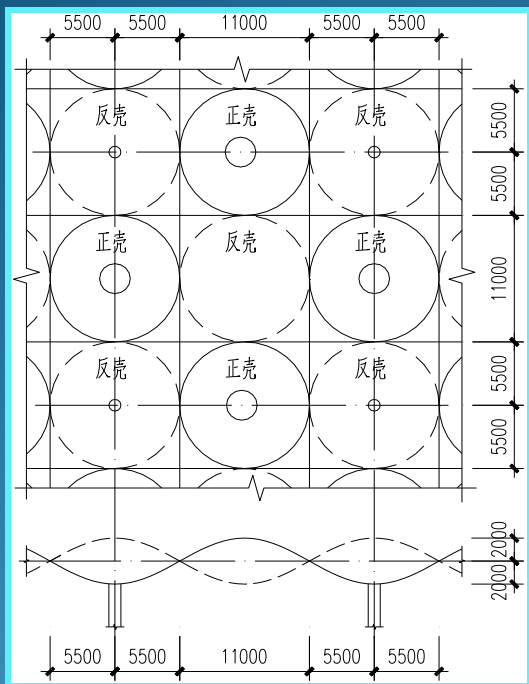


- 周边网架的存在对网壳形成有效的约束
- 完善的分析和试验保证结构的安全
- 网壳曲面与建筑屋面造型完美结合
- 大大降低了结构自重，减少了基础造价
- 结构所占高度小
- 施工速度快

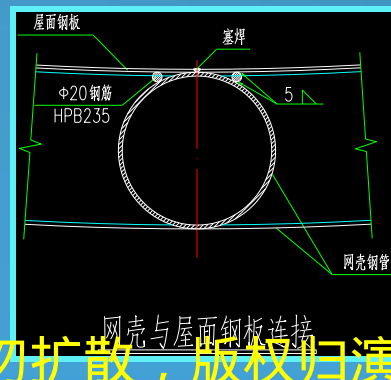


# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化



后因工期尤为紧张，且施工单位对曲面形预制叠合板不甚熟悉，最后经甲方同意，将预制叠合板改成6~10mm厚钢板。



# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化

展览中心大厅建筑效果图



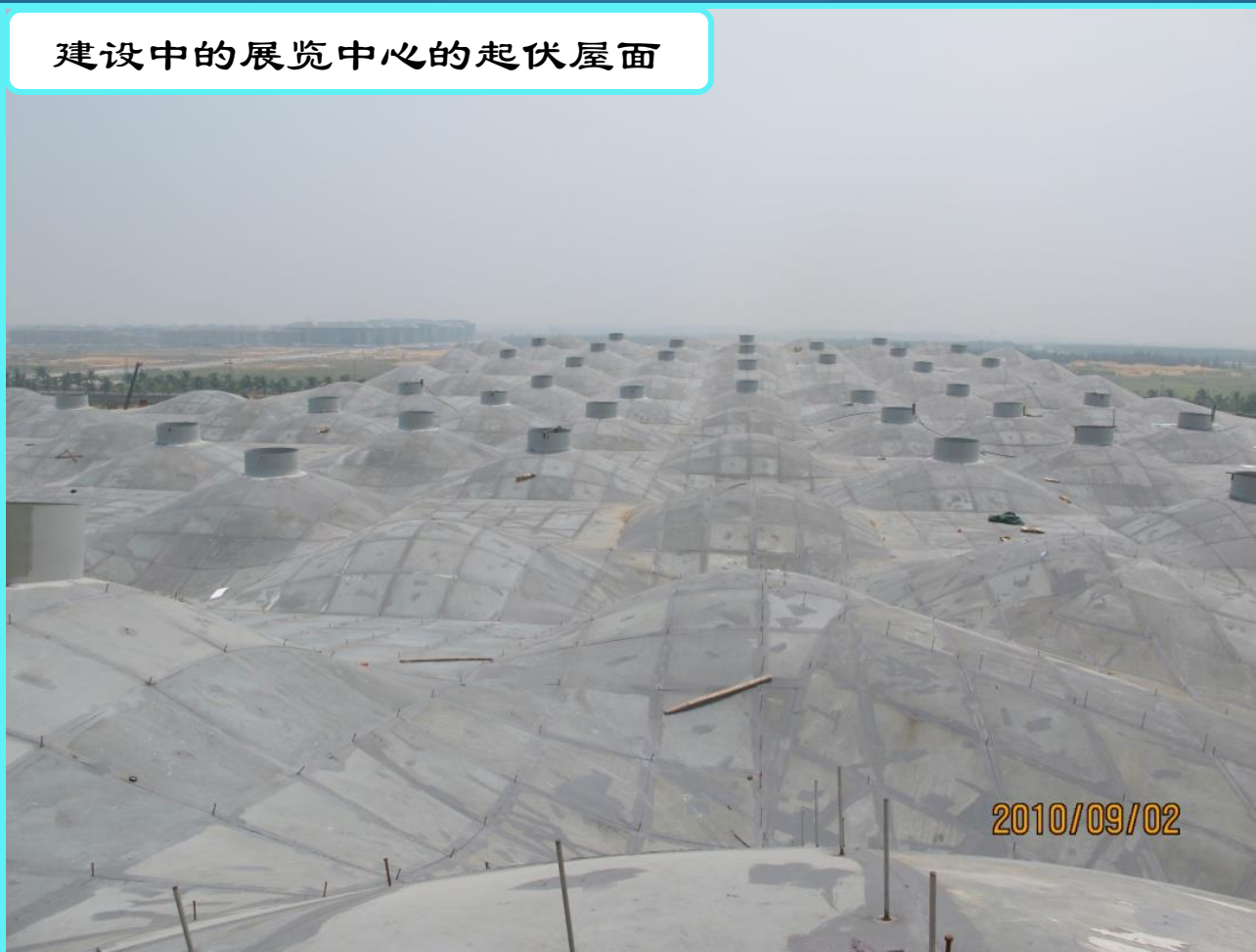
投入使用的展览中心大厅



# 海南国际会展中心

## 柱网及屋盖体系优化

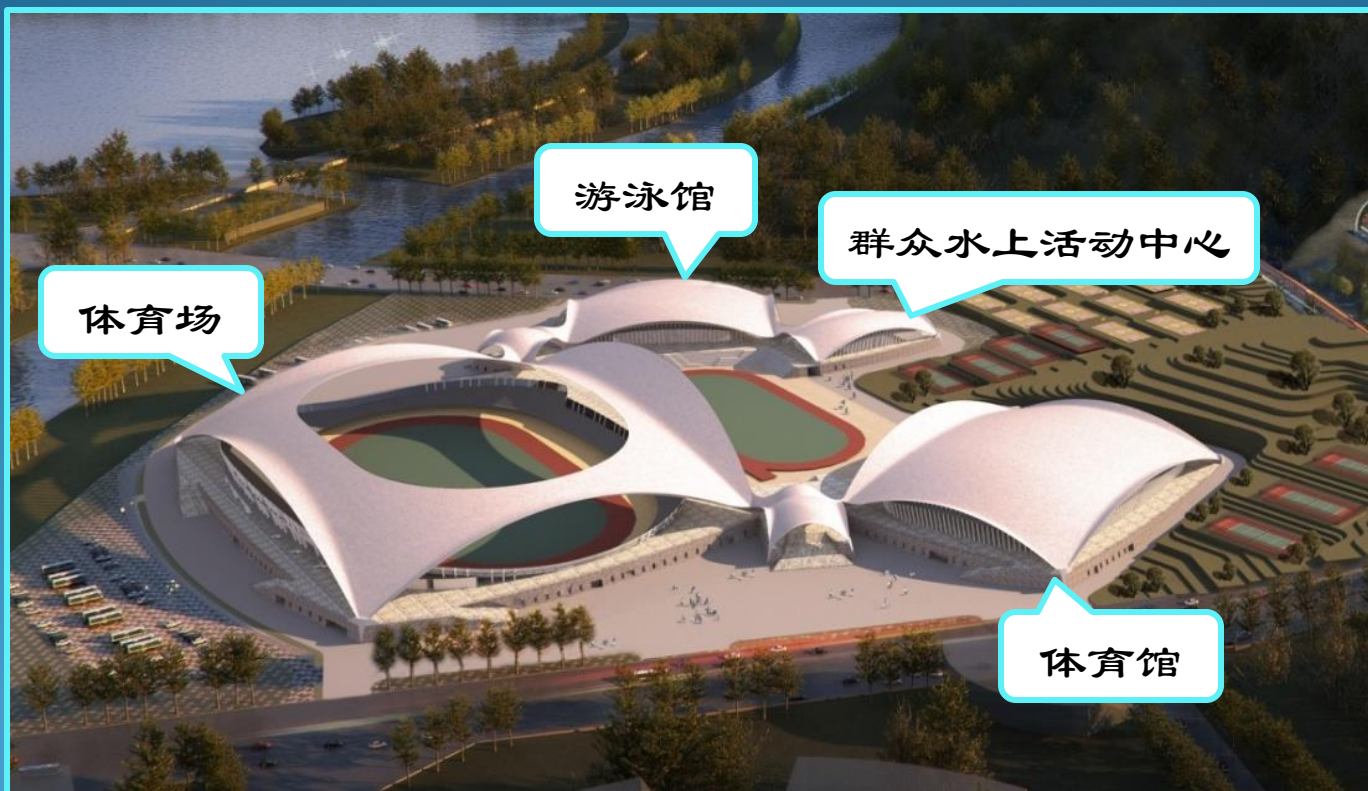
建设中的展览中心的起伏屋面





# 吕梁体育中心—体育馆

## 建筑概况



# 吕梁体育中心—体育馆

## 建筑概况

吕梁新城体育中心是吕梁市的市级体育中心。规划建成为体育竞赛、大众健身、文化表演、休闲娱乐为一体的综合服务型多功能场所。



场馆	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	座数	长度 (m)	宽度 (m)	结构体系
体育场	29000	15000	204	160	四角落地钢拱与中间大开孔单层组合网壳
体育馆	27000	6800	131.6	100	四角落地带钢组合边拱的空心壳板混凝土薄壳
游泳馆	17000	2000	100	70	四角落地带钢组合边拱的空心壳板混凝土薄壳
群众水上运动中心	4500	-	70	35	四角落地带钢组合边拱的变厚度混凝土薄壳
南北入口	900	-	30	30	混凝土薄壳
附属设施、看台	12000				框架结构

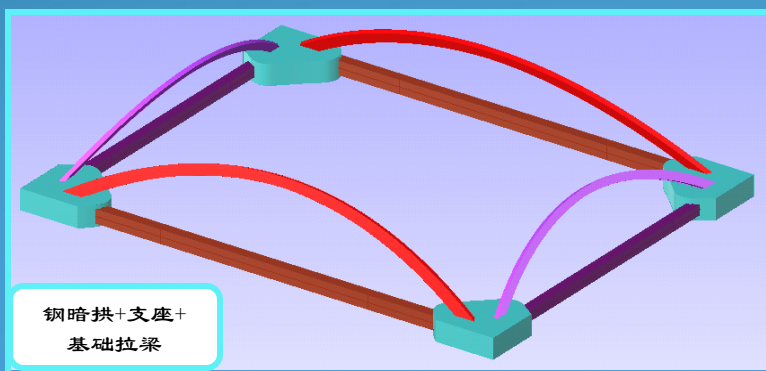
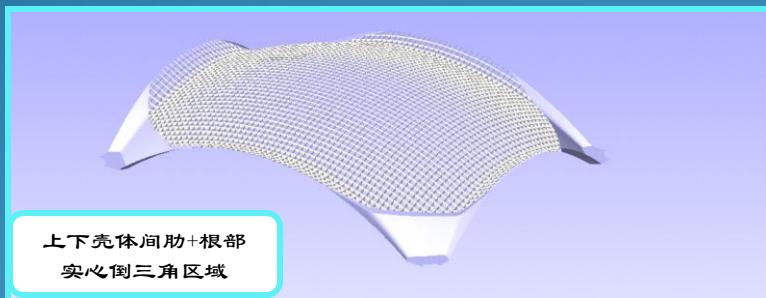
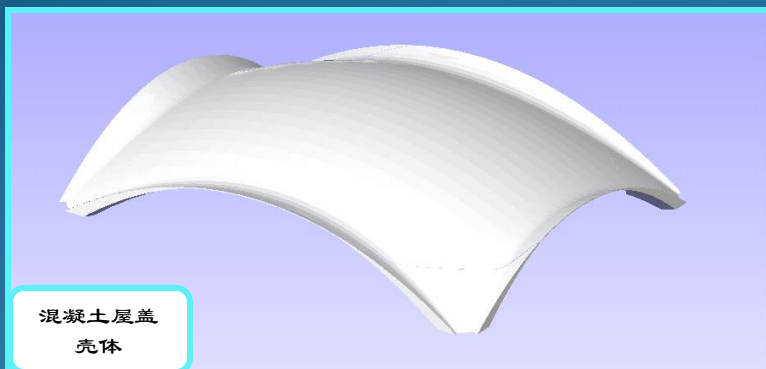
# 吕梁体育中心—体育馆

## 建筑概况

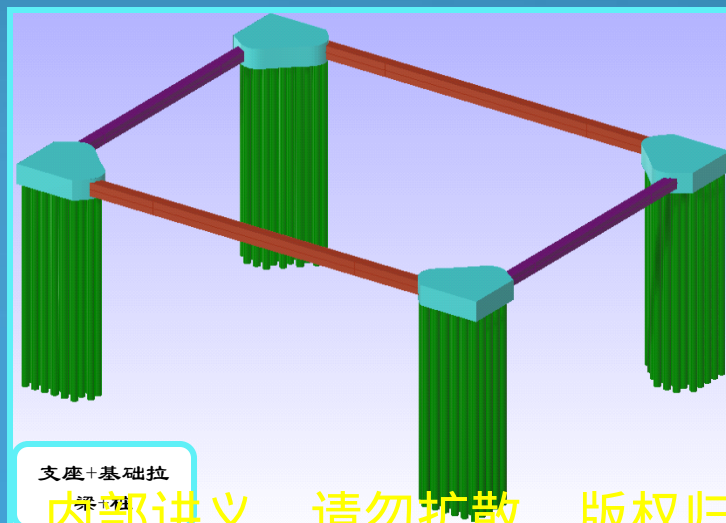


# 吕梁体育中心—体育馆

## 结构体系

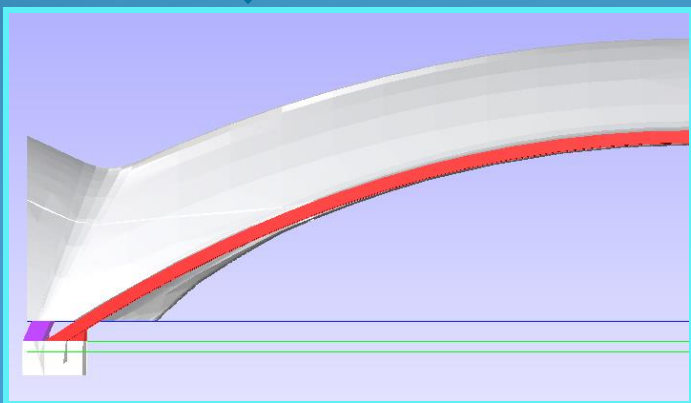
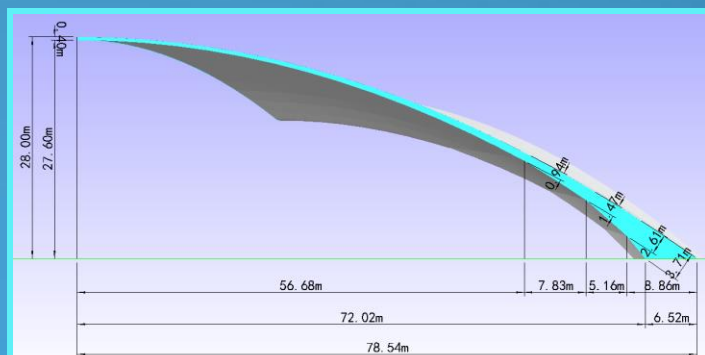
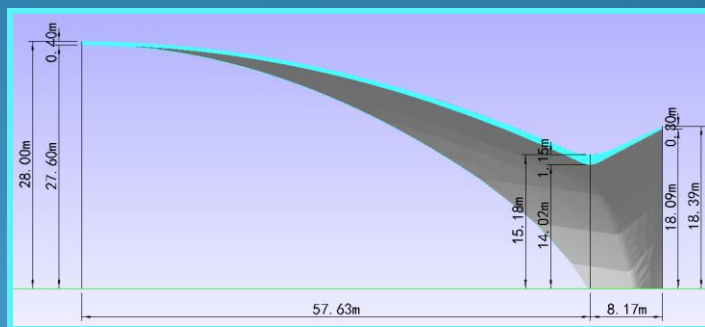
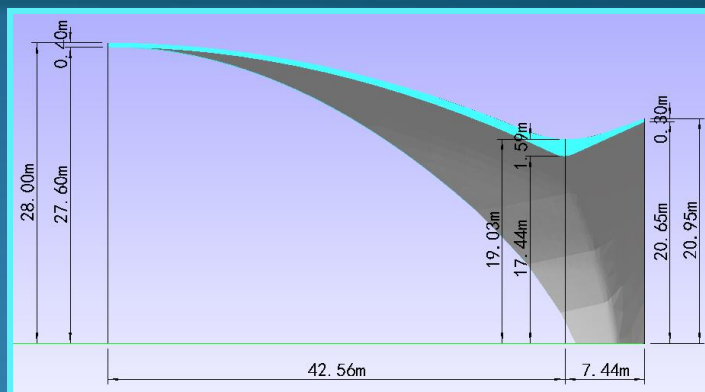
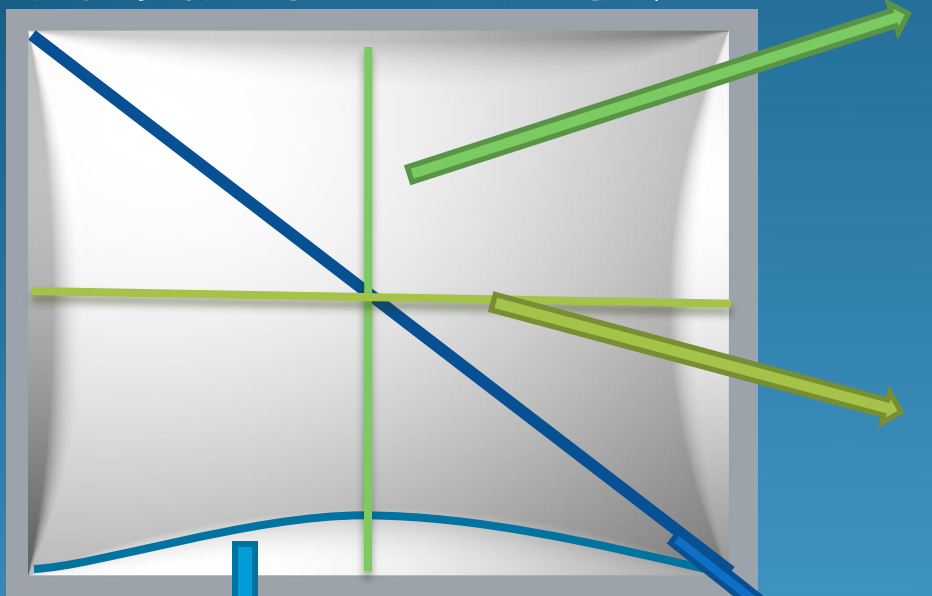


- 屋盖壳体采用四角点支撑方式，中部为变厚度双层带肋壳体，壳体落地区域由带肋壳体过渡为实心壳体；
- 利用向内侧倾斜壳体翻檐，形成隐形拱形加强结构；
- 通过基础承台与混凝土预应力拉梁连接，形成自平衡体系来抵消壳体通过隐形大拱传来的水平推力，提高了整个壳体的稳定性。



# 吕梁体育中心一体育馆

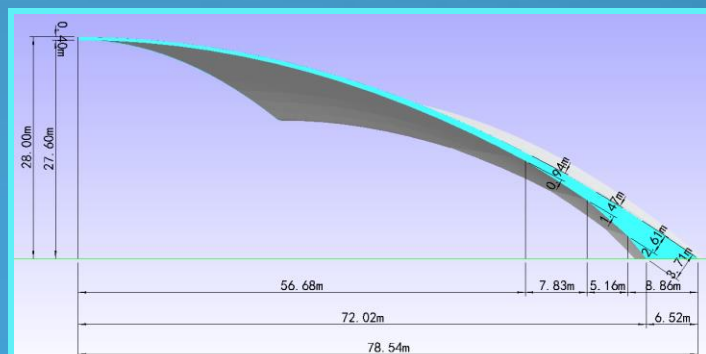
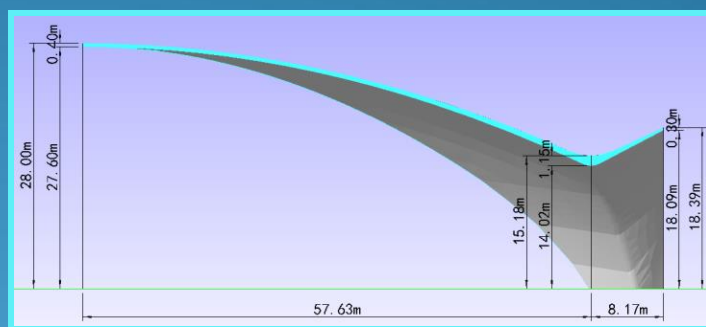
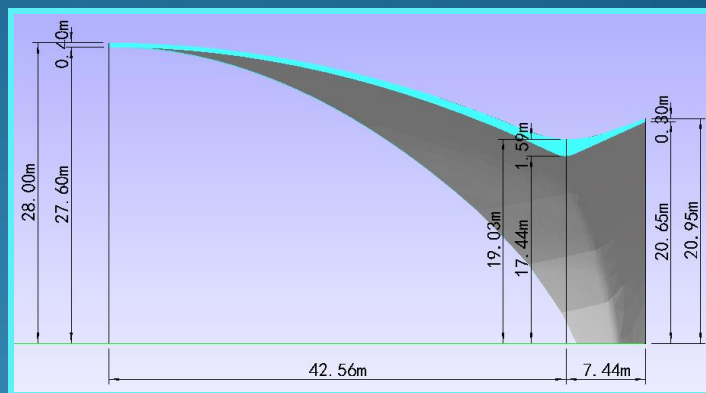
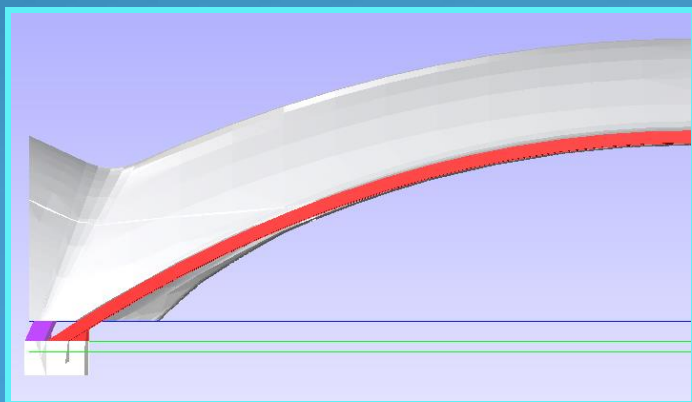
## 变厚度壳各断面形状尺寸



# 吕梁体育中心一体育馆

## 屋盖壳体基本参数

比较参数		体育馆屋盖壳体
周期	T <sub>1</sub>	0.3724s
	T <sub>2</sub>	0.2865s
	T <sub>3</sub>	0.2832s
自重		16790t
厚度	壳顶点	0.4m
	长向拱顶点	1.59m
	短向拱顶点	1.15m
	反檐边缘	0.3m
	材料折算平均厚度	0.472m
	壳体结构平均厚度	0.613m
壳整体平均空心率		54.3%
单个拱脚面积		70.74m <sup>2</sup>



# 吕梁体育中心一体育馆

## 有限元计算模型实现方法

- 软件平台：Ls-DYNA, ANSYS, MIDAS/Gen
- 壳单元：Shell161, SHELL181, Plate
- 壳单元尺寸：不大于1m
- 变厚度壳实现方法：

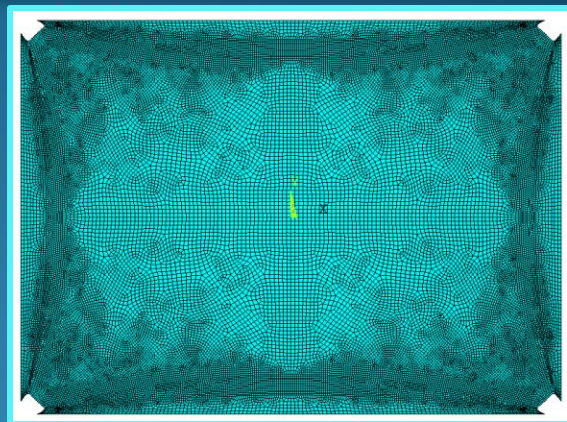
1、双层壳RHINO模型导出壳中间层壳模型

2、中间层壳模型在ANSYS中划分单元

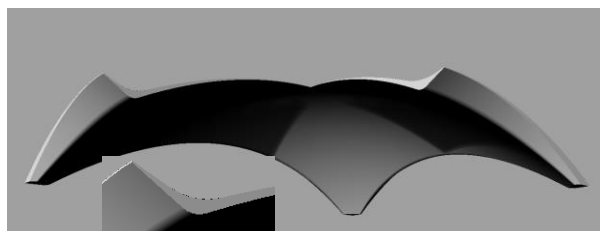
3、提取出ANSYS单元的节点坐标

4、在RHINO模型中计算出节点坐标出法向方向的厚度

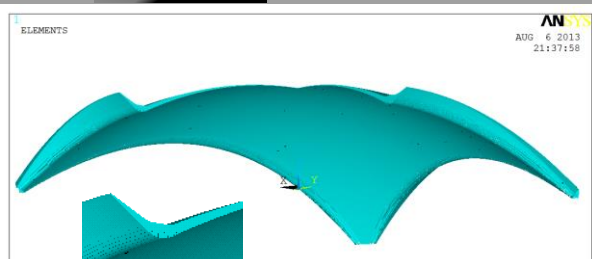
5、将厚度值赋给ANSYS壳单元模型



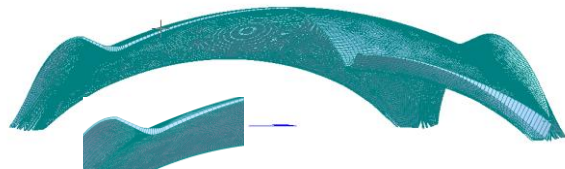
犀牛模型



ANSYS模型

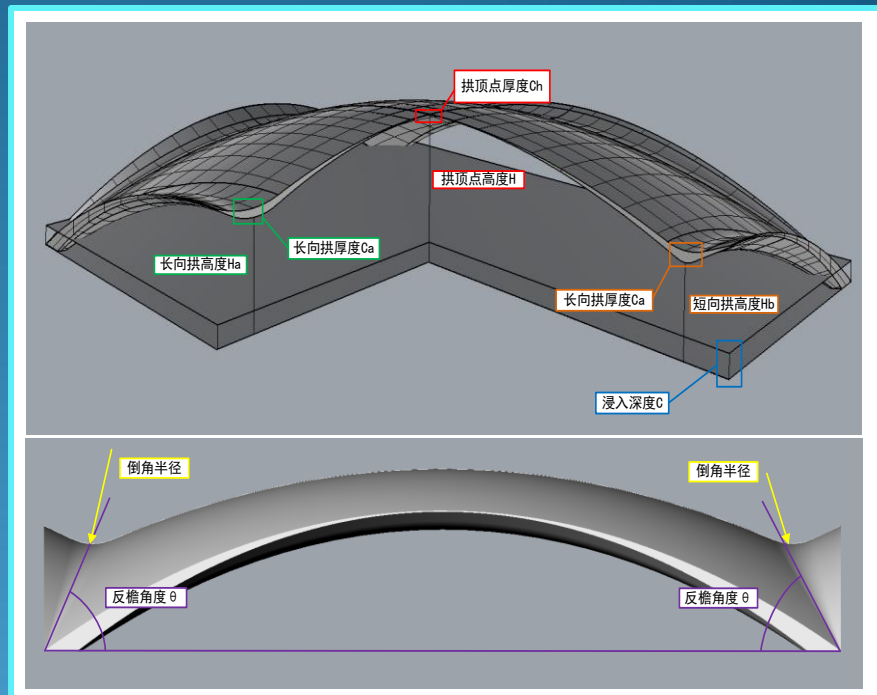
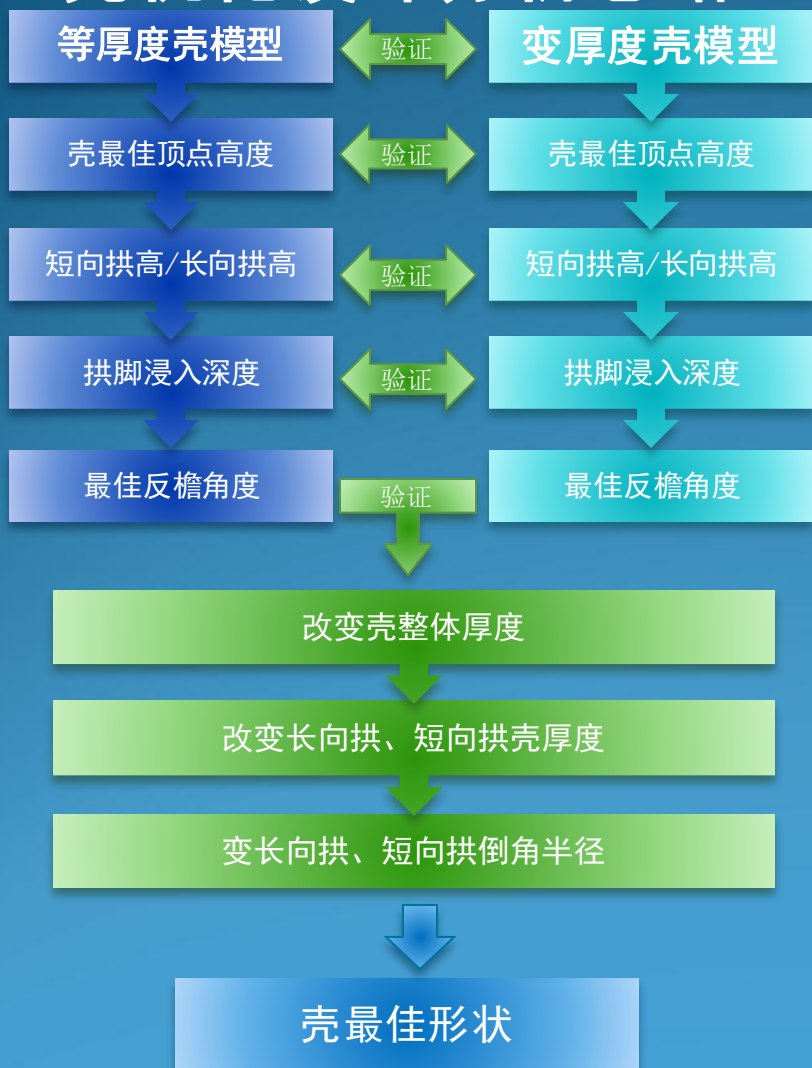


MIDAS/Gen壳模型



# 吕梁体育中心—体育馆

## 壳优化设计分析思路



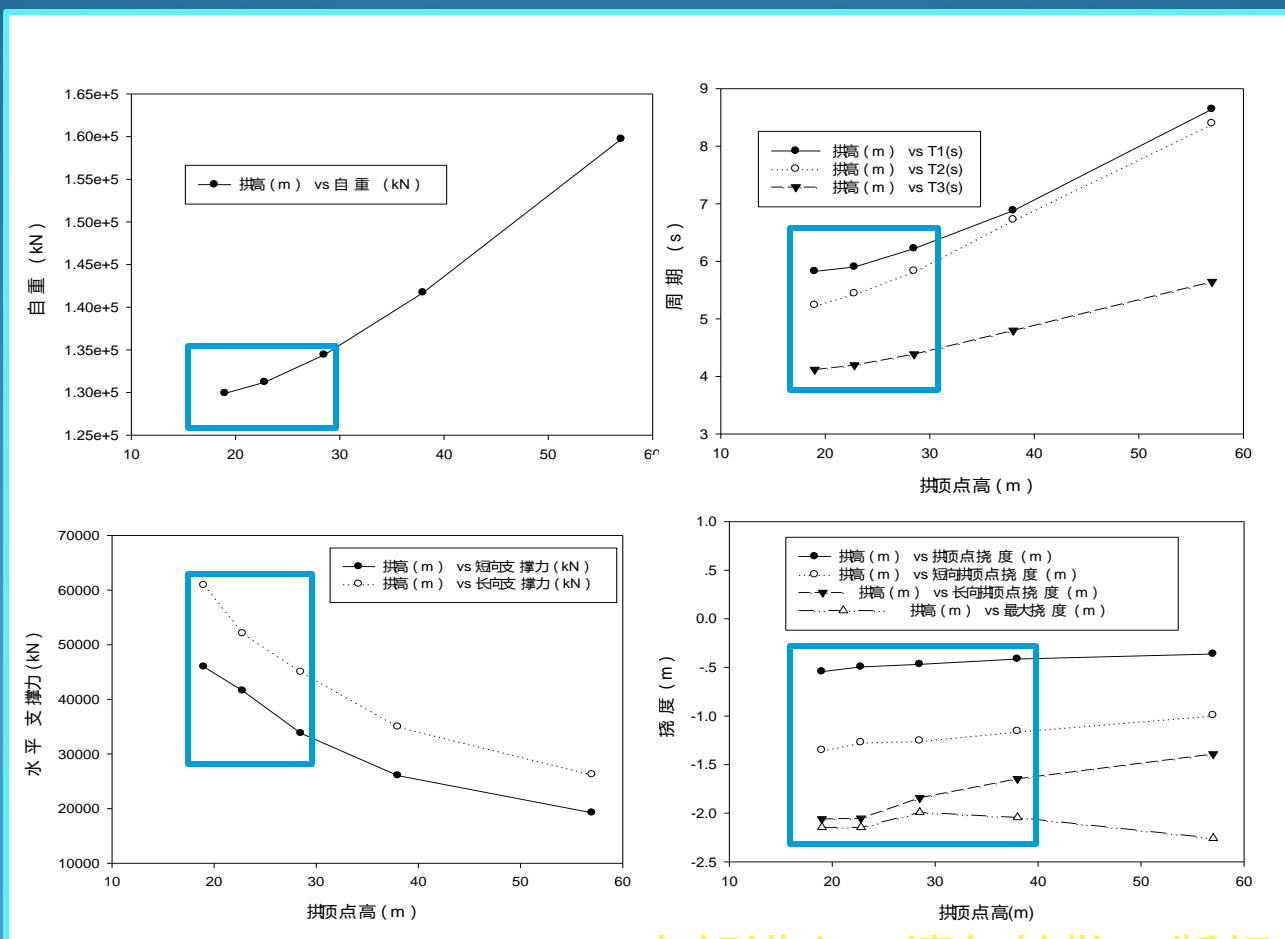
比较指标	单位	说明
周期	s	$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$
挠度	m	拱顶点挠度，短向拱顶挠度、长向拱挠度
平均厚度	m	壳体积除以场地面积
弹性一阶稳定系数		
应变能密度	J/m <sup>3</sup>	壳应变能与壳混凝土体积的比值
支座反力	kN	场地短向、长向支座推力
自重	t	
非线性承载力安全系数		极限承载力综合(自重+设计外荷载)



# 吕梁体育中心一体育馆

## 等厚度壳最佳拱顶点高度

拱高介于20~28m自重、周期、挠度较好，下面分析采用拱高为28m（跨高比1/4）进行分析。

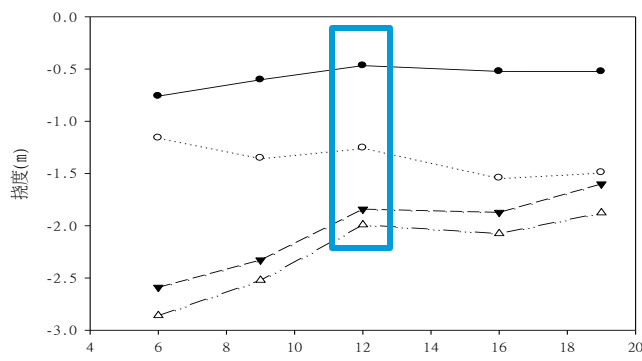
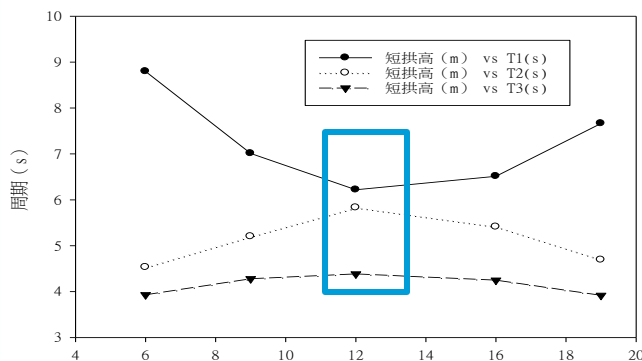


# 吕梁体育中心一体育馆

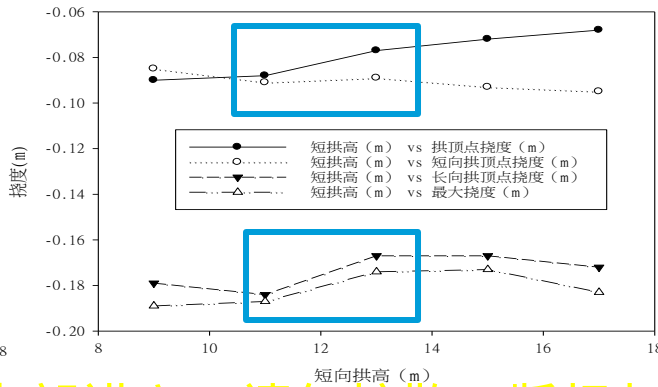
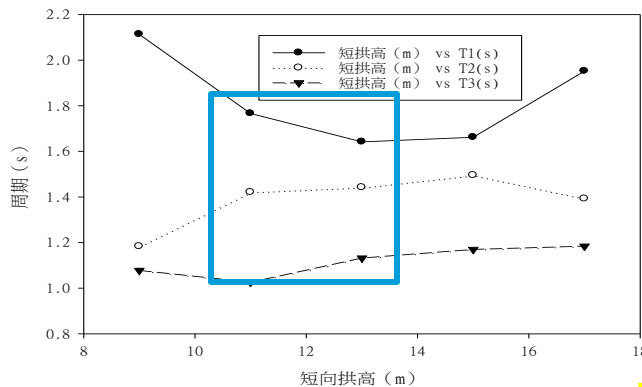
## 最佳短跨长跨拱高比 $h_a/h_b$

拱高比为12m/16m(接近于短向拱长向拱跨度比值100/130)、周期、挠度较好,同时增强反檐后壳体的力学性能有一定帮助。

无翻檐



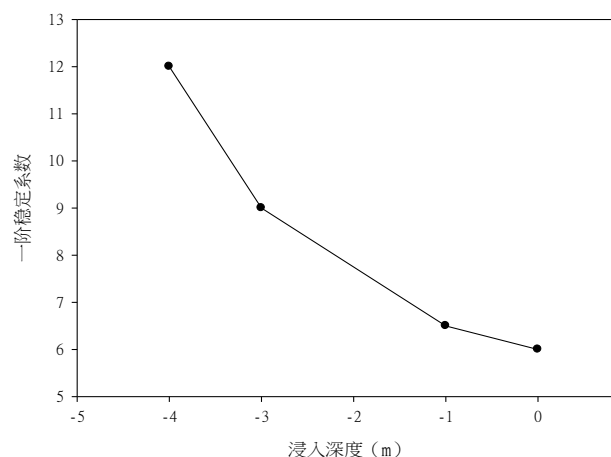
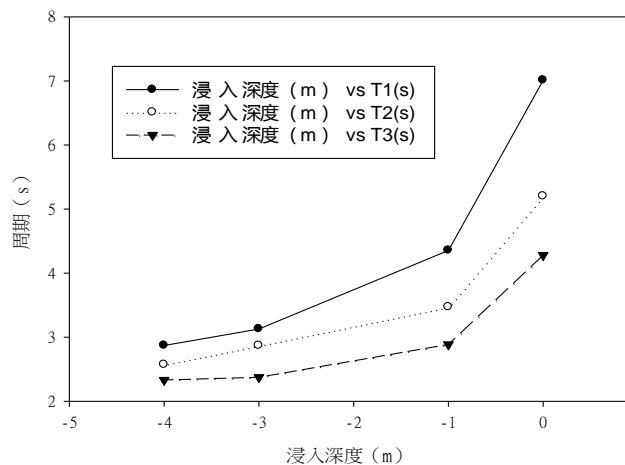
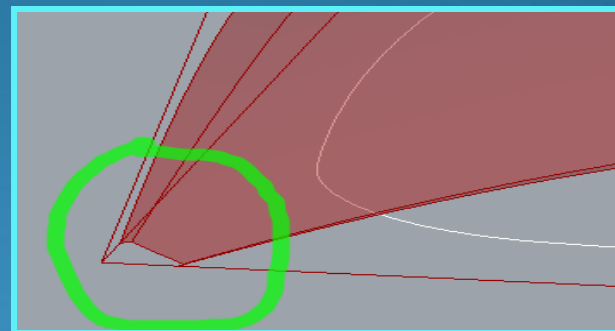
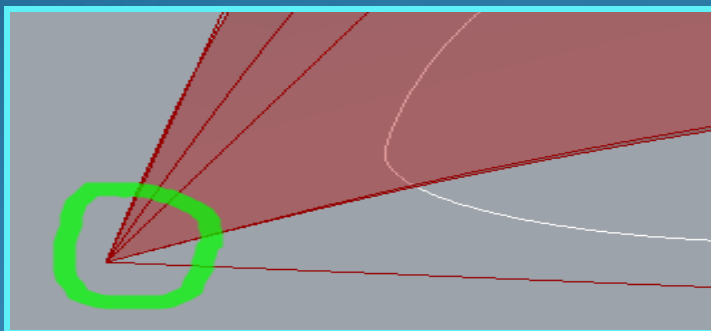
65°翻檐



# 吕梁体育中心一体育馆

## 最佳浸入0.000高度

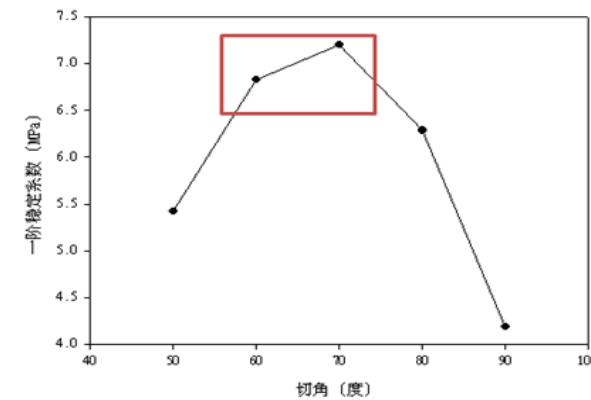
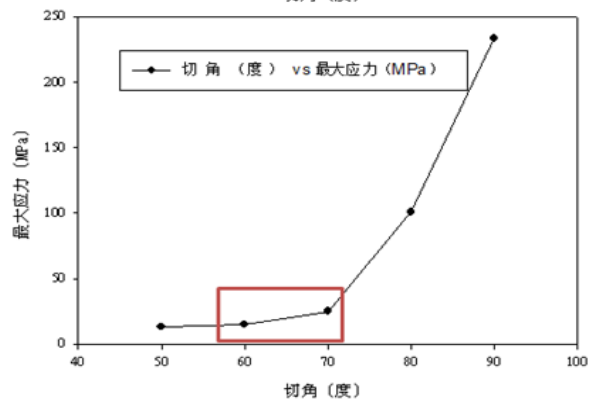
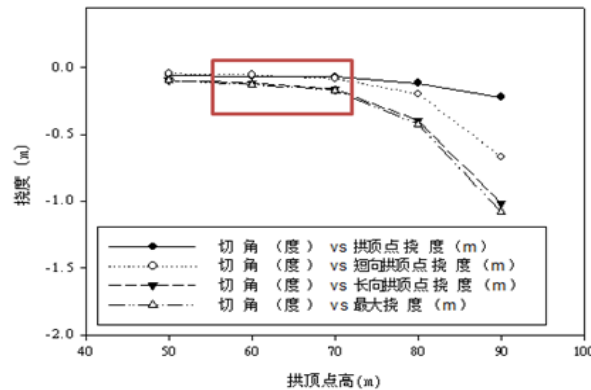
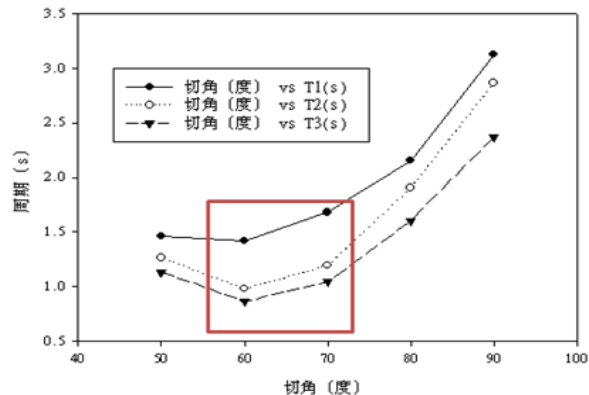
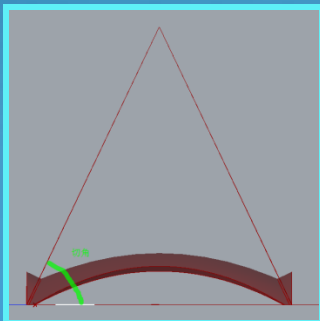
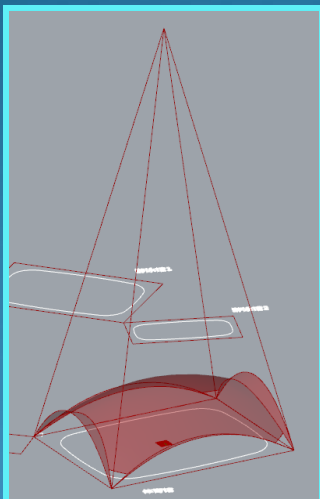
壳体的浸入地面深度直接影响到壳体的支撑边界的大小，直接影响到壳体的力学性能，随壳体浸入深度的增加，壳体的周期逐渐减小，一阶稳定系数提高。



# 吕梁体育中心一体育馆

## 最佳反檐角度

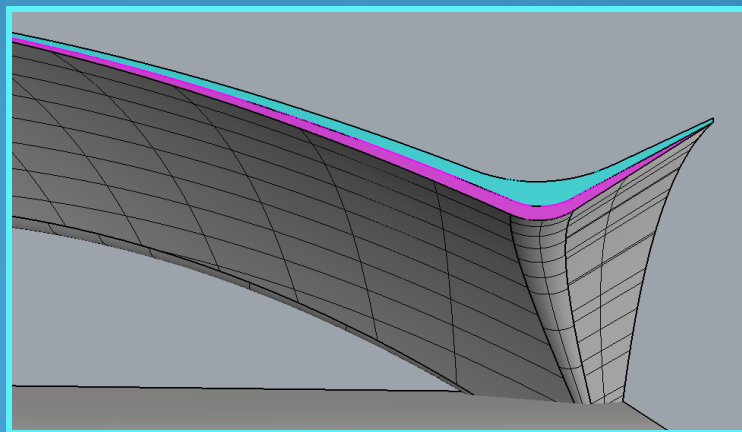
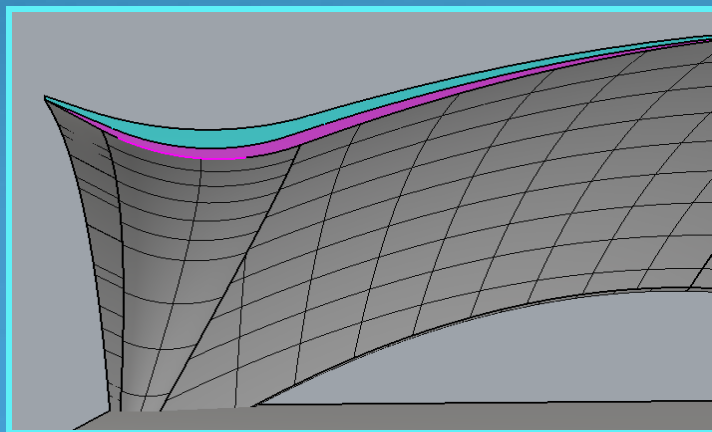
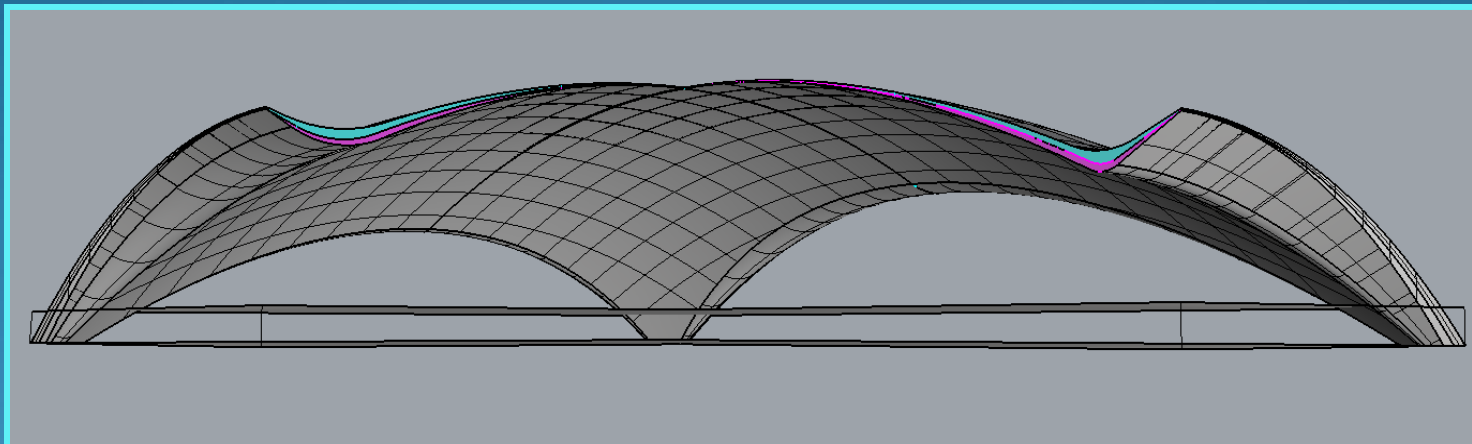
反檐角度在60-70度之间时，壳力学性能较好，选择65°作为反檐角度进行后续计算。



# 吕梁体育中心一体育馆

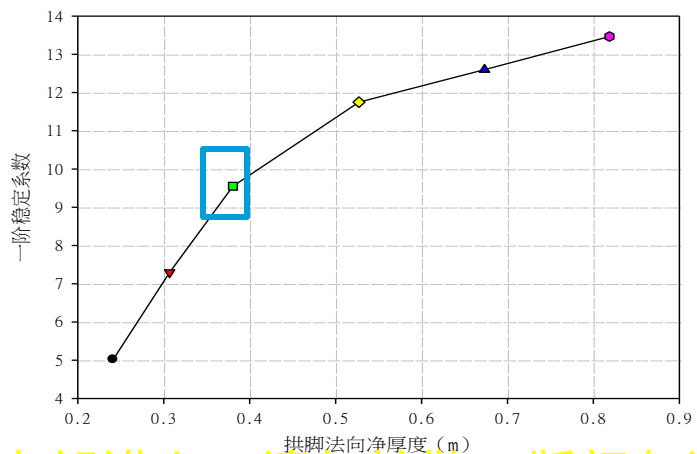
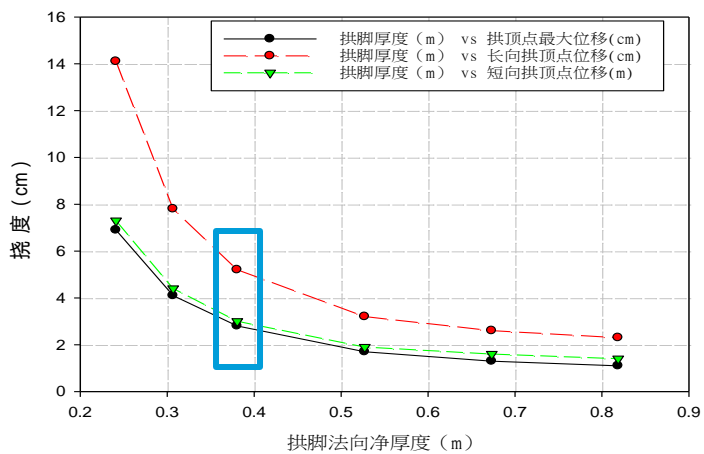
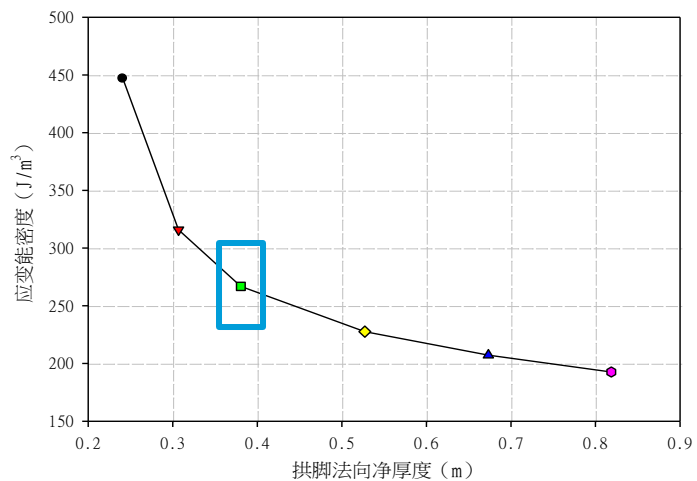
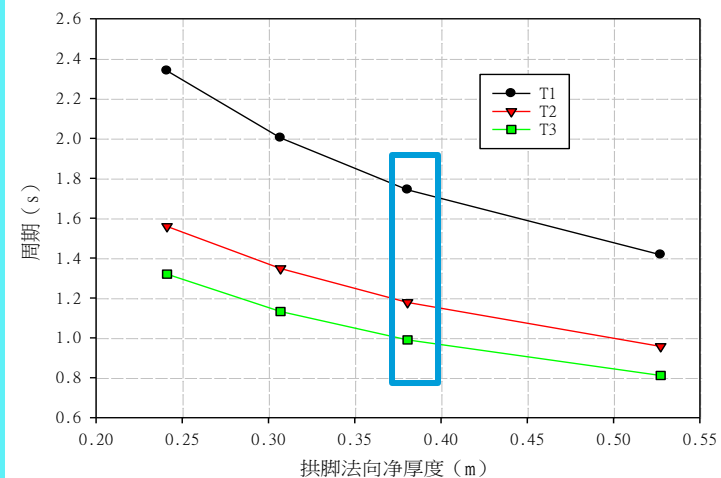
## 改变壳整体厚度

保证壳顶点处厚度及上表面曲面不变，修改下表面曲面参数从而改变壳不同位置的厚度。



# 吕梁体育中心一体育馆

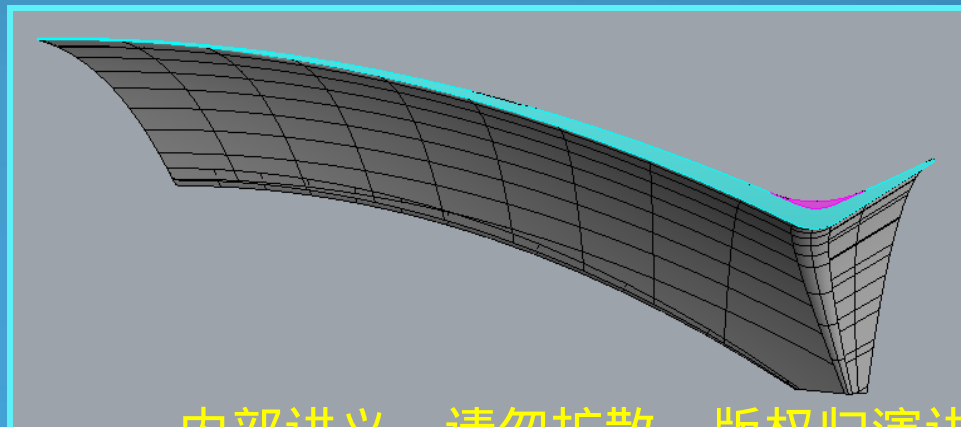
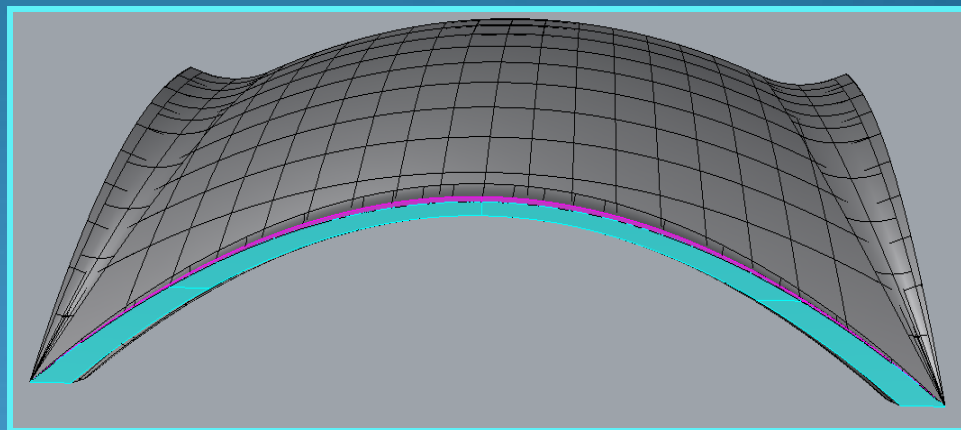
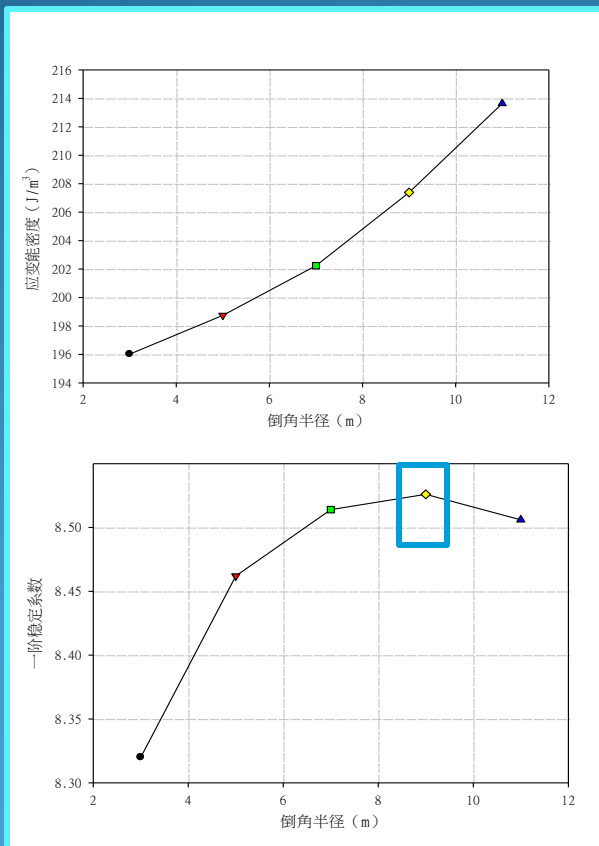
## 改变壳整体厚度



# 吕梁体育中心一体育馆

## 改变短向拱、长向拱反檐倒角半径

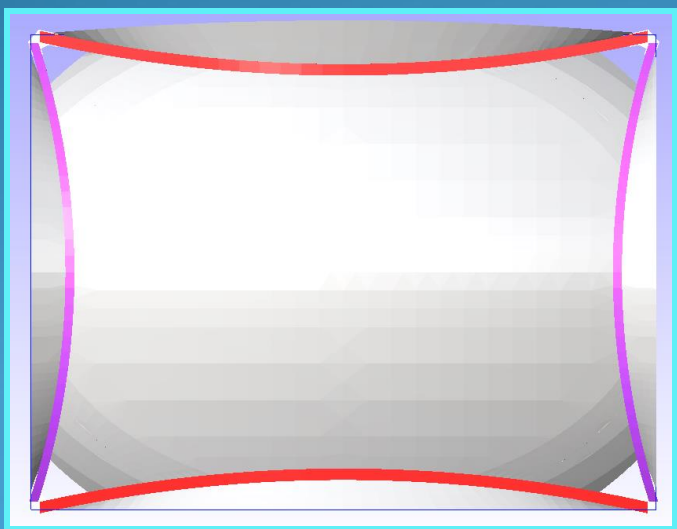
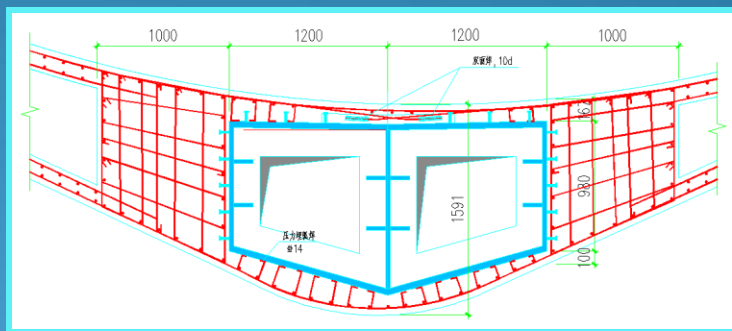
由于倒角半径越小拱中间部位重量分布越少，对拱变形越有利；同时由于反檐与壳成约 $90^\circ$ 的V型截面，反檐最外点挠度并不大，因此选用倒角半径均为3m。



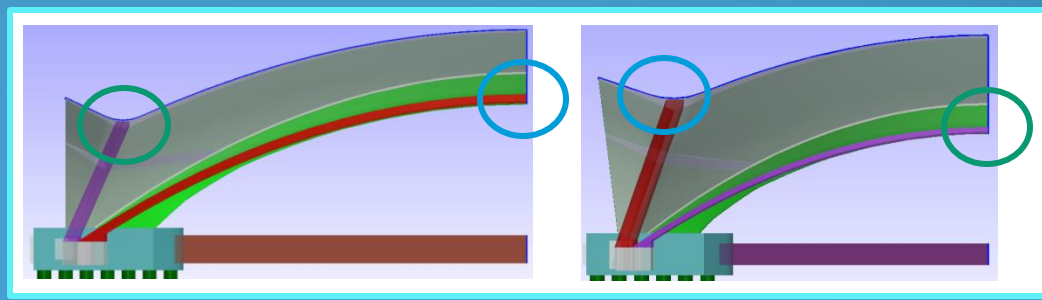
# 吕梁体育中心—体育馆

## 壳体边缘钢拱

- 在混凝土壳体倒角位置设置钢拱，增强壳体边缘部位的刚度和延性。钢拱位于混凝土壳体上下层表面中间，与壳体形状契合；
- 钢拱以 $65^\circ$ 向场地内侧倾斜，以抵抗壳体向外侧的推力；
- 长向、短向钢拱截面型心所在曲线的交点与基础预应力拉梁的交点重合，传力直接避免附加弯矩；
- 钢拱由拱顶点至拱脚截面高度逐渐增加，长向钢拱高度1.2m变至1.6m，短向钢拱由0.95m变至1.2m。



钢拱平面位置



短向钢拱截面

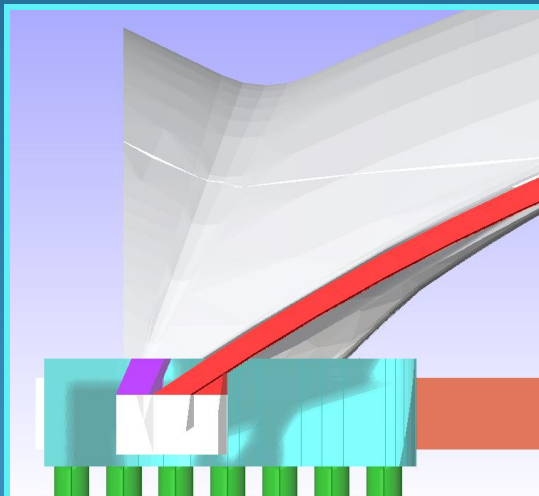
长向钢拱截面



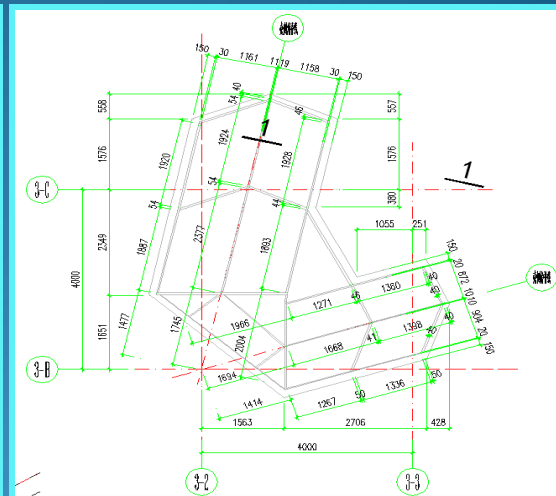
# 吕梁体育中心—体育馆

## 钢拱脚节点设计分析

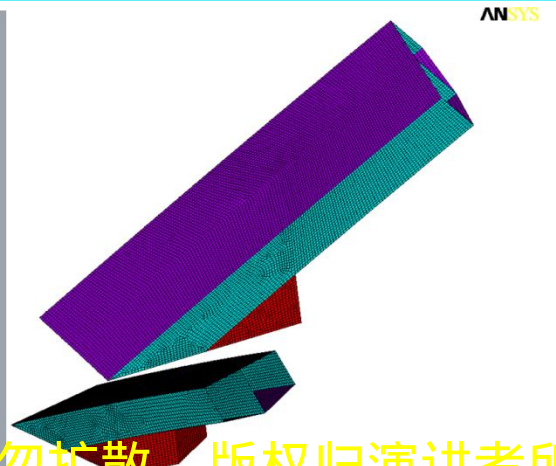
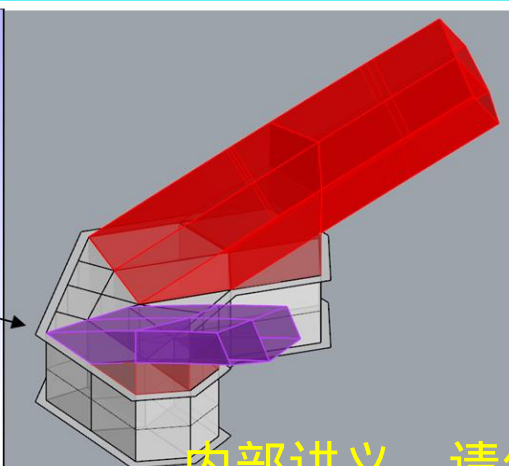
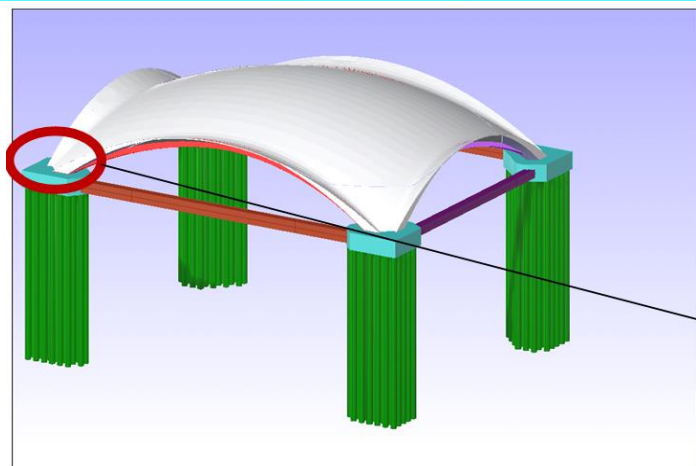
取长、短向拱与壳体支座处的节点进行有限元分析，以保证节点连接的可靠性。采用大型通用有限元分析软件ANSYS对该节点进行弹塑性分析，考虑到计算的效率及精度，对该节点采用ANSYS中的4节点shell1181壳单元进行分析，该单元具有良好的弹塑性分析特性。



壳体边缘钢拱及拱脚示意图



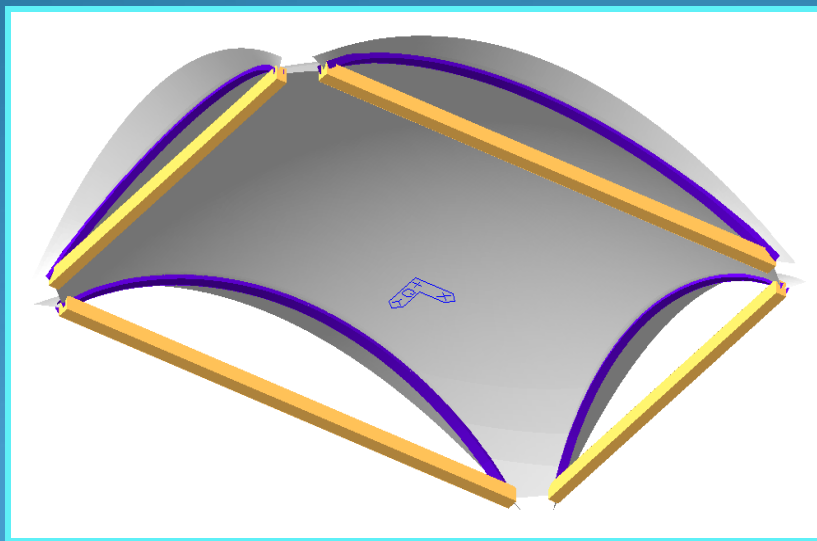
壳体边缘钢拱水平剖面示意



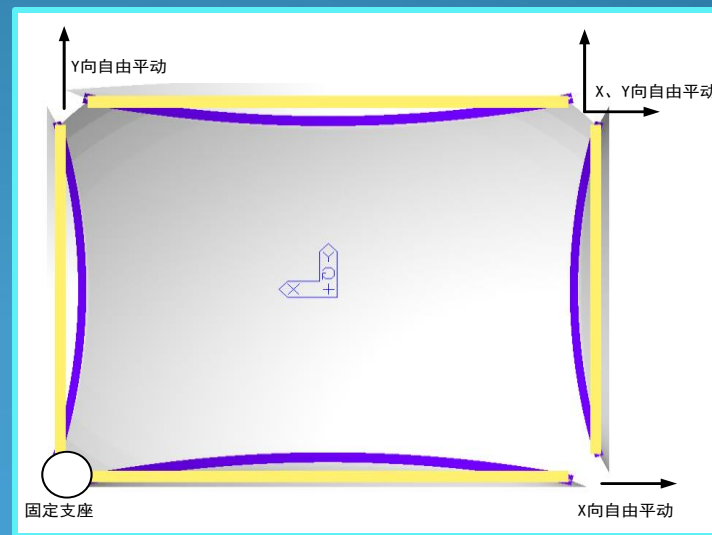
# 吕梁体育中心一体育馆

## 基础拉梁计算

采取对承台周边的土体进行加固的办法来提高土体对壳体桩基承台的约束作用和抗侧能力，通过桩基水平承载力、承台周边土体和拉索共同作用来抵抗地震作用下的水平推力。为提高桩的水平承载力，在加固桩顶承台周边土体之前，对桩顶所在土层进行碾压处理，并对承台周围土体进行分层振实回填。



带基础拉梁计算模型示意



带基础拉梁计算模型约束示意

# 玉环博物馆、图书馆

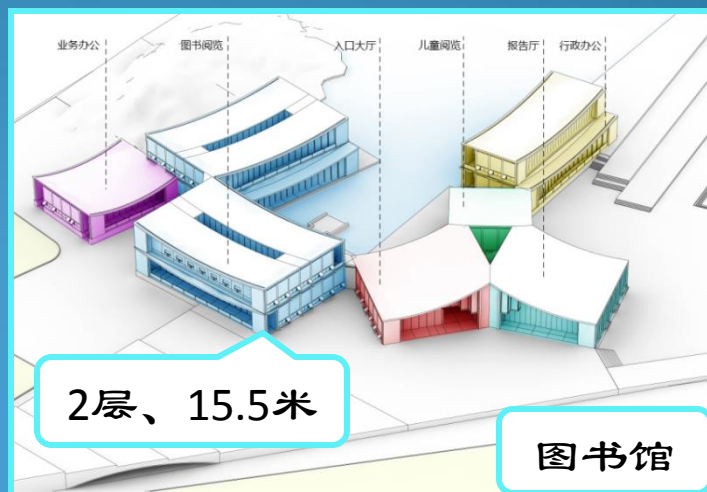
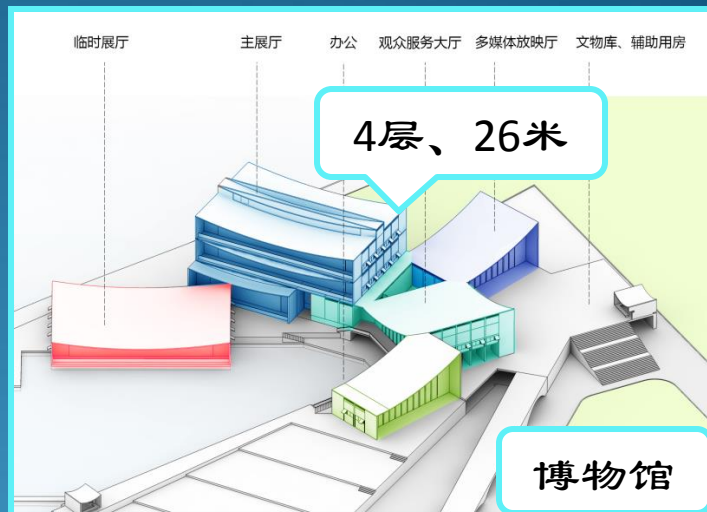
## 建筑概况



# 玉环博物馆、图书馆

## 建筑概况

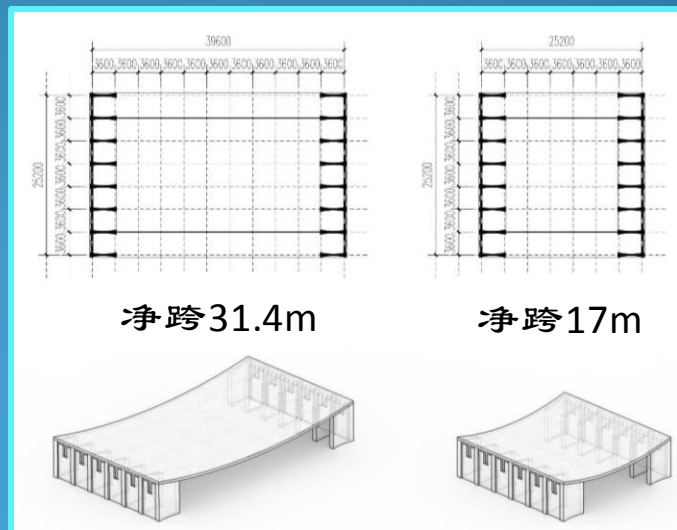
- 玉环县博物馆（右上）建筑用地面积  $7752\text{m}^2$ ，建筑面积  $7947.14\text{m}^2$ 。建筑功能单元呈水平展开的布局方式，基座之上的入口大厅和茶座位于群组中部，多功能厅和陈列展厅部分分别向南北两翼展开。技术和办公用房、藏品库房、设备机房位于一层基座层内。建筑高度（最高点） $26\text{m}$ 。
- 玉环县图书馆新馆（右下）建筑用地面积  $10351\text{m}^2$ ，建筑面积  $10500\text{m}^2$ ，地上2层，局部地下1层，建筑高度（最高点） $15.5\text{m}$ 。
- 博物馆与图书馆均由多个单体建筑组成。



# 玉环博物馆、图书馆

## 建筑造型

- 建筑以几种“反曲悬索屋面”几何单元为范型，通过并置、斜交、叠合、包含、堆积、聚合等几何操作手法，在场地上放置了18个单元。
- 反曲屋面不仅使建筑有着起伏美妙的轮廓线，在室内也形成了较大的无柱空间。为形成曲面的形式，在屋面部分采用了现浇混凝土悬索结构，悬索由单元两端的剪力墙筒体提供拉力，现浇混凝土作为悬索的配重维持了悬索的稳定。楼面部分采用了箱形结构，受力构件为鱼腹式钢筋混凝土工字形梁，结合预制混凝土楼板。为了表现微妙的曲面形态，室内不再需要常规的吊顶而是直接将混凝土裸露表现材料的质感。



# 玉环博物馆、图书馆

## 自然条件

### • 建筑结构安全等级及设计使用年限

建筑结构的等级： 二级  
设计使用年限： 50年  
建筑抗震设防类别： 非抗震设防区  
结构重要性系数： 1.0  
建筑地基基础设计等级： 乙级  
建筑物的耐火等级： 一级

### • 风荷载

$w_0=1.20\text{kN/m}^2$  (重现期50年)，地面粗糙类别：A类。  
屋面设计时，考虑其为对风荷载敏感结构，影响系数取1.1。

### • 温度作用

合拢温度（后浇带封闭温度）：  $10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$   
最大正温差：  $34-10=24^{\circ}\text{C}$   
最大负温差：  $-0-20=-20^{\circ}\text{C}$   
混凝土收缩应力松弛系数： 0.3  
混凝土温度应力松弛系数： 0.4

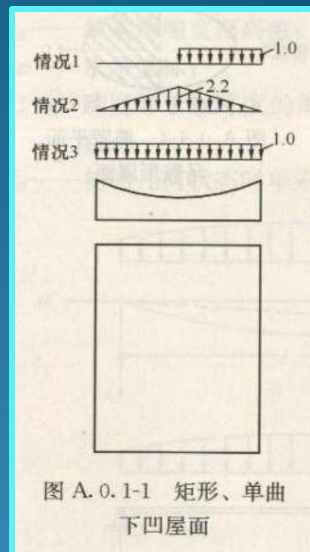
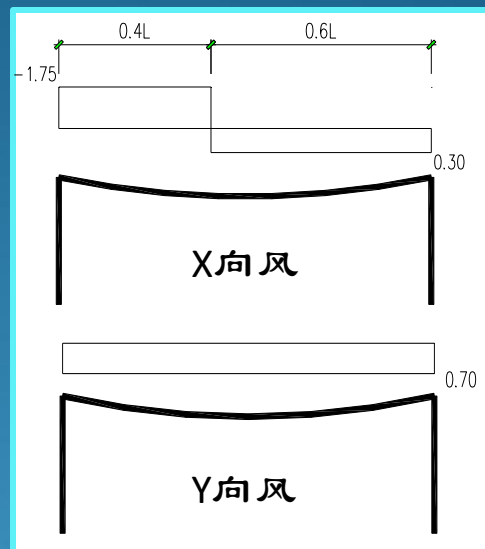


图 A.0.1-1 矩形、单曲  
下凹屋面

体型系数

雪荷载分布形式

### • 雪荷载

基本雪压0.35，雪荷载准永久系数分区为Ⅲ区。

混凝土收缩当量温度：  $-16.0^{\circ}\text{C}$

混凝土收缩有效当量温度：  $-6.4^{\circ}\text{C}$

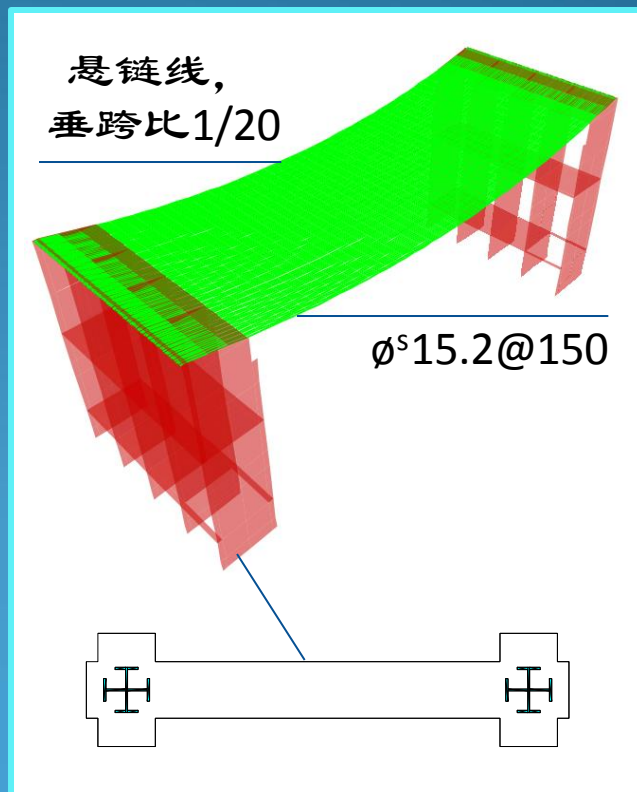
混凝土计算正温差：  $9.6^{\circ}\text{C}$

混凝土计算负温差：  $-14.4^{\circ}\text{C}$

# 玉环博物馆、图书馆

## 结构选型

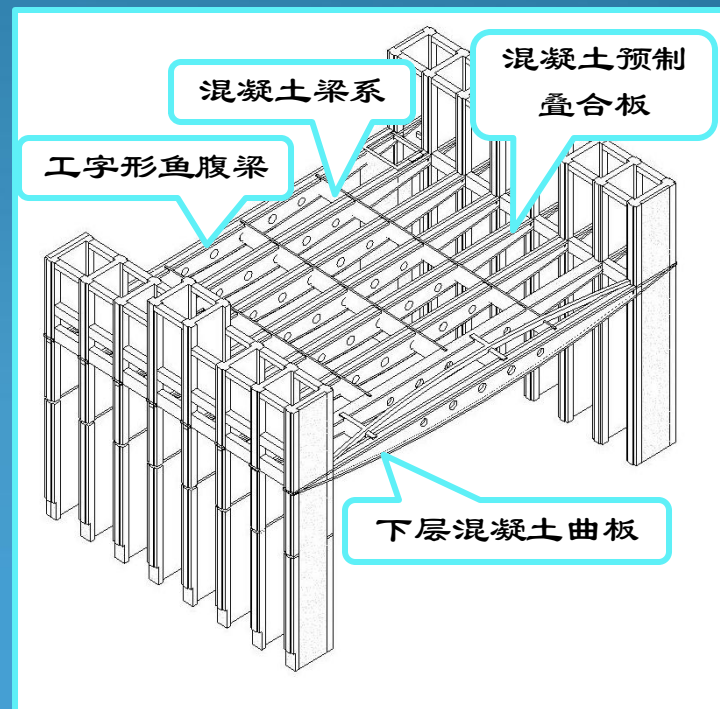
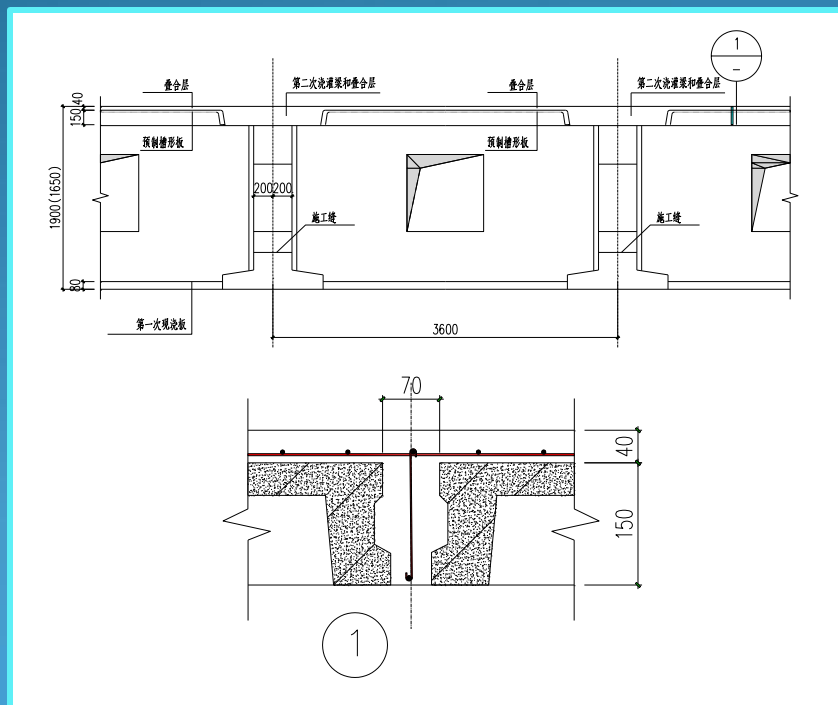
- 图书馆结构高度最高15.5m，博物馆结构高度最高24m，最大净跨：31.4m，抗侧力体系：剪力墙结构，墙厚300mm~600mm。
- 针对建筑外观特点，屋盖均采用悬索屋面结构，各单体建筑统一采用单层悬索重型屋面结构。为了给拉索提供支承力，在矩形平面的两端结合建筑功能布置多道平行的钢筋混凝土剪力墙，各剪力墙之间通过扩大其端部边缘墙体厚度和设置高连梁使得建筑平面端部形成筒体，一方面满足结构竖向和侧向抗力要求，另一方面为建筑提供了可供灵活布置的大空间，从而形成钢筋混凝土剪力墙抗侧力结构体系，单层悬索屋面结构，屋面悬索采用 $\phi^s 15.2$ 或 $\phi^s 17.8$ 钢绞线。



# 玉环博物馆、图书馆

## 结构选型

- 楼面结构针对建筑下悬鱼腹式吊顶要求采用了箱形结构方案，既满足了建筑外观要求，方便了管线布置，提高了上下层之间的隔声性能，同时结构用料也比较经济，近32米结构净跨混凝土折算厚度约 $43.4\text{cm}/\text{m}^2$ 。





# 玉环博物馆、图书馆建筑设计技术

## 基础设计

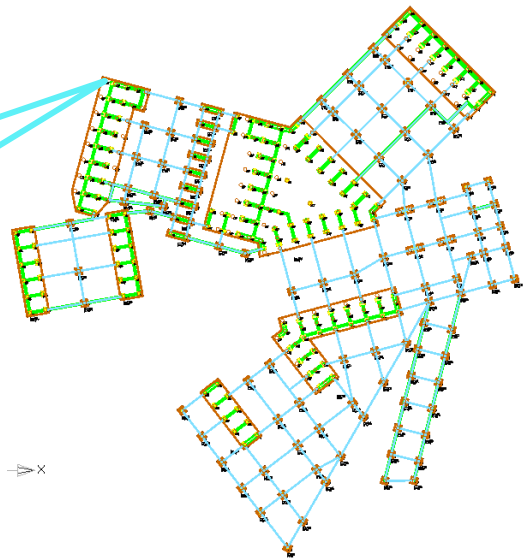
- 拟建场地原始地貌单元属海岸平原。地表面平坦，场地内地基土埋深、层厚变化较大，性质差异较大，属于不均匀地基，且场地内有较深厚的淤泥土层。
- 根据地勘报告建议，选用桩型为800直径的钻孔灌注桩，桩长约为60m，为提高单桩承载力，桩底桩侧采用复式后压浆技术，预估单桩承载力为2000kN。
- 由于悬索屋面的作用，结构墙体受到偏拉作用，因此墙体在基础位置存在较大弯矩，为平衡此弯矩采用偏心布桩。



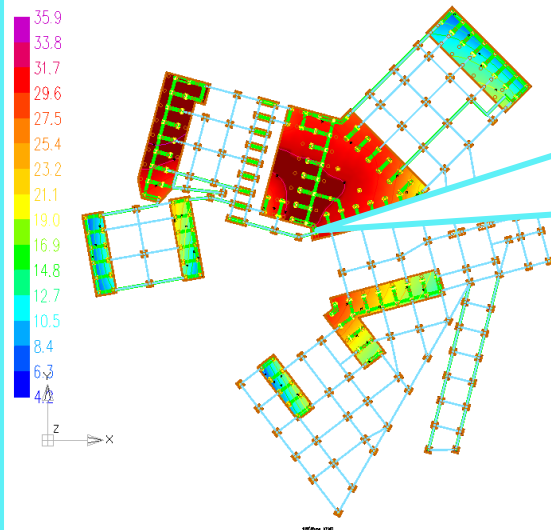
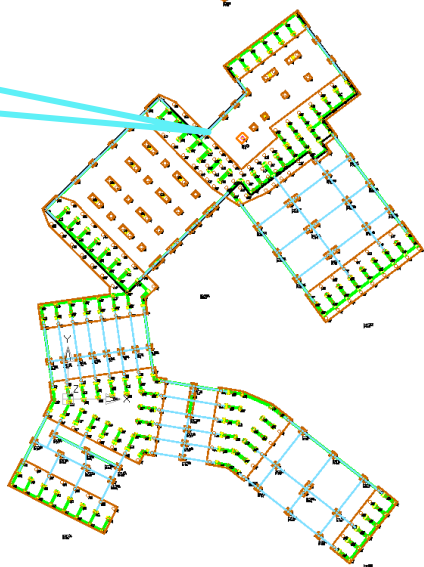
# 玉环博物馆、图书馆建筑设计技术

## 基础设计

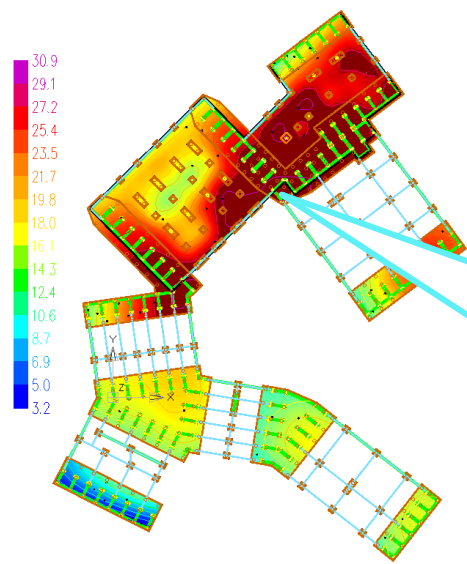
最大单桩  
受力1726



最大单桩  
受力1837



最大沉降  
35.9mm,  
最大沉降  
差1/1356



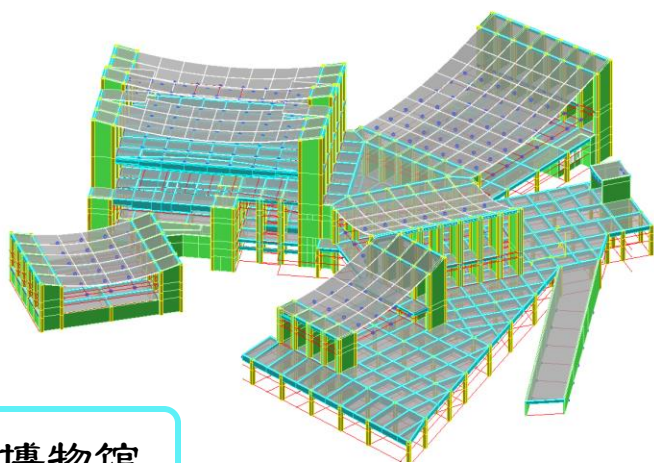
最大沉降  
30.9mm,  
最大沉降  
差1/1582

# 玉环博物馆、图书馆建筑设计技术

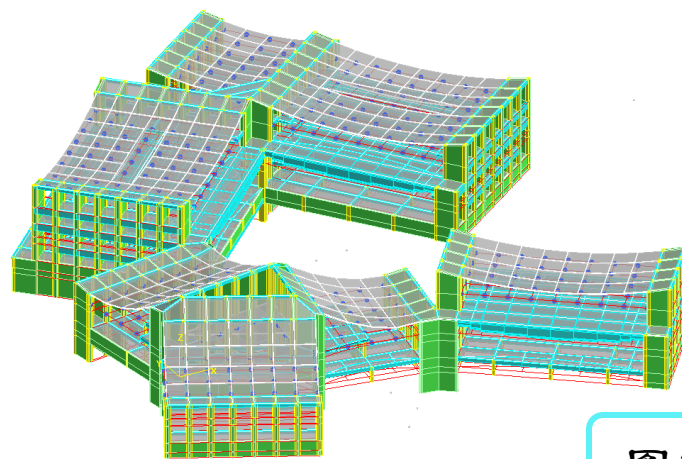
## 结构整体计算

- 结构处于非抗震区，无抗震超限情况；
- 采用盈建科建筑设计程序、SAP2000计算程序计算；
- 计算假定：

采用弹性曲面壳等效屋面结构对下部结构的影响  
结构嵌固端位于基础顶面  
计算多个风向角（每个单体建筑主轴与次轴方向）



博物馆



图书馆

# 玉环博物馆、图书馆

## 结构整体计算

### 图书馆

		YJK	SAP2000	备注
振型 (s)	第一周期	0.4111		
	第二周期	0.2030		
	第三周期	0.1856		
	扭转周期/平动周期	-	-	-
顶点最大位移 (mm)	风 (最不利风向角 $64^\circ$ )	3.57		
最大层间位移角	风 (最不利风向角 $64^\circ$ )	1/3380		
总质量 (吨)		45759.2		

### 博物馆

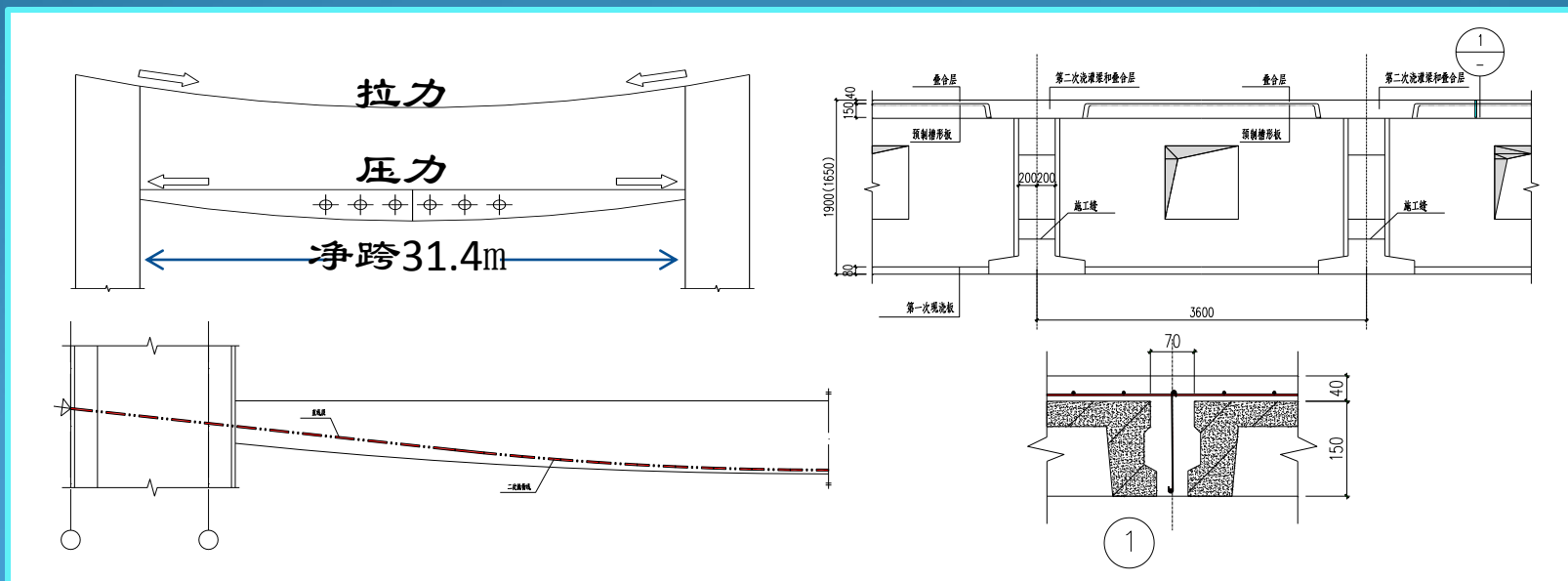
		YJK	SAP2000	备注
振型 (s)	第一周期	0.3852	0.3844	
	第二周期	0.3755	0.3539	
	第三周期	0.3224	0.3087	
	扭转周期/平动周期	-	-	
顶点最大位移 (mm)	风 (最不利风向角 $0^\circ$ )	5.89		
最大层间位移角	风 (最不利风向角 $64^\circ$ )	1/2666		
总质量 (吨)		32563.4		

由于结构之间连接较弱，结构的自振振型主要表现为各单体各自独立震动。

# 玉环博物馆、图书馆

## 楼面工字形鱼腹梁设计

- 针对建筑楼面采用下悬鱼腹式吊顶采用箱形结构。下层鱼腹板采用80mm现浇板，上层板采用预制混凝土板加叠合现浇层。
- 由于上部悬索屋面对两侧墙体有拉力作用，作为相邻下层结构，鱼腹梁楼层有较大的轴压力，鱼腹梁受力状态复杂，为大偏压构件。
- 针对鱼腹梁的受力特点，预应力布筋形式采用直线与抛物线相切布置。

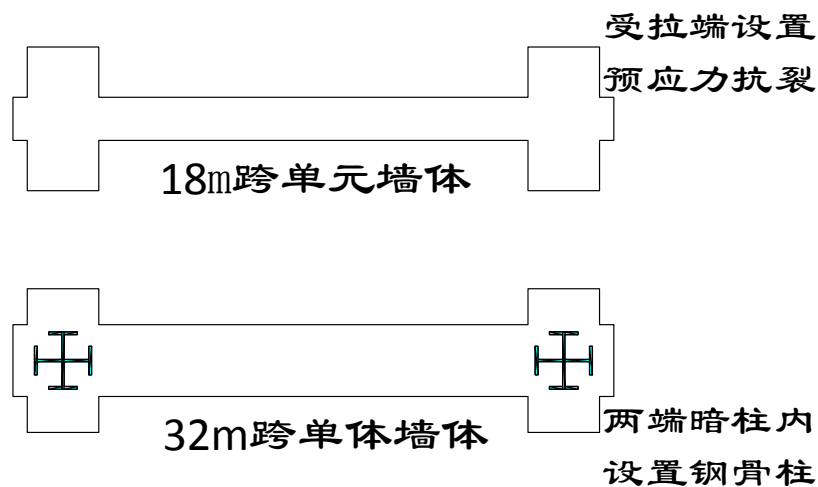
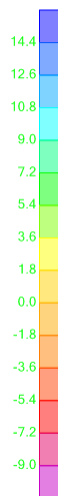
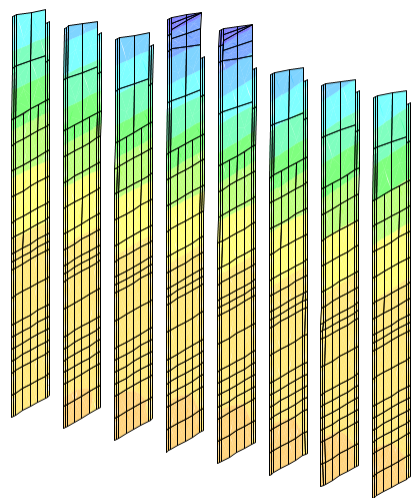


# 玉环博物馆、图书馆

## 支撑墙体设计

- 由于上部悬索屋面对两侧墙体的拉力作用，墙体根部有较大的弯矩，在墙体外侧存在有较大拉力。

单体	跨度/墙高	墙体位移
博物馆	32m/26m	13.5mm(1/1148)
图书馆	32m/16m	5mm(1/3200)



# 玉环博物馆、图书馆

## 屋面悬索结构设计

- 采用Sap2000 V15. 2. 1, 考虑几何非线性
- 计算控制指标:

	荷载工况	计算控制条件
强度条件	D+1.4W	索应力不小于 $0.1f_{tpk}$
	其他荷载荷载下	索应力不大于 $f_{tpk}/2.2$
刚度条件	D+W	结构的挠跨比应小于 $1/400$ (考虑了混凝土壳体的刚度作用, 参考混凝土薄壳结构设计规程)
	D+L	结构的挠跨比应小于 $1/300$
普通钢筋配筋	D+1.4W	普通钢筋抵抗风荷载引起的弯矩作用

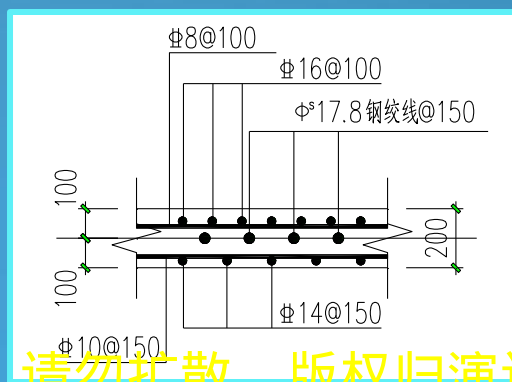
通过结构的强度确定所选用的索构件截面; 通过结构的刚度条件确定混凝土现浇的厚度。

# 玉环博物馆、图书馆

## 屋面悬索结构设计

	建筑单体	跨度	板厚	索截面	索应力 (最大/最小)	挠度 (向上; 向下)
博物馆	1号 (不等高)	31.4	180	$\phi^s17.8@150$	570.2/216.3	1/581; 1/2093
	2、3号 (不等高)	17.0	150	$\phi^s15.2@200$	540.6/193.8	1/680; 1/1985
	4号 (等高)	17.0	150	$\phi^s15.2@200$	567.6/240.4	1/1172; 1/2125
	5号 (等高)	31.2	200	$\phi^s17.8@150$	618.8/221.2	1/305; 1/709
图书馆	1、3、4b号 (等高)	31.4	180	$\phi^s17.8@150$	570.3/245.1	1/680; 1/654
	2号 (等高)	17.0	150	$\phi^s15.2@200$	508.0/238.6	1/1172; 1/2125
	4a、5、6号 (等高)	17.0	150	$\phi^s15.2@200$	508.0/189.3	1/1491; 1/3770

根据风荷载引起的壳面平面外弯矩配置普通钢筋。

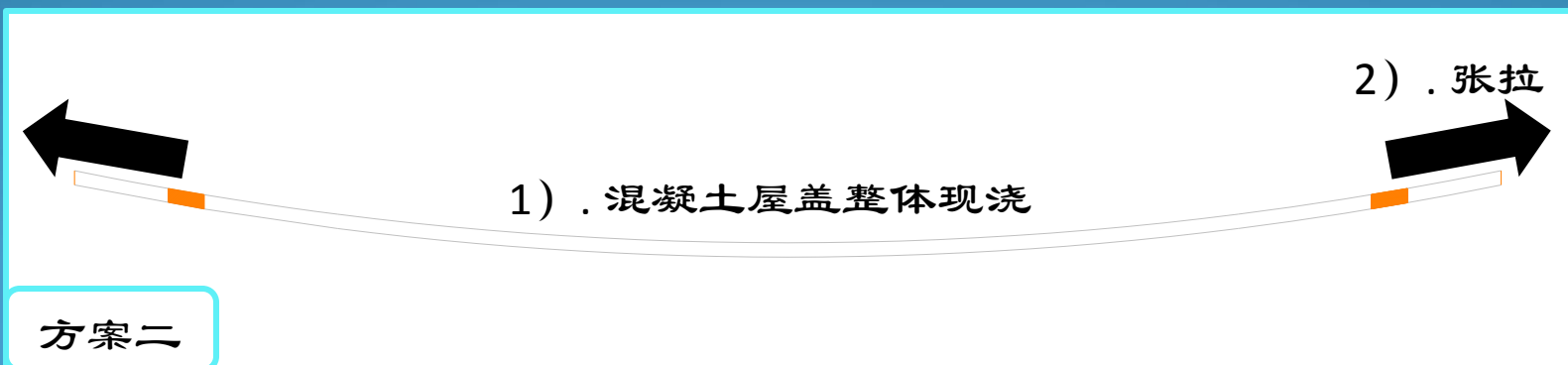
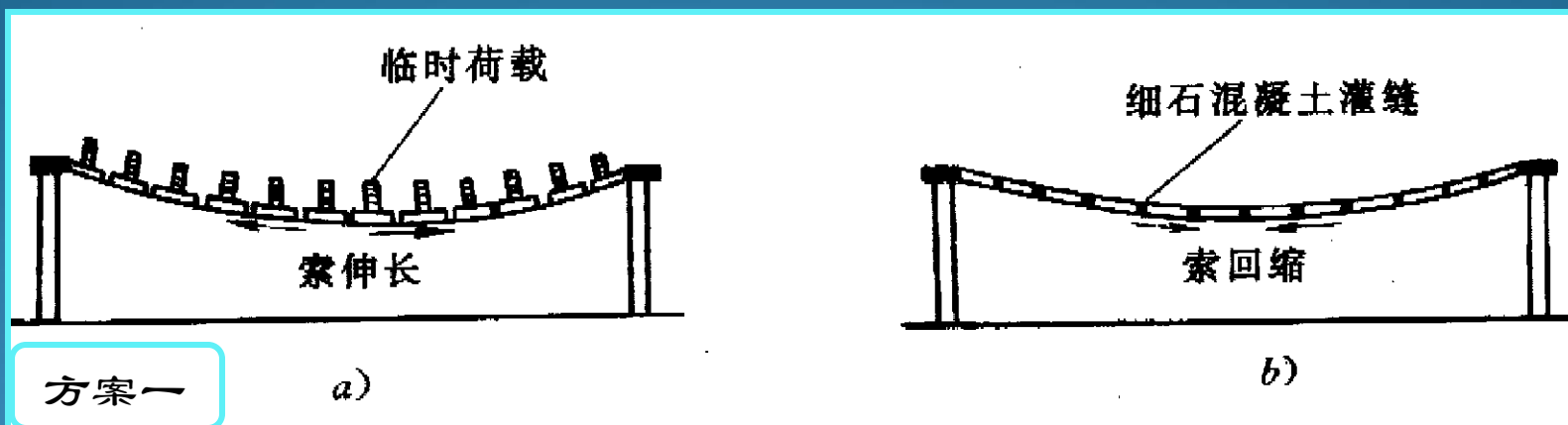




# 玉环博物馆、图书馆

## 屋面悬索结构设计

- 加载方案的选择



方案二满足建筑对建筑室内空间的要求。

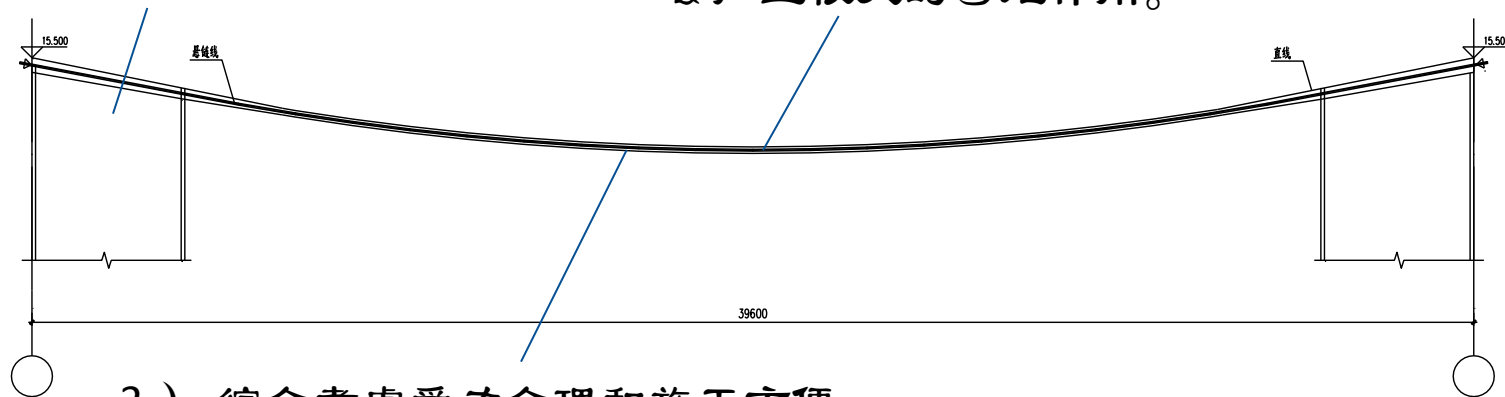
# 玉环博物馆、图书馆

## 屋面悬索结构设计

- 张拉过程分析

1) . 预加力是否会施加在墙上

2) . 张拉预应力时，板中会不会产生很大的弯矩作用。



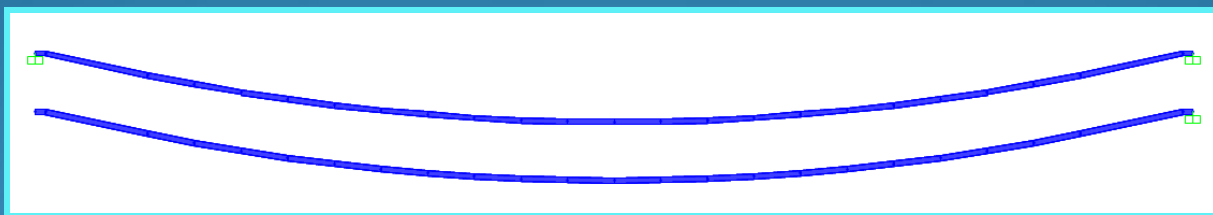
3) . 综合考虑受力合理和施工方便，  
预应力该采用什么样的张拉方案？

# 玉环博物馆、图书馆

## 屋面悬索结构设计

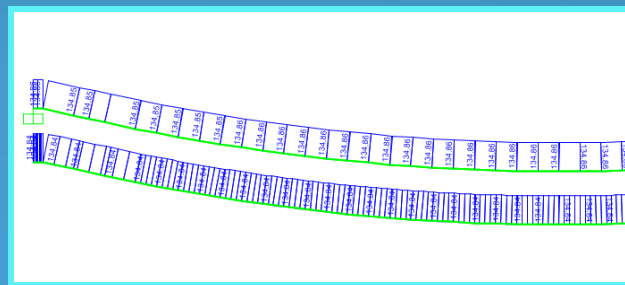
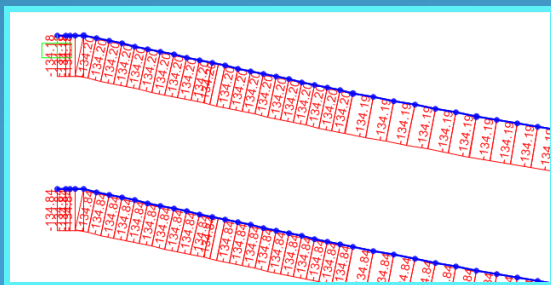
- 张拉过程分析

上述问题，实质上是为预应力构件的次内力问题，通过建立典型结构模型，分析次内力影响的大小。



截取150X180的典型区间，做为模拟单元。

上梁两端完全固支（模拟一次性张拉），下梁一端自由，一端固支（模拟支座处设置后浇带，采用二次张拉）。

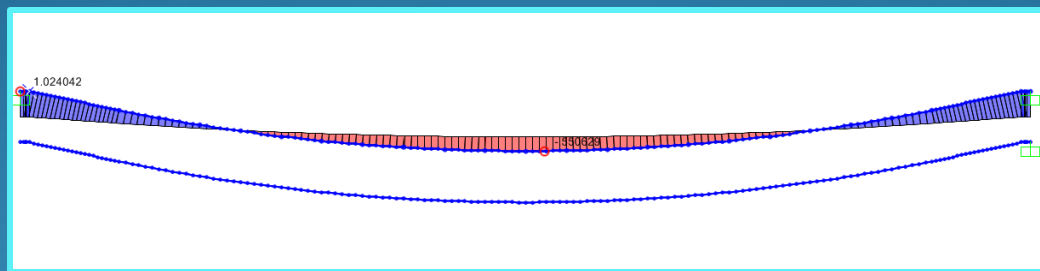


施加到板中的预加轴力相差很小，相差仅0.49%。也就是说不设后浇带直接张拉与设后浇带采用二次张拉，施加的预加轴力相差不多，预应力筋的拉力亦相差很小。

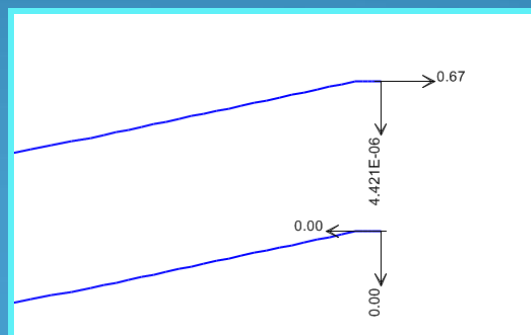
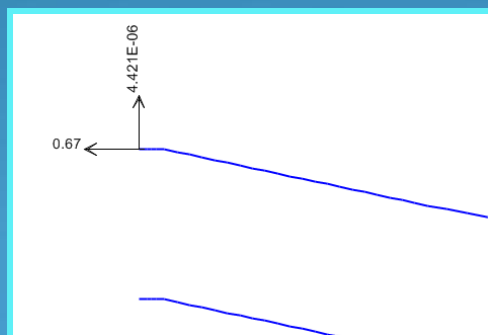
# 玉环博物馆、图书馆

## 屋面悬索结构设计

- 张拉过程分析



弯矩对比，上梁支座处为1.02kNm，跨中处为0.55kNm，下梁各处弯矩均为0。  
本工程若直接加预应力，由于板端实际约束达不到完全固支，实际上板的次弯矩会更小。



考察支座的次内力，当板端完全约束，其次内力才0.67kN，实际上会更小。

综上所述，张拉板内预应力筋，通过后浇带使板不受剪力墙的约束，可避免次内力的不利影响，但影响不大，且增加了施工难度。应当优先考虑不设后浇带，直接进行张拉。

# 玉环博物馆、图书馆

## 屋面悬索结构设计

- 悬索张拉预拉力选取：

采用缓粘结钢绞线。

通过上述分析，通过张拉悬索，可以对曲面板施加上预压力，因而，整个屋面可以看做一个悬链线形的曲线预应力混凝土构件，构件整体参与受力，一个轴心受拉构件。

综合结构的环境类别，其预应力抗裂等级为一级。因此确定在悬索中应当建立的最小有效张拉力应为

$$T \geq \frac{ql}{8f}$$

f为悬链线的垂跨比；

谢 谢