



黄河水利职业技术学院

YELLOW RIVER CONSERVANCY TECHNICAL INSTITUTE



4拱坝



李梅华

2020年12月26日

教学目标

素质目标

1. 激发学习兴趣，培养创新意识；
2. 树立追求卓越、精益求精的岗位责任，培养工匠精神；
3. 传承大禹精神、红旗渠精神、抗洪精神、愚公移山精神，增强职业荣誉感，民族自豪感。

知识目标

1. 了解拱坝的发展史；
2. 理解拱坝、薄拱坝、重力拱坝、拱中心角、水平拱圈等几个概念；
3. 掌握拱坝顶部自由跌流式泄水、鼻坎挑流式泄水、滑雪道式泄水等特点、适用条件；
4. 掌握拱坝的空中冲击式消能等特点、适用条件；
5. 理解拱坝的分缝、防渗、垫座等构造。

技能目标

1. 会区分坝型；
2. 会先择不同类型的拱坝；
3. 会选择不同的泄水方式；
4. 会选择不同的消能方式；
5. 能识读拱坝的设计图，指出各个部位的名称。

主要内容



01 坝的发展史

02 拱坝特点

03 拱坝对地形地质要求

04 拱坝的类型

05 拱坝泄洪方式

06 拱坝的消能和防冲



国之重器——白鹤滩水电站，创造了多项世界第一。

- (1) **单机容量100万kW居世界第一**。电站首次全部采用国产单机容量百万千瓦级水轮发电机组，使我国水电制造技术从“追赶”走向“引领”。
- (2) **300m级高坝抗震参数世界第一**。电站最大坝高289m，属于300m级特高拱坝，抗震参数在300m级特高拱坝中居世界第一。
- (3) 首次在300m级特高拱坝全坝使用低热水泥混凝土。这在国际上尚属首例，其应用可保证大坝基本上不产生宏观裂缝，**打破了“无坝不裂”这个魔咒**。
- (4) **无压泄洪洞群规模世界第一**。电站3条泄洪洞均呈直线布置在左岸，最大泄量为12300m³/s，单侧泄量世界第一。

职业荣誉感，民族自豪感

白鹤滩水电站

案例

白鹤滩水电站位于金沙江下游、四川省宁南县和云南省巧家县境内，距巧家县城45km，是金沙江下游梯级中的第二级。电站上接乌东德梯级，下邻溪洛渡梯级，距离溪洛渡水电站195km，控制流域面积43.03万km²，占金沙江流域面积的91.0%。坝址多年平均流量4110 m³/s，平均年径流量1296亿m³。工程以发电为主，兼有防洪、拦沙、改善下游航运条件、库区通航等综合效益，16台单机100万千瓦的水轮发电机组，总装机容量1600万kW，电站建成后，将成为中国第二大水电站，世界第三大水电站。



▲ 白鹤滩水电站大坝3D视图（白鹤滩工程建设部供图）

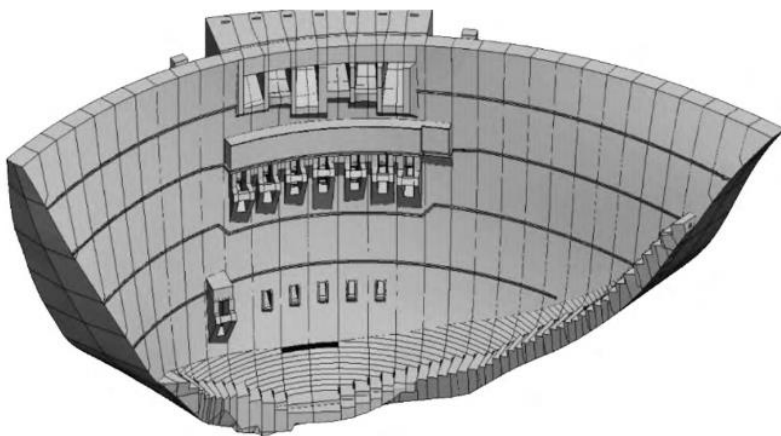


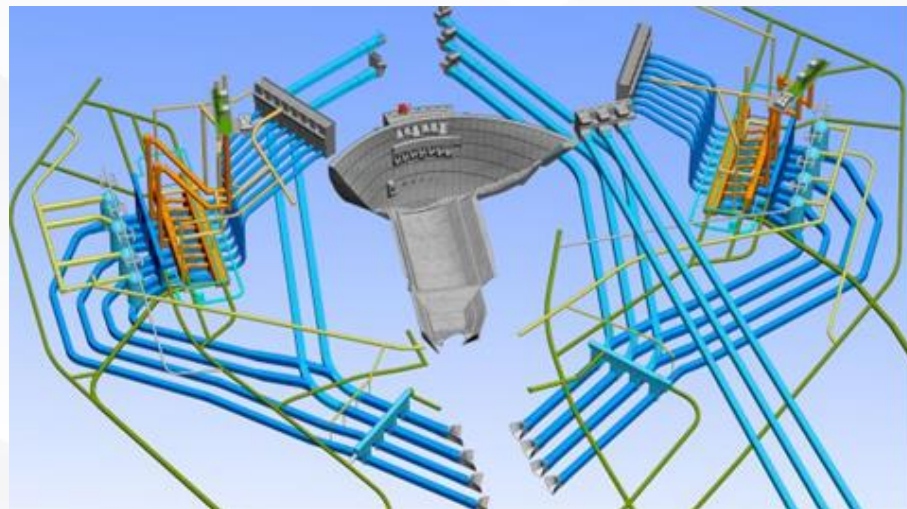
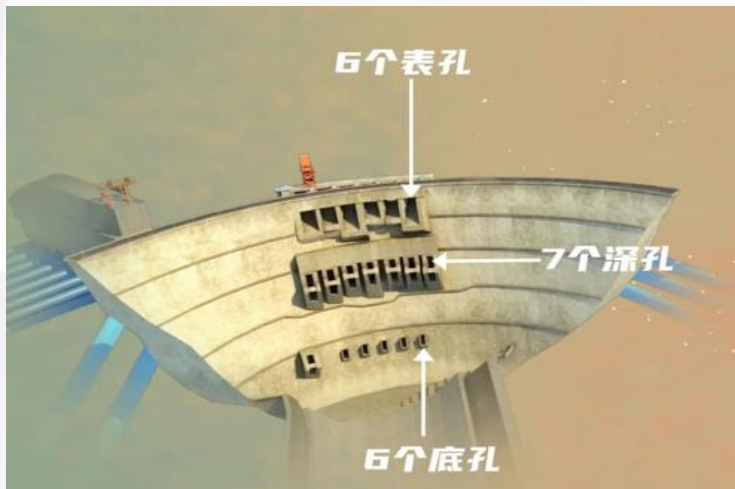
图2 白鹤滩拱坝体形结构示意图



白鹤滩水电站

案例

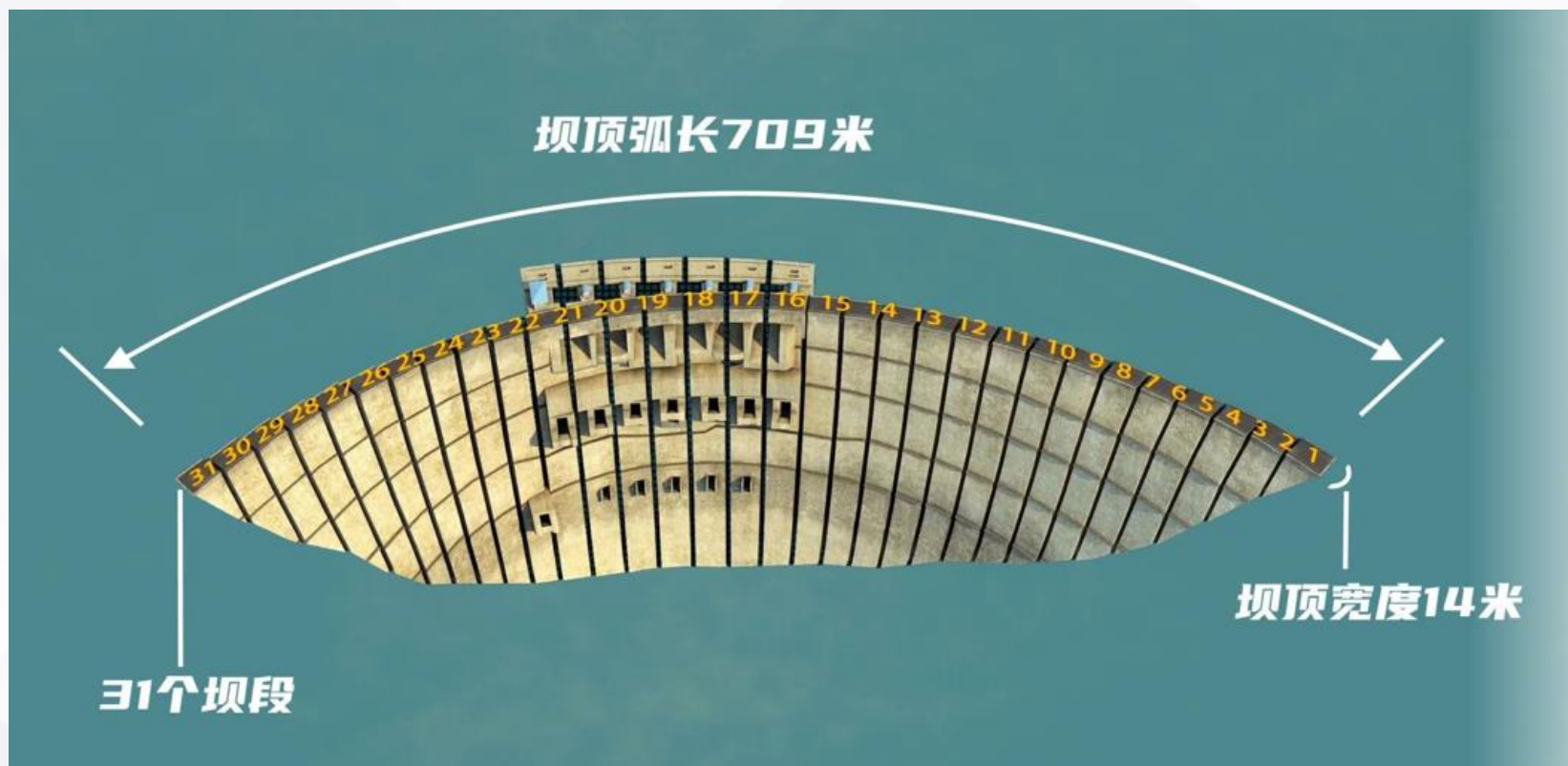
白鹤滩水电站工程主要由混凝土双曲拱坝、水垫塘及二道坝、左右岸引水发电系统、泄洪洞等建筑物组成。白鹤滩水电站按千年一遇洪水设计，万年一遇洪水校核，相应洪水流量分别为 $38800\text{m}^3/\text{s}$ 和 $46100\text{m}^3/\text{s}$ 。泄洪建筑物由坝身孔口和岸边泄洪洞组成。坝身设6个表孔（ $14.0\text{m}\times 15.0\text{m}$ ）、7个深孔（ $5.5\text{m}\times 8.0\text{m}$ ），有6个导流底孔、坝下水垫塘消能；岸边3条泄洪隧洞（ $15\text{m}\times 9.5\text{m}$ ）均布置在左岸。正常蓄水位 825m ，水库总库容 $206.27\text{亿}\text{m}^3$ ，总装机容量 $1600\text{万}\text{kW}$ ，多年平均发电量 $624.43\text{亿}\text{kWh}$ 。坝址所在河谷呈不对称的“V”型，左岸坡缓，右岸坡陡；总体来说两岸岩体质量较好，右岸岩体质量好于左岸。白鹤滩坝址河谷地形地质条件均存在较明显的不对称性。



白鹤滩水电站

拦河坝采用抛物线型混凝土双曲拱坝，坝项高程834.0m，最大坝高289.0m；拱冠梁断面顶宽13.0m，最大底宽72.0m，弧高比2.63，顶拱中心线弧长708.7米，共分31个坝段。

白鹤滩水电站工程，总工期为12年，工程静态投资660亿元，动态投资880亿元。



白鹤滩水电站

案例

工程建设部还在大坝坝体内埋设**上万支监测仪器**，能感知**温度、风速、变形**等重要信息，并将信息反馈给智能建造信息管理平台进行实时分析判断，使各项系统准确进行智能控制和实时调节，实现建造运行全周期精细化管控，让白鹤滩水电站大坝成为**最聪明的大坝**。大坝自开浇以来**没有产生一条温度裂缝**，标志着我国已掌握大体积混凝土温控防裂关键技术，进一步提升了我国水电行业的核心竞争力。白鹤滩建设者始终把质量和安全放在首位，**以精益求精、追求卓越的大国工匠精神**，全力以赴把白鹤滩水电站建设成为让党和人民放心的精品工程。



▲智能建造——白鹤滩水电站中控室 摄 / 韦凤年



白鹤滩水电站

三峡大坝

白鹤滩大坝

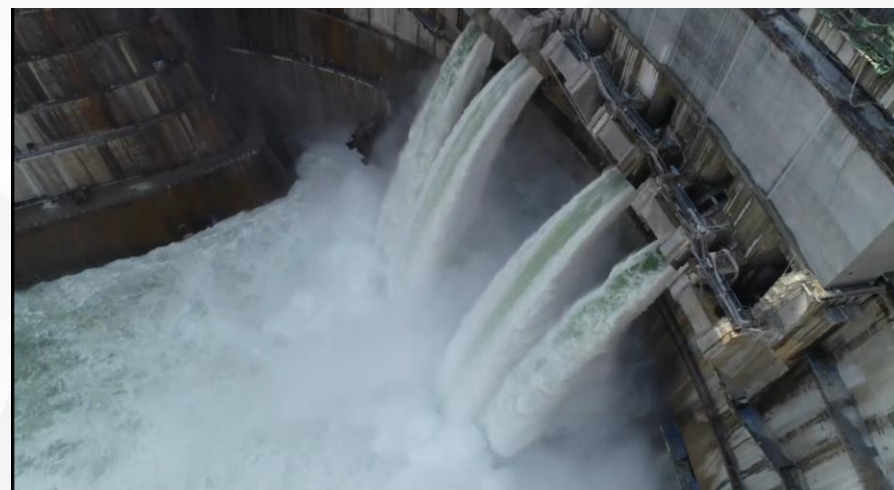
项目	三峡大坝	白鹤滩大坝
坝高 (m)	181	289
坝顶厚度 (m)	40	14
坝底厚度 (m)	127	72
坝体混凝土 (m ³)	1600万	810万



01

白鹤滩大坝vs三峡大坝：
高度多一半，浇筑量少一半？

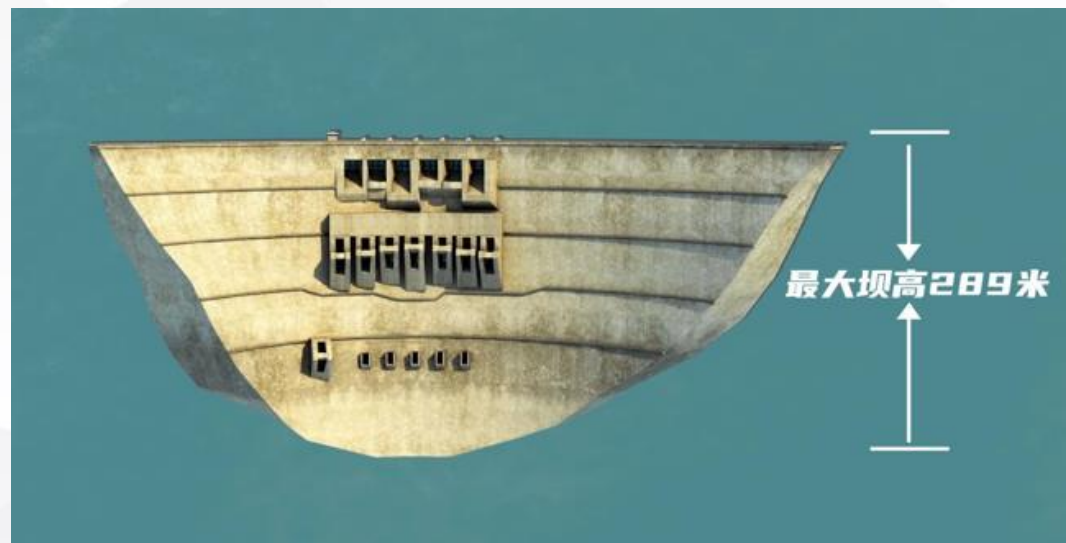
担心：白鹤滩大坝，挡水靠得住吗？



白鹤滩水电站

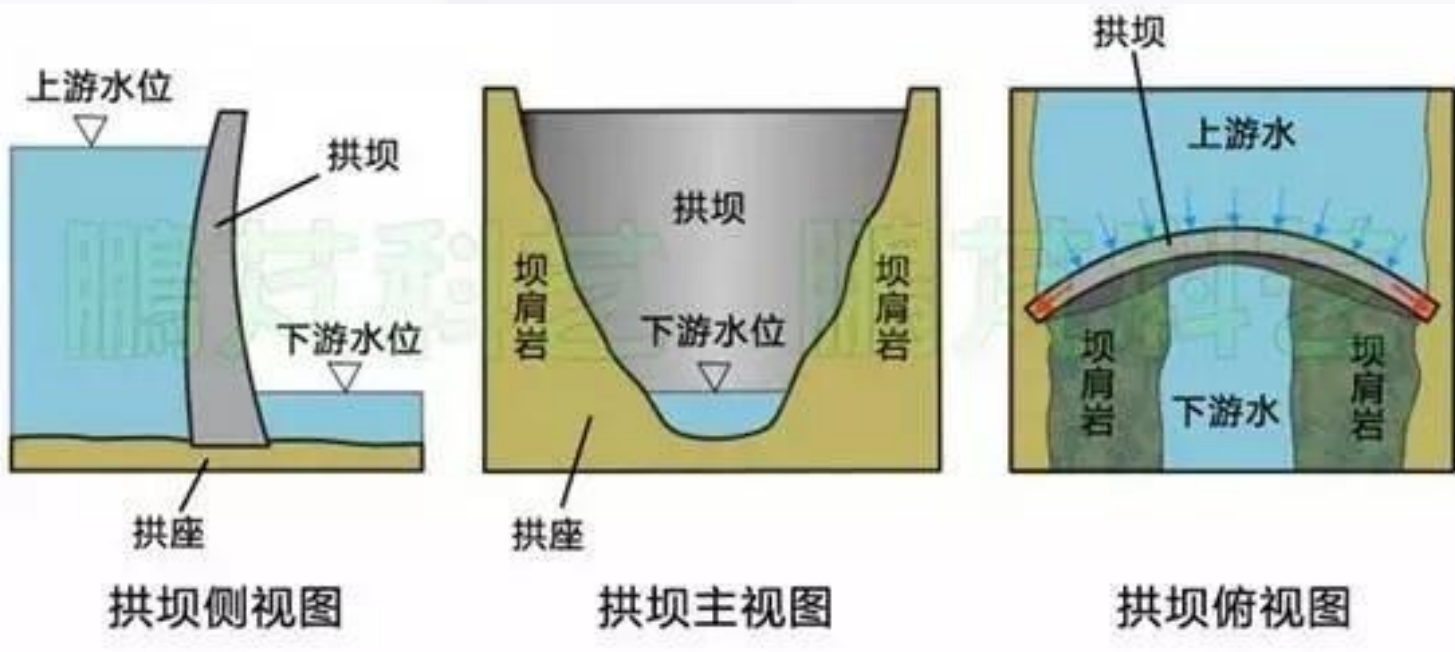
问题

- 1.白鹤滩水电站拦河大坝是什么坝型?
- 2.白鹤滩水电站主要水工建筑物有哪些?
- 3.大坝 这么单薄, 坝体内部能不能开口泄洪吗
- 4.拱坝的消能方式跟重力坝一样吗?



一、拱坝

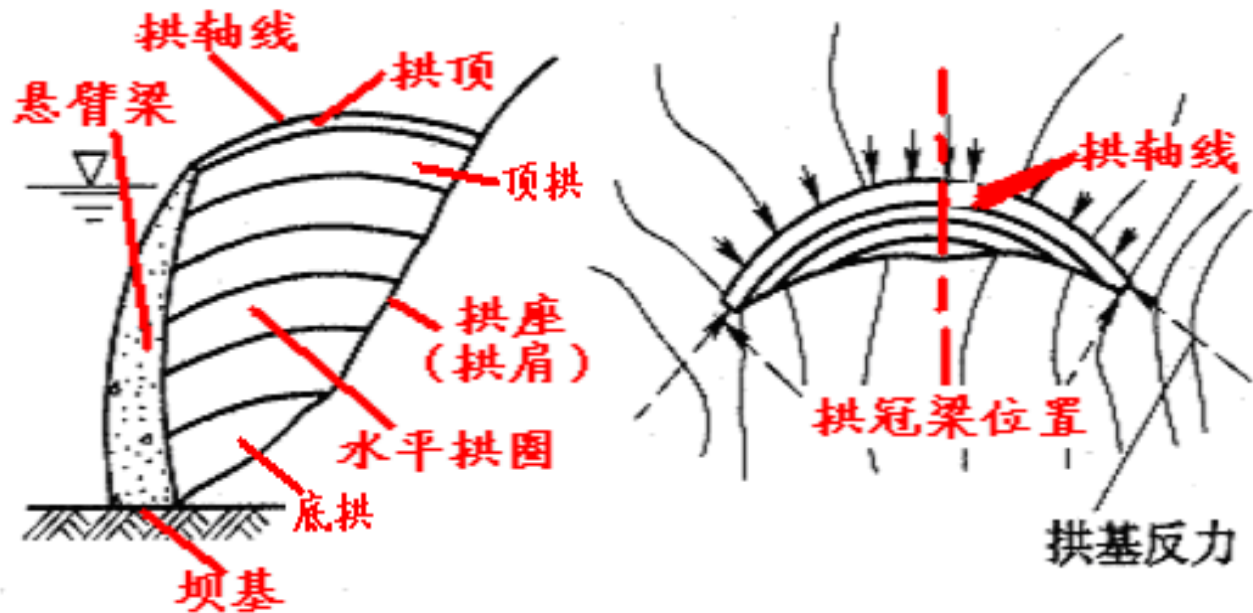
拱坝是一空间壳体结构，平面上呈凸向上游的拱形建筑物，可看成是凸向上游的水平拱圈系和竖向悬臂梁系组成。



一、拱坝

拱坝所坐落的两岸岩体部分称作拱座或坝肩。

位于水平拱圈拱顶处的悬臂梁称作拱冠梁。



坝体结构既有拱作用又有梁作用，具有双向传递荷载的特点。其所承受的水平荷载一部分由拱的作用传至两岸岩体，另一部分通过竖直梁的作用传到坝底基岩

一、拱坝

世界拱坝发展速度仅次于土石坝，且多修建高拱坝、双曲拱坝和薄拱坝。高度超过200m的拱坝约17座，占有高度为200米以上大坝总数的57%。这17座拱坝中有13座是双曲拱坝，双曲拱坝是高拱坝发展的趋向，被誉为“近代拱坝”。锦屏一级水电站大坝设计坝高305米，为目前世界上已建、在建和设计中的最高的双曲薄拱坝。



一、拱坝

案例：锦屏一级水电站

电站地点：四川省凉山彝族自治州

所在河流：雅砻江

所在水系：长江水系

主要坝型：双曲拱坝

最大坝高：305m

建设工期：2006~至今



一、拱坝

二滩双曲拱坝

电站地点：四川省攀枝花市

所在河流：雅砻江

所在水系：长江水系

主要坝型：混凝土拱坝

最大坝高：240m

坝顶高程：1205m

坝顶弧长：774.69m

建设工期：1991~2000年



二、拱坝特点

(一) 受力特点:

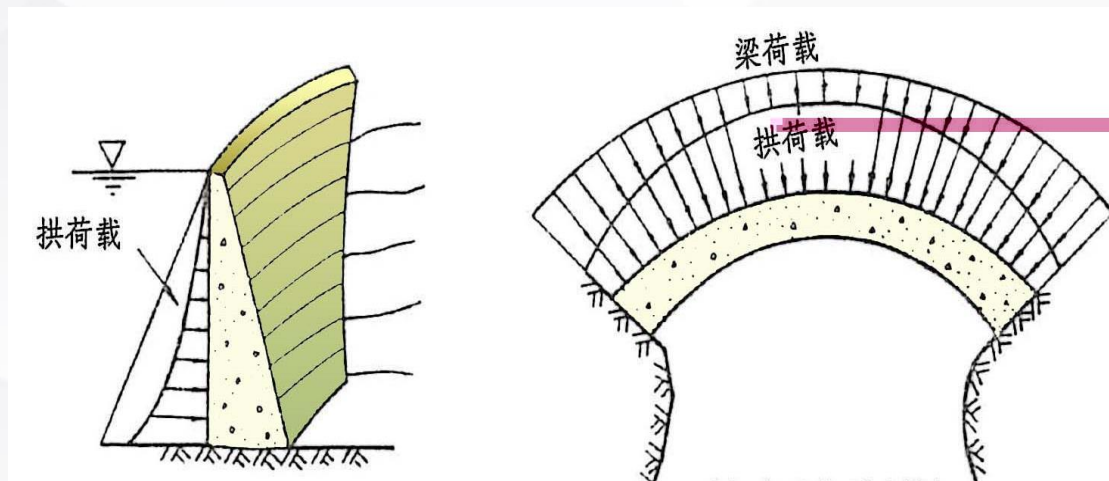
- 1.拱坝是一高次超静定结构，拱坝结构既有拱作用又有梁作用，具有双向传递荷载特点，拱作用与悬臂作用之间能自动互相调整，故其稳定性好，抗震能力强；
- 2.拱结构是推力结构，主要为轴向压力。

(二) 稳定特点

主要靠两岸拱端反力，不全靠重量维持稳定。（重量轻）

(三) 地基变形特点

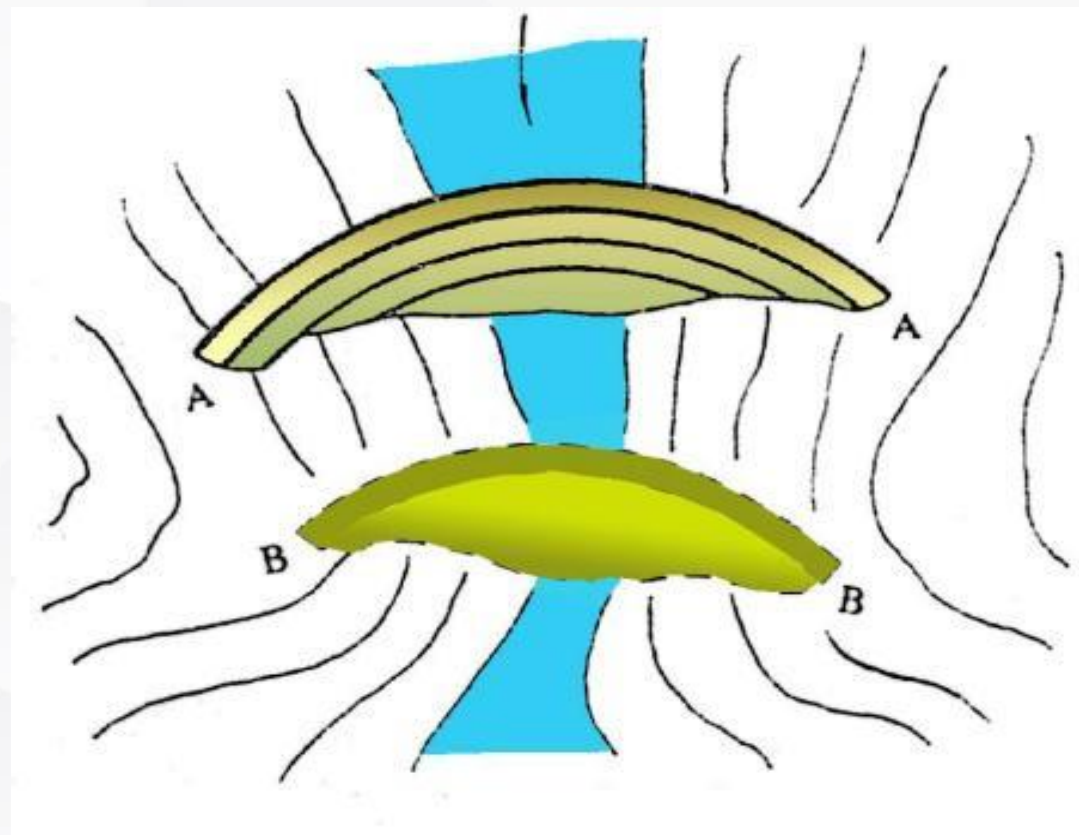
拱端推力大，要求基岩有较高的抗压强度和较小变形。



三、拱坝对地形和地质的要求

(一) 对地形的要求

理想的地形应是河谷狭窄、两岸对称、岸坡平顺、向下游收缩型峡谷段、坝端下游侧有足够稳定的岩体支承。避免河道的出口和转弯处。



三、拱坝对地形和地质的要求

(二) 对地质的要求

拱坝地基的关键是两岸的基岩，它必须能承受拱端传来的巨大压力、保持稳定，并不产生较大变形。理想的地质条件是：坝肩的基岩要求高：基岩均匀单一、完整稳定、强度高、刚度大、变形小、透水性小和耐风化。



三、拱坝对地形和地质的要求

河谷断面形状：**U型**、**V型**



白鹤滩水电站坝址处地形地质



V形河谷：上宽下窄，在下部虽然水压力较大，但拱的跨度较小，拱承担的荷载较大，拱作用发挥较充分，因此坝可以修的较薄、经济。

U形河谷：靠近底部处拱跨较大，拱的作用显著降低，梁的作用相应增大，因此坝底部较厚。

三、拱坝对地形和地质的要求

白鹤滩水电站坝址处地形地质

坝址所在河谷呈不对称的“V”型，左岸坡缓，右岸坡陡；总体来说两岸岩体质量较好，右岸岩体质量好于左岸。白鹤滩坝址河谷地形地质条件均存在较明显的不对称性。

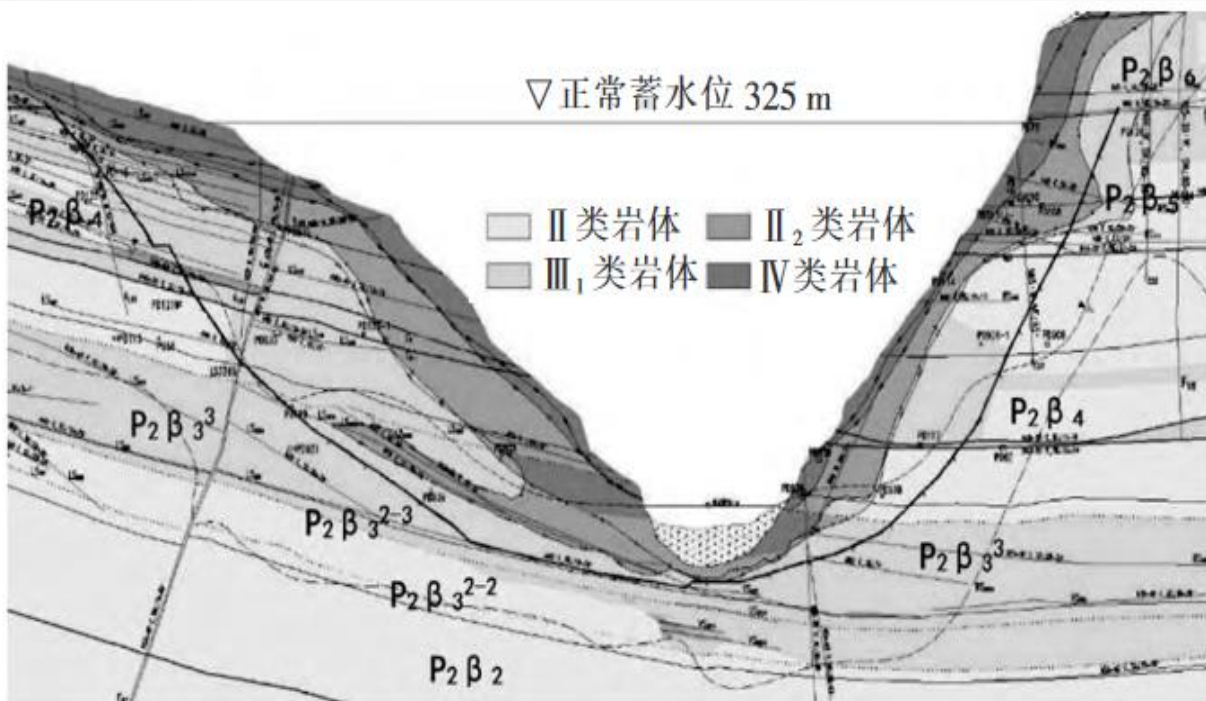


图1 拱坝建基面布置示意图(拱轴线剖面)



三、拱坝对地形和地质的要求

白鹤滩水电站坝址处地形地质

坝址所在河谷呈不对称的“V”型，左岸坡缓，右岸坡陡；总体来说两岸岩体质量较好，右岸岩体质量好于左岸。白鹤滩坝址河谷地形地质条件均存在较明显的不对称性。

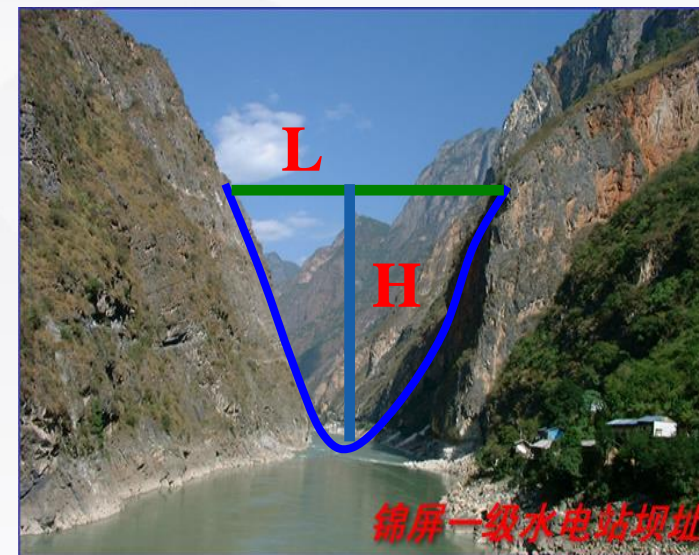


三、拱坝对地形和地质的要求

(三) 河谷形状与拱坝厚薄的关系

1、河谷形状特征值：宽高比L/H

$L/H < 2$	窄深河谷；
$L/H = 2 \sim 3$	中等宽度河谷；
$L/H = 3 \sim 4.5$	宽河谷；
$L/H > 4.5$	宽浅河谷；



L/H值小，说明河谷窄深，拱坝水平拱圈跨度相对较短，悬臂梁高度相对较大，即拱的刚度大，梁的刚度小，荷载大部分通过拱作用传给两岸；反之，L/H值很大时，河谷宽浅，拱作用小，梁作用大，荷载大部分通过梁作用传递给坝基。

三、拱坝对地形和地质的要求

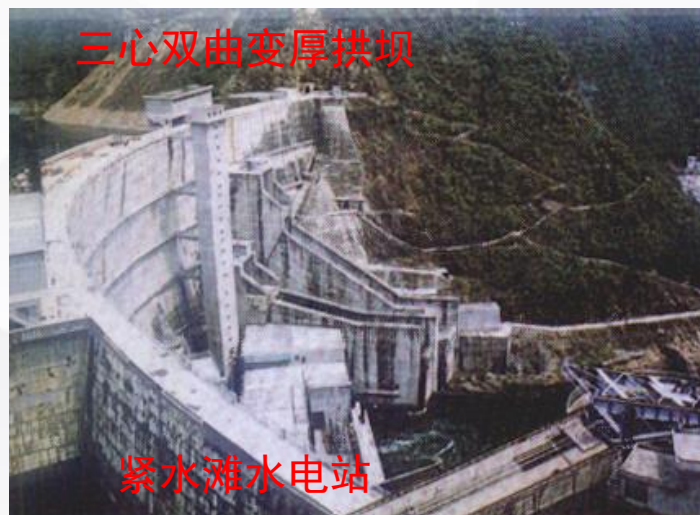
河谷形状与拱坝厚薄的关系

拱坝的厚薄程度：厚高比： T/H

当 $T/H < 0.2$ 时，薄拱坝；

当 $T/H = 0.2 \sim 0.35$ 时，中厚拱坝；

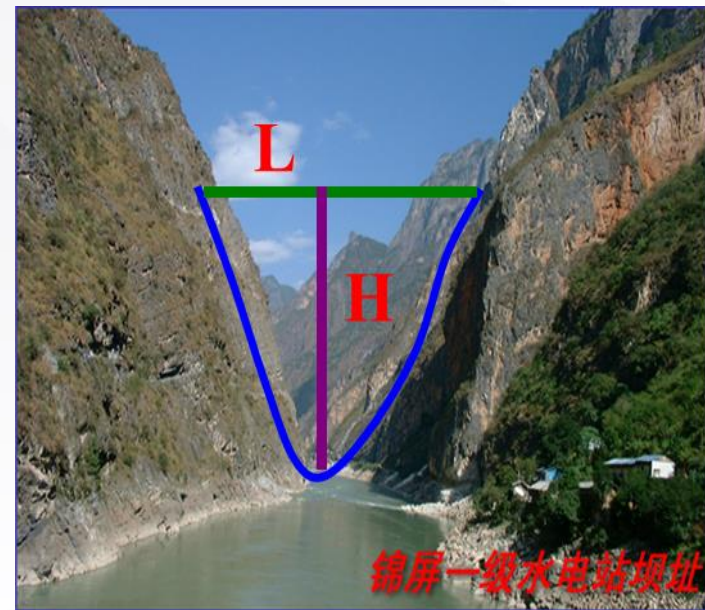
当 $T/H > 0.35$ 时，厚拱坝或重力拱坝。



三、拱坝对地形和地质的要求

河谷形状与拱坝厚薄的关系

$L/H < 2$	窄深河谷	薄拱坝
$L/H = 2 \sim 3$	<ul style="list-style-type: none">中等宽度河谷	<ul style="list-style-type: none">中厚拱坝
$L/H = 3 \sim 4.5$	<ul style="list-style-type: none">宽河谷中	<ul style="list-style-type: none">重力拱坝
$L/H > 4.5$	<ul style="list-style-type: none">宽浅河谷	<ul style="list-style-type: none">重力坝或拱形重力坝

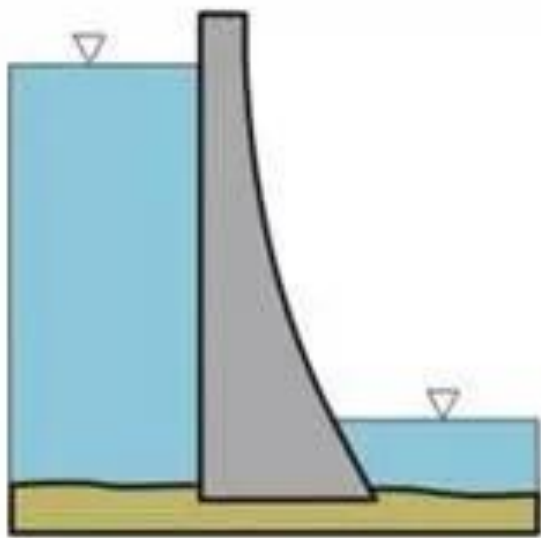


L: 拱坝宽度; H: 拱坝高度; T: 拱坝厚度

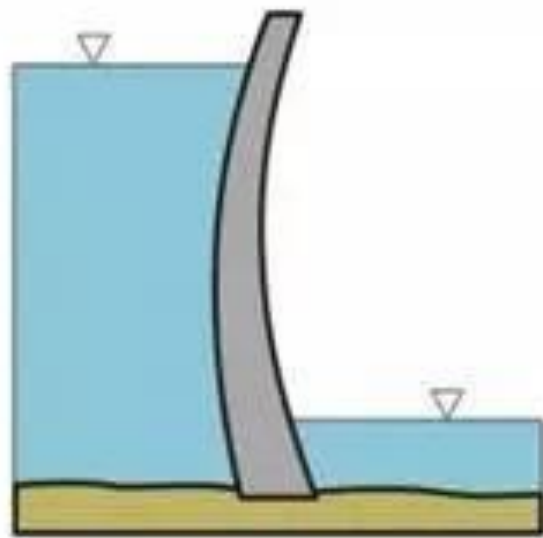
四、拱坝的类型

(一) 按曲率分

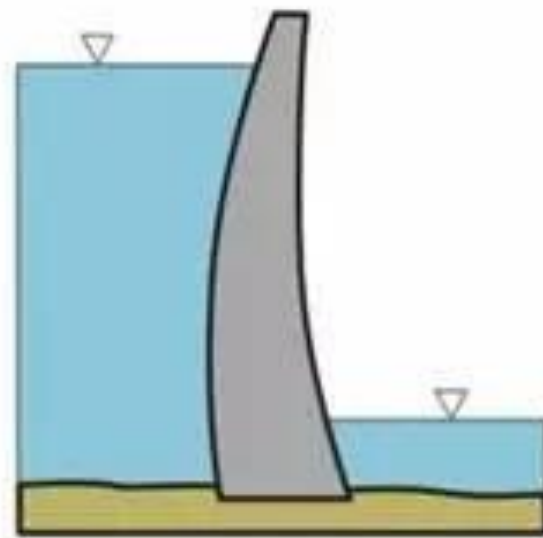
1. 单曲拱: 只在水平断面上有曲率, 适用U形、矩形河谷包括定内外圆心等外半径、变内半径拱坝布置形式
定外圆心等外半径 变内圆心和内半径拱坝布置形式
2. 双曲拱: 在拱圈和悬臂梁上均有曲率。适用V形或U形河谷包括等中心角拱坝, 变半径变中心角拱坝布置形式



单曲拱坝



双曲薄拱坝



双曲厚拱坝

四、拱坝的类型

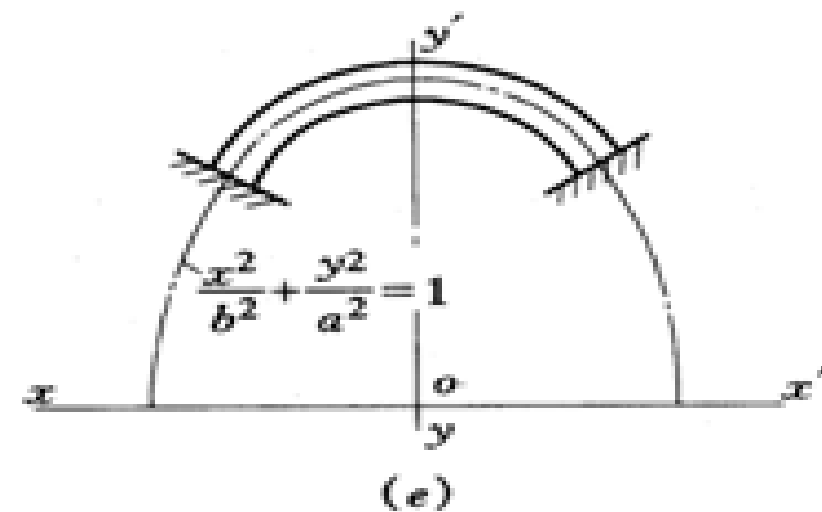
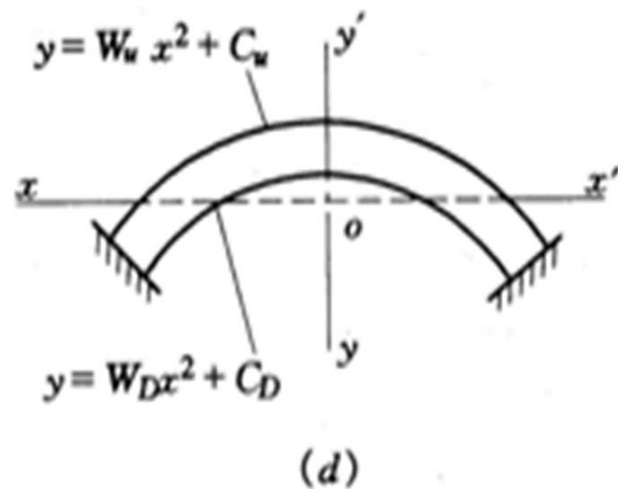
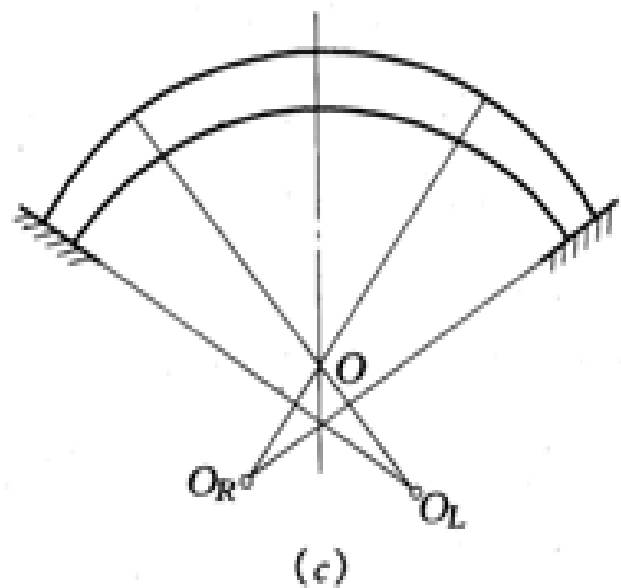
(二) 按水平拱圈形式分:

圆弧拱、多心拱、变曲率拱 (椭圆拱、抛物线拱)

单心圆弧拱: 拱端推力方向与岸坡边线的夹角较小, 不利坝肩抗滑稳定。

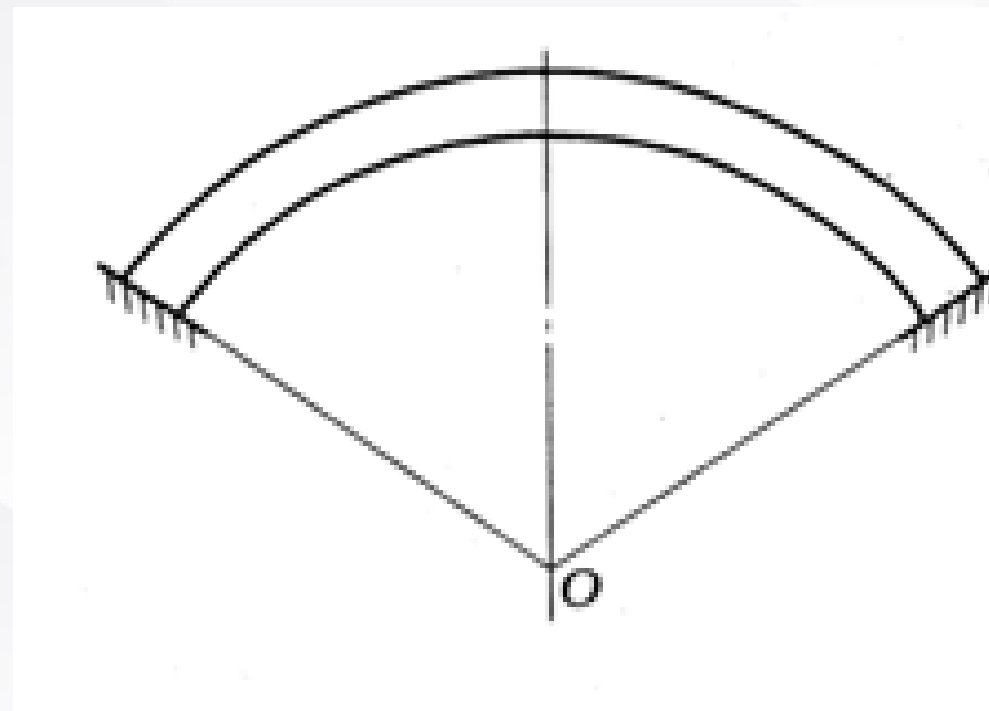
多心拱: 两侧半径较大, 改善坝肩岩体的抗滑稳定条件 (二心拱、三心拱);

变曲率拱: 中间段曲率较大, 向两侧曲率逐渐减小, 主要有椭圆拱、抛物线拱、对数螺旋线拱,



四、拱坝的类型

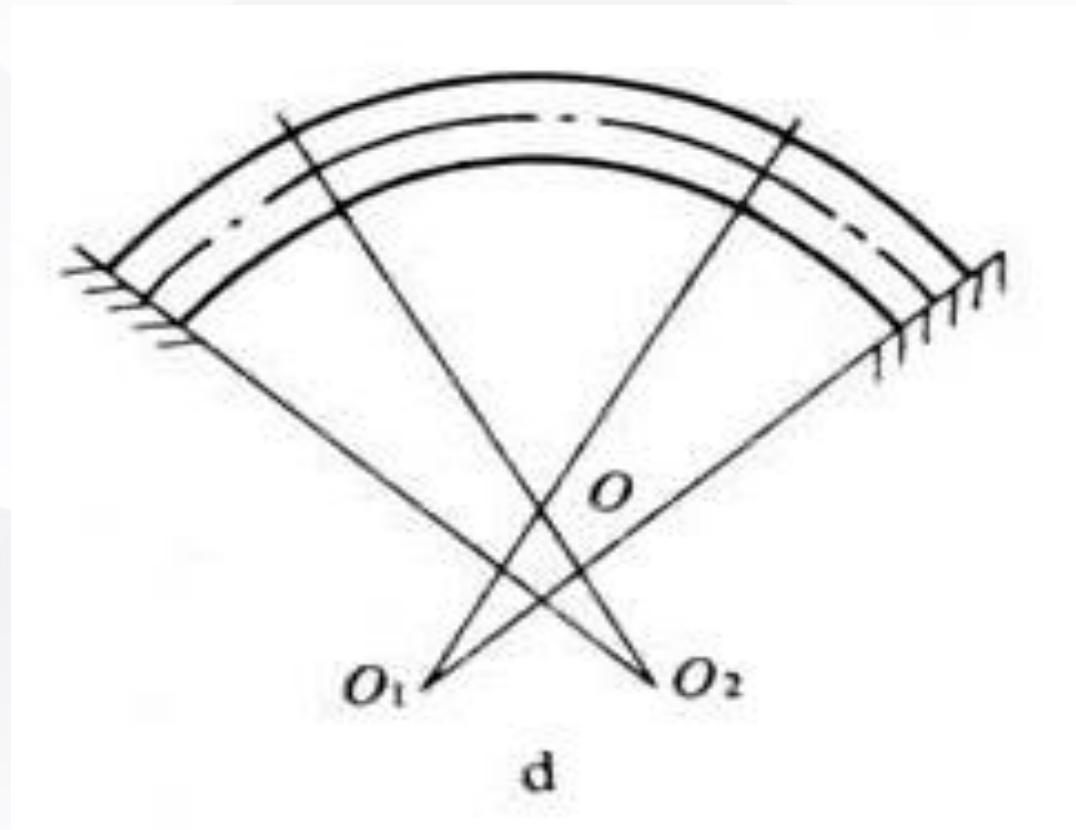
拱坝各种水平拱圈型式



圆弧拱

四、拱坝的类型

拱坝各种水平拱圈型式



三圆心拱



五、拱坝的泄流

①坝身单薄

A、由于不能形成完整的溢流面→产生新型泄水方式

B、坝身布孔泄水时坝体被削弱

C、泄水振动

②水流过坝后具有向心集中现象，水舌入水处单位面积能量大造成集中冲刷，消能问题严重。

③拱坝一般地处高山峡谷，需解决厂房布置与泄洪布置的矛盾，同时泄流形成的强力回流易造成边岸淘刷。

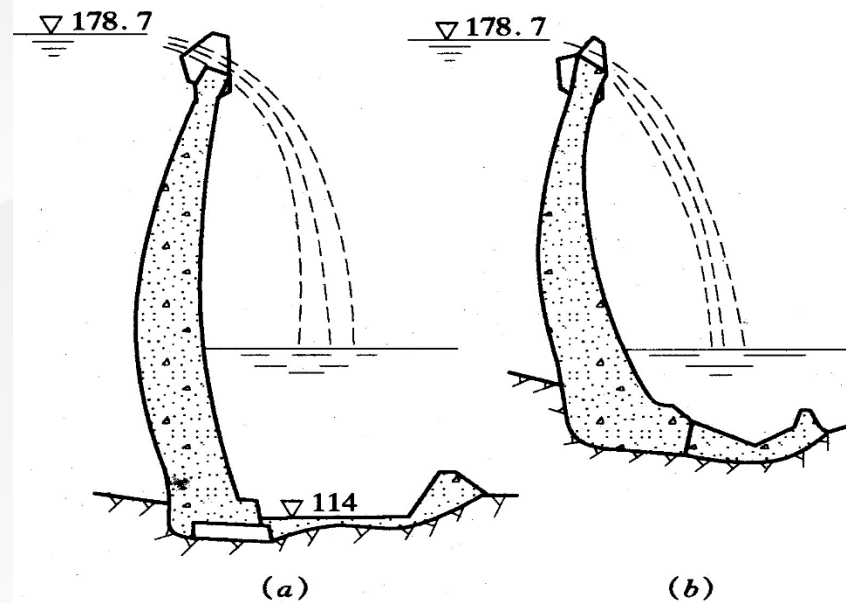
五、拱坝的泄流

1. 自由跌流式

泄流时，水流经坝顶自由跌入下游河床。这种型式适用于基岩良好，单宽泄洪量较小的拱坝。

由于落水点距坝趾较近，坝下必须有防护设施。

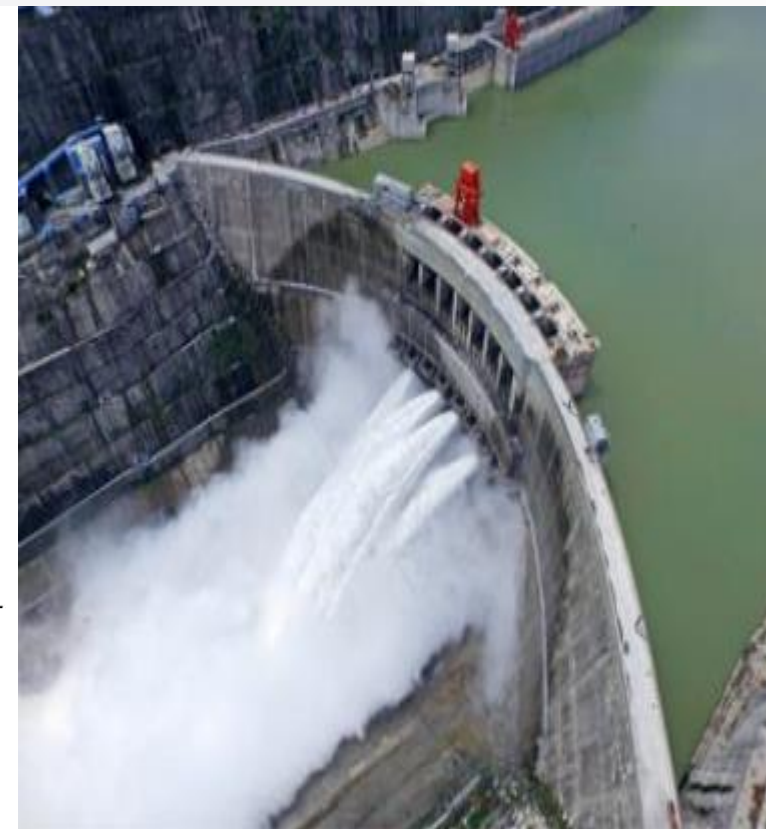
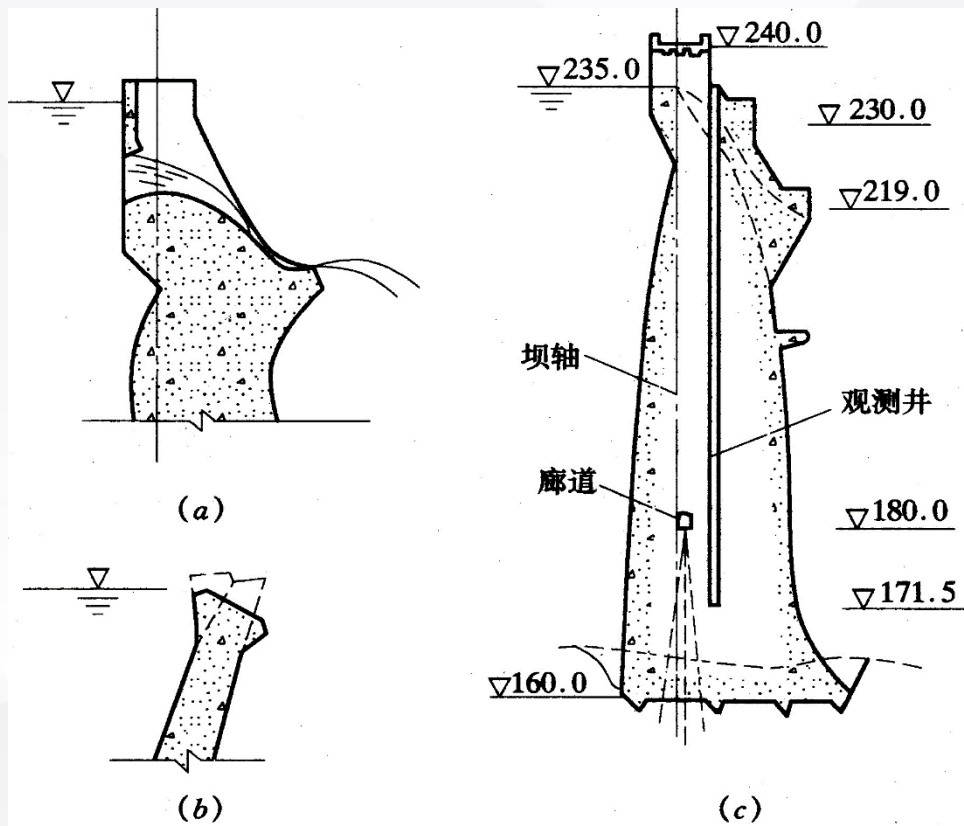
一般坝后设置二道坝，形成水垫塘。



五、拱坝的泄流

2. 鼻坎挑流式

在溢流堰顶曲线末端以反弧段连接成为挑流鼻坎。采用连续式结构，堰顶与鼻坎高差小于6~8m，挑角为 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。适用于泄流量较大的轻薄拱坝，一般 $q \leq 50 \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。



五、拱坝的泄流

3.滑雪道式

滑雪道泄洪是拱坝特有的一种泄洪方式，其溢流面曲线由溢流坝顶和紧接其后的泄槽组成，由于挑流坎一般都比堰顶低很多，落差较大，因而挑距较远。适用于泄洪量较大、较薄的拱坝。



五、拱坝的泄流

3.滑雪道式



五、拱坝的泄流

4.坝身泄水孔式

拱坝坝身可开设孔口用来辅助泄洪。拱坝泄流孔口在平面上多居中或对称于河床中线布置，孔口泄流一般是压力流，比堰顶溢流流速大，挑射距离远。



五、拱坝的泄流

4. 坝身泄水孔式



二滩双曲拱坝



六、拱坝的消能与防冲

常见型式：

①挑流消能：最多

②水垫消能：适于坝顶跌流，且 $q < 15 \text{m}^2/\text{s}$ ，

适于下游水深大或河床有条件加以保护的情况，通常在坝下游设消力坎、二道坝或挖深消力池。

③底流消能：适于重力拱坝，

适于下部岩石条件较差时，或有通航要求时。

④空中冲击：用的很多

六、拱坝的消能与防冲

1. 挑流消能

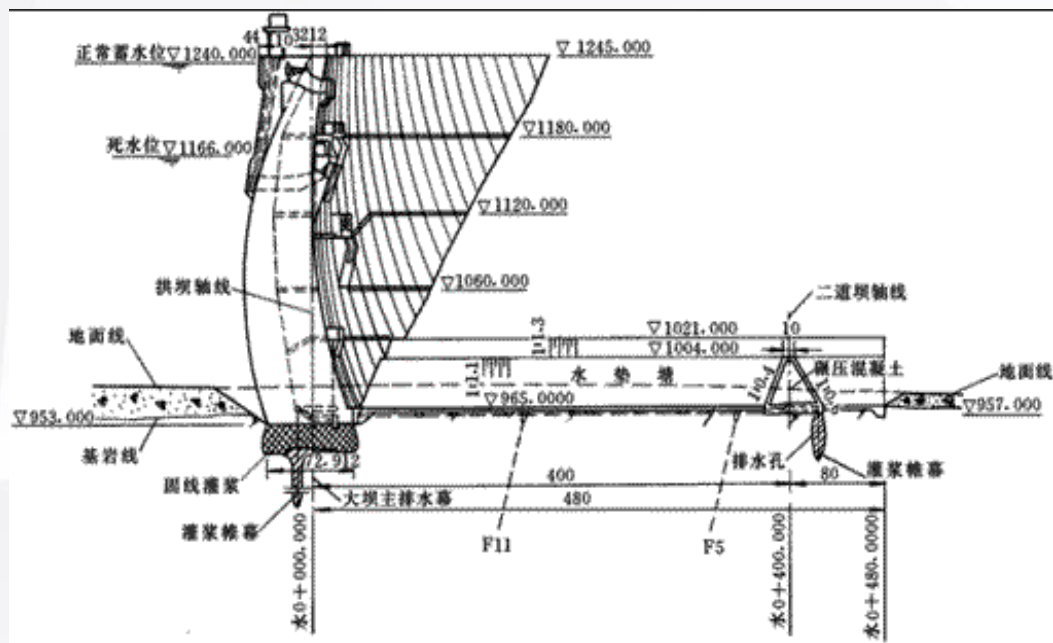
拱坝采用最多的消能形式。鼻坎挑流式、滑雪道式和坝身泄水孔式大都采用各种不同形式的鼻坎，使水流扩散、冲撞或改变方向，在空中消减部分能量后再跌入水中，以减轻对下游河床的冲刷。



六、拱坝的消能与防冲

2、水垫消能

水流从坝顶表孔或坝身孔口直接跌落到下游河床，利用下游水流形成的水垫消能。由于水舌入水点距坝趾较近，故需采取相应的防冲措施，一般都在坝下游一定距离处设置消力坎，二道坝或挖深式消力池。



六、拱坝的消能与防冲

3. 空中冲击消能

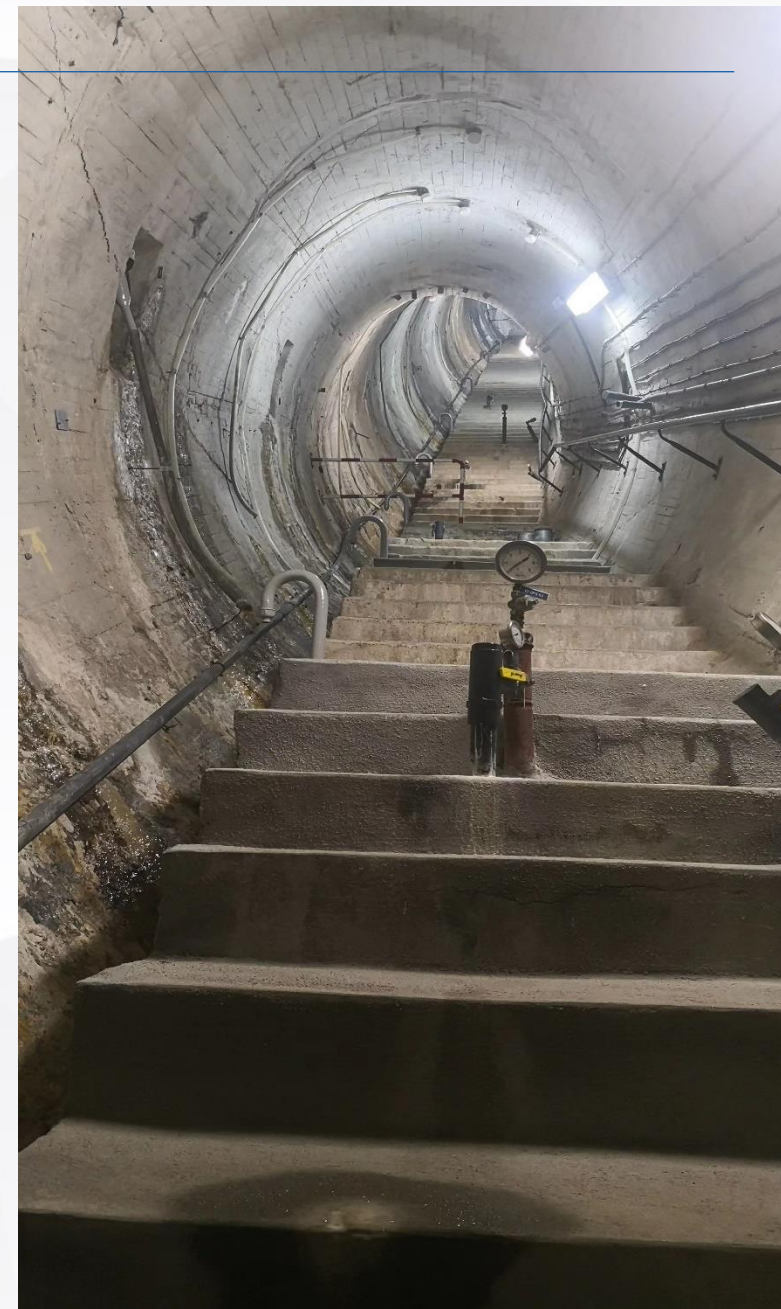
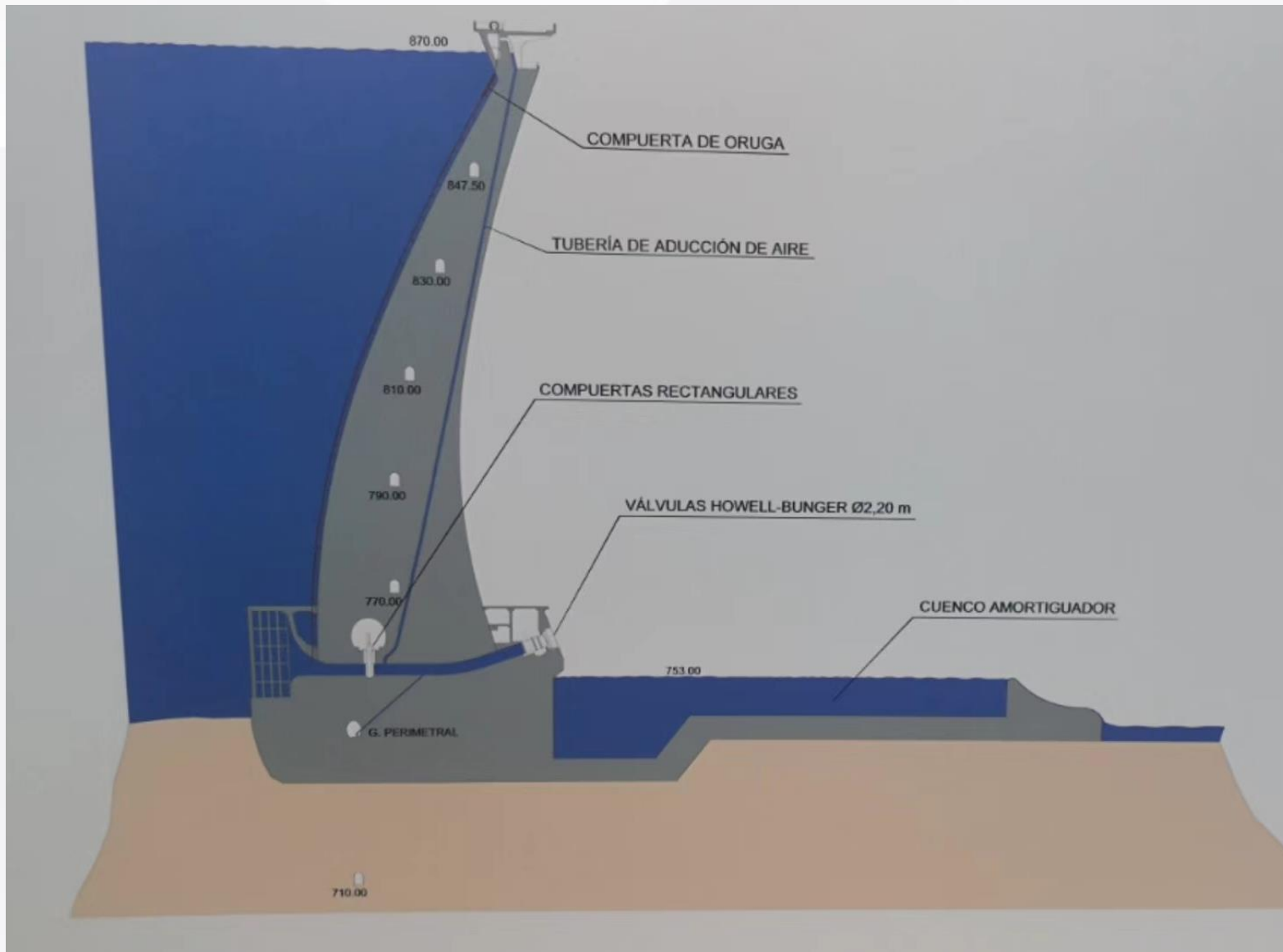
狭窄河谷中、高坝利用水流向心特点，使左右两侧溢流表孔或泄水孔水舌在空中交汇，冲击掺气，从而消耗大量的能量，但应注意同步开启。此外，高拱坝可用高低坎大差动形式，形成水股上下对撞消能。



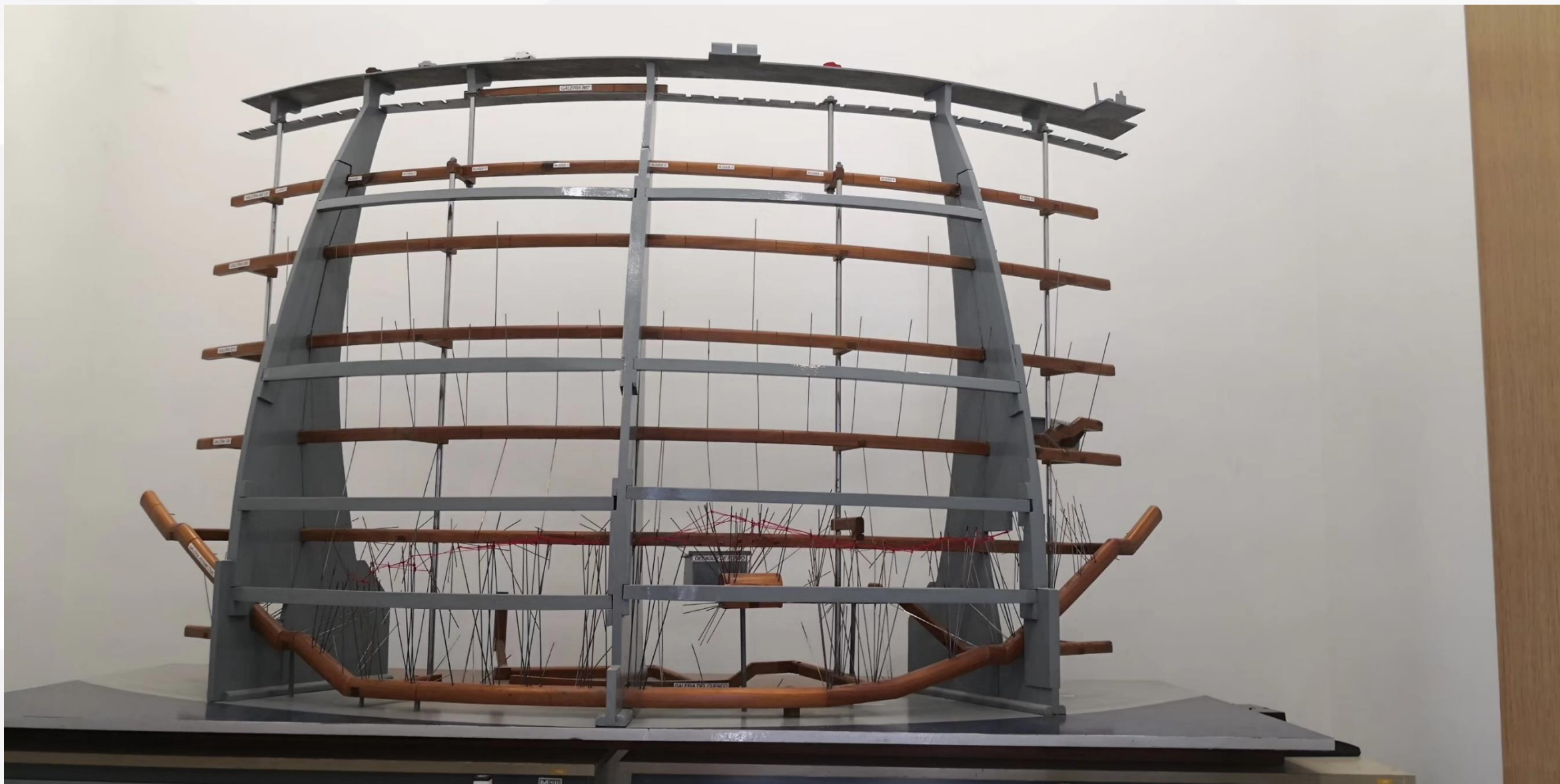
六、拱坝的消能与防冲



拱坝内部构造



六、拱坝的消能与防冲



白鹤滩水电站

问题

- 1.白鹤滩水电站拦河大坝是什么坝型？
- 2.白鹤滩水电站主要水工建筑物有哪些？
- 3.大坝如何泄水？如何消能？





黄河水利职业技术学院
YELLOW RIVER CONSERVANCY TECHNICAL INSTITUTE

敬请指导

Thank You