



盖下坝水电站工程

超薄拱坝优化设计总结

2014-11-26

中水东北勘测设计研究有限责任公司



退出

项目提要

- 1工程概况
- 2拱坝布置
- 3设计优化
- 4结语
-



主菜单

退出

1 工程概况



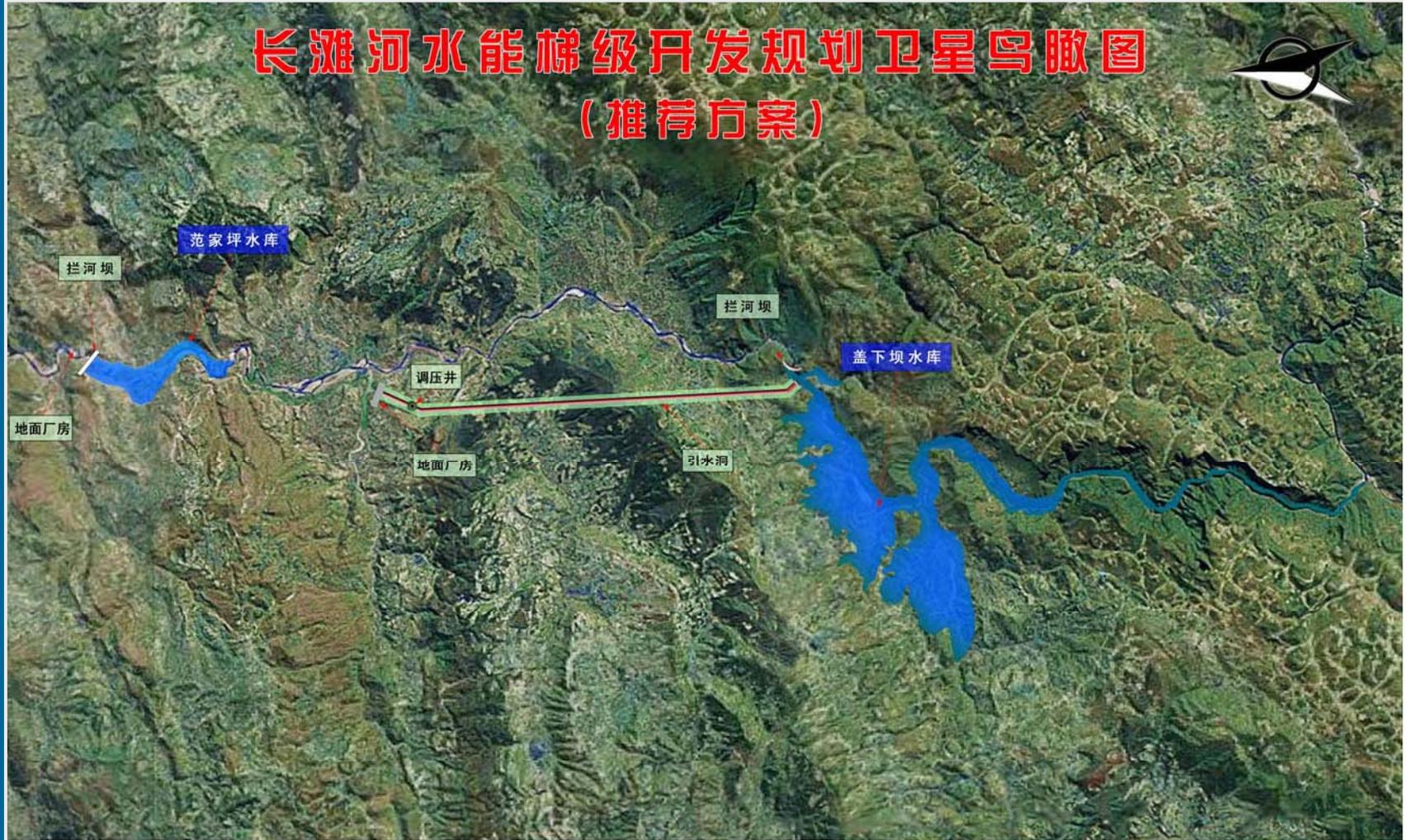
- a) 流域概况
 - 长滩河是长江南岸的一级小支流，发源于湖北省利川县，在湖北境内称梅子水，进入重庆市云阳县境内，称长滩河，至故陵汇入长江。
- b) 工程地理位置
 - 盖下坝水电站位于重庆市云阳县和奉节县境内的长江一级支流长滩河中上游河段，距下游长江入口处的故陵镇约45km，距云阳县城约72km。
- c) 工程规模
 - 水库总库容 $3.54 \times 10^8 \text{m}^3$ ，电站总装机容量132MW，最大坝高160m。大坝及泄水建筑物为1级建筑物，消能建筑物为3级建筑物，引水发电建筑物为3级建筑物。



主菜单

退出

库区卫星鸟瞰图



主菜单

退出

拱坝布置



主菜单

退出

拱坝下游立视



- 枢纽布置由混凝土双曲拱坝及左岸引水发电系统组成。混凝土双曲拱坝包括溢流坝段、挡水坝段。最大坝高**160.00 m**（拱坝基本体形**141m**），坝顶高程**394.00m**，坝顶长**153.2m**。溢流坝段布置在主河床上，两岸布置挡水坝段；泄水建筑物采用坝顶表孔跌流。泄洪表孔共**3**孔，每孔宽**12.00m**，堰顶高程**379.00m**，坝下布置水垫塘，水垫塘长**181.00m**，底宽**20.00m**。



主菜单

退出

地形、地貌



- 坝址区位于云阳县云峰乡盖下坝村下游约**2km**的老鸦峡河段上。坝址枯水期河水位高程一般为**268.2m~269.7m**，水深约**0.5m~3.0m**，谷底宽**30m~60m**，呈狭窄的“V”型河谷，坝址处无阶地。设计正常蓄水位**392m**高程处，谷宽约**100m~120m**。坝址两岸地形高耸陡峻，基岩裸露，两岸谷坡坡度约**60°~80°**，山体高程**600m~700m**，相对高差**150m~300m**，岩层走向与河流流向间夹角约**50°~80°**，与坝轴线近于平行。



主菜单

退出

地质条件

- 坝址区出露基岩主要为三叠系下统嘉陵江组第四段第一层中厚层~薄层状石灰岩夹泥质白云岩和角砾状灰岩。坝址区局部地段次级小褶皱发育,岩层产状为:走向基本垂直河流流向,倾向上游,偏左岸,倾角 $40^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 。
- 据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001),本区地震动峰值加速度值为**0.05g**,地震动反应谱特征周期为**0.35s**,相应的地震基本烈度为VI度。



主菜单

退出

3 设计优化

- **3.1 拱坝体形优化**

- 拱坝体形设计采用“拱坝体形优化程序(ADASO)”初选体形，并经过坝肩抗滑稳定复核计算确定体形。坝体最大高度**160m**，垫座高度**19m**，拱坝基本体形最大坝高**141m**，厚高比**0.106**。混凝土垫座顶高程为**253m**，最低建基高程为**234m**。

- 通过减小顶拱中心角减少了左坝头洞挖跨度，降低了对左坝头上部山体的扰动；减小了拱圈中心角，尽最大可能实现拱坝的扁平，减小拱端向下游侧推力，使拱端推力合力方向尽可能推向两岸山体，有利于坝肩稳定。

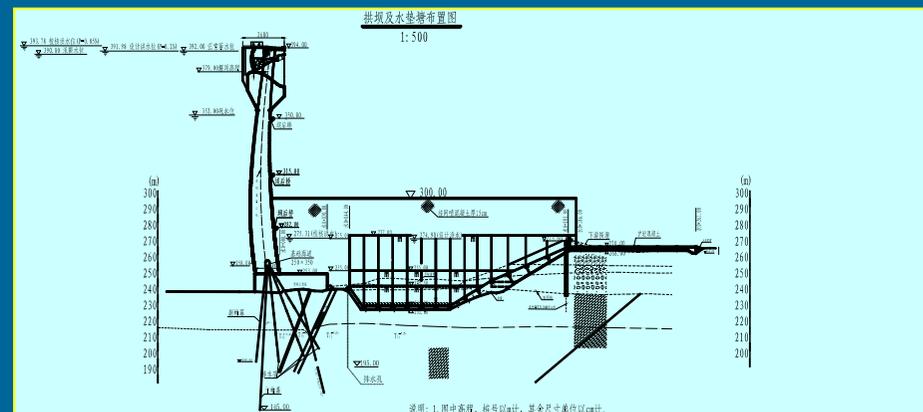
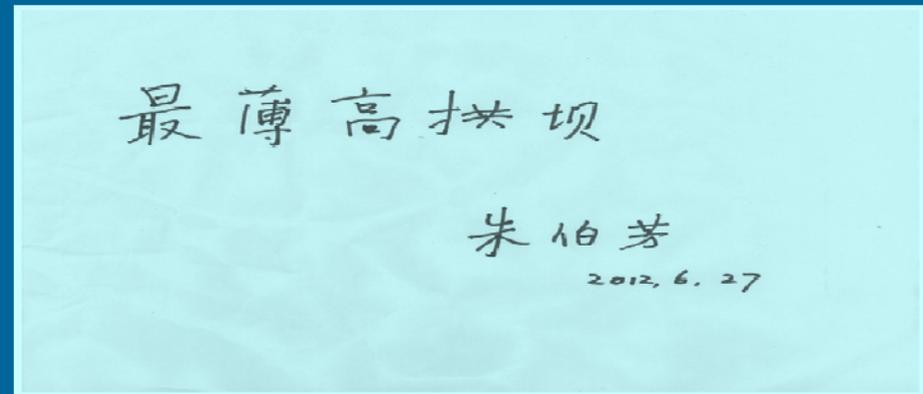
项 目	参数值
坝顶高程 (m)	394
最大坝高 (m)	141
顶拱上游面弧长 (m)	153.2
坝顶中心线弧长 (m)	148.15
坝顶中心线弦长 (m)	132.54
拱冠梁顶宽 (m)	6
拱冠梁底宽 (m)	14.962
顶厚/底厚 (拱冠梁)	0.4
最大拱端厚度 (m)	22.958 (295m 高程左拱端)
坝体弧高比	1.087
坝体厚高比	0.106
最大半中心角 (°)	45.509 (355m 高程右拱端)
最大中心角 (°)	89.157 (335m 高程)
顶拱中心角 (°)	83.626
坝体柔度系数	10.34
坝体体积 (m ³)	19.7 × 10 ⁴



主菜单

退出

经优化，选定的拱坝体形为椭圆拱圈双曲拱坝，拱坝基本体形坝高**141m**，也是国内最高的椭圆双曲拱坝。厚高比**0.106**，在世界上已建、运行的高拱坝中厚高比最小。拱坝体形优化成果得到计家荣、王理华、李同春、苏荣等多位业内专家的认可，中国工程院朱伯芳院士为本工程题字“**最薄高拱坝**”。



国内外超薄拱坝技术参数统计表

序号	工程名称	国家或省区	建成年份	坝高 (m)	弧高比	厚高比	泄量 (m ³ /s)	基岩岩性
1	瓦伊昂	意大利	1961	265	0.73	0.080	284	白云质灰岩
2	介兹	伊朗	1963	203	1.04	0.110	6000	钙质砾岩
3	斯派契尔里	意大利	1957	155	1.2	0.110		灰岩
4	圣杰斯汀纳	意大利	1950	153	0.81	0.110	1200	灰岩白云岩
5	圣罗萨	墨西哥	1963	144	1.2	0.120	2300	流纹岩
6	盖下坝	中国重庆	2012	141	1.09	0.106	4091	石灰岩夹泥质白云岩和角砾状灰岩
7	川俣	日本	1966	137	1.14	0.145	450	凝灰岩
8	留米意	意大利	1952	136	1	0.110		灰岩白云岩
9	索特	法国	1934	130	0.605	0.600	1570	灰岩
10	诺阿纳	意大利	1960	126	1.02	0.150		灰岩白云岩
11	哨响	美国	1910	100	0.61	0.330		花岗岩
12	施家裕	中国湖南	1975	80	0.075	0.075		砂质石英岩
13	柯立米拉	墨西哥	1951	80	0.475	0.130	5500	
14	青年	中国湖南	1976	80	0.75	0.186		灰岩
15	铜坑溪	中国浙江	1972	59	1.2	0.102	440	花岗岩
16	仙人溪	中国湖南	1977	59	1.05	0.203		灰岩
17	天佑崖	中国山西	1975	58	0.91	0.500		灰岩
18	卡多尔	意大利	1955	55	0.61	0.050		灰岩白云岩
19	三江寨	中国湖南	1965	48	0.46	0.196		灰岩
20	尹家崖	中国贵州	1977	32	0.75	0.175		白云质灰岩
21	海尔斯盖特	南非	1910	26	0.154		116	



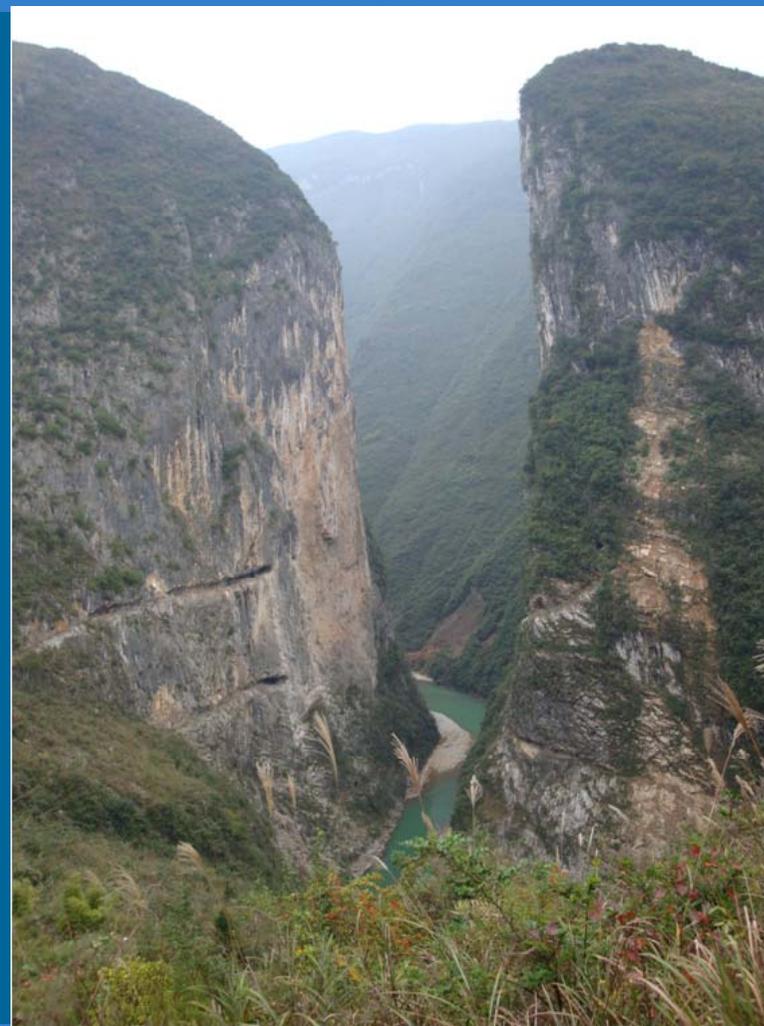
主菜单

退出

3.2 开挖方式优化

坝址区呈狭窄的“V”型河谷，坝址处无阶地。设计正常蓄水位392m高程处，谷宽约100m~120m。坝址两岸地形高耸陡峻，基岩裸露，两岸谷坡坡度约 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，山体高程600m~700m，坝顶高程394.0m，相对高差150m~300m，岩层走向与河流流向间夹角约 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，与坝轴线近于平行。

根据坝址地形、地质条件，大坝基础采取拱肩槽全径向槽挖方案，左坝头洞挖方案。



主菜单

退出

左坝头洞挖

- 本工程左岸洞挖方案，在国内首次尝试。前苏联托克托古尔坝曾尝试类似设计方案，但在开挖后山体崩塌，未能形成坝肩，最后被迫修改了坝型。
- 由于左岸坝头为掏槽开挖型式，通过体形调整，减小了拱坝顶拱中心角，进而减小了拱坝坝头洞挖的跨度，左坝头洞挖跨度减小约**20%**，改善了左坝头洞挖受力条件，对山体稳定是有利的。为左岸坝头及坝肩开挖成“洞”创造了有利的条件。



主菜单

退出

开挖优化成果

拱肩槽采用全径向掏槽开挖、左坝头洞挖方案属国内首创，国际先进。此开挖方案较常规大开挖方案减少开挖量**220万立方米**，大大减少了开挖量和高边坡支护工程量，减少了弃渣量，减少了土地资源占用，避免了坝顶以上高边坡的开挖和支护，降低了施工难度，规避了施工风险，最大程度上减小了对原生态环境的影响。



主菜单

退出

3.3 坝体结构设计优化

- **3.3.1 基础无盖重固结灌浆**

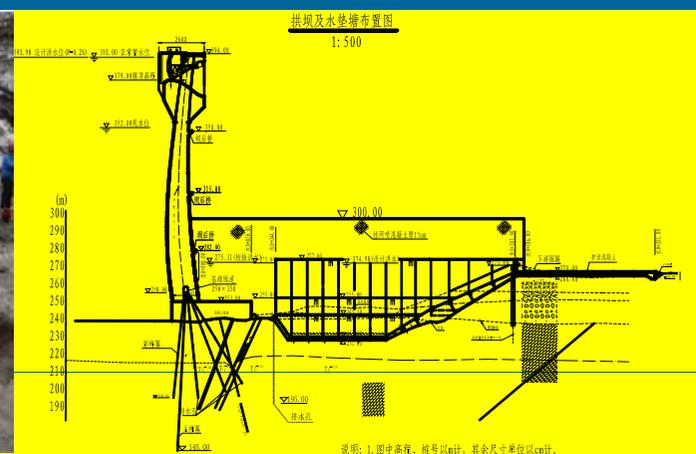
- 本工程拱坝两岸岸坡陡峭，常规盖重固结灌浆无法实施，设计过程中坝基深部固结采用无盖重固结灌浆，接触段岩体进行埋设固结灌浆管，在坝体浇筑后实施分期固结。固结灌浆孔深**9m**，表部**3m**范围内固结灌浆管引至下游，坝体浇筑后，接触段岩体进行埋管二次固结灌浆，实践证明固结灌浆效果良好。

- **3.3.2取消坝体排水孔及排水廊道**

- 由于本工程无冰冻问题，且属于超薄拱坝，取消了坝体排水孔，进而取消了坝体排水廊道，节省了直接投资，更重要的是大大的节省了施工工期，减少了施工干扰，便于混凝土入仓、平仓、震捣，对于保证混凝土浇筑质量是有益的。此项设计优化在国内同级工程建设中也是大胆的尝试，并取得了良好的效果。

3.3.3 拱坝垫座优化

- 根据开挖后的实际地质情况对盖下拱坝垫座结构进行调整，将原设计台阶开挖方案调整为顺势清基，按开挖后的实际地形，调整垫座模型进行有限元仿真模拟。最初设计垫座上游伸出坝体上游面**10m**，后采用有限元仿真模拟垫座从**10m**、**5m**、**3m**、**0m**四种方案，分析垫座稳定、应力和变形情况。垫座上游面与坝体基本一齐，这样上游面的第一主拉应力得到了很好的释放，消除了一部分应力集中的影响；随着垫座伸出上游不断减短的情况下，最大第三主应力逐渐减小。



主菜单

退出

- 坝体底部的第一主应力逐渐减小的，坝体底部的第三主应力逐渐增大。随着垫座的减短，坝底应力集中范围变小，且应力集中的部位由原先的坝底**253**高程往坝体下部垫座基面扩散，而坝体上其他部位的第一主应力基本不变，第三主应力也基本不变。由此，可以说明垫座减短，坝体应力集中范围减小，应力集中部位出现在垫座基面，拉力区范围较小。四种工况下垫座上游的最大等效应力均小于规范要求。



主菜单

退出

- **3.3.4坝体上游增设柔性防渗涂层**
- (1)本工程在技施阶段取消了坝体排水孔，对于提高混凝土浇筑质量，加快浇筑进度是有好处的，然而取消坝体排水孔，坝体内渗透压力势必会有增大趋势，提高混凝土抗渗性能对减少坝体渗透压力进而减小水力劈裂是有好处的。提高混凝土的抗渗性能的常规办法是增加混凝土水泥用量，但增加水泥用量导致混凝土水化热增加，加大了温度控制成本和难度且效果不理想。坝体上游面喷涂柔性防渗材料解决了在不增加混凝土中水泥用量的前提下，提高坝体防渗性能的矛盾。

2014-11-26



主菜单

退出

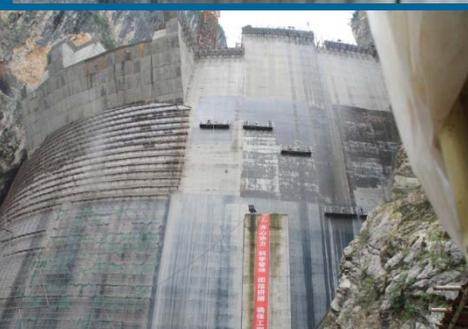
坝体上游增设柔性防渗涂层

- (3)大坝施工中产生的裂缝大多是坝体内外温差引起的表面裂缝或水平施工缝张开，而混凝土坝上游面的表面裂缝，有在蓄水之后发展为深层裂缝的可能。如美国德沃夏克坝和加拿大雷沃斯托克坝的情况 [2]。所以混凝土坝的保温，防裂、防渗等一系列问题是相互关联的，也是人们极为关心的问题。本工程原计划坝体上游防渗与施工期保温结合，同步进行，后由于施工进度问题分步实施。



坝体上游增设柔性防渗涂层

- (4)拱坝施工过程中温度控制要求严格，温控、养护措施落实不到位，混凝土在施工期极易出现细微裂缝，而这种裂缝在蓄水后在水力劈裂的作用下有可能进一步开展，由微裂缝发展成规模比较大的裂缝，影响坝体整体性、耐久性，甚至影响工程的正常使用，这在混凝土坝施工中也是经常出现的问题。大坝上游柔性防渗涂层有效的限制了细微裂缝进一步开展，有效地弥补了混凝土脆性材料抗裂性能差的不足。

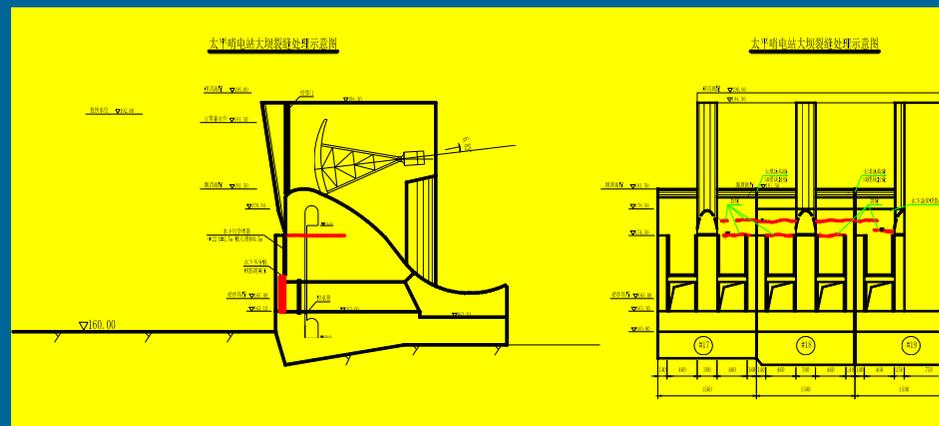


主菜单

退出

坝体上游增设柔性防渗涂层

(5) 坝体施工过程中分层浇筑，水平施工缝处理不当会出现沿水平施工缝的渗漏通道，由于混凝土入仓机械故障、送电线路故障、天气原因等各方面因素，施工冷缝在施工过程中也很难完全避免，这都是很多工程建设过程中出现的施工质量缺陷，给坝体蓄水后的渗漏埋下了隐患，而且处理难度极大，处理成本较高。坝体上游面柔性防渗涂层的设置可有效地对水平施工缝及施工冷缝等质量缺陷进行补救，截断层间渗漏通道，避免蓄水后处理混凝土浇筑质量缺陷带来的坝体渗漏的难题。



主菜单

退出

坝体上游增设柔性防渗涂层

- (6)在运行期，坝体一旦出现裂缝，在高水头下进行裂缝修补难度大、代价高，这也是水工界的共识。借鉴碾压混凝土坝上游面薄膜防渗的经验，在高拱坝上游面设置柔性防渗体系，可以防止高拱坝运行期微裂缝开展，减少或避免水下裂缝修补加固，为工程的运行、维护创造有利条件，降低了运行维护成本。

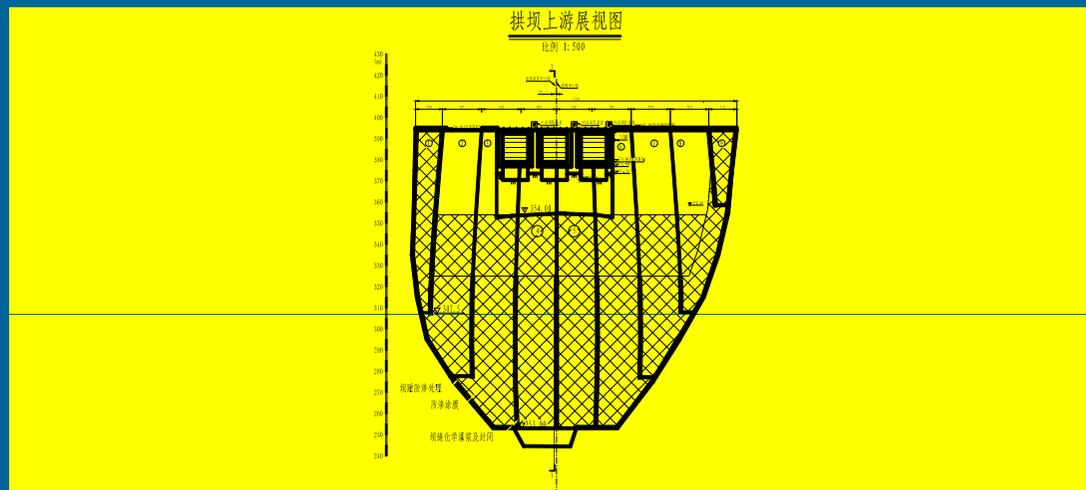


主菜单

退出

坝体上游增设柔性防渗涂层

- 本工程正常蓄水位**392.0m**，坝顶高程**394.0m**，拱坝基本体形建基**253.0m**，死水位**352.0m**，本工程未设置放空设备，大坝堰顶高程**379.0m**，防渗涂层布置至**354.0m**。



主菜单

退出

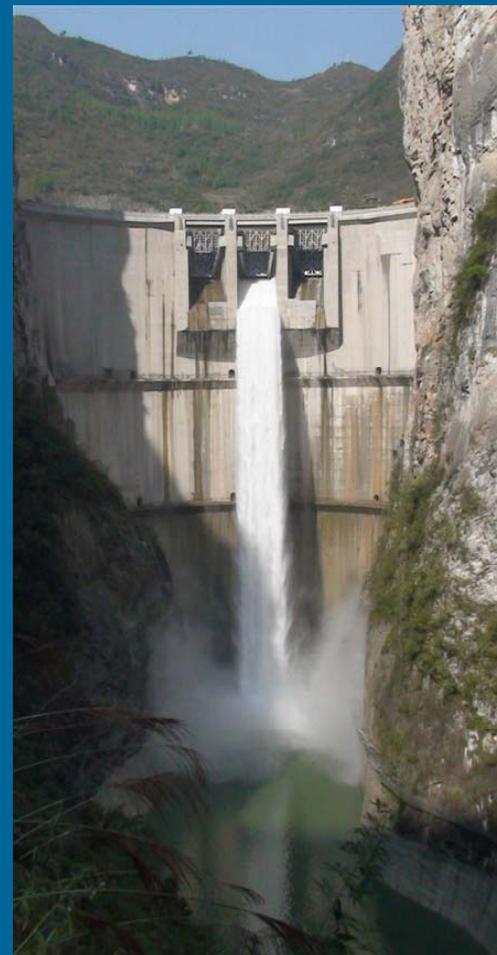
3.4 泄洪、消能系统优化

- 在宣泄**100**年一遇洪水时，消能塘内水面宽度仅为**48m~51m**、长度约**150m**，水垫深度不足**30m**。而**100**年一遇洪水泄洪功率为**3235MW**，单位水体承受的泄洪功率达到**20.2kW/m³**，与国内外其他工程相比泄流量偏大，消能塘偏小，如此大的泄洪功率相对窄小的水垫塘使消能防冲问题极为突出。与国内和国际代表性拱坝工程泄洪系统比较，盖下坝水电站泄洪消能系统布置型式先进，单位水体消能率国内同类工程最大。



坝身泄洪挑跌流水垫塘消能比较

工程名称	坝高 (m)	下泄流量 (m ³ /s)	泄洪功率 (MW)	单位水积消能率 (kW/m ³)	水垫深度 (m)	水垫塘净长度 (m)
二滩	240	16300	26500	13.3	57.2	320.0
小湾	292	15600	34500	14.87	46.9~51.2	380.0
构皮滩	231	26950	39600	15.84	51.76~76.83	286.1
钦古(巴西)	144.7	17700		17.4	61.2	320.0
卡博拉巴桑 (莫桑比克)	171	13300		16.1 (10.1)	38.1 (76.9)	
溪落渡	295	23650	48300	10.0		400.0
白山	149	9350	12000	15.9	39.5	228.0
盖下坝	160	2842	3235	20.2	29.1	92.5



2014-11-26

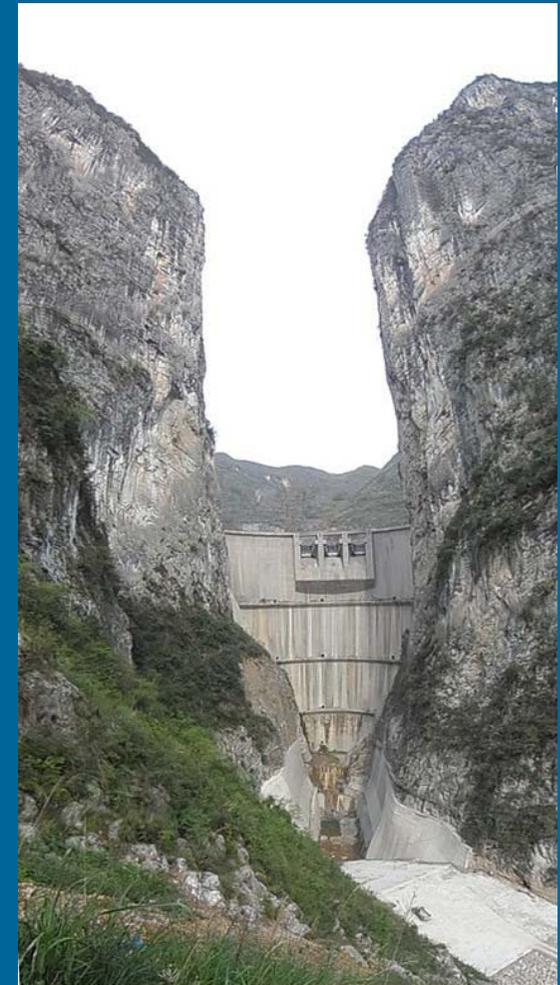
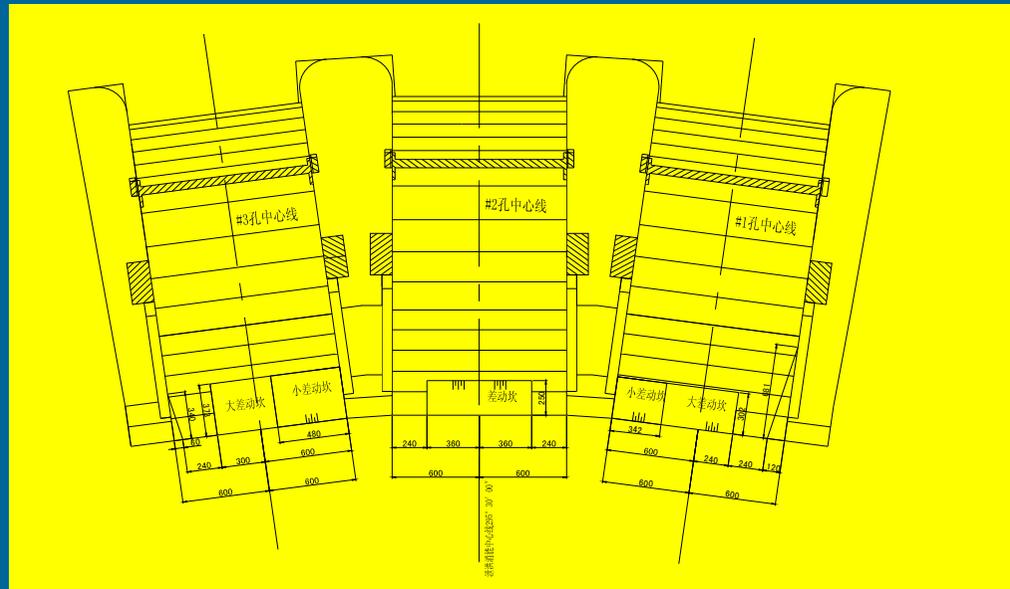


主菜单

退出

泄洪、消能系统优化

- 表孔末端的挑流体形是消能的关键，利用双层差动小挑坎分散水流，适当地调整中间孔、右孔差动坎高度，让水舌分区分层入水，纵向拉开，减少入水单宽流量、分散消能，尽可能减小水垫塘底板受力。

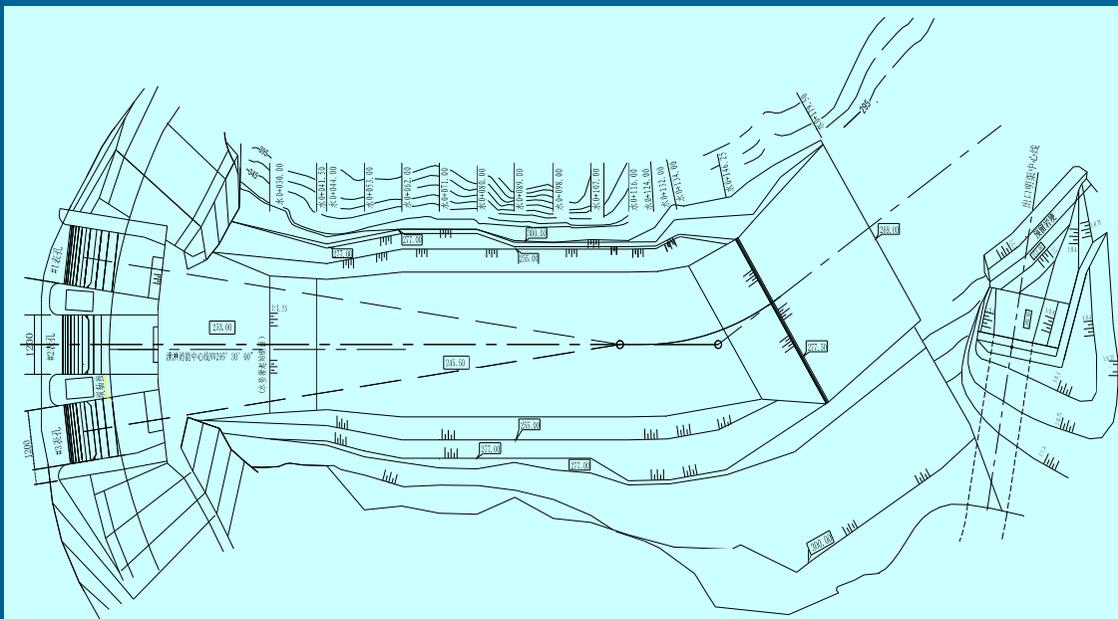


主菜单

退出

泄洪、消能系统优化

盖下坝工程这种河谷狭窄，泄洪功率偏大、坝下游消能水体有限的特殊情况，因河道狭窄加之拱坝各孔射流向心集中的作用，要实现水舌横向、纵向有较大的扩散，仅仅依靠单层差动坎来解决坝下游水垫塘消能问题则很困难。

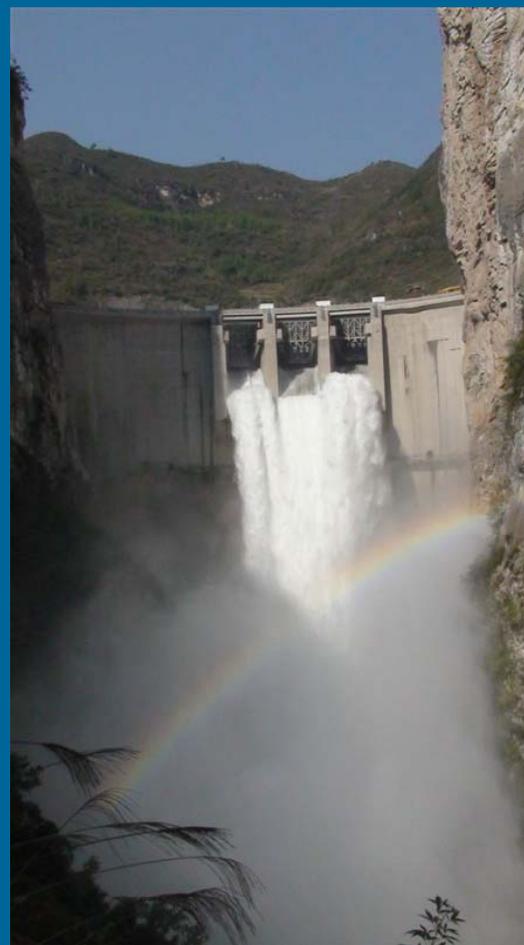


主菜单

退出

泄洪、消能系统优化

- 本工程采用在差动坎上再叠加小差动坎的双层差动坎措施，使表孔末端出口水股分三层出流、水舌在横向适当地分散充满河道，纵向拉开，使水舌入水范围增大，入水单宽流量减小。小差动坎的挑流导向作用，使射流集中强度减小；水舌空中发生交叉碰撞，在入水前损耗部分能量，有效地减小下泄水流对水垫塘底板的冲击荷载与脉动荷载，提高了消能效果，使底板最大动水冲击压力 ΔP 满足规范和设计要求。差动坎上再叠加小差动坎的布置型式新颖，消能效果较好^[3]。

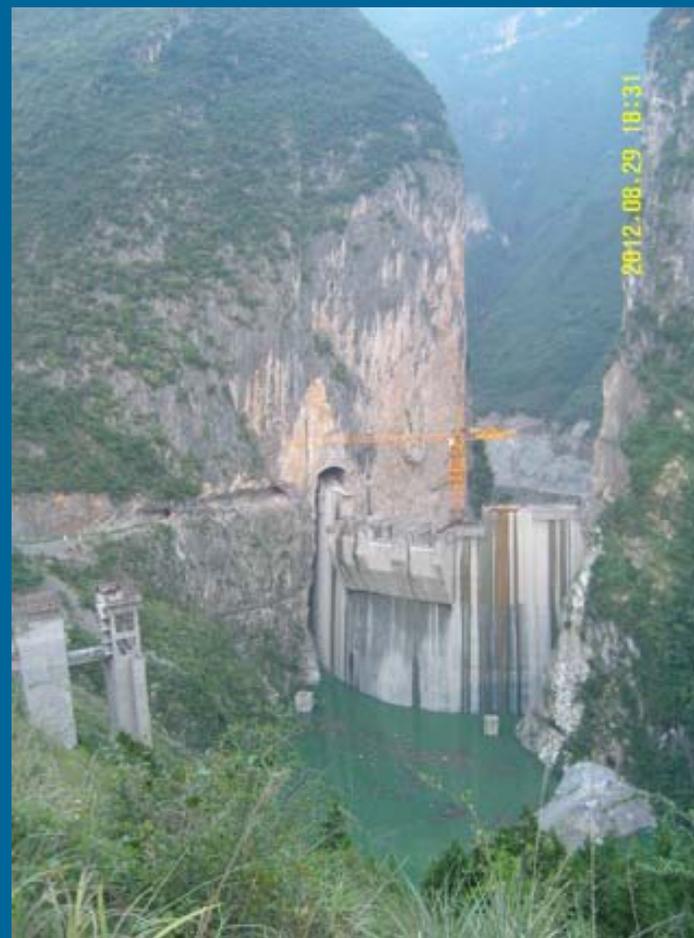


主菜单

退出

4 结语

- 本工程设计过程中充分考虑了实际地形、地质条件，从拱坝体形、开挖方式、拱坝构造、运行维护及消能防冲等方面综合考虑，进行了设计优化。实现了节省工程量，缩短工期，改善坝肩受力条件、减少坝体开挖量、弃渣量、减少土地资源占用，降低对原生态环境的破坏和影响，解决了高山窄谷拱坝泄洪消能设备布置的难题，结构设计在满足规范要求前提下，方便施工和运行维护，为类似工程设计提供了参考。



主菜单

退出

截止发稿，大坝已经蓄水发电两年，蓄水高度基本达到正常高水位**392.0m**（最高达到**392.60m**），监测成果变化量相对平稳，大坝监测无明显异常测值，横缝开度变化趋于平稳，坝体应力状态正常，变形量小于设计值；坝体混凝土与基岩面接触总体良好；垫座混凝土接缝开度较小且变化基本趋于平稳；垫座与坝体间接缝处于压缩状。坝基下游则无明显渗压，坝基变形较小。



主菜单

退出



谢谢!

2014-11-26