# 湖南省 桑植县

# 牛洞口水库堆石混凝土双曲拱坝设计与施工特点



中国水利水电第八工程局有限公司

2023年10月12日

主 讲 人：李锦岚
联系电话：15874170697

# 目录

1、堆石混凝土技术在湖南省推广应用概况

2、牛洞口水库工程概况

3、堆石混凝土拱坝设计探讨

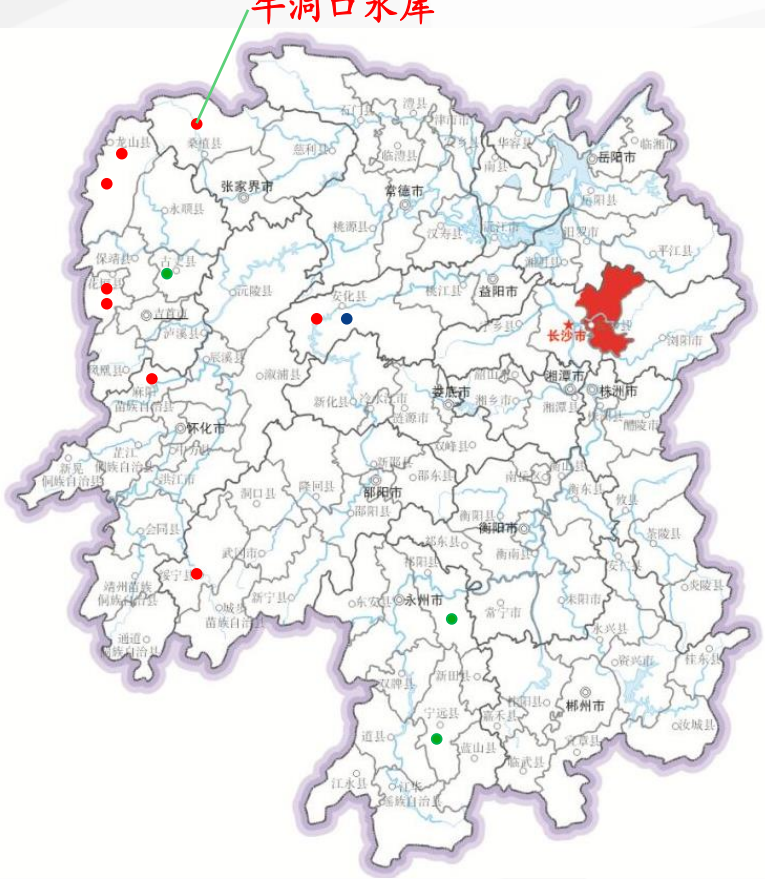
4、堆石混凝土拱坝施工特点

5、实施效果分析

Part 1

# 堆石混凝土技术在湖南省推广应用概况

# 2.1 湖南省堆石混凝土技术应用概况




部分湖南省堆石混凝土重力坝及拱坝项目清单

| 工程名称 | 工程所在地 | 坝型 | 坝高(m) | 建设情况 |
|---|---|---|---|---|
| 吉辽河水库 | 湘西州花垣县 | 重力坝 | 41.5 | 2016.12建成 |
| 火马坪水库 | 怀化市麻阳县 | 重力坝 | 31 | 2017.12建成 |
| 楠竹坪水库 | 湘西州龙山县 | 重力坝 | 41.5 | 2019.08建成 |
| 龙潭河水库 | 湘西州龙山县 | 重力坝 | 60.6 | 2020.09建成 |
| 大湖坪水库 | 益阳市安化县 | 重力坝 | 61.8 | 2021.09建成 |
| 五龙冲水库 | 湘西州花垣县 | 重力坝 | 66 | 2022.08建成 |
| 秀水水库 | 邵阳市绥宁县 | 重力坝 | 57.7 | 2023.01建成 |
| 仙丰水库 | 益阳市安化县 | 重力坝 | 49.8 | 在建 |
| 徐家岭水库 | 湘西州古丈县 | 重力坝 | 68.5 | 拟建 |
| 东方红水库 | 永州市祁阳市 | 重力坝 | 49 | 拟建 |
| 九疑水库 | 永州市宁远县 | 重力坝 | 64.1 | 拟建 |
| 牛洞口水库 | 张家界市桑植县 | 拱坝 | 64 | 2021.08建成 |

Part 2

# 牛洞口水库工程概况



牛洞口水库是一座以灌溉、防洪为主，兼顾乡镇及农村人畜饮水、生态用水的综合利用水利枢纽工程，是一个烟水援建项目。坝址位于湖南省张家界市桑植县谷罗山乡牛洞口村境内，是目前湖南省最高的堆石混凝土双曲拱坝，最大坝高为64.0米，工程于2023年6月下闸蓄水成功。



牛洞口水库坝址建坝前原始地形照片

牛洞口水库坝址河谷为近似对称的“V”型，底宽约33m，高程441m时河谷宽约110m。两岸山势陡峻，边坡坡角约75°。

左岸高程430m以下、右岸高程400m以下为三叠系中统嘉陵江组第一段以灰岩为主地层（$T_{2j}^{4-1}$），上部则为三叠系中统嘉陵江组第二段以角砾状灰岩为主地层（$T_{2j}^{4-2}$），灰岩与角砾状灰岩物理力学特性相近，以厚层块状结构为主，岩石坚硬致密，弱风化岩石饱和抗压强度约45MPa，变形模量$E_o$约5～8Gpa，微风化岩石饱和抗压强度约为65MPa，变形模量$E_o$约12～15Gpa。

Part 3

# 堆石混凝土拱坝设计探讨



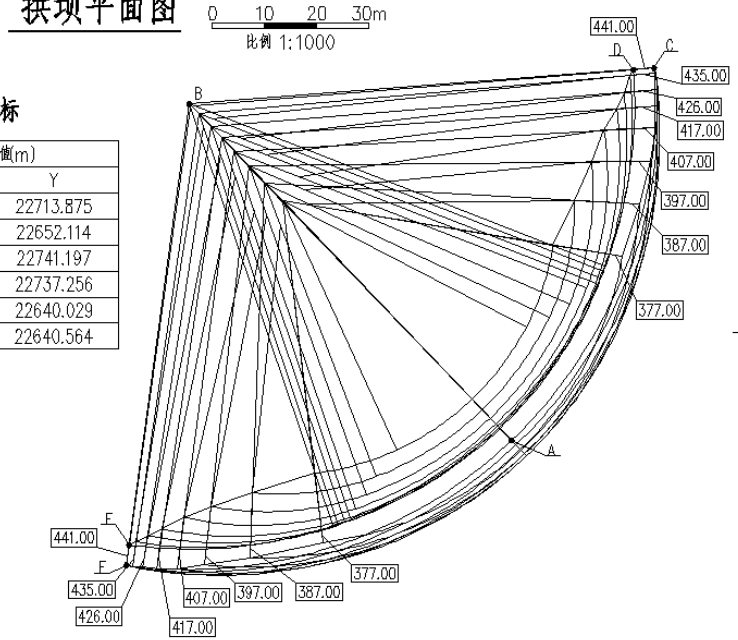




结合牛洞口水库现场地形地质条件，枢纽大坝设计采用了堆石混凝土双曲拱坝。

# 3.2 拱坝体形设计

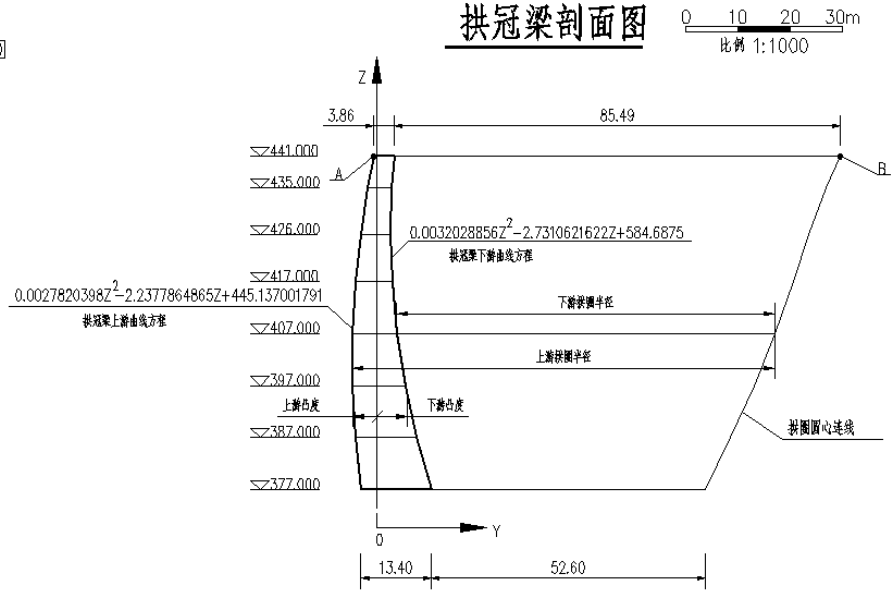
拱坝平面图




拱坝平面控制点坐标

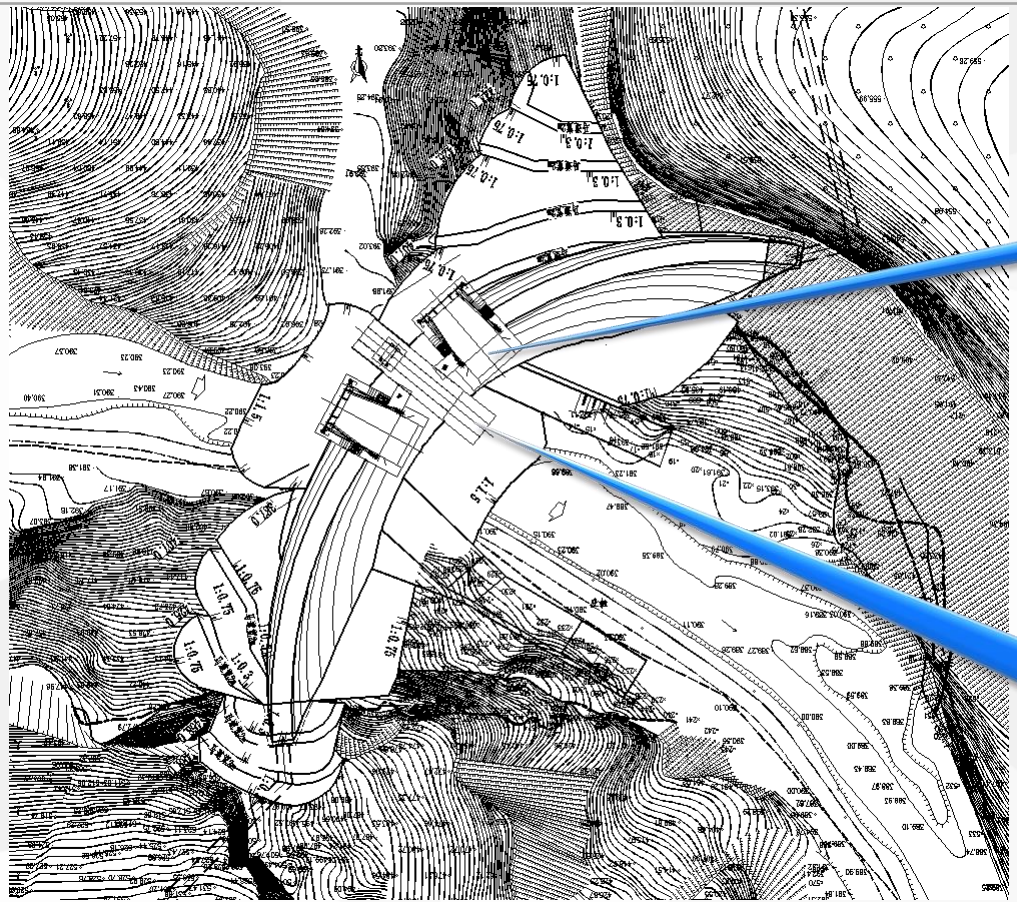
| 编号 | 坐标值(m) | |
|---|---|---|
| | X | Y |
| A | 75823.250 | 22713.875 |
| B | 75887.818 | 22652.114 |
| C | 75894.719 | 22741.197 |
| D | 75894.414 | 22737.256 |
| E | 75799.289 | 22640.029 |
| F | 75803.206 | 22640.564 |

拱冠梁剖面图




本工程采用堆石混凝土双曲拱坝，水平拱圈采用多心圆，顶拱最大中心角102.204℃，顶拱弧长 159.381m。拱冠梁顶厚 3.863m，底厚 13.4m，厚高比为0.2094，倒悬度控制在0.3:1以下，坝体结构总方量约7万$m^3$，其中堆石混凝土约5.2万$m^3$。

# 3.2 拱坝体形设计



表孔共两孔，孔口尺寸为8.8m×8.5m（宽×高）

泄洪中孔，出口尺寸3.0m×4.3m（宽×高）

牛洞口水库枢纽平面布置图

| 《混凝土拱坝设计规范》(SL282-2018) | 《砌石坝设计规范》(SL25-2006) |
| --- | --- |
| 7.3.1 采用拱梁分载法计算时，坝体的主压应力和主拉应力应符合下列应力控制指标的规定：<br>1 坝体的主压应力不应大于混凝土的容许压应力。混凝土的容许压应力等于混凝土强度值除以安全系数。对于基本荷载组合，1级、2级拱坝的安全系数采用4.0,3级拱坝的安全系数采用3.5。对于非地震情况特殊荷载组合，1级、2级拱坝的安全系数采用3.5,3级拱坝的安全系数采用3.0。<br>2 坝体的主拉应力不应大于混凝土的容许拉应力。对于基本荷载组合，混凝土的容许拉应力为1.2MPa。对于非地震情况特殊荷载组合，混凝土的容许拉应力为1.5MPa。 | 6.2.5 用拱梁分载法计算时，坝体的主压应力和主拉应力应符合下列要求：<br>1 砌石体容许压应力的安全系数，对于基本荷载组合，采用3.5；对于特殊荷载组合，采用3.0。当无试验资料时，砌石体容许压应力值可按本规范附录 A 表 A -7选用；<br>2 砌石拱坝非地震组合容许出现一定的计算拉应力；<br>3 砌石拱坝地震组合控制计算拉应力可视工程具体情况适当放宽。<br>用拱冠梁法计算时，拱和梁的法向应力应满足本条所规定的应力指标。 |

基于以下两个方面的原因：

1、由于采用高自密实混凝土，其具有超强穿透填充能力、高粘结力，工艺也更简单，因此，堆石混凝土坝相比砌石坝坝体更完整密实，性能更接近大骨料混凝土。

2、根据已有的试验成果结论，堆石混凝土抗压强度均高于自密实混凝土，使用自密实混凝土的抗压强度指标来表征堆石混凝土抗压强度是安全的。

因此，本工程堆石混凝土拱坝应力建议参照《混凝土拱坝设计规范》（SL282-2018）提出如下控制指标：本工程挡水建筑物为4级建筑物，采用拱梁分载法，坝体的主压应力不应大于混凝土的容许压应力，对于基本荷载组合，取容许压应力为3.8Mpa，对于非地震情况特殊荷载组合，取容许压应力为4.5 MPa；坝体的主拉应力不应大于混凝土的容许拉应力，对于基本荷载组合，混凝土的容许拉应力为1.2Mpa，对于非地震情况特殊荷载组合，混凝土的容许拉应力为1.5MPa。

●温度荷载是拱坝设计的重要荷载之一。温度荷载与坝体材料相关的重要参数为线膨胀系数，砌石体线膨胀系数可在（6～8）×$10^{-6}$/℃范围内选用；混凝土线膨胀系数一般为（8～12）×$10^{-6}$/℃，主要决定于骨料种类、含量和混凝土配合比等。《堆石混凝土技术》（金峰）根据试验提出堆石混凝土线膨胀系数参考值为7.76×$10^{-6}$/℃，介于砌石体与混凝土之间。本工程线膨胀系数取值为8×$10^{-6}$/℃。

●应力=弹模×应变， 1℃→∽100KPa 应力变化。

| 混凝土拱坝 | 混凝土砌石拱坝 |
| --- | --- |
| 不同的强度指标对应有不同的弹模，在规范中已有具体的数据，对应C20混凝土弹模Ec值为25.5Gpa，但拱坝坝体在水荷载作用下，长期处于负荷状态，存在蠕变问题，另外坝体的分缝在进行封拱灌浆时不可能达到100%的饱满，缝面的存在对坝体混凝土的约束有所减轻，因此，一般设计取值为应力试验值的0.6～0.7倍，对应C20混凝土为15.3～17.85 Gpa。 | 根据《砌石坝设计规范》，按毛石占70%，块石占30%，块石强度40Mpa，混凝土砌石体弹模Ec取值为6.7 Gpa，变形模量Eo取值为3.7 Gpa，不到混凝土弹模的1/2，坝体应力将明显减小。 |

●根据目前文献资料，堆石混凝土弹模取值有待进一步研究，但若按上述两种坝体材料取值计算，其应力结果将出现较大的差异。本工程坝体弹模Ec取值为10Gpa，基本上为堆石与自密实混凝土弹模考虑堆石率为50%后的加权平均值。

●应力=弹模×应变，坝体弹模的取值与拱坝的应力成正比关系，特别是在温度荷载作用下。结合前面对线膨胀系数的讨论，因此，相比混凝土拱坝，在相同应力控制指标、同样地形、同等坝高条件下，堆石混凝土拱坝坝体方量会小于混凝土拱坝。

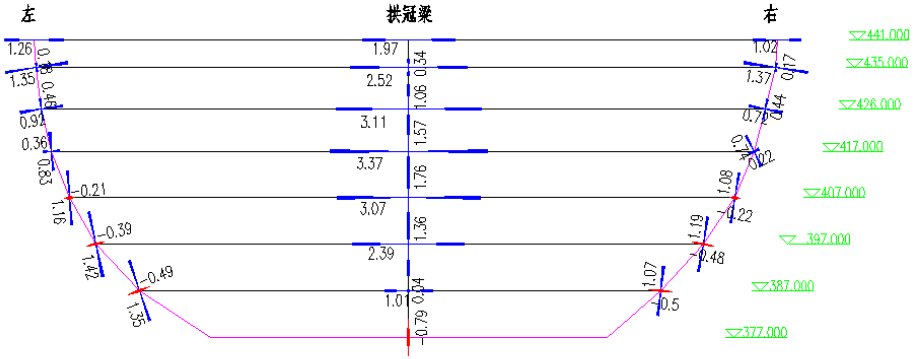
拱冠梁径向位移（单位：mm，向上游方向位移为正）

| 高程 | 441 | 435 | 426 | 417 | 407 | 397 | 387 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 工况1 | -38.95 | -39.65 | -39.86 | -37.66 | -31.66 | -22.50 | -11.92 |
| 工况4 | 12.55 | 9.77 | 5.48 | 1.18 | -2.69 | -4.38 | -3.54 |
| 工况5 | -18.60 | -21.91 | -25.95 | -27.32 | -24.84 | -18.63 | -10.30 |

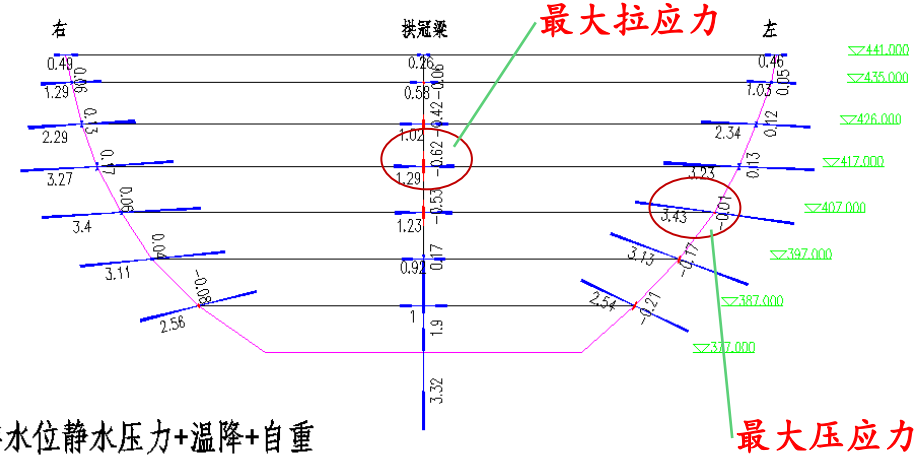
从表中可以看出，由于温降引起的变位与水压引起变位方向一致，因此，工况1正常蓄水位+温降径向位移最大，最大向下游变位发生在拱冠梁高程 426m处，值为-39.86mm。根据蓄水后实测结果，在正常蓄水位下坝顶径向位移观测值为-21.4 mm，在坝体弹性工作范围内，说明计算假设参数取值基本合理。

# 3.6 坝体应力计算

上游面主应力成果图




下游面主应力成果图

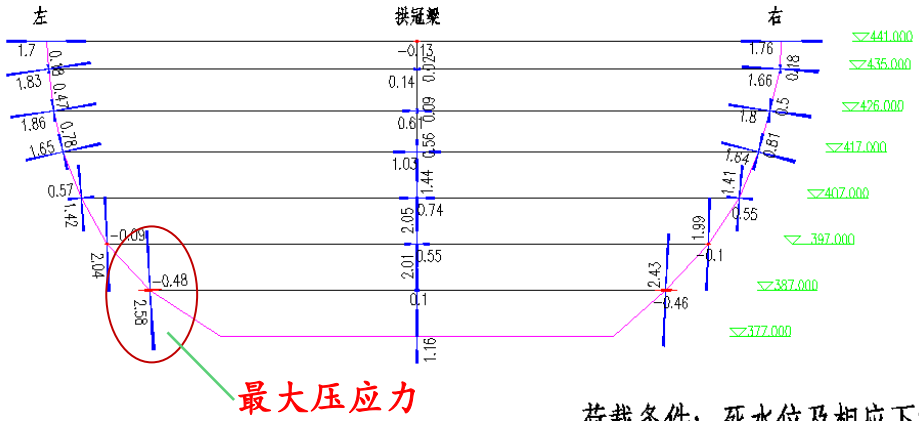



荷载条件：正常蓄水位及相应下游水位静水压力+温降+自重

正常蓄水位+温降工况，最大主拉应力发生在下游面拱冠梁第4层拱端高程 417m处，最大主拉应力为-0.62MPa<-1.2Mpa；最大主压应力发生在下游面左岸拱端第5层高程407m处，最大主压应力为3.43MPa<3.8MPa。

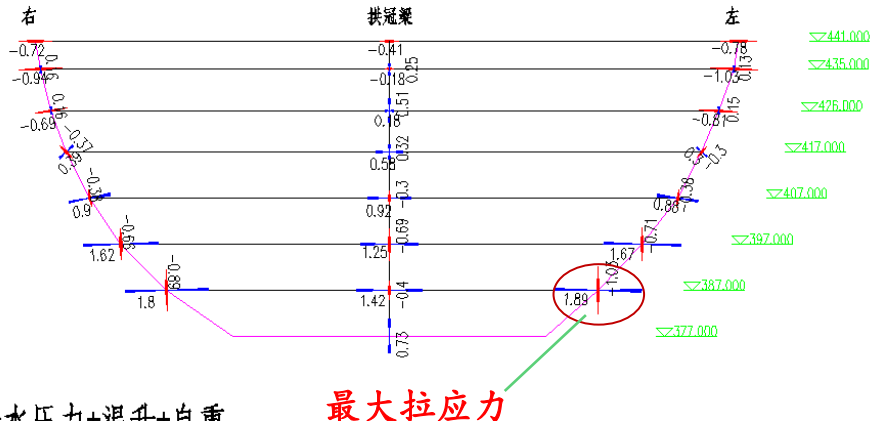
# 3.6 坝体应力计算

上游面主应力成果图




最大压应力

下游面主应力成果图



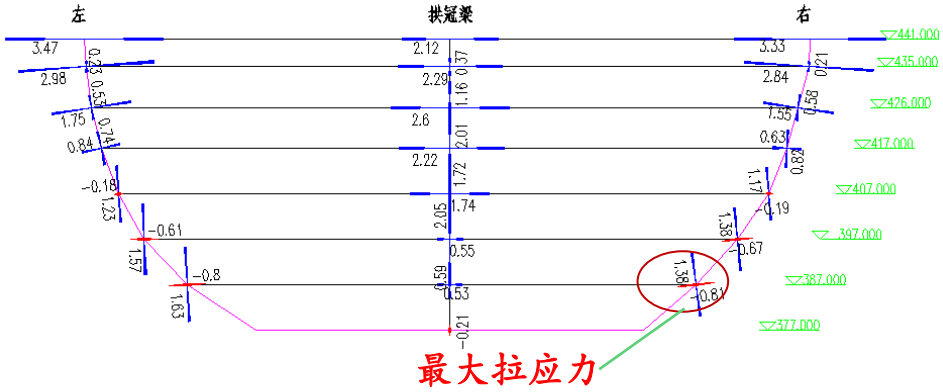

最大拉应力

荷载条件：死水位及相应下游水位静水压力+温升+自重

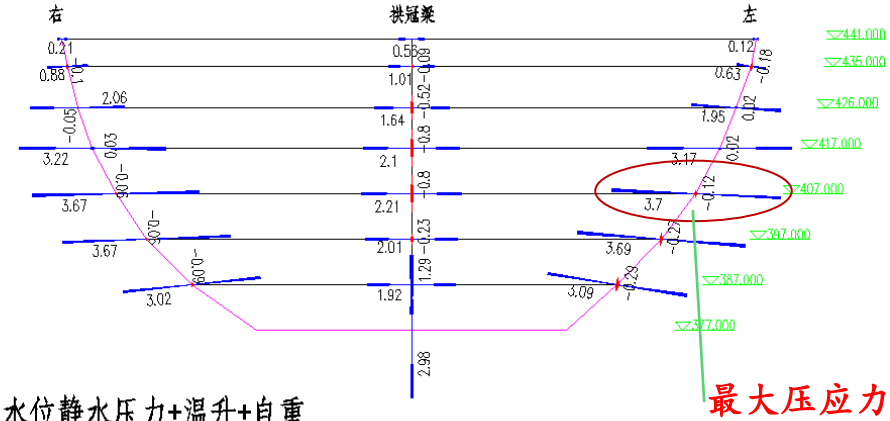
死水位+温升工况，最大主拉应力发生在下游面左岸拱端第7层拱端高程387m处，最大主拉应力为-1.03MPa<1.2Mpa；最大主压应力发生在上游面左岸拱端第 7层高程 387m处，最大主压应力为2.58MPa<3.8MPa。

# 3.6 坝体应力计算

上游面主应力成果图




下游面主应力成果图

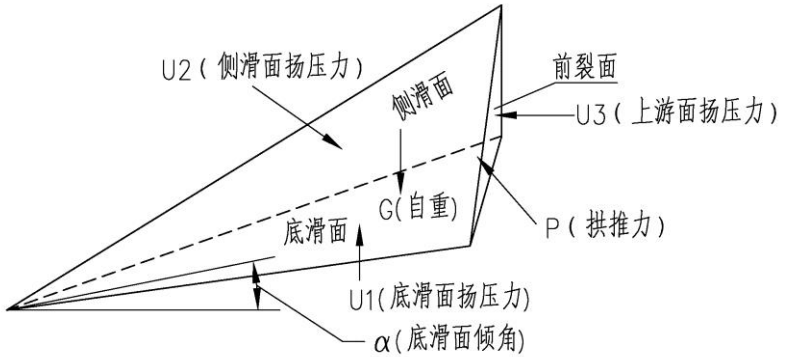



荷载条件：校核洪水位及相应下游水位静水压力+温升+自重

校核洪水位+温升工况，最大主拉应力发生在上游面右岸拱端第7层高程387m处，最大主拉应力为-0.81MPa<-1.5Mpa；最大主压应力发生在下游面左岸拱端第5层高程407m处，最大主压应力为3.70MPa<4.5MPa。

# 3.7 坝肩稳定计算

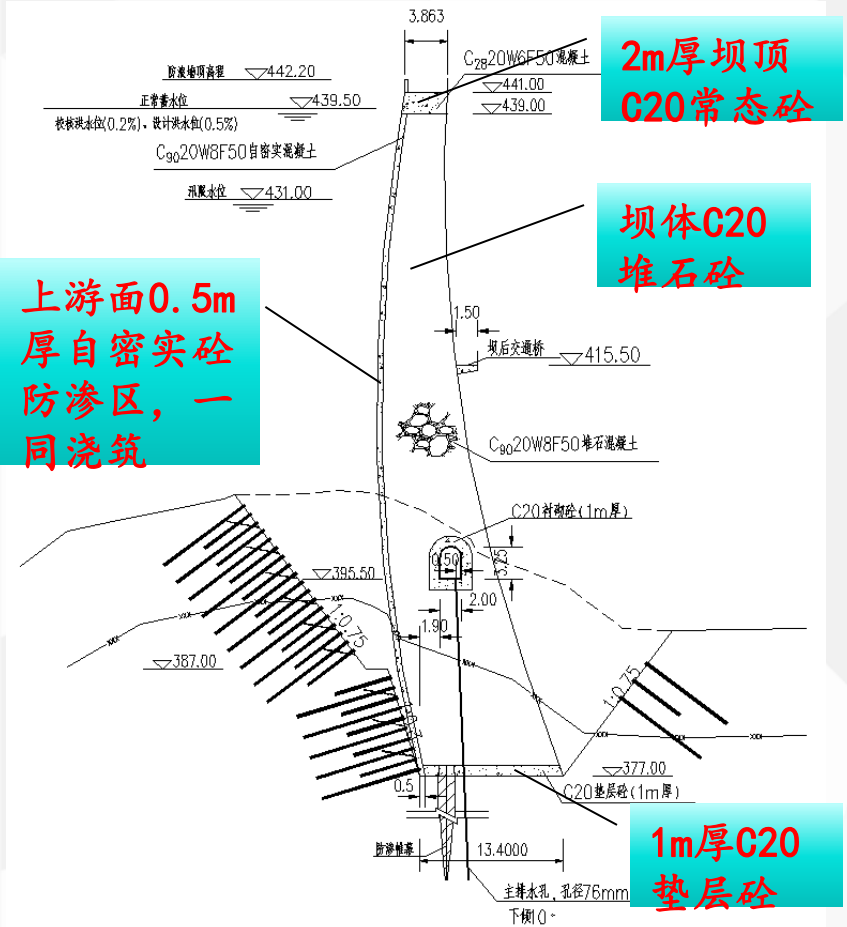



坝肩稳定计算简化模型

牛洞口水库左、右岸坝肩抗滑稳定计算除了根据地质不利条件选取的不同滑动面模型进行坝肩稳定计算，同时，根据发现的右坝肩高程408～413m溶洞对应的夹层，对抗滑稳定的敏感性进行了分析。对此处做一极端假定：认为该夹层是空的，把该夹层做临空面考虑，帷幕线垂直下切作为前裂面，在高程408m拱端和该夹层垂直方向做铅垂面作为侧滑面，上部坝体被剪，高程380m做底滑面。计算的抗滑稳定安全系数为1.935，虽小于规范规定的3.0倍，但抗滑力仍是滑动力的1.935倍，不会产生压缩变形。

# 3.8 大坝材料分区及温控方案




挡水坝段坝顶宽度3.863m～3.95m，坝轴线长度159.381m。最大坝高64m。

坝体横缝采用径向布置，共2条缝，间距为54.8m，横缝面为铅直面，并设置键槽，键槽为垂直方向，采用梯形槽，并埋设接缝灌浆系统。

本工程堆石混凝土埋石率约50%，另外高自密实性能混凝土水泥用量也较常规混凝土少，故堆石混凝土整体水泥用量要显著低于常态混凝土，大块石的使用可以提高混凝土密度，增强混凝土抗断裂性能，还可以降低水化热，减少收缩，因此，本工程取消了坝体温控措施。

Part 4

# 堆石混凝土拱坝施工特点



牛洞口大坝开挖设计对陡壁岩石先进行锚固，然后进行约10m深的窑洞式开挖，形成坝肩开挖平洞，再自上而下进行槽挖，这样可大大减小坝顶以上开挖量。同时，堆石混凝土拱坝对块石用量大，块体抗压强度一般要求大于40MPa，大坝基础嵌入弱风化岩中下部，通过分拣，其开挖料抗压强度可以满足块石料要求，这就为坝体块石料提供了很好的来源。通过合理设计坝肩嵌岩深度，采用窑洞式开挖可以做到充分利用开挖料，合理解决块石料源问题，从而降低工程投资。

# 4.2 高自密实性能混凝土配合比

中国电建 POWERCHINA

**高自密实混凝土性能指标**

| 检测项目 | 塌落度（mm） | 塌落度扩展（mm） | V形漏斗通过时间（S） | 自密实性能稳定性（h） |
|---|---|---|---|---|
| 指标 | 260～280 | 650～750 | 7～25 | ≥1 |

**$C_{90}$20粉煤灰高自密实性能混凝土配合比（kg/m³）**

| 项目 | 水泥 | 粉煤灰 | 砂子 | 石子 | 水 | HSNG-T |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 理论配合比 | 177 | 357 | 743 | 759 | 203 | 6.63 |
| 实际配合比 | 177 | 171 | 1141 | 591 | 203 | 6.63 |

高自密实性能混凝土由北京华石纳固科技有限公司提供技术支持。HSNG-T为高自密实性能混凝土专用外加剂。采用一级配，相比同标号三、四级配常态混凝土，每方混凝土水泥用量少50～110kg。因此，堆石混凝土的水泥用量显著低于常态混凝土，大大降低水化热，可取消温控措施，降低成本。

# 4.3 块石、混凝土入仓方式



根据堆石混凝土特点，在施工总布置时，可尽量将混凝土拌和系统靠近大坝布置，高自密实性能混凝土从拌合系统出料口直接由混凝土输送泵接料，再通过泵送管接仓面布料机将混凝土直接泵送入仓，从而大大简化了混凝土水平与垂直运输。大坝堆石料则通过缆吊吊运入仓。

堆石混凝土这种显著施工特性，特别在峡谷地区，可大大降低材料运输对场内交通的要求，从而节省临时工程投资。

# 4.3 块石、混凝土入仓方式



# 4.3 块石、混凝土入仓方式




大型悬臂钢模板



# 4.3 块石、混凝土入仓方式



# 4.3 块石、混凝土入仓方式



混凝土浇筑视频

# 4.4 堆石混凝土质量控制



堆石混凝土坝体质量主要采用钻孔压水试验检查，每上升5m打一批检查孔，每100 $m^2$左右布置一组压水检查孔，一组3孔，三角形布置，三角形边长1.5m，一孔压水，另外2孔打开。压水检查的压力为0.3～0.5mpa，坝体渗量小于3Lu 即为合格，否则需进行灌浆处理，直至合格为止，坝体方可继续上升。检查孔压水检查完成后，用M10 砂浆水泥浓浆灌注封孔。根据统计资料，本工程大坝坝体钻孔压水试验检测结果平均透水率为0.53～1.11 Lu。

牛洞口水库堆石混凝土拱坝平面上按横缝分为三个仓面，每层上升高度为1.5m，平均2～3天可完成一个仓面，每整体上升一层约7天，与混凝土坝上升时间差不多，较浆砌石坝速度要快。

堆石混凝土单价按2019年价格水平约370元/$m^3$，与浆砌石坝相比造价接近，与混凝土坝相比单价更低。同时，两岸坝肩采用窑洞式开挖技术，开挖后产生的弱风化石料就地用于大坝建设，减少了开挖弃渣，减少了采石场、弃渣场建设维护。

本工程建设总体上发挥了堆石混凝土筑坝技术充分利用当地石料、环境友好、经济性好、施工工艺简单、建造速度快的优点。

Part 5

# 实施效果分析



在牛洞口水库蓄水初期，水位达到正常水位时，大坝坝顶实测最大径向位移值为21.4mm，小于设计计算值，说明坝体设计参数选择合理，大坝在弹性范围内正常运行。

# 5.1 实施效果反馈



通过坝体取芯和压水监测，坝体的密实度良好，其透水率值基本小于1Lu，根据岩芯显示，混凝土和块石结合良好，坝体干容重接近2.45t/m³，经过蓄水后近半年的观察，坝体表观未见裂缝、渗水等现象，坝体内灌浆廊道干燥不积水，说明堆石混凝土在温控及防渗方面均表现优异。

# 5.1 实施效果反馈



特别是2023年8月26日桑植县遭遇了1998年以来最大的洪水，牛洞口库水位超过了校核洪水位20cm，大坝各项监测指标正常，经受住了超规范库水位压力的考验。以上证明，堆石混凝土技术在牛洞口水库双曲薄拱坝中的设计与应用是成功的。

1）有进一步优化空间，应用还可突破。例如坝顶2m完全可以采用堆石混凝土替代，效果将更好，主要是解决了温控问题；另外溢流坝段也可以推广应用堆石混凝土技术。

2）力学性能研究。针对不同岩性，对于中小型工程如何快速、经济地确定力学参数，解决设计痛点问题：大量生产性试验、原位试验、大型试块；总结归纳、形成规范推荐建议值。

# 汇报完毕！

# 谢谢大家！