

论堆石混凝土重力坝的优势

赵仕勇, 聂庚生, 彭辉, 朱东军, 崔艳玲

(重庆同望水利水电工程设计有限公司 重庆市 401120)

【摘要】本文通过重庆市梁平区猎神水库工程设计和施工, 得出堆石混凝土筑坝技术机械化程度高, 造价经济, 施工快, 质量易保障、温升高、环境友好。目前水库工程已建成, 蓄水至正常水位已半年, 各项指标均满足设计要求, 具备较强的推广性。

【关键词】猎神水库; 堆石混凝土重力坝; 设计; 优势;

中图分类号:

文献标识码: A

1 概述

重庆市梁平区猎神水库工程是重庆市第一座建成的堆石混凝土重力坝, 最大坝高 32.5m, 坝长 81.0m, 设计堆石混凝土 2.78 万 m^3 , 最大仓面 $636/954m^2/m^3$ 。主体施工期 7 个月, 堆石混凝土最大月浇筑量为 $8466m^3$, 平均月浇筑强度为近 $4500m^3$ 。堆石混凝土水化热温升较低, 实测平均值低于理论值的 50%。实测 C20 自密实混凝土 90 天龄期平均强度为 25.3MPa, 坝体压水试验平均值小于 1.1LU。

2 工程设计

2.1 基本概况

猎神水库为堆石混凝土重力坝(埋石率 55%), 坝顶高程 726.50m, 最大坝高 32.50m, 坝顶宽 4.50m, 坝长 81.0m。大坝上游设 1.0m 厚混凝土防渗层, 设计采用 C20 自密实混凝土同坝体一同浇筑, 堆石混凝土重力坝自左岸至右岸共 3 条沉降伸缩缝, 共计 4 个坝段。坝址区位于明月峡背斜南东翼, 岩层倾向 $110^\circ \sim 150^\circ$, 倾角 $35^\circ \sim 65^\circ$, 坝址处地形狭窄, 河谷呈不对称的“U”型, 河流自北西向南东流, 河床高程 702.22m, 河床宽 6.5~8.5m。大坝基岩均为三叠系下统嘉陵江组四段灰岩夹盐溶角砾岩, 左岸山顶高程高于 795m, 右岸山顶高程高于 780m。梁平县多年平均气温 $16.6^\circ C$, 7 月最高平均气温为 $27.3^\circ C$, 1 月最低平均气温为 $5.4^\circ C$, 极端最高气温 $40.3^\circ C$, 极端最低气温 $-6.6^\circ C$ 。

猎神水库工程枢纽由挡水建筑物、泄水建筑物、取水建筑物等组成。挡水建筑物坝型为堆石混凝土重力坝, 坝顶高程 726.50m, 最大坝高 32.50m, 坝顶宽 4.50m。坝长 81.0m, 其中左岸非溢流坝段长 45.0m, 右岸非溢流坝段长 30.0m。下游高程 720.0m 以下设置渣料填筑区, 外坡比为 1:2.0。

溢流坝段位于大坝河床中部。溢流堰为开敞式溢流堰, 共 4 孔, 分左右岸坝肩各两孔对称布置, 每孔净宽 6.00m, 堰顶高程 724.50m (正常蓄水位), 堰型为 WES 型曲线; 左右岸泄槽汇于主泄槽段汇合后, 结合景观设计采用多级跌水消能, 末端接消力池, 消力池出口接下游河床。溢洪道均采用 C25 钢筋混凝土结构。

取水建筑物采用坝内埋管, 兼放水、放空及态放水, 布置于桩号 K0+075.0m 处布, 采用 DN500 钢管, 管道进口中心线高程为 714.05m; 大坝下游侧引水管尾端设置阀门室, 闸室内设置检修闸阀、工作闸阀各一套, 其后接灌区管道。生态放水管采用 DN300 钢管。

2.2 建坝材料比选

猎神水库大坝坝型推荐采用重力坝, 本工程选用埋石混凝土重力坝与堆石混凝土重力坝进行同精度对比分析, 对比差异指标如表 1:

表 1 大坝建坝材料对比差异分析表

名称	埋石混凝土重力坝	堆石混凝土重力坝	备注
埋石率	20%	55%	
块石入仓方式	塔吊入仓	汽车+塔吊入仓	

混凝土入仓方式	泵送	泵送
混凝土振捣	需要	不需要
施工工期	13月	9月
坝体月平均浇筑强度	2150m ³	3100m ³
坝体人工消耗总量	1.85 万工日	0.73 万工日
概算单价 (元/m ³)	408.95	380.34

从施工工期、施工工艺简便、工程造价、减少劳动力及劳动力强度和施工噪音影响分析，猎神水库工程推荐采用堆石混凝土重力坝。

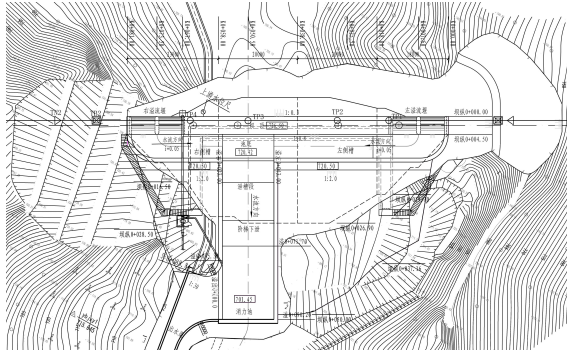


图 1 枢纽平面布置图

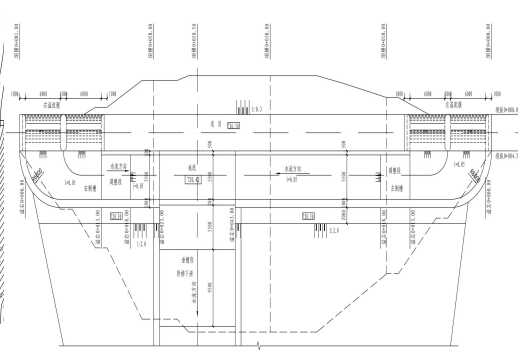


图 2 溢洪道平面布置图

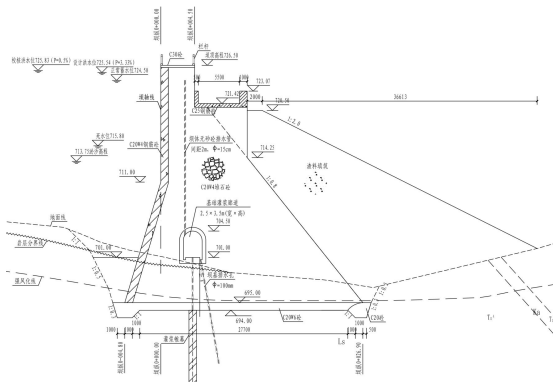


图 4 非溢流大坝最大剖面图



图 5 猎神水库实景图 (2020.05)

2.3 设计主要技术指标

2.3.1 坝体混凝土材料及分区

本工程结合规模及各部位混凝土受力状况和环境的不同，大坝混凝土材料在满足功能要求的前提下宜尽量简化，坝体材料及分区见表 2：

表 2 坝体材料及分区表

部位	混凝土类型	级配	指标	备注
大坝基础垫层	常态混凝土	二级配	C20W6	
大坝坝身	堆石混凝土	一级配	C20W4	外加剂 6.5kg/³
大坝防渗面板 (厚 1.0m)	自密实混凝土	二级配	C20W4	外加剂 6.5kg/³
廊道	常态混凝土	二级配	C25 W6	
大坝坝顶	常态混凝土	二级配	C30	

2.3.2 坝体分缝与排水

结合大坝地形、坝体布置等条件，本工程共设置 3 道横缝 4 个坝段。从左岸到右岸坝段长分别 18.0m、20.0m、20.0m、23.0m。大坝横缝上游侧设铜片止水，坝体预埋设Φ150 无砂混凝土排水管。

2.3.3 坝体施工技术要求

(1) 本工程天然建筑材料均为外购灰岩料，混凝土工程总量约 3.3 万 m³，其中堆石混凝土 2.78 万 m³，大坝堆石混凝土浇筑 9 个月，平均月浇筑强度为 3100m³。

(2) 混凝土采用 60m³/h 拌和站拌制，混凝土水平运输由 2.0m³ 罐车运输 200m；再采用 30m³/h 混凝土泵送混凝土，部分采用 25t 塔吊配合 1.6m³ 吊罐辅助等手段完成。

(3) 堆石料运输及入仓方式：大坝 718.0m 高程以下堆石料采用 PC360 挖掘机装车，20t 自卸汽车运输至仓内，仓面配置 PC300 挖掘机进行堆石料的码放、整平。大坝 718.0m 高程以上采用 ST6023 塔吊，吊运块石入仓。最大仓面为 636m²，堆石混凝土最大浇筑量 954m³/仓，设计仓面高 1.5-2.0m。

3 堆石混凝土施工分析

3.1 自密实混凝土实际配合比

猎神水库工程大坝混凝土为 C20 自密实混凝土，其理论配合比及实际施工配合比相关参数，详见表 3。

表 3 C20 自密实混凝土配合比

名称	水泥	粉煤灰	砂子	石子	水	外加剂	总重
单位	kg	kg	kg	kg	kg	Kg	kg
理论配合比	160	257	1065	646	166	6.34	2300.34
实际配合比	183	202	1111	646	166	6.34	2314.34

3.2 大坝坝体排水

为优化施工作业条件，施工时将坝体预埋无砂混凝土排水管调整为从坝顶钻孔成孔法，采用 300 型地质钻机钻 Φ110 孔，C20 混凝土封堵顶端 1.0m。

3.3 施工主要工程及技术条件

(1) 混凝土工程总量约 3.7 万 m³，其中堆石混凝土 3.05 万 m³。2018 年 11 月至 2019 年 6 月浇筑坝体堆石混凝土，主体施工期 7 个月。

(2) 混凝土采用 HZS 系列 1.0m³ 主机拌和站拌制，配用 S8013-110 型混凝土泵入仓，实际泵送能力 50m³/h 左右，局部位置采用 ST6023 塔吊配合 1.6m³ 吊罐辅助等手段完成。

(3) 堆石料运输及入仓方式

受两岸地形限制，两坝肩上坝（临时）公路布置难度较大，大坝基坑至 706.0m 高程堆石料采用 329DL 挖机，配合 11 辆 20t 自卸汽车将备用料场块石转运至大坝下游，配合高压水枪翻洗后由斗山 300LC 挖机堆石平整。

706.0m 高程至 716.5m 高程堆石料采用 PC300LC 挖机配合 11 辆 20t 自卸汽车将备用料场块石转运至大坝下游，由 LG855B 型装载机配合高压水枪对块石进行，仓面由卡特 329DL 进行堆放。对廊道周边、临边堆石采用 ST6023 塔吊配合进行堆石。

716.5m 高程至 726.5m 高程堆石料采用 PC300LC 挖掘机装车，配合 4 辆 20t 自卸汽车运输至大坝下游，由 LG855B 型装载机配合高压水枪对块石进行，仓面由卡特 329DL 进行堆放。对廊道周边、临边堆石采用 ST6023 塔吊配合进行堆石。

3.4 施工工期及强度

堆石混凝土主体开始浇筑时间为 2018 年 11 月 8 日，最后一仓堆石混凝土浇筑时间为 2019 年 5 月 29 日，堆石混凝土浇筑连续时间为 6 月 21 日（共计 203 天）。堆石混凝土平均浇筑强度约 4500m³/月，最高月浇筑量为 8466m³，实现施工仓面浇筑平均间隔时间为 4 天/仓。大坝主体浇筑期高峰期人数 40 人/月。

3.5 堆石混凝土的温升

猎神水库设置 2 个监测断面，共埋设 8 支温度计进行坝体温度实测。坝体温度监测成果见表 4。

表 4 堆石混凝土坝体温度监测成果表

编号	埋设日期	下一仓浇筑时间	块石温度 ℃	入仓温度 ℃	浇筑时气温 ℃	最高温度 ℃	温升值 ℃	平均温升 ℃	备注
T1	2018	2019 /12/ /1/1 22	9.5	13.0	9.2	18.9	5.9	5.53	距上游面 3.9m, 仓面中部
T2	/12/		8.3	12.5	8.3	16.7	4.2		坝中部,
T3	22		7.4	11.0	7.4	17.5	6.5		距下游面 4.5m
T7	2018	2019 /12/ /1/9 26	9.5	11.6	7	19.1	7.5	6.27	距上游面 3.9m
T8	/12/		11.5	11.8	7	17.6	5.8		坝中部
T9	26		11.8	11.4	7.7	16.9	5.5		距下游面 4.5m
T6	2019 /4/1 3	/	24.1	25.0	26	29.5	4.5	/	仓面浇筑 4.5m 宽 (距上游面 3.5m, 距离浇筑下游面 1.0m)
T12	2019 /4/1 1	2019 /4/2 1	15.6	15.2	18.6	29.7	14.5	/	坝段中部 (全仓面一次浇筑)

堆石混凝土综合平均温升值为 8.19℃，小值平均值为 5.7℃ (剔除 T12)。

根据参考文献[8]及以上分析，堆石混凝土实际温升值可按公式 (1) 估算：

$$\theta_{\tau} = \theta_o \left(1 - e^{-0.0339 \tau} \right)$$

$$\theta_o = \frac{Q_o(W + KF)}{C_c \gamma_c}$$

$$\theta_{\text{测max}} = \mu \rho \theta_o \quad (1)$$

式中： θ_o —混凝土绝热温升，℃，C20 自密实混凝土经验绝热温升值为可取 15℃；

τ —龄期，h；

$\theta_{\text{测max}}$ —估计实测最大温升值，℃；

ρ —埋石率；

μ —折减系数，建议取值 0.4-0.6 (气温高时取高值，气温低时取低值)。

3.6 堆石混凝土质量分析

本工程堆石混凝土 4 个坝段均对比检测 28d 和 90d 凝期混凝土共 64 组，其中 28d 凝期混凝土强度平均值为 21.9Mpa，最小值为 21.9Mpa；90d 凝期混凝土平均强度为 25.30Mpa。最小值为 22.7Mpa。

本工程堆石混凝土 4 个坝段均进行坝体压水试验，试验压力为 0.37-0.7MPa，实测吕荣值为 0.18-2.5LU，平均值为 1.1LU。

3.7 效果与优势

(1) 猎神水库大坝工程质量满足各项设计指标要求, 先已下闸正常蓄水运行半年。

(2) 大坝设计上游面防渗层与堆石坝体一同浇筑、坝体排水孔由预埋无砂混凝土管调整为从坝顶钻孔成孔法, 简化了施工工序, 加快了施工进度。

(3) 本工程充分利用下游渣料堆体作为块石入仓(平台)道路, 提高了堆石混凝土施工效率。因坝体仓面小, 块石无法直接汽车入仓, 采用挖机二次转运入仓。实现月浇筑强度 $8466\text{m}^3/\text{月}$, 实现施工仓面浇筑间隔时间为 4 天/仓。

(4) 28d 凝期混凝土强度最小值为 21.9Mpa, 90d 凝期混凝土强度平均值为 25.30Mpa。混凝土后期强度较高的原因为自密实混凝土中掺用粉煤灰量大, 对混凝土的后期强度提高较大。堆石混凝土强度(含上游侧面板)可选用 90d 龄期强度, 能减少水泥用量、降低工程造价、进一步减小水化热。

(5) 堆石混凝土水化热温升较低, 可减少混凝土浇筑间隔时间要求和简化养护措施, 可放宽堆石混凝土筑坝横缝(温度)缝设置要求。

4 结论

通过以上比分析得: ①堆石混凝土平均温升值为 8.19°C , 实测平均温度约为理论值得 47%, 可放宽堆石混凝土筑坝横缝(温度)缝设置要求; ②堆石混凝土筑坝实际温升值可按公式(1)进行估算; ③堆石混凝土块石入仓效率直接影响工程造价、主体工期, 施工组织设计应优化上坝方式和路线; ④堆石混凝土强度(含上游侧面板)可选用 90d 龄期强度, 能减少水泥用量、降低工程造价、进一步减小水化热。⑤工程已下闸蓄水半年, 施工和运行过程中未发现等异常情况, 坝体结构和防渗性能安全, 可供同类工程参考, 具备较强的推广性。

参 考 文 献:

- [1] 金峰, 安雪晖, 周虎, 堆石混凝土技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] SL678-2014. 胶结颗粒料筑坝技术导则[S].
- [3] SL329-2018. 混凝土重力坝设计规范[S].
- [4] 金峰, 李乐, 周虎, 等. 堆石混凝土绝热温升性能初步研究[J]. 水利水电技术, 2008(05): 59-63.
- [5] 何涛洪, 张全意, 张文胜, 等. 堆石混凝土重力坝分缝设计的思考与实践. 水利规划与设计[J], 2019(02): 105-111.
- [6] 张宗明, 王卫华, 玄庙观碾压混凝土拱坝施工温度控制措施. 水利水电工程设计[J], 2008(27): 55-58.
- [7] 水利水电工程施工组织设计手册[M], 3, 施工技术. 水利电力出版社, 1987. 12.
- [8] 赵仕勇, 聂庚生, 王周海, 廖宗霖, 堆石混凝土重力坝混凝土温升实践与设计, 中国大坝工程协会, 2019. 11.

On the advantages of rock-fill concrete gravity dam

Zhao shiyong, Nie gengsheng, Peng hui, Zhudongjun, Cui yan ling

(Chongqing Tongwang Water Conservancy and Hydropower Engineering Design Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

[Abstract] Through the design and construction of Lieshen Reservoir project in Liangping district of Chongqing City, it is concluded that the technology of rock-fill concrete dam construction is highly mechanized, economical in cost, quick in construction, easy in quality guarantee, low in temperature rise and friendly in environment. At present, the reservoir project has been completed, the normal water level has been stored for half a year, all the indicators meet the design requirements, with a strong generalization.

[Keywords] Lieshen Reservoir; rockfill concrete gravity dam; design; advantage;