

自密实堆石混凝土拦渣坝施工技术

单磊

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7090

[摘要] 堆石混凝土施工操作简便、辅料消耗少,水化热调控优势显著,能够就地开采石料,兼具绿色耐久、成本可控优势,适用于抽蓄工程前期挡土墙施工,此项工艺已在贵州多座水电站成功应用。九峰山抽蓄电站上库拦渣坝坐落于浅埋强风化岩基地段,施工条件复杂,存在混凝土运距远、坝体易出现温度裂缝难题。本工程采用高自密实堆石混凝土筑坝,石料取自坝址周边边坡,大幅降低商品混凝土用量,抑制水化热产生,规避裂缝风险。施工搭配免拆模板提升浇筑效率,增设防裂钢筋网增强结构抗裂性,保障坝体密实度。坝体浇筑完成后实施基础灌浆,进一步提升拦渣坝防渗能力与整体稳定性。

[关键词] 堆石混凝土; 抽水蓄能电站; 拦渣坝; 自密实混凝土; 施工工艺

中图分类号: TV743 **文献标识码:** A

Construction technology of self-compacting rockfill concrete slag dam

Lei Shan

China 11th Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] Rock-fill concrete is easy to operate, consumes less auxiliary materials, and has obvious advantages in regulating hydration heat. It can mine stones in situ, and has the advantages of green durability and controllable cost. It is suitable for retaining wall construction in the early stage of pumping and storage project. This technology has been successfully applied in several hydropower stations in Guizhou. The upper reservoir slag dam of Jiufengshan Pumping and Storage Power Station is located in the shallow-buried and strongly weathered rock foundation. The construction conditions are complex, and there are problems such as long concrete transportation distance and temperature cracks in the dam body. This project uses high self-compacting rockfill concrete to build the dam, and the stone is taken from the slope around the dam site, which greatly reduces the consumption of commercial concrete, inhibits the generation of hydration heat and avoids the risk of cracks. The construction is matched with non-dismantling formwork to improve the pouring efficiency, and the anti-crack steel mesh is added to enhance the crack resistance of the structure and ensure the compactness of the dam. After the dam body is poured, the foundation grouting will be implemented to further improve the anti-seepage ability and overall stability of the slag dam.

[Key words] construction technology of self-compacting concrete for slag dam of rock-fill concrete pumped storage power station

引言

抽水蓄能电站上库拦渣坝承担库区渣体、季节性洪水拦截作用,多修建于冲沟强风化岩浅埋地基,坝体温差变形、基础渗流、石料运输等施工难题突出。传统常态混凝土坝水化热高,温控防裂投入大,堆石混凝土可就地利用开挖块石,大幅削减胶材用量,温控优势显著。本文依托九峰山抽蓄上库拦渣坝实体工程,系统阐述风化岩地基固结灌浆、分层堆石入仓、自密实混凝土充填、免拆模板配套成套施工工艺,总结适配浅风化基

底拦渣坝的标准化施工流程,为同类抽蓄小型挡渣水工构筑物提供参考。

1 工程概况

河南辉县九峰山抽水蓄能电站安装6台单机容量为350MW的立轴单级混流可逆式水泵水轮机,总装机容量为2100MW,额定发电水头682m。工程属大(1)型、I等工程。本工程的开发任务为承担河南省电力系统的调峰、填谷、储能、调频、调相、紧急事故备用等任务。电站主要由上水库、下水库、输水系统、地

下厂房及地面开关站、补水工程等建筑物组成。

上水库拦渣坝坝顶高程1233.0m, 坝顶宽6m, 总长123.5m, 坝基开挖最低高程1206.00m, 最大坝高27m。拦渣坝采用重力坝, 坝体基本剖面为三角形, 上游坝面竖直, 下游坝坡在1225.0m高程以上竖直, 在1225.0m高程以下坡度为1:0.75。坝体防渗层分缝采用紫铜止水, 伸缩缝填缝采用聚乙烯闭孔泡沫板。

上库拦渣坝坝体为C20W4F150堆石混凝土, 上游50cm防渗层、下游30cm表层坝顶路面、坝体底部1m基础采用C20W4F150高自密实混凝土。

2 堆石混凝土坝基础处理

因本工程堆石坝建立在冲沟中, 岩石为强风化岩和微风化岩, 大坝的主要作用是拦挡坝前冲沟的季节性洪水和石渣, 为库盆创造有利的施工和运行环境。

为了增加大坝基础的稳固性和抗渗性, 降低风化岩石的不良影响, 根据设计要求, 对大坝地基进行固结灌浆。

2.1 固结灌浆的施工工艺流程

固结灌浆因孔深不超过8m, 采用全孔一次灌浆, 循环式灌浆法进行灌注, 循环式灌浆法灌浆工艺流程图如下图所示:

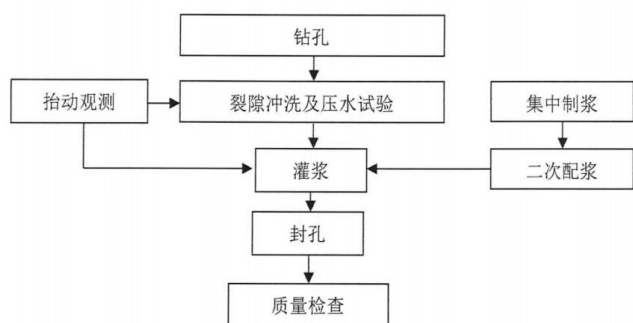


图1 固结灌浆工艺流程图

2.2 施工技术

2.2.1 钻孔

(1) 固结灌浆参数: 灌浆钻孔孔径 $\geq \Phi 56\text{mm}$, 入岩深度8m, 孔位按3m $\times$ 3m梅花形布设。

(2) 钻孔机具: 选用100D潜孔钻机施工。

(3) 施工次序: 同一灌浆单元划分两序孔, 遵循先I序、后II序原则依次施工。

(4) 灌浆分段: 采用全孔一次成孔、一次性灌浆工艺。

(5) 造孔要求: 钻孔班报如实记录混凝土厚度、孔深数据; 钻孔碰到结构钢筋时, 孔位偏移控制在5cm以内, 严禁损伤钢筋; 全过程详实留存钻进水压、钻压、回水颜色、钻渣情况等, 如实反映岩体及混凝土层状状况。

2.2.2 孔壁冲洗

钻孔完毕后采用导管大流量水自孔底向外冲洗, 排出孔内沉渣, 冲洗完成后孔内沉渣厚度 $\leq 20\text{cm}$ 。

2.2.3 裂隙冲洗

所有灌浆孔灌浆前开展裂隙冲洗, 冲洗水压取灌浆压力的

80%, 压力超1MPa则按1MPa控制; 冲洗至回水澄清, 时长不超过20min。邻近孔正在灌浆, 或灌浆完成未满24h时, 不得进行裂隙冲洗。

2.2.4 压水试验

裂隙冲洗后开展压水试验。各序孔选取不少于5%灌浆孔, 灌浆前做简易压水试验, 执行DL/T5148-2021附录C, 试验可与裂隙冲洗同步实施。检查孔压水试验采用单点法。

2.2.5 制浆

采用强度等级 ≥ 42.5 普通硅酸盐水泥, 出厂期限不超过3个月, 优先选用新鲜水泥; 拌合水温 $\leq 40^\circ\text{C}$ 并满足规范要求。浆液由集中制浆站拌制, 过程检测浆液密度并留存记录; 浆液使用前过筛, 自拌制至用完不超过4h, 超时作废, 浆液温度控制在5 $\sim$ 40 $^\circ\text{C}$ 。

2.2.6 灌浆

上水库拦渣坝基础固结灌浆采用有盖重施工, 在底部首层混凝土强度达到50%后进行, 因灌浆孔段长度均在8m以内, 故采用全孔一次灌浆, 循环式灌浆法进行灌注, 射浆管距孔底不大于0.5m。固结灌浆采用一泵灌一孔, 当相互串浆时, 采用不多于3个群孔并联灌浆, 并且控制好灌浆压力避免造成混凝土抬动。

浆液设置2:1、1:1、0.7:1、0.5:1四级水灰比, 灌浆遵循由稀到浓逐级变换。压力稳定、注入率持续减小, 或注入率稳定、压力持续上升时, 不调整配比。当本级浆液灌入量超300L或灌注满30min, 压力与注入率无明显变化, 则换浓一级浆液; 注入率大于30L/min时, 可结合现场工况越级调浓。

本次采用循环式全孔一次灌浆, I序孔灌浆压力0.4MPa, II序孔0.7MPa。灌浆作业开始后快速升压至设计压力; 对于注入率偏大的孔段, 以裂隙冲洗或压水试验压力为基准分级升压, 每级升压0.2 $\sim$ 0.4MPa, 单级稳压时长不少于5min, 出现混凝土抬动异常时适当延长稳压时间。现场将回浆管压力表布置在灌浆自动记录仪附近, 压力表至灌浆孔管路长度不超过30m, 确保压力数值可真实反映孔段实际灌浆压力。

结束标准: 根据地质条件和工程要求确定, 当灌浆段在最大设计压力下注入率不大于1L/min后, 屏浆30min, 且屏浆期间的平均注入率不大于1L/min即可结束灌浆。当长期达不到结束标准时报请监理工程师研究处理措施。灌浆过程中, 如发现回浆变浓, 则改用回浓前的水灰比新浆进行灌注, 若继续回浓, 则延续灌注30min后可结束灌浆作业。其回浓情况予以记录, 并提交监理人。

封孔: 采用置换压力灌浆法。全孔灌浆完毕, 经监理核验孔深与灌浆成果后立即开展封孔。先采用0.5:1新鲜浓浆置换孔内稀浆、积水, 直至孔口返出浓浆; 上提进浆管时管口始终埋于浆面下, 防止进气。随后采用同配比浓浆纯压灌浆, 封孔压力采用最大灌浆压力。孔内浆液凝固后, 清理孔顶污水与浮浆, 使用水泥砂浆回填密实, 相关资料报送监理。

2.2.7 抬动观测

抬动观测孔孔径90mm,入岩深度8m,钻孔垂直建基面,采用100D潜孔钻机施工,成孔后安装抬动观测装置。

观测采用千分表,每10min记录一次读数。裂隙冲洗、压水、灌浆全过程专人值守观测。变形临近允许值或增速较快时,及时通知作业人员降压,避免岩体抬动破坏;若变形超出限值,立刻停工并上报监理,依照监理指令处置。抬动变形允许值200 μm ,同时满足设计相关要求。

千分表使用前完成率定,施工期间经常性检查,保证灵敏准确;仪器存放与使用阶段做好防护,防止撞击、震动造成精度受损。

2.2.8质量检查

固结灌浆质量检测选用单点法压水试验,检测工作于灌浆施工结束3天后开展;检查孔数量不少于固结灌浆总孔数的5%。

质量标准:岩体透水率 $\leq 5\text{Lu}$ 判定合格。单元工程内检查孔段合格率需高于85%;不合格孔段透水率不得大于7.5Lu,且缺陷孔段不得集中分布。未达到上述标准区域,需实施补灌浆处理,直至各项指标符合设计规定。

2.2.9特殊情况处理

灌浆前编制特殊工况处置方案并报送监理审批;现场施工依据监理批复方案落实处置工作。遇重大复杂工况,施工单位会同业主、设计、监理四方协商确定处置方案。

3 堆石混凝土拦渣坝施工技术

3.1堆石混凝土施工工艺流程:

上水库拦渣坝堆石混凝土施工工艺程序为:施工准备→堆石混凝土分段分层规划→止水槽施工→仓号基础开挖→仓面清理、验收→下层混凝土浇筑→翻升模板施工→钢筋网及免拆模板安装、加固→堆石入仓码放→止水施工→自密实混凝土施工→混凝土养护、凿毛→下一循环,施工完成后进行固结灌浆施工。

3.2堆石混凝土拦渣坝施工方法

3.2.1施工准备

施工准备包括施工所需要的设备材料、风水电通信、技术质量安全管理人员等,施工前应完成技术交底。

3.2.2对堆石混凝土分段分层规划

拦渣坝划分4个施工区段,分为一二坝段、三四坝段开展施工;堆石混凝土按2m厚度分层浇筑。施工采用翻升模板,混凝土依靠汽车吊搭配吊罐入仓。

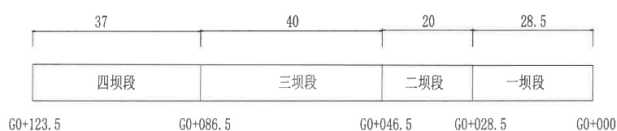


图2 上库拦渣坝分段示意图

3.2.3止水槽施工

止水槽设于止水下部,需在底层混凝土浇筑前完成开挖、清

理作业。经联合验收后布设并固定紫铜止水,随后浇筑微膨胀混凝土;待混凝土达到相应强度,及时开展养护工作,并做好紫铜止水成品防护。

3.2.4仓号基础开挖

依据上水库拦渣坝开挖施工图纸,先实施施工道路开挖及布设,再依照设计边线、高程开展主体开挖。场区岩体以强风化、风化岩层为主,采用爆破结合机械开挖方式;开挖至距设计基底高程0.3m范围时,改用人工配合机械清底,避免扰动基础岩体。

3.2.5仓面清理、验收

上库拦渣坝堆石混凝土仓面划分为基岩面、普通层面、封顶面三类。基岩仓面需清理干净,不得存有积水、废渣杂物;普通层面混凝土按规范凿毛,收仓阶段自密实混凝土堆放块石宜高出浇筑面50~150mm,增强层面粘结效果,提升施工缝抗剪能力;封顶面严格参照图纸控制堆石高程,保证仓面坡度与平整度达标。

基础开挖采用人机配合施工,完工后使用高压风清理仓面,组织施工、监理、设计、业主四方联合验收,验收合格方可开展后续工序。

堆石混凝土仓面凹凸不平,低洼位置容易积聚泥水,因此严禁冲水清理。先清除表层杂物,再利用高压风吹扫仓面;待本仓堆石混凝土抗压强度达到2.5MPa,才能开展下一仓浇筑。

3.2.6下层混凝土浇筑

按图纸要求,拦渣坝底部设置1m厚自密实混凝土。浇筑前先修整仓号周边施工道路,布设作业场地;浇筑由底部向上分层分仓有序开展。施工采用优质钢模板,模板安装前开展测量放样,就位后复核校正,利用钢管搭配方木完成加固。混凝土由罐车转运,通过汽车吊配吊罐入仓;浇筑尽量避开夏季高温时段,防范温度裂缝产生。混凝土入仓铺料、平仓振捣各工序均遵照规范及设计要求执行,浇筑结束后采取覆膜或洒水方式保湿养护。

3.2.7翻升模板施工

翻升模板水平接缝与层间位置采用U形卡、螺栓连接。模板翻转后,上层模板依托下层背架以及上层预埋拉条固定。模板就位后,利用L型插筋锁定底口,再借助方木与L型插筋固定背架角钢;锚筋长度不少于50cm。通过调节背架锚筋与背部支撑调整模板倾角,满足设计坡度要求,随后布设预埋拉条与插筋,螺栓拧紧前复核校正模板倾斜角度。

模板翻转施工时,将下层模板吊运翻转至上层就位。人工拆除模板后,在坝面清理并涂刷脱模剂,再实施安装加固。加固体系采用 $\Phi 14$ 、长度1.2m圆钢拉筋,一端螺栓固定于坡面模板,另一端穿过模板、楔板,同预埋在基体内 $\Phi 18$ 、长60cm螺纹锚固筋焊接。拉筋与锚固筋间距60cm,单块模板设置两排,锚固深度结合现场工况灵活调整。

模板安装前清理板面杂物,均匀涂刷脱模剂,验收通过后方可投入使用。

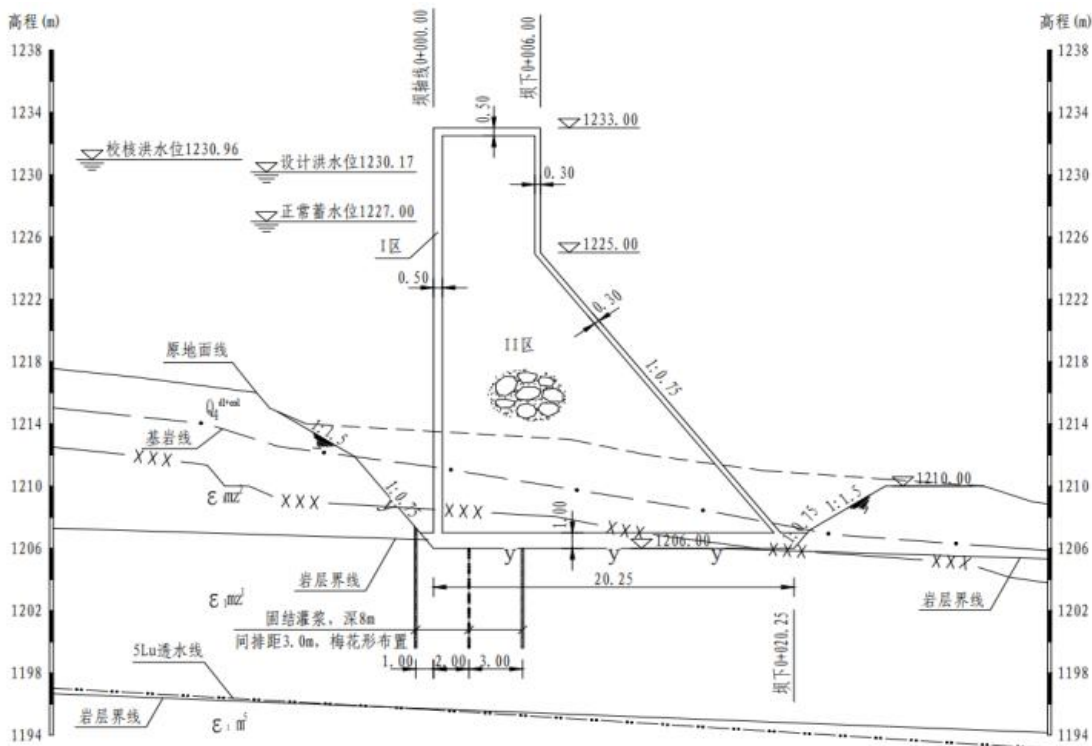


图 3 拦渣坝断面图

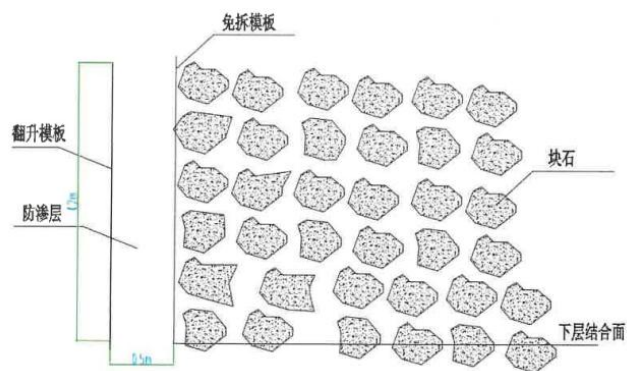


图 4 免拆模板位置示意图

3.2.8 钢筋网及免拆模板安装加固

依据施工图纸, 上游 0.5m 厚防渗层中部布设 $\phi 12@200 \times 200$ 防裂钢筋网。外侧模板搭设完毕后, 增设辅助筋定位固定钢筋网; 钢筋网可提前在加工厂预制, 提升施工效率, 网片搭接尺寸满足设计及规范要求。

上游防渗层、下游表层和坝体混凝土之间利用免拆模板设置分缝, 模板选用热镀锌雪花薄板, 采用脚手架钢管加固, 钢管间距 1.5m, 预埋于混凝土内部不予拆除。待防裂钢筋网安装固定到位后, 再进行免拆模板铺设作业。

3.2.9 堆石备料及入仓、码放

依据《堆石混凝土筑坝技术导则》(NB/T10077-2018), 堆石混凝土所用块石需水洗处理, 堆石占比不宜低于 45%。堆石料优

先选用上库导水洞、拦渣坝边坡开挖石料以及周边支沟经液压锤破碎的孤石; 石料缺口部分, 从下库 Y4 路 4# 隧道、4# 支洞调运挖料, 加工后运至上库拦渣坝使用, 石料岩性、粒径等指标需符合图纸及规范要求。

备料优先选用洁净块石, 石料入仓前开展两次冲洗: 石料转运至坝区堆料场时首轮冲洗, 吊运入仓前再次冲洗, 保障块石洁净度达标。

块石采用汽车吊配吊笼入仓, 场内水平转运由小型挖掘机配合, 坝面堆石利用挖机摊平, 堆石孔隙率控制在 40%~45%。入仓石料各项指标需满足设计标准, 仓内禁止留存积水、石粉及碎屑, 混凝土分缝位置按施工缝工艺处理。

块石入仓铺以人工摆放定位, 安放过程严禁碰撞、挤压模板、钢筋网片及免拆模板。

3.2.10 止水施工

本堆石混凝土坝横缝设置 1.2m 紫铜止水, 搭配闭孔泡沫板嵌缝。紫铜止水由专业厂家预制加工, 安装时止水鼻中线与分缝中线对齐, 借助钢筋网、U 型筋辅助定位并依托模板加固, 防止浇筑期间产生偏移。

安装止水片前, 先将氯丁橡胶条嵌入止水鼻腔, 胶带封堵缝隙, 避免水泥浆侵入。止水焊接前使用钢刷清理接触面, 保证表面干净; 搭接长度不小于 30mm, 采用黄铜焊条气焊施工。先点焊中部及两端固定, 再自一端向另一端连续施焊。焊缝完工后采用煤油渗漏试验检测, 排查砂眼、孔洞、漏焊缺陷, 发现问题及时补焊。

3.2.11 自密实混凝土浇筑

自密实混凝土由罐车完成水平转运, 依靠汽车泵实现垂直入仓。正式浇筑前, 复核模板支撑、各类预埋件位置与尺寸, 确保安装无误。浇筑过程中可轻敲模板外侧辅助密实, 提升混凝土成型外观。上下层浇筑须在下一层混凝土初凝前完成。浇筑点位均匀布设, 间距控制在3m以内, 浇筑路线由上游迎水面往下游侧按S形推进。

3.2.12 堆石混凝土养护及缝面处理

堆石混凝土施工遭遇强光、大风天气时, 需向块石喷洒水雾保湿, 同时优选适宜温度时段开展浇筑; 经过暴晒的块石, 不可直接进行混凝土浇筑。混凝土终凝后, 按照规范开展保湿养护。

堆石混凝土施工缝面采用风砂枪、刷毛机或人工凿毛处理, 尽量不采用水冲毛。凿毛后的缝面不得存有水泥乳皮, 要求微露粗砂, 自密实混凝土泌浆形成的软弱层需彻底清理。缝面凿毛后禁止冲水清洗, 凿毛产生的粉尘、石料碰撞形成的石渣, 采用清扫或高压风吹扫清理。

凿毛完成的仓面做好防雨防护, 避免雨水冲刷。仓面外露堆石易滞留积水, 雨水冲刷后积水难以排净, 会影响施工缝结合质量。

3.2.13 下一循环

本层混凝土浇筑完成后, 按照设计和规范要求养护不少于7天, 开始下一层施工, 层厚和分块按照批复的施工方案执行。

4 技术应用效果

九峰山抽水蓄能电站上水库拦渣坝采用堆石混凝土结构形式, 在第一层混凝土浇筑完成后进行了固结灌浆, 然后采用翻升模板和自密实混凝土进行堆石混凝土坝施工, 应用了防裂钢筋网片和高自密实混凝土, 显著提高了施工效率, 改善了风化岩基上堆石混凝土坝的质量, 节约了施工成本。用时5个月完成施工

任务, 比传统施工方法节约2个月的工期, 顺利完成了业主下达的2024年防洪度汛任务, 展现了公司的良好履约形象。

5 结束语

依托本工程实践可知, 于风化岩地基修筑堆石混凝土坝, 需依据勘察资料实施固结灌浆; 若坝体下游存在渗流管控要求, 应对帷幕灌浆实施的必要性开展专项论证。灌浆施工遵循先固结灌浆、后帷幕灌浆的工序原则, 基础处理验收合格后方可开展上部坝体施工; 如需调整施工时序, 须结合现场工况、结构受力条件及工程安全要求论证通过后方可执行。

自密实混凝土流动性与充填性能优异, 适用于振捣作业受限、振捣难以到位的施工部位, 具备良好推广价值。本工程采用的免拆模板、防裂钢筋网施工工艺取得较好实施效果, 可为同类堆石混凝土坝工程建设提供参考。

[参考文献]

- [1]朱海涛, 苏城峰. 自密实混凝土在堆石混凝土坝中的应用[J]. 广东水利水电, 2022, (9): 30-33.
- [2]胡艳婷. 自密实堆石混凝土重力坝地基处理的关键技术及实践[J]. 珠江水运, 2024, (5): 69-71.
- [3]陈才明. 自密实堆石混凝土坝施工质量控制过程分析[J]. 陕西水利, 2021, (6): 162-164.
- [4]谭琪, 郭伟强, 代学然, 等. 再生骨料粒径对堆石混凝土性能的影响研究[J]. 四川建筑, 2025, 45(1): 215-218.
- [5]彭波, 张浩然. 东堰口水库大坝河床段固结灌浆效果分析[J]. 陕西水利, 2025, (10): 154-156+160.

作者简介:

单磊(1988—), 男, 汉族, 河南南阳人, 本科, 当前职称: 中级工程师, 从事专业: 水利水电工程施工方向。