

水工建筑新技术在左江水利枢纽工程中的应用

何善国

(南宁水利电力设计院, 广西 南宁 530001)

摘要:简介左江水利枢纽工程几种水工建筑新技术及应用情况。①首次在左江干流大(Ⅱ)型水利工程成功应用草土围堰技术,其渗透系数为 1×10^{-5} cm/s,内外坡比 1:1,抗冲流速 3~3.5 m/s,寿命可达 2a;②采用水坡过坝建筑物,坡槽为钢筋混凝土“U”型断面,整体结构,全长 1235 m,纵向坡度 3%,可比船闸方案减少投资 900 万元;③在国内首次将消力库应用于较低 Fr 数水流的较大工程,解决了低 Fr 数水跃摆动问题,且在较短的下游水流表面消除了波动,减轻了冲刷,提高了消能效果,经 5 个洪水期的考验,运行情况良好。

关键词:草土围堰;水坡;消力库;左江水利枢纽

中图分类号:TV61

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2001)05-0049-04

左江水利枢纽工程位于广西南部、郁江支流左江干流中上游宁明县辉村与崇左县峒江村之间河段,距南宁 136 km,离凭祥友谊关 78 km。工程以发电为主,兼有灌溉、航运、旅游、水产养殖等综合利用效益。坝址控制集雨面积 26 173 km²,水库总库容 7.16 × 10⁸ m³,电站装机 3 × 24 MW,通航能力 120 t,灌溉面积 18 100 hm²。

左江水利枢纽工程是“八五”计划国家扶持的广西重点建设项目之一。拦河建筑主体工程 1992 年开工,1995 年完工,后因资金问题,工程建设进度缓慢,1998 年底引进外资后恢复正常施工,1999 年底电站 3 台机组全部并入广西主电网运行发电。工程设计过程中,结合工程实际开展技术创新活动,引进、应用多种新技术,解决了工程建设中的许多难题,取得了良好的技术效果及经济效益。以下简介草土围堰、水坡、消力库等水工建筑新技术的设计应用情况。

1 草土围堰

左江水利枢纽工程施工总工期为 4 a,分三期施工,首期先施工右岸厂房和 3 + 1/2 孔闸坝段(1~3 号孔底板暂筑至 88 m 高程,闸墩及闸门槽具备下闸挡水),左河槽导流;第二期施工 6 + 1/2 孔闸坝段和左岸重力坝,利用已建的闸孔明槽导流;第三期封堵 1~3 号闸孔导流明槽,浇筑溢流堰体,4~10 号闸孔导流。三期施工共用的纵向围堰(在 4 号闸墩位置)

经方案比较采用浆砌石堰型,洪水标准为 $P = 20\%$ 施工洪水, $Q = 1320$ m³/s(时段 11 月至 4 月底)。为了浆砌石围堰的施工,一期施工时要在其外侧筑一道临时围堰并上下游侧端与右岸相接构成封闭,防御 $P = 33\%$ 施工洪水(时段 12 月至 3 月, $Q = 675$ m³/s),标准低、上下游侧堰顶汛期考虑过水。由于枯水期时段较短,工期较紧张,又受投资限制,因此造价低,施工技术简单,周期短是临时围堰堰型选择时首先要考虑的因素。进行临时围堰方案设计时,通过走访调查及初步论证,从航运部门引进了草土围堰堰型及其施工技术,并与土石围堰堰型作了方案比较。

土石围堰方案占地较大,堰体材料透水较好,需要作防渗、闭气处理,工期较长,工程量较大,土石方比草土围堰方案多 2.64×10^4 m³,增加投资近 250 万元。草土围堰堰身系粘土和草料结合体,堰体材料及构造具有加筋土墙的特性,有较好的抗剪稳定性和抗渗性能,围堰施工合龙后不用闭气便可抽水,可缩短工期,造价较低(单价比土石围堰低 26%~35%),经济实用。草土围堰技术早在 1959 年广西航运部门的河道疏浚、桥墩及水闸等工程围堰施工中开始得到应用,最大堰体工程量 4×10^4 m³,最大水深 13 m,最大流速 4 m/s,已积累有一定的设计、施工及运用实践经验可资借鉴。综合上述比较,草土围堰技术经济指标较优,故设计推荐采用。

本工程草土围堰堰堤总长约 562 m,其中上下游

侧横向堰段分别为 139 m 和 181 m, 纵向堰段长 242 m。设计采用编织草捆包粘土分层填筑施工, 内外坡比 1:1 (实施时因抢工期改用散土散草分层填筑, 坡比 1:1.5 左右), 堰顶宽度 6 m, 其中外侧堆石护体顶宽 2 m, 平均堰高 11.3 m, 平均水深 9.94 m, 堰基底中部做一倒梯形防渗齿墙切穿砂卵石层至基岩, 如图 1 所示。草料选用当地较为丰富的茅草 (新鲜干草), 堰身材料渗透系数设计采用 1×10^{-5} cm/s, 地基砂卵石层渗透系数用 1×10^{-3} cm/s, 经计算堰体和基础总渗漏量为 $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$, 单宽渗漏量为 $6.23 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 抗渗性能尚好, 不另作防渗处理。临时草土围堰于 1992 年 11 月 20 日开始填筑, 同年 12 月 30 日合龙并抽水, 1993 年 1 月 17 日填筑至设计高程 94.8 m, 共填筑草土约 $7.35 \times 10^4 \text{ m}^3$, 外侧抛堆石 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 使用干茅草 2 600 t。据查, 本工程是广西水电系统应用草土围堰技术的首项工程, 草土围堰工程规模之大, 施工速度之快在国内亦尚属首例。浆砌石纵向围堰建成后, 左江汛期即将来临, 为了使上下游横向堰段能在过水时保持稳定, 对堰体进行了加高培厚的加固处理, 堰顶高程升至 96.2 m。1993 年 5 月至 10 月初, 共来洪 9 次, 来水流量 $1\,870 \sim 4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 堰顶部被洪水冲刷近 2 m 厚。草土围堰上下游侧横向堰段汛后及时得到修复, 使用至 1994 年 5 月中旬, 主体工程筑出施工洪水水位之后结束使命, 前后经历两个枯水期和一个洪水期共 18 个多月。

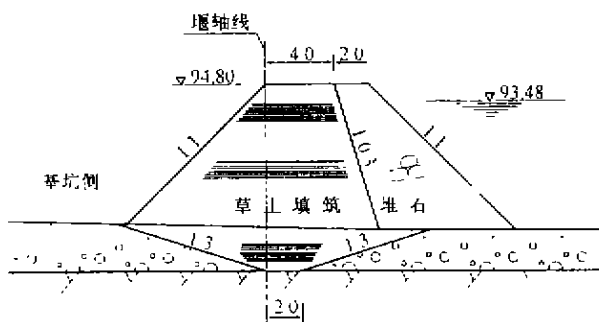


图 1 草土围堰剖面 (单位: m)

左江水利枢纽工程实践说明, 草土围堰具有良好的抗渗稳定性, 堰体为茅草粘土分层填筑构造时其渗透系数可按 1×10^{-5} cm/s 设计, 当堰底地基为良好隔水层时堰身合龙后不等闭气即可抽水, 有利于缩短工期; 采用草捆边坡分层填筑时外坡可用 1:1 左右, 抗冲流速一般达 $3 \sim 3.5 \text{ m/s}$, 但堰顶过水、水流速度大于 3.0 m/s 时应采取适当的护面护坡措施; 使用新鲜干草对延长草土围堰寿命是有益的, 寿命可达 2 a 以上; 草土围堰可就地取材, 结构简单、技术合理, 造价较低, 经济实用, 不失为水利工程临时工程施工围堰建筑形式的一种选择。

2 水 坡

左江水利枢纽通航建筑物按 6 级航道标准通航 120 t 船队, 年货运量 $50 \times 10^4 \text{ t}$ 进行设计, 上游最高、最低通航水位分别为 108 m, 106.5 m, 最大通航流量为 $3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 相应下游最高通航水位为 97.15 m。取下一个梯级先锋水轮泵站的上游最低运行水位 91.8 m 为下游最低通航水位。初步设计阶段对左江水利枢纽通航建筑物形式进行了设计探索与方案比较研究。可供选择的通航建筑物形式有多种, 结合本工程的实际, 选取船闸和水坡两种方案进行设计比较, 设计条件、深度及精度相同。两方案的上下游引航道进出口位置及引航道中心线与天然航道水流夹角基本相同。

船闸方案由上游引航道、上闸首、闸室、下闸首、泄水段和下游引航道组成, 全长 1 260 m。闸室有效尺寸为 $60 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 闸室采用当时河海大学最新研究成果——闸底廊道二区段出水的分散输水系统、钢筋混凝土排架槽式整体结构, 底宽 17 m, 闸墙高 26.7 m, 底板厚 5 m, 基础高程 84.3 m。当时广西桂江昭平水电站船闸闸室采用了这种先进的输水系统和结构形式, 现已建成运用。

水坡方案由上游引航道、上坡首、坡槽、坡脚和下游引航道组成, 全长约 1 235 m。坡槽采用钢筋混凝土 U 型断面整体结构, 槽口净宽 6.8 m, 槽内壁净高 3.75 m, 槽基底宽 8 m, 底板厚 0.5 m, 纵向坡率 3%, 基础高程 104.5 ~ 88.4 m。

水坡是一种新型的过坝通航建筑物, 其工作原理是利用推进机推移带有密封止水装置的推水挡板将载有船舶的水楔体沿着一斜面坡槽向上或向下行进至指定位置 (坡首段或坡脚段) 而完成一次船舶过坝过程。法国在 1973 年和 1982 年先后完建并投入使用了两座水坡——蒙特施水坡和枫斯汉水坡, 均为 350 t 级, 落差分别为 13.3 m, 13.6 m。我国第一座水坡——江苏沐阳水坡 (60 t 级, 落差 5.5 m) 于 1989 年 7 月完建, 1991 年 3 月正式投入使用。国内外均有了一定的水坡设计、施工及运行管理经验。

与船闸方案相比, 水坡方案最大的优势是投资较省 (比船闸方案减少投资 900 多万元), 耗水量仅为 $0.03 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ (船闸方案为 $1.03 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$), 另外还有过坝时间较短, 为 28.8 min (船闸方案为 37.4 min), 土建工程结构简单, 对地基要求不高, 通航能力大, 适应发展能力较强, 设备维护与检修在水上进行等优点。缺点是, 水坡虽已开始应用, 技术上可行, 但国内设计及运行经验相对不足, 自行式推进机电设备年运行维修 (主要是橡胶轮胎更换) 费用较高。

业主有顾虑。船闸通航有悠久历史,其优势是设计、施工、运行、维护等技术成熟、经验丰富,是一种早已被工程界和社会认可的通航建筑形式,但作为方案,船闸投资较大(一般比水坡增加投资30%~40%),对于当时建设资金筹措较困难的左江水利枢纽来说是一个比较难以接受的缺点。综合上述技术经济比较,设计推荐水坡方案,并获主管部门审查通过。

总体布置时将水坡布于左岸山坳内,利用顺河带状天然冲沟地形,不仅可以节省土石开挖工程量,且水坡主体施工不用围堰、不受洪水影响、对左河槽二期大坝主体工程施工干扰很小。

上、下游引航道均包括导航段、调顺段和停泊段3部分,其中停泊段内均布置有5座靠船墩,引航道按船舶单侧停靠等候过坝的方式设计,宽度为23m。上、下游引航道的长度分别为447.9m和187.4m,底板高程分别为105.0m和90.3m,导航墙顶高程分别为109.0m和98.5m。上下游引航道成反对称布置,曲线进出水坡。

坡首分为两段,总长46m,第一段为枢纽水工建筑物组成部分,长13.5m,采用侧墙与底板整体连接的U型结构。侧墙即是防洪闸墩,墩顶平坝顶,高程为118.8m,底板高程为105.0m,通航净宽6.8m。中部及下游侧布置有检修防洪门及工作门各1扇,均为提升式平板闸门,采用固定式启闭机操作,启闭平台高程为129.60m。第二段为推进机和工作门运转前船舶的停泊区,长32.5m,净宽6.8m,采用钢筋混凝土墙式结构,底板高程105.0m,侧墙高度3.75m。

坡槽段全长537m,纵坡率经计算取3%,坡槽上口净宽6.8m,侧墙内侧净高3.75m,墙顶宽0.7m,底板厚0.5m,底板高程105.0~88.89m,钢筋混凝土整体结构。为了防止推水挡板在升降过程发生卡死现象,将槽壁做成内呈3%的倾斜状。为了让挡板的侧止水滚柱与底止水滚柱在墙面处以45°圆锥体形式相密接,坡槽底两侧端与侧墙连接处采用45°斜面过渡。整个坡槽沿纵向每隔25m设一道构造缝。为避免挡板止水滚柱沿坡槽槽面滚动时在构造缝处产生撞击和跳动,使挡板较平稳地通过所有构造缝,将两侧墙间的构造缝自上而下呈10%倾斜度,底板构造缝也呈“V”形状,斜度为10%。

为了便于工程检修和交通,坡槽两侧布置与之平行的交通便道,便道宽为3.2m,路面高程比坡槽壁顶低0.8m,以3%的坡度自坡首延伸至坡脚。便道两侧设排水沟,用于排泄路面及两侧积水,纵坡率3%,排向坡脚外。

坡脚段系为推进机设的当下游水位处于最低通航水位时运行过程中的停车坡段,长30m。设有用

于检修水坡的防洪检修叠梁门。其坡底先以反坡形式上升至90.3m高程,此后呈水平状延伸至与下游引航道相接为止。两侧墙仍以3%的坡度向下游延伸,直至与墩台相接。墩台采用重力式埋石混凝土结构,墩台顶高程102.5m,底板高程为90.3m,净宽6.8m,墩台顶部左、右两岸以交通便桥连接。

机电部分最主要的设备是推进机,主要由牵引机车和滑动挡水板两大部分组成,挡水板高3.6m,板前水深一般为2.85m,为适应上游水位变化,板前水深短时间内可升达3.42m。自行式推进机电机驱动总功率为648kW,设计上行速度为50m/min。

3 消力戽

本枢纽采用闸坝泄洪,当流量大于 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 时所有闸门敞开泄洪,此时上下游水位差较小,河道水流基本同天然行洪状态,不是消能工设计控制工况。坝前正常水位为108m(汛期降低至106.5m运行),溢流堰局部泄流时下游最低水位为92.8m,因此消能工设计控制工况应该是坝前水位为正常水位,闸门局部开启泄流时的消能情况。

本工程为低水头(上下游水位差0.53~14.63m)、低 Fr 数(0.2~4.7)水流的较大型水利枢纽工程,溢流堰较矮,具有潜堰的水流特性,初设阶段曾研究比较了消力池、短池式戽、圆弧消力戽等几种消能工方案。消力池(有的增设辅助消能设施)作为底流消能工程措施,比较适应潜堰泄水工程的水流条件,因此在国内外低水头工程的泄流消能中得到广泛应用,但它的不足是水下工程量较大,增加投资且施工期长。消力戽作为面流消能工,形体短,消能较充分,工程量及投资比消力池或戽式消力池省,但人们担心消力戽的水跃摆动在坝下游水面产生波动或涌浪可能对航运不利且对下游两岸岸坡产生冲刷,加上有的工程设计周期短,科研经费投入不足,未能进行深入的科学研究与试验来有效地解决这个问题。因此消力戽应用工程实例屈指可数,仅陕西汉水石泉水电站和广西昭平水电站采用。短池式戽具有消力戽的结构优点和消能水力特点,工程量比消力池大大减少,可缩短水下工程施工期,利于渡汛安全施工,鉴于此,左江水利枢纽初设阶段推荐池式戽方案并获得主管部门审查通过。1~5号孔坝段采用浅潜式池式戽,戽底高程86.0m,水平池段长6m,戽尾斜坎段长7.4m,尾坎顶高程88.4m。6~10号孔坝段采用深潜式池式戽,戽底高程82.4m,水平池段、尾坎段长度同1~5号孔坝段,尾坎顶高程84.8m。经水工模型试验验证,初设审定采用的池式戽消能形式及体形尺寸能满足工程运用要求。

为进一步优化枢纽布置、改善运行条件,减少工程投资,缩短水下施工期,技施设计中受建设单位委托,广西大学和作者所在单位联合承接“左江水利枢纽泄水建筑物体型优化研究”课题,此时闸坝1~3号孔溢流坝段已开始施工,研究任务较为紧迫。根据本枢纽闸坝泄流特点,广西大学采用“屏流消能研究”理论成果进行分析计算,选出较优的方案进行物理模型试验,从而减少了试验方案,缩短了试验研究周期,按时提交了研究成果。试验研究中,对WES剖面的设计水头 H_d 拟定12m,14m,17.68m三种方案;对堰趾消能结构形式尺寸拟定了4种形式即直柱分流墩、“ $\neg$ ”形分流墩、消力屏、池式屏进行水工模型试验研究比较,并推荐 $H_d=14$ m、消力屏为实施方案。水工模型试验结果表明,实施方案坝后水流流态有如下改善:①坝下水流流速降低,在坝下100m处垂线平均流速由1.48m/s降为0.86m/s;②坝下水面波浪衰减率提高,在坝下200m范围内,波浪衰减率由37%提高为53%;③坝下河床冲刷较轻,最大冲深2.71m,冲坑后坡为0.13,属轻度冲刷;④引航道下游口门区横向流速减小,由0.70m/s减小为0.28m/s,水面波高由0.23~0.34m降为0.11~0.17m;⑤厂房尾水水面波浪平均波高由0.36m降为0.18m。第一期主体工程的1~3号闸孔坝后消能工形式、尺寸仍按初设审定的方案施工,4~10号闸孔坝下消能工采用消力屏,其中4~5号孔屏底高程86.0m,屏坎高程89.0m,屏面曲线半径底线上游侧为13.47m,下游侧为16.5m,6~10号孔屏底高程83.5m,屏坎高程86.4m,屏面曲线半径11m,屏体长度比池式屏缩短了10.54m(如图2所示),并大幅度抬高坝建基面高程,下游护岸工程防护范围缩小,左岸护岸长度由216m缩短为86m,右岸护岸长

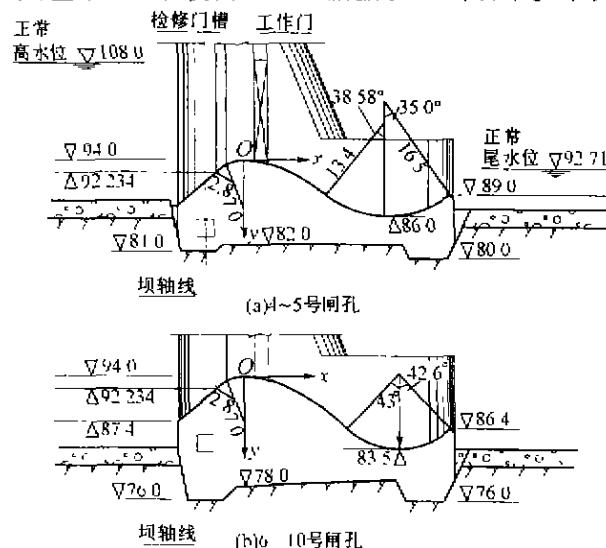


图2 溢流堰剖面(单位:m)

度由260m缩短为132m,基础开挖和混凝土工程量大为减少,缩短了6个月工期,节省投资约511万元,节约投资效果显著。消力屏建成运用以来经历了5个洪水期的泄洪消能验证,据现场观测,厂房进出口及坝后下游水流平稳,坝后水下检测未发现被冲刷现象,消力屏消能效果好,枢纽水流流态与模型水流流态基本相吻,枢纽运行情况良好。

根据查新报告和有关资料,本工程把消力屏用于较低 Fr 数水流的较大型工程在国内尚属首例,解决了低 Fr 数水跃摆动问题,且在较短的下游水流表面消除了波动,减轻了由于面流或屏流表面波动引起的岸边冲刷,提高了消能效果,综合技术处于国内领先水平,在大流量低 Fr 数泄流工程中应用消力屏消能达到世界先进水平。在大流量低 Fr 数水利工程中成功地应用消力屏,为低 Fr 数水流的大中型水利工程消能设计提供了实例,在低水头泄水工程中将具有广泛的应用前景。

(收稿日期:2000-04-27 编辑:马敏峰)

欢迎订阅 2002 年《中国农村水利水电》

《中国农村水利水电》是由中国灌溉排水发展中心、水利部农村水电及电气化发展局、武汉大学、中国国家灌排委员会主办的水利水电专业性技术期刊,主要内容:灌区建设与管理、节水灌溉、农村饮水与乡镇供水、农田水利建设、机电排灌、水工建筑、水利经济、水电建设、农村电气化、电站运行与管理、电网技术及水资源开发利用等。信息量大,读者面广,且注重应用技术的研究和推广。该刊是全国(省、部)优秀科技期刊,并荣获“首届国家期刊奖”,是全国中文核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊、中国科技论文统计源期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊。

《中国农村水利水电》为月刊,大16开,56页,每月10日出版,订价5.5元,全年66元。国内订阅:全国各地邮局,邮发代号38—49;国外订阅:中国国际图书贸易总公司(北京399信箱),国外代号M4211,也可直接向编辑部订阅。地址:武汉大学内,430072,电话:(027)87888155,87643133;传真:(027)87888155。

《中国农村水利水电》1980~2000年光盘版和水电专版已经出版。光盘版收录了1980~2000年《中国农村水利水电》杂志上的主要文章近6000篇,水电专版近2000篇,各1张光盘,方便单位或个人收藏和快速查阅。光盘版定价400元/张,水电专版200元/张。

邮局汇款请寄:湖北省武汉市武汉大学内《中国农村水利水电》编辑部,430072。

银行汇款:《中国农村水利水电》读者服务部;账号:85442893261002962;开户银行:武汉市建行水办学苑所(银行信汇者请注明详细地址)。

联系人:胡成胜

电话:(027)87888155 87643133

传真:(027)87888155