

汉江兴隆船闸建设主要技术问题的设计研究

郭红亮, 童迪, 蒋筱民

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:汉江兴隆船闸为单线一级船闸,线路总长1 400 m,闸室有效尺寸180 m×23 m×3.5 m。船闸设计水头8.1 m,属短廊道输水系统中的高水头船闸。模型试验表明,船闸运行时,闸室船队系缆力超标且产生立轴吸气漩涡等问题;通过研究设置消涡板、调整下闸首进水口型式等措施可以使问题得到解决。船闸上、下闸首采用整体式结构,底板面积大,为降低温控要求和改善底板结构受力状态,研究提出了“左右分块浇筑、中间预留宽槽、中期适时并缝”的解决方案。但在实施过程中,由于进度滞后错过了宽槽并缝的时机,为不耽误后续施工,又研究提出了闸墩内设空腔和底板堆载解决方案。兴隆船闸主要技术问题的解决方案可供类似工程参考。

关键词:船闸;输水系统;隔流堤;宽槽;汉江兴隆水利枢纽

中图法分类号:U641

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.16.007

1 工程概述

汉江兴隆水利枢纽位于汉江下游湖北省潜江、天门市境内,是汉江梯级开发的最下一级,工程任务为灌溉、航运并兼顾发电,主要建筑物有泄水闸、船闸、电站等。

船闸为单线一级船闸,级别为Ⅲ级,设计代表船型为1+4×1 000 t船队。

船闸由主体段(上闸首、闸室、下闸首、消能段)、上下游引航道及导航靠船建筑物组成。闸室有效尺寸为180 m×23 m×3.5 m(长×宽×槛上最小水深)。船闸与右岸电站同侧布置在汉江右岸高漫滩上,上闸首与电站之间净距80 m,船闸轴线与坝轴线正交。船闸主体段总长268 m,航槽净宽23 m。上、下游引航道采用不对称型布置,过闸方式为曲线进闸、直线出闸,引航道在高漫滩开挖形成,直线段长450 m,直线段外与汉江曲线衔接,最小有效宽度76 m,最小水深3.2 m。船闸线路总长约1 400 m。

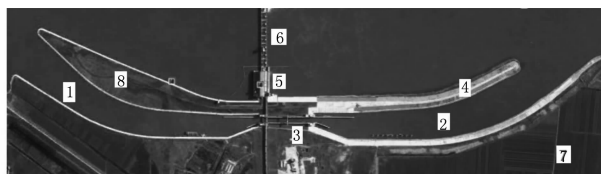
输水系统设计是船闸设计的关键问题,兴隆船闸设计水头8.1 m,输水系统采用了集中短廊道布置,在

类比其他工程的基础上,上闸首消能工采用格栅式帷墙消能室,下闸首采用简单消能工,虽然水力计算结果能满足规范要求,但在模型验证时仍出现闸室系缆力超标、充泄水时在进水口产生立轴吸气漩涡等问题。在分析问题原因和试验的基础上,通过研究设置消涡板、调整下闸首进水口型式等措施使问题得到解决。

船闸上、下游隔流堤原设计由开挖引航道后保留的漫滩经防护后形成,上游隔流堤按设计实施顺利,下游隔流堤则因发生汉江漫滩崩塌,在缺乏常规筑堤材料和需水下施工条件下,对隔流堤筑堤材料和结构型式等问题进行了研究。

船闸上、下闸首采用整体式结构,底板面积大,为降低温控要求和改善底板结构受力状态,研究提出了“左右分块浇筑、中间预留宽槽、中期适时并缝”的解决方案。但在实施过程中,由于前期进度滞后,错过了宽槽并缝的时机,为不耽误后续施工,经研究又提出了闸墩内设空腔和底板堆载的解决方案。

船闸于2013年初建成,4月中旬开始通航,船舶安全过闸万余艘次,运行情况良好。建成后的船闸鸟瞰图见图1。



1. 上游引航道; 2. 下游引航道; 3. 船闸主体段; 4. 下游隔流堤; 5. 电站; 6. 泄水闸
7. 右岸滩地; 8. 上游隔流堤

图1 船闸鸟瞰图

2 输水系统设计研究^[1-2]

2.1 基于水力计算和工程类比的输水系统

船闸设计水头 8.1 m, 闸室充水时间 10 ~ 11 min, 采用短廊道集中输水系统。

上闸首充水廊道进水口为喇叭形, 布置在人字门门龕内, 进水口底高程 22.0 m, 与输水廊道底板同高程, 进水口顶部最小淹没深度 10.3 m, 每侧廊道进水口断面尺寸为 4.5 m × 3.6 m (宽 × 高, 下同), 廊道断面及阀门处孔口尺寸均为 3.2 m × 3.6 m, 廊道出口断面扩大为以分流墩相隔的两个 2.5 m × 3.6 m 孔口。下闸首泄水廊道布置与上闸首基本相同, 仅直线段长度增加 14.5 m, 廊道出水口布置在消能段。

消能工型式根据设计水头以及上、下闸首断面输水时的最大平均流速值 (0.78, 1.52 m/s) 确定。设计初期在类比皂河二线船闸 (设计水头 5 m)、三峡临时船闸 (设计水头 6 m) 等同类工程的基础上, 按《船闸输水系统设计规范》(JTJ306-2001) 的划分标准, 上闸首需用复杂消能工, 下闸首可用简单消能工。

上闸首消能工采用了格栅式帷墙消能室的型式。消能室在顶部和上游面均设出水孔, 顶部出水孔采用盖板消能, 侧向出水孔采用明沟消能、沟内设消力梁。顶部出水孔分两列, 每列 12 孔, 共 24 孔, 每列出水孔采用中间密两侧疏的变间距、变孔宽布置 (0.6 ~ 0.8 m), 孔长 2.8 m, 顶部出水孔总面积 49.28 m²。侧向 10 个出水孔, 等间距、等孔宽布置, 每孔高 3 m、宽 1.3 m, 总面积 39 m²。在消能室内设 3 道消力槛, 其中 2 道槛高 0.7 m, 1 道槛高 1.4 m。消能室上游面距上闸首帷墙最近距离 6.1 m。

下闸首简单消能工采用对冲消能、消力池内设消力槛的消能方式。消力槛高 0.7 m, 不对称布置, 左侧消力槛斜向航道布置并与船闸中心线夹角 28°。

初步水力计算表明, 输水系统在船闸充泄水时间、船舶在闸室和引航道内的停泊条件、阀门收缩断面廊道顶部压力、不产生远驱水跃等各项设计指标都能满足规范要求。

2.2 模型验证、存在的问题及原因分析

兴隆船闸属短廊道输水系统中的高水头船闸。船闸规模较大, 输水时间短, 水力指标要求高, 除借鉴类似工程经验外, 还需通过模型试验验证。

船闸水力学整体模型按重力相似准则设计, 比尺为 1 : 30。试验表明, 短廊道输水系统布置基本可行, 但存在下列问题: ① 闸室充水时, 设计船队纵向系缆力超标约 10%, 横向系缆力前段超标约 40%, 后段超标约 10%; ② 下闸首左侧单独泄水时, 由于消力槛偏角的影响, 下游引航道内水流集中于右岸, 造成停泊于右岸靠船墩的船舶横向系缆力偏大; ③ 上、下闸首的输水系统进口在充、泄水时产生立轴吸气漩涡。

经分析, 闸室充水时, 系缆力超标的主要原因一方面是闸室充水流量较大, 顶孔消能盖板顶面距下游最低通航水位仅 0.3 m, 起始淹没水深较小, 侧向孔出流虽经明沟消能, 但翻越消能室时, 与顶孔出流碰撞, 增加了水流的紊动程度; 另一方面, 1 + 4 × 1 000 t 级设计代表船队的平面尺度为 167 m × 21.6 m × 2 m, 几乎满布闸室宽度, 使得闸室宽度范围内的有效过水断面减小, 消散紊动水流的能力降低, 造成充水初期闸室系缆力超标。充、泄水系统进水口形成漩涡的主要原因则是进水口分别位于上、下闸首人字门门龕内, 门龕内取水水域相对较小, 特别是充水系统进水口位于上闸首人字门门龕段的深坑内, 取水条件差, 取水过于集中, 流速较大。

2.3 解决方案

为解决上述问题, 在大量试验探索的基础上, 研究提出了以下解决方案: ① 取消上闸首格栅式帷墙消能室侧壁出水孔, 同时修改顶部出水孔布置, 3 组顶孔宽度不变, 但各组孔数由原来的 3 孔、2 孔和 1 孔调整为 2 孔, 顶孔出水面积调整为 47.04 m², 取消出水廊道内消力槛; ② 将下闸首左侧消力槛角度由 28° 调整为 20°; ③ 在上闸首左右进水口上部, 分别设置 1 块顺流向长 11.1 m、横向宽 5.5 m、顶部高程与人字门底槛相同并与闸首侧墙相连的消涡板; ④ 将下闸首廊道系统的高程整体下降 2 m, 进水口由喇叭形侧向集中进水修改为门龕段格栅式分散进水, 其他尺寸不变。进水孔共 12 孔, 与廊道同宽 3.2 m, 采用变间距、变孔宽布置, 一半航槽宽度内 4 组孔宽由边侧向中间分别为 0.7 m (1 孔)、0.5 m (1 孔)、0.9 m (2 孔)、1.1 m (2 孔)。

调整后, 经模型试验再次验证, 立轴吸气漩涡现象得以消除, 系缆力等各项指标均满足要求。

经 1 a 多的实际运用表明, 船闸充泄水时水面较

为平静,既无吸气漩涡产生,也未出现大的紊动;船舶在闸室内和下游靠船墩处停泊平稳,船闸输水系统工作状况良好。

3 下游隔流堤设计研究^[3-4]

3.1 存在的问题

右岸高漫滩地面高程 38 m,原设计上、下游引航道在滩地上开挖形成,引航道左侧与汉江间的保留滩地经保护后形成隔流堤。

原设计下游引航道和隔流堤的布置及结构为:口门内全长 1 009 m,其中直线段长 450 m,曲线段长 559 m;口门外连接段长 287 m,最小底宽 76 m,口门宽度 139 m,底部高程 26.5 m,船闸中心线延线与电站下泄水流夹角约 20°。下游引航道开挖后形成的隔流堤长为 960 m,其中位于围堰外部分长 820 m。围堰外隔流堤航道侧按两级边坡开挖,坡比 1:3,在 32.5 m 处设有马道,马道以下为水下开挖,采用膜袋混凝土护坡;马道以上为干地开挖,采用混凝土护坡;临江侧高程 32.5 m 以下,以抛石进行防护,以上将边坡修整为 1:3 并进行混凝土护坡。隔流堤堤顶宽度最窄 12 m,最宽 54 m。

上游引航道隔流堤、围堰内的下游隔流堤按设计方案实施顺利,但在船闸主体段基坑开挖期间,围堰下游右岸高漫滩发生崩塌,长度约 2 000 m,宽度 40 ~ 100 m,原滩地开挖引航道后拟保留作为下游隔流堤的部分基本崩入江中。在船闸中心线既定条件下,需研究下游隔流堤人工修筑问题。

3.2 隔流堤布置、筑堤材料和结构型式研究

下游隔流堤需要研究解决两方面重要问题:① 隔流堤布置,需在满足通航水流条件的前提下,尽量减少隔流堤长度以节省投资;② 当地缺乏通常条件下筑堤所需的粗粒料,而且需水下条件下施工,必须研究解决水下筑堤的材料和结构型式问题。

(1) 下游隔流堤筑堤布置研究。隔流堤布置主要取决于船闸的通航水流条件。隔流堤的不同布置方案,将导致电站下泄水流对口门区的影响程度和隔流堤的工程投资。为此,研究了船闸中心线与主流向的夹角为 25.0°,22.5°,20.0° 三种方案,并在水工整体模型上进行验证。试验结果表明:夹角 25.0°,22.5° 时,下游引航道口门区横向流速值超标测点比例分别为 41% 和 22%;水流夹角 20.0° 时,仅个别点超标,决定选用夹角为 20.0° 的布置方案。与

原设计方案相比,船闸中心线延线不变,堤顶为同一宽度,堤头位置向滩地一侧横向移动 23.5 m,向下游延伸 12 m。下游隔流堤布置调整见图 2。

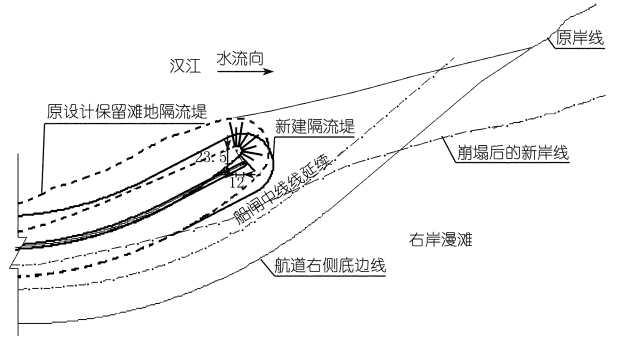


图 2 下游隔流堤布置调整示意(单位:m)

(2) 筑堤材料和结构型式研究。水下筑堤通常采用块石、石渣、砂卵石等材料,需具备一定抗冲和水下自稳能力,但在当地此类型材料运距约 80 km,运距远、价格高,还受到运输条件限制,其他制约因素也较多,工期又十分紧迫。在分析不同筑堤方案利弊的基础上,经研究后决定利用该河段粉细砂多、含泥量少、能就近取材的条件,采用吹填进行筑堤,即利用泥浆泵或高压水泵切割冲吸粉细砂沙洲,经输泥管水力输送充填入复合土工袋,排出水分后,沉留袋内的粉细砂固结形成有一定密实度的袋装土,两侧堤脚用具备防冲和自稳能力的袋装土叠置成棱体,堤身在棱体保护下,再用吹填粉细砂填筑。

复合土工袋应满足吹填砂对渗透性、保土性、防淤堵要求,渗透系数要求 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/s,等效孔径 O_{95} 在 0.1 ~ 0.12 mm;抗拉强度不小于 18 kN/m,延伸率不大于 20%,充盈系数宜为 85%,充填后的土工袋长/宽 > 2.4,长/高 > 3.5。充填后的干土重度不小于 14.5 kN/m³。

设计隔流堤断面为顶宽 8 m,堤身在高程 32.5 m 处设有马道,两侧马道上下两级边坡按稳定要求确定为 1:3。隔流堤断面结构见图 3。棱体顶宽临江侧为 10 m,航道侧顶宽为 8 m,顶高程 31.5 m,每层充填后的复合土工袋厚度不超过 0.5 m,内坡坡比为 1:1.5,外坡坡比为 1:3。两侧棱体先行施工,其间高程 31.5 m 以下堤身在棱体保护下直接吹填粉细砂,高程

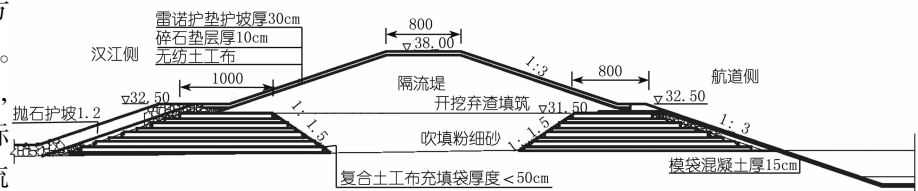


图 3 隔流堤断面结构示意图(高程:m,尺寸:cm)

31.5 m 以上堤身则利用引航道开挖弃料填筑。马道以下临江侧抛石护坡和护底,航道侧为模袋混凝土护坡;马道以上堤坡及堤顶为雷诺护垫保护。

施工实践证明,采用上述设计方案,堤身填筑密实,既满足了堤身稳定要求,施工简便,同时还节省了工程投资,施工进度也较快。

4 闸首大底板施工方案研究

根据地质条件,为避免不均匀沉降影响船闸人字门正常工作,船闸上、下闸首采用整体式“U”型结构,闸顶高程 46.5 m,两侧边墩宽 12 m。上闸首长 40 m,宽 47 m,高 28.5 m,建基面高程 18 m,底板顶面高程 22.0 m,门槛段高程 32.4 m。下闸首长 30 m,宽 51 m,高 31 m,建基面高程 15.5 m,闸底板标准段顶高程 24.6 m,输水廊道进口段底板高程降至 19.5 m。上、下闸首边墩墙后采用粉细砂回填至原地面高程 38 m。

地基地层从上至下为深厚的粉细砂层和砂砾石层,为减小沉降量,上、下闸首用水泥土搅拌桩进行了地基处理,处理后的地基承载力特征值为 460 kPa。

4.1 闸首大底板施工主要难点

上闸首底板面积为 $40\text{ m} \times 47\text{ m}$ (长 \times 宽,下同),下闸首为 $30\text{ m} \times 51\text{ m}$,如采用整体底板浇筑,仓面面积太大,对施工温控要求很高,同时边墩结构自重及填土边载对底板跨中产生很大的负弯矩,大体积混凝土温度应力容易产生裂缝。

4.2 施工方案研究

通过大量的分析计算工作,研究提出的解决方案为:在施工程序上,“左右分块浇筑、中间预留宽槽、中期适时并缝”,即沿闸首底板中心线设 1 条宽 1.5 m 的宽槽,将闸首底板分为左右两块;左右边墩平行浇筑上升,墙后跟进填土;边墩浇筑上升至 38 m 高程后,于低温季节进行宽槽过缝钢筋连接和混凝土回填,将底板连成整体;之后继续浇筑闸墩到顶。该方案降低了混凝土温控要求,使闸首底板结构受力和配筋量大幅减小,降低了施工难度。为保证并缝的可靠性,宽槽两侧预留键槽,并用微膨胀混凝土回填。宽槽回填条件为:冬季回填,底板混凝土自身龄期不少于 2 个月,且混凝土温度须降至不高于 10°C 。

设宽槽后上闸首每块底板长度仍达 40 m,为减小施工难度,在底板正中设临时施工缝,底板分两层浇筑,每层厚 2 m,施工缝采用错缝型式,错缝间距 0.8 m。下闸首底板长 30 m,不设临时施工缝。

4.3 实施过程中的方案调整研究

实际实施过程中,因前期施工进度滞后,上、下闸

首边墩浇筑到 38 m 高程时预计将进入夏季,错过了宽槽回填时机。

原研究提出的施工程序,选择边墩浇筑上升至 38 m 高程后并缝,主要因素有:① 合理选择并缝时机。按施工组织设计,完成 38 m 高程以下混凝土浇筑的时间是低温季节。② 在施工中尽量减少底板结构受力。③ 基底应力不超过搅拌桩复合地基的承载力。闸墩不并缝继续上升带来的主要问题是基底应力将超过搅拌桩复合地基的承载力,同时地基应力不均匀系数大。以上闸首为例,不并缝闸墩直接浇筑到顶,基底应力闸墩侧为 608 kPa,航道侧为 21 kPa,不均匀系数高达 29。

研究的解决方案为:上闸首在左右闸墩 26.0 ~ 40.0 m 高程的对称部位,每侧设 5 个空腔(每侧空腔总体积 $1\,600\text{ m}^3$),将实体闸墩改为空箱式闸墩,同时在航道侧底板上用沙袋堆载,堆载高度 6 m。下闸首在类似部位,每侧闸墩设 3 个空腔(每侧空腔总体积 928 m^3)。经计算,这样能减轻闸墩自重且堆载后基底应力不超过地基允许承载能力,使基底应力不均匀系数不大于 5,既满足结构设计的要求,也降低了闸墩施工温控要求,有利于加快施工进度。

实际实施中,选择在 1 月下旬上、下闸首闸墩浇筑到顶时进行了底板宽槽回填。船闸投入运用前,经过一年多气温变化和最大荷载的考验,上、下闸首底板未出现裂缝,圆满解决了闸首大底板施工难题。

5 结 语

兴隆船闸建设过程中,在输水系统、隔流堤修筑、上下闸首大底板施工方案等方面,紧密结合工程特点和现场条件,因地制宜地研究提出了切合工程实际的技术解决方案,加快了施工进度,降低了施工难度,节省了工程投资。工程建成后运用情况良好,取得了良好的社会效益。

参考文献:

- [1] 长江科学院. 汉江兴隆水利枢纽船闸水力学模型试验研究报告[R]. 武汉:长江科学院,2009.
- [2] 长江科学院. 汉江兴隆水利枢纽船闸输水系统进出水口优化试验报告[R]. 武汉:长江科学院,2010.
- [3] 长江科学院. 汉江兴隆水利枢纽水工整体模型试验研究报告[R]. 武汉:长江科学院,2012.
- [4] 包承纲. 堤防工程土工合成材料应用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

(编辑:徐诗银)

(下转第 47 页)

landslides; error correction and affirmation of mechanism for the Vaiont landslide[J]. *Geotechnique*,1992,42(4):641-643.

[2] 姚伟,侯宗博,张永康,等. 某多次治理滑坡的变形机理和经验教训[J]. *工程地质学报*,2014,22(S1): 320-325.

[3] 王启国. 金沙江虎跳峡河段水电开发重大工程地质问题研究[J]. *岩土工程学报*,2009,31(8):1292-1298.

[4] 王启国,张良平. 西藏中波河段大型碎屑流成因机制及防治对策[J]. *岩石力学与工程学报*,2011,30(11):2293-2302.

[5] 崔杰,王兰生,徐进,等. 金沙江中游滑坡堵江事件及古滑坡体稳定性分析[J]. *工程地质学报*,2008,16(1): 6-10.

[6] 王启国,颜慧明,刘高峰. 金沙江虎跳峡水电站上江坝址若干关键工程地质问题研究[J]. *水利学报*,2012,43(7):816-825.

(编辑:赵凤超)

Study on engineering geological characteristics and stability of a dam near landslide

YANG Hanliang¹,ZHOU Li²

(1. Yangtze River Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Institute of Technology, Wuhan 430200, China)

Abstract: A landslide is distributed at the upstream of a planned dam right abutment, south side of inlet of the hydropower plant. The hydraulic structures would be destructed if the landslide losses stable, so it is a major technical problem to be solved. Through the survey work such as engineering geological mapping, drilling, adit surveying, geomechanics testing, etc. , it is discovered that the volume of the landslide is about 700 thousands m³, belonging to a medium debris landslide, and its overall situation is stable. Under a multiple operation conditions such the reservoir impoundment and operation as well as sliding body saturated due to storm, long period heavy rainfall, the whole landslide would be in less stable to unstable state. Therefore, the engineering measures should be adopted. Through comparison, it is suggested that the landslide should be moved out in combination with the third stage cofferdam construction, so as to avoid the danger of the landslide completely.

Key words: engineering geology; landslide; basic characteristics; stability; engineering treatment

(上接第 30 页)

Design research on main technological problems in construction of Xinglong shiplock on Hanjiang River

GUO Hongliang, TONG Di, JIANG Youmin

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The Xinglong shiplock on Hanjiang river, a single-lane one-step shiplock with total length of 1 400 m, has effective chamber size of 180 m×23 m×3.5 m, and its design water head is 8.1 m, which could be classified as a high water head shiplock in the series of short corridor water diversion system. In the model test, it was found that the mooring force of ship team exceeded the standards and the vertical suction eddy existed. Comprehensive measures such as setting eddy-reduction plate, adjusting water intake shape of lower lock head were adopted to solve the above problems. The upper and lower lock heads is an integral structure with large bottom plate. Therefore, a solution of conducting the pouring of left zone and right zone separately, reserving a wide joint in middle part and performing joint conjunction timely in mid period was proposed, so as to reduce the temperature-control demands and improve the stress condition of bottom plate. However, the opportunity for joint conjunction had been missed due to the lag in schedule, so a new substituted solution was proposed, which set cavities in sluice piles and conducted preloading on bottom plates. These solution measures could provide references for other similar projects.

Key words: shiplock; water diversion system; flow-separation dyke; wide joint; Xinglong Water Conservancy Project