

# 川北某山区水库应急补水工程设计

杨华仙<sup>1</sup>, 袁绍春<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 2. 重庆交通大学 水利水电工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 根据应急工程时效性、可靠性要求高的特点,对川北山区幸福水库进行了长距离管道输水补水工程设计,包括水源选择、管道定线、管材选择、管径确定、取水型式、水锤防护、管道试压等。依据山区地形特点采用浮船取水后长距离加压输水,设计管径为 DN1 000,设计管长为 6.6 km,年均补水  $2\,190 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,有效解决了水源灾情危机。结合 Bentley HAMMER V8i 水锤分析,在输水管道沿程设置了气囊式空气压力罐、水锤泄放阀、活塞式调流阀、弥合水锤预防阀等水锤防护措施,输水一年多的运行结果表明,系统压力控制在 1 100 kPa 以内,无水柱拉断现象,吨水电耗成本为 0.14 元/ $\text{m}^3$ ,系统运行稳定、安全。

**关键词:** 应急补水工程; 长距离输水; 浮船取水; 水锤防护

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)04-0075-05

## Design of Emergency Water Supply Project of a Mountain Reservoir in Northern Sichuan

YANG Hua-xian<sup>1</sup>, YUAN Shao-chun<sup>2</sup>

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China;  
2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** According to the characteristics of high timeliness and reliability of emergency projects, a long-distance pipeline water supply project was designed for mountainous Xingfu Reservoir in northern Sichuan, including water sources selection, alignment of pipeline, pipeline material selection, determination of pipe diameter, water intake type, water hammer protection, pipeline pressure test, etc. Based on the topographic characteristics of the mountainous area, long distance pressurized water conveyance was adopted after pontoon water intake. This project was designed with a pipe diameter of DN1 000, a design pipe length of 6.6 km, and an average annual water supply of  $2\,190 \times 10^4 \text{ m}^3$ . As a result, the project effectively solved the crisis of water source disasters. Combined with the Bentley HAMMER V8i water hammer analysis, water hammer protection measures such as water bladder air pressure tanks, water hammer relief valves, piston type flow regulating valves, and bridge water hammer prevention valves were installed along the water pipeline. The results of operation over one year showed that the system pressure was controlled within 1 100 kPa, there was no water column breaking phenomenon. Consumption of per ton water was 0.14 yuan/ $\text{m}^3$ , and the system could be operated stably and safety.

**Key words:** emergency water supplement project; long-distance water conveyance; pontoon water intake; water hammer protection

幸福水库是川北第二大水库,也是正南方向 12 km 外营山县县城的唯一饮用水水源地,由于极端气候频发、久旱无雨,水库水位持续下降,库床日渐裸露,城市供水受到极大威胁。当地虽然采取了水库取水口前置延伸、开凿土坝放水、定时供水等一系列工程措施,但水源干涸的压力并没有得到排解,县城 20 万人口的供水安全面临极大威胁,为此建设幸福水库应急补水工程。工程设计输水管线长为 6.6 km,设计管径为 DN1 000,输水规模为  $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该工程于 2016 年 8 月启动设计,次月开工,2017 年 3 月建成通水,运行至今状态良好,为县城居民的安全供水提供了有力保障。

### 1 水源选择

营山县城内主要河流有流江河及其支流仪陇河、消水河。根据幸福水库所处的位置及区域地貌地形分析,可利用的水源只有仪陇河。仪陇河位于幸福水库东北方向(见图 1),直线距离仅约 4 km。根据原水检测报告,仪陇河水质属于Ⅲ类地表水,符合集中式生活饮用水地表水源地标准要求。根据水文资料,仪陇河 2013 年—2015 年最小流量平均为  $7.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,最大流量平均为  $771.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,满足取水量的要求。结合水深和河岸条件,最佳取水口确定在浮山村鹅颈项处的 U 形回水湾。

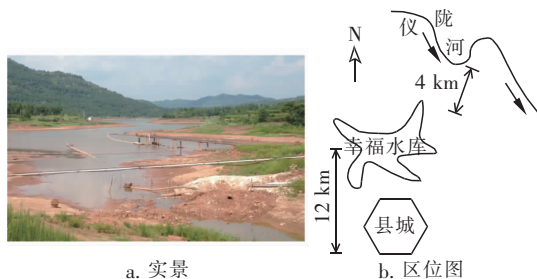


图 1 水库干涸实景及其区位图

Fig. 1 Dried-up reservoir scenery and its location map

### 2 管道定线

取水口到水库的地形高差为 54 m,采用泵站加压供水。经现场踏勘,线路沿途山高林密、沟壑纵横,溪沟、巨岩、陡坎较多,为保证管道纵坡起伏缓和,最终确定管道沿绿水小河旁边台地定线。依托既有的乡道作为施工主便道,同时开辟多条泥结石道路作为施工支便道,解决建材和机具通达问题。

管道定线过程中需要对线路进行“裁弯取直”缩短管道长度,同时对线路上的山包(梁)按管道埋

深、断道施工影响等条件分别制定顶管或大开挖方案,以最大程度减少对周边农房、水井等设施的影响,降低社会协调风险。因地处野外地形,为了防范后期的征地、林木赔偿争端,现场定线中对所途经的村组,均由当地村长、书记带队负责农户的沟通宣传工作,争取群众支持,确保项目用地得到落实,避免后期因村民阻工而频繁改线,突破工期和造价。

### 3 取水型式

根据现场调查,仪陇河在取水口下游安固乡境内建有溢水坝,取水口处河岸较陡( $\alpha = 25^\circ \sim 30^\circ$ )、水流平缓、船只停泊条件较好。根据技术经济比较,确定采用浮船取水(见表 1)。

表 1 取水型式技术经济比较

Tab. 1 Technical and economic comparison of water intake forms

项 目	岸边固定式 取水泵站	浮船式 取水泵站
选址论证、水下测量、 地质勘察等前期工作	必须	可简化
估算投资/万元	2 000	500
建设周期/月	6 ~ 8	2 ~ 2.5
正常使用寿命/a	50	20
结构牢固度	高	较高
山区河流水位波动适应性	一般	高
施工难度	难	容易
应急时效性	差	高
选择结论	不采用	采用

设计浮船长为 24 m、宽为 7.7 m、高为 7.5 m,船体上布置悬臂户外吊车、霍尔锚、球形万向转动接头、离心泵、救生圈等设备。沿浮船中心线在岸边设置 2 个主支墩(见图 2),用于固定输水管道栈桥和人行栈桥,同时主支墩两侧分设 2 个钢缆牵引副支墩,用于辅助调节浮船的张弛。在岸边平坦空地设一座变配电间(含值班室),占地为  $333 \text{ m}^2$ ,从附近两座 35 kV 变电站架空引来 2 回 10 kV 外电源,实现浮船的供配电。

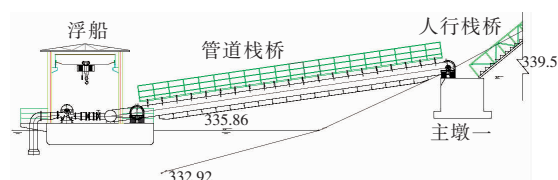


图 2 浮船剖面

Fig. 2 Pontoon profile

4 管材选择

长距离输水管道材质主要选择钢管、球墨铸铁管、预应力钢筒混凝土管(PCCP管)及玻璃钢管。

球铁管、PCCP管、玻璃钢管接头均为柔性,现场地质情况为软基分布较广泛、地下水位较高,采用这三种管材时均需设置管道基础或对管道基础进行处理<sup>[1]</sup>。钢管具有强度好、承受内压能力高、抗应变能力强、抗不均匀沉降性能佳等特点<sup>[2]</sup>。考虑到山区地形复杂、施工难度大,管道组装要简便快捷,管材供应和到岸要方便易得,最终确定采用钢管。

为减少现场的防腐工作量、节省工期,钢管在出厂前均要求在厂内完成采用环氧树脂内外防腐处理,防腐执行《给水涂塑复合钢管》(CJ/T 120—2008)标准。涂层厚度标准为:内防腐,环氧树脂,厚度大于 0.45 mm;外防腐,环氧树脂,厚度大于 0.5 mm。现场焊口、焊点防腐由管道供应商负责提供环氧树脂原料,并向施工方提供防腐技术指导。

5 管径确定

考虑到输水安全性、经济性和可实施性,根据应急工程的实际需要,确定采用单管输水。根据经济比较,管径确定采用 DN1 000,见表 2。

表 2 管径技术经济比较

Tab.2 Technical and economic comparison of pipe diameter

项 目	管径 DN800	管径 DN1 000
取水口水位标高/m	336	
出水口处最不利点标高/m	397	
自然高差/m	54	
压力管线长度/m	6 600	
输水量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	6	
压力管管径/mm	DN800	DN1 000
水力坡度/%	0.272 6	0.087 4
管道沿程水头损失/m	17.99	5.77
管道局部水头损失/m	5.4	1.73
管道总水头损失/m	23.39	7.5
理论所需扬程/m	77.39	61.5
选型水泵扬程/m	85.81	68.95
水泵数量/台	3,2 用 1 备	3,2 用 1 备
单泵流量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	1 250	1 250
水泵型号 (双吸单级离心泵)	300SS116 - A	300SS116 - B
轴功率/kW	432.7	338.1
电机功率/kW	450	355
水泵效率/%	79	81.5
流速/(m · s <sup>-1</sup> )	1.38	0.88

续表 2 (Continued)

项 目	管径 DN800	管径 DN1 000
管道估算单价/(元 · m <sup>-1</sup> )	2 964	4 010
管道估算投资/万元	1 956	2 807
水泵估算单价/(万元 · 台 <sup>-1</sup> )	65	60
水泵估算投资/万元	195	180
水泵、管道总估算投资/万元	2 151	2 987
水泵年耗电量/10 <sup>4</sup> kW · h	788.4	621.9
水泵年耗电费用/万元	512.5	310.9
盈亏平衡周期/a	6.2	6.2
安全可靠度	一般	高
选择结论	不采用	采用
注: 水头损失、扬程 1 m≈10 kPa。		

管道设计工作压力为 1.0 MPa,经结构计算,直埋段钢管采用 D1 020 mm × 10 mm,桥管及巨岩架空段钢管采用 D1 020 mm × 16 mm,顶管段采用 D1 020 mm × 14 mm。为保证过流要求,本次设计钢管内径为 1 000 mm,壁厚外加,法兰盘制作及过渡焊接时,应特别注意。

6 水锤分析

水锤是压力管道中水流速度剧烈变化引起管道压力交替升降的水力冲击现象,又以停泵水锤和断流弥合水锤危害最大<sup>[3]</sup>。根据《泵站设计规范》(GB 50265—2010)和《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS 193: 2005),中口径(DN600 ~ DN1 200)输水管道应进行专门的水锤分析计算并确定水锤防护措施,水锤防护安全技术准则为:管道出现的最大水锤压力不超过工作压力的 1.3 ~ 1.5 倍;离心泵反转速度不超过额定转速的 1.2 倍,超过额定转速的时间不超过 2 min;输水系统任何部位不发生水柱拉断。

针对本工程的实际情况,采用美国的 Bentley HAMMER V8i 水锤分析软件进行水锤分析计算。

6.1 稳态分析计算

稳态运行时,管道设计标高和压力走势见图 3。

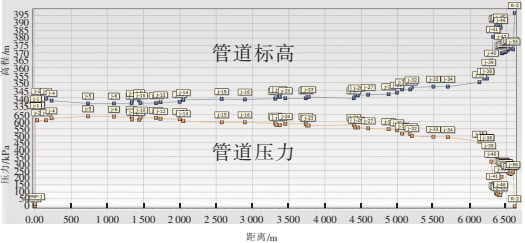


图 3 管道稳态压力线

Fig.3 Pipeline steady state pressure line

可见,稳态运行时管道实际扬程为66.72 m、实际流量为2 617 m<sup>3</sup>/h,满足设计要求。最大压力为637.2 kPa,系统中没有出现负压,可正常运行。

## 6.2 瞬态分析计算

### ① 无水锤防护工况

未采取水锤防护措施前,水泵事故断电时,泵后液控止回偏心半球阀13 s关闭(3 s关闭80%,10 s关闭20%),管道压力变化见图4。可见,管道压力出现强烈升降,最高达2 200 kPa,出现在节点j-2(桩号0+005),远高于管道工作压力;最低压力出现在节点j-41~j-45(桩号6+310~6+408),已降至汽化压力之下,管道内大范围水体发生水柱拉断。这是特殊地形下管道翻越巨岩造成的必然结果。

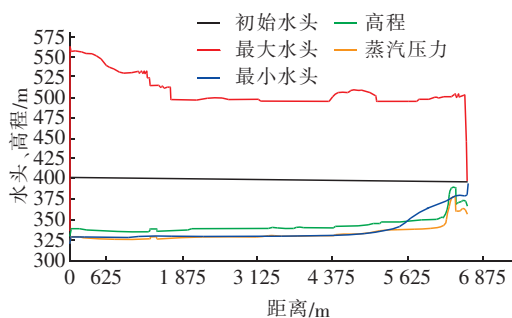


图4 无水锤防护下管道瞬态压力线

Fig.4 Pipeline transient pressure line without water hammer protection

### ② 采取水锤防护工况

根据无水锤防护下瞬态分析结果,经反复试算,确定在水泵汇水管起点安装气囊式空气压力罐和水锤泄放阀,在管道出水口附近设活塞式调流阀,并在管道中间适当位置设置弥合水锤预防阀(共计13处)。采取水锤防护措施后管道压力变化见图5。

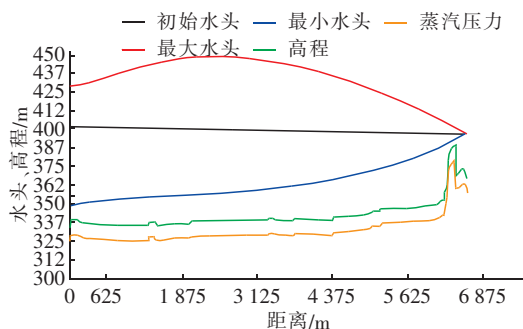


图5 采取水锤防护后管道瞬态压力线

Fig.5 Pipeline transient pressure line with water hammer protection

由图5可知,采取水锤防护措施后,管道高、低压曲线平滑,最高压力出现在节点j-15(桩号2+500),仅为1 100 kPa<1 300 kPa,整个系统无水柱拉断现象,符合水锤防护安全技术要求。

## 7 管道试压

工程设计顶管4处,每处管长为47~124 m,总长为346 m;设计桥管9处,每处管长为19~180 m,总长为554 m;设计巨岩段架空管1处,管长为204 m,安装角为45°~70°;设计直埋管长为5.5 km;设计管道支、镇墩共计38个。

管道安装和支墩浇筑完毕后,根据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)要求进行水压试验。根据提前编制的水压试验方案和充水预案,设计管道试验压力为1.5 MPa,水压试验的分段长度不超过1.0 km,共分7个试验段。试验管段两端采用钢制法兰盲板封堵,其中一端设置压力表,由独立第三方检测机构在现场按照操作步骤,对水压试验结果作出评定。管道终点设置永久警示牌,禁止无关人员逗留,管道通水时出水口处安排专人值守,防止发生意外。

为便于就地取材,水压试验水源就近抽取河水,雨天时浊度为50~100 NTU,经过简单过滤后可直接使用。为减少试验段钢管的切口和补焊,利用挖掘机铲斗悬挑潜水泵从河道吸水后沿排泥阀反向注水,同时确保高点上的排气阀全部打开,管道充水控制流速为0.3~0.5 m/s。

## 8 结语

本应急补水工程根据山区地形特点采用长距离加压输水,有效解决了水源灾情危机,设计管径为DN1 000,设计管长为6.6 km,设计管材为涂塑钢管,年均补水量为 $2\,190 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,电耗成本为0.14元/m<sup>3</sup>。工程自2017年3月通水以来运行良好,为该地区安全供水提供了有力保障。

实践表明,应急补水工程不仅要在满足应急时效性、可靠性的前提下快速制定技术方案,而且也要充分防控水锤风险,采取气囊式空气压力罐、水锤泄放阀、活塞式调流阀、弥合水锤预防阀等工程措施,可有效保障长距离输水系统的运行安全。

## 参考文献:

- [1] 杨志峰. 杭州萧山长距离大口径输水管道设计总结 (下转第83页)