

# 库区弯曲桥区河段航道通航条件影响分析

胡阳<sup>1,2</sup>, 曹洪<sup>2</sup>, 陈婷婷<sup>1</sup>, 杨莹<sup>1</sup>

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610200; 2. 攀枝花市交通运输局, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:** 本文以枣园黄河大桥为研究对象, 针对其跨越黄河盐锅峡库区 V 级航道弯曲河段的特殊区位, 开展桥梁建设对航道通航条件的影响分析。研究采用通航净空尺度复核、实测船舶航迹线分析、美国 AASHTO 船撞桥概率模型计算、船舶通航安全模拟试验及平面二维数学模型耦合等方法, 系统分析枯水期至洪水期的桥区航道通航安全性。结果表明: 枯水期, 建桥对航道通航条件影响较小; 中水期, 船舶撞毁桥梁的概率较小; 洪水期, 上行船舶与下行船舶存在交叉风险, 且下行船舶与桥墩的安全距离不足。研究提出设置桥梁防撞设施与预警装置、发布航行限制条件等针对性保障措施, 为库区弯曲河段跨河桥梁的通航安全评估与工程设计提供了技术参考。

**关键词:** 库区弯曲航道; 桥区航道条件分析; AASHTO 船撞桥概率模型; 船舶通航安全模拟试验

中图分类号: U447 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0014—04

## Impact Analysis on Navigation Conditions of Bend Waterway of Bridge Area in Reservoirs

Hu Yang<sup>1,2</sup>, Cao Hong<sup>2</sup>, Chen Ting-ting<sup>1</sup>, Yang Ying<sup>1</sup>

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd, Chengdu 610200, Sichuan, China; 2. Panzhihua Municipal Bureau of Transportation, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

**Abstract:** This paper takes the Zaoyuan Yellow River Bridge as the research object and analyzes the impact of bridge construction on waterway navigation conditions in view of its special location crossing the Grade V waterway bend section of the Yanguoxia Reservoir on the Yellow River. The study utilizes methods such as navigation clearance dimension verification, analysis of measured ship track lines, calculation using the American AASHTO ship collision probability model, simulation test of ship navigation safety, and coupling 2D planar mathematical models to systematically assess the navigation safety in the bridge area from low flow to flood flow. Specifically, the results show that, during the low water period, bridge construction has less impact on the navigable conditions of the waterway; during the medium water period, the probability of ships colliding with bridges is comparatively low; during the flood period, there is a crossing risk between upbound vessels and downbound vessels, and the safe distance between downbound vessels and bridge piers is insufficient. The study proposes targeted safety measures, including the installation of anti-collision facilities and early warning devices, issuance of navigation restrictions, etc, providing a technical reference for navigation safety assessment and engineering design of river-crossing bridges in reservoir bend sections.

**Keywords:** bend waterway in reservoir area; navigation conditions analysis in bridge area; AASHTO model for probability of ship collision with bridge; simulation test of ship navigation safety

## 1 引言

在我国内河航运体系中, 库区弯曲河段桥梁建设与航道通航安全的协调发展是水运工程领域的重要议题。随着西部大开发战略的深入推进, 黄河上游干流水运通道建设与跨河基础设施的交叉需求日益凸显。如枣园黄河大桥作为永靖至大河家高速公路的控制性工程, 其跨越库区弯曲河段的特殊区位, 对 V 级航道通航条件的影响亟需系统性研究。

从研究现状来看, 现有成果已在桥梁净空设计、弯曲河道对通航影响等方面取得进展。例如, 贺亮鑫结合实际工作经验, 以跨河拱桥为介绍典型, 提出了该型桥梁通航净高的计算方法, 并应用于实际工作中进行验算<sup>[1]</sup>; 邓良爱等根据叠加原理, 分别计算出在无风流情况下过弯道所需航宽、流致漂移量、风致漂移量、偏航量,

相互叠加得到有风流情况下船舶通过弯道所需航宽, 对航道通航能力进行预报<sup>[2]</sup>; 在船撞风险评估领域, 袁龙文等借助 LS-DYNA 三维有限元计算软件, 建立三维数值模型, 从桥墩混凝土强度、配筋率、船舶行驶速度等方面分析主要影响因子对桥墩撞击的具体作用规律<sup>[3]</sup>。

然而, 针对库区弯曲桥区河段的特殊性, 现有研究对洪水期复杂水动力条件下船舶航行安全性的影响分析仍显不足。李大鸣等虽以二维非恒定流基本控制方程为理论基础, 采用有限体积法, 建立了洪水演进数学模型, 但缺乏对桥区水域船舶操纵性响应的动态耦合分析<sup>[4]</sup>; 张秀凤等在船舶操纵模拟器上实施大型船舶通航安全的模拟试验, 并在通航安全方面提出了合理化建议, 但未揭示弯道通视影响与船舶会遇风险<sup>[5]</sup>。

鉴于此，本文以枣园黄河大桥为研究对象，开展枯水期至洪水期的航道通航影响分析。研究成果不仅可为该桥的工程建设提供通航安全技术支撑，更有望为类似库区弯曲河段跨河桥梁的通航影响评价体系完善提供实践参考，推动内河航运与桥梁工程的协同发展。

## 2 工程概况

枣园黄河大桥为甘肃永靖至大河家（积石山）高速公路控制性工程。桥梁横跨黄河，位于临夏州永靖县太极镇牛鼻子拐黄河峡谷弯道上，桥轴线法线方向与水流流向间的夹角为 $10^\circ$ （图1）。桥位下距盐锅峡电站约16.6km，上距刘家峡电站约14.5km。桥梁全长500m，桥面总宽28.5m，跨径布置采用（40+300+65+54+41）m。大桥主跨采用300m独塔钢箱-混凝土组合梁斜拉桥，仅有主跨2#墩位于航道内（图2）。桥区河段通航参数见表1。

## 3 通航净空尺度复核

### 3.1 通航净空高度分析

枣园黄河大桥位于盐锅峡水电站库区内，桥位与盐锅峡水电站相距16.6km，之间没有较大的支流汇入，集水面积相差较小，因此设计洪水成果可直接移用盐锅峡电站设计洪水成果（表2）。

根据水文计算确定的设计最高通航水位1619.18m（表1）和大桥立面布置图（图2），图解量得通航水域范围内最低梁底高程为1689.92m。通航净空高度为 $1689.92-1619.18=70.74\text{m}$ ，满足《内河通航标准》中V级航道净高不小于8m的要求。

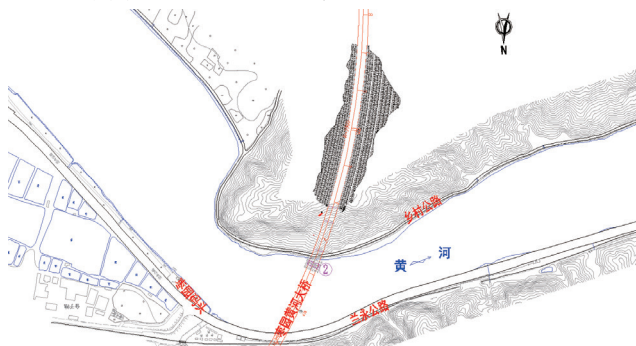


图1 工程河段河势图

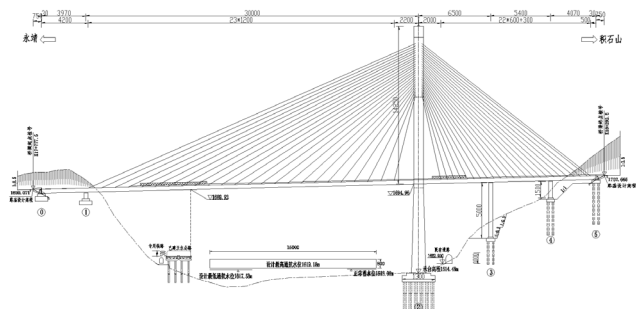


图2 桥型立面布置图

表1 桥区河段通航参数表

项目	参数
航道等级	V级
设计代表船型	300t级货船: 55.0m×8.6m×1.3m (长×宽×设计吃水)
现状船型	54客位旅游客船: 21.0m×4.0m×1.0m (长×宽×型深)
最高通航水位	1619.18m (5年一遇)
最低通航水位	1617.58m (盐锅峡电站死水位)

表2 受上游水库调蓄影响的盐锅峡电站设计洪水成果

频率	1%	2%	33%	5%	10%	20%	50%
流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	4290	4290	4290	4290	4290	4060	3030

### 3.2 通航净空宽度分析

为详尽分析桥区通航水流条件，本次采用SMS软件进行数值模拟计算。计算工况选择设计最高通航流量 $4060\text{m}^3/\text{s}$ （五年一遇，对应水位1619.18m）和两年一遇洪水流量 $3030\text{m}^3/\text{s}$ （对应水位1617.80m）两种洪水工况。

由于枣园黄河大桥位于弯道，横向流速较大，经计算桥位上游3倍船长范围内的最大横向流速为 $0.75\text{m}/\text{s}$ 。根据《内河通航标准》表C.0.3，当横向流速为 $0.75\text{m}/\text{s}$ 时，V级航道单向通航净宽增加值为35m，双向增加值为70m。因此大桥单孔双向最小通航净宽为 $70+80=150\text{m}$ 。大桥通航孔沿2#主墩边线及兰永公路桥墩边线的有效跨度为193.2m，紊流宽度6.05m，实际通航净宽 $= (193.2-6.05) \times \cos 10^\circ = 184.31\text{m} >$ 最小通航净宽计算值150m（图3）。因此大桥通航净宽满足单孔双向通航要求。

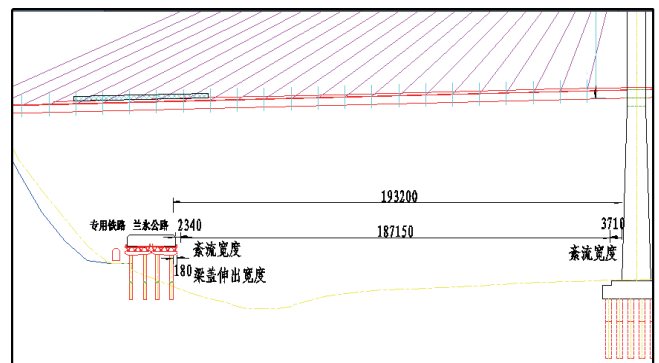


图3 通航净宽计算示意图

## 4 航道通航条件影响分析

枣园黄河大桥位于库区弯曲桥区河段，本文在分析

建桥对航道的通航条件影响时，将考虑以下几个方面：首先，大桥位于库区河段，需要至少考虑枯水期电站蓄水以及洪水期电站泄洪两种情况；其次，大桥位于弯曲河段，需要充分考虑洪水期横流影响、通视性限制以及会船风险。

#### 4.1 枯水期

在枯水期，下游盐锅峡电站保持正常蓄水位运行，库区水流流速接近于零，此时可通过实测船舶航迹线分析建桥对航道的通航条件影响。工程河段目前为区间通航，现状船型为 54 客位旅游客船，船型尺度：21.0m×4.0m×1.0m（长×宽×型深）。本研究于 2022 年 12 月对该客船的航迹线进行了实测（图 4）。工程河段目前有两条旅游航线：

航线 1：枣园码头→上游掉头→下游 2.4km 掉头→枣园码头；

航线 2：枣园码头→下游 2.4km 掉头→枣园码头。

客船在穿越桥轴线时，偏向河道中心左岸航行。两条航线均是上行航线更靠近大桥 2# 桥墩，与 2# 桥墩边缘的最小间距为 45.1m，大于船舶宽度的 10 倍。此外，枯水期库区水流流速极小。因此，在枯水期，船舶碰撞桥墩的概率极小，建桥对现行航线和航道通航条件影响较小。

#### 4.2 中水期

在中水期，本研究采用美国 AASHTO 规范船撞桥概率模型分析中水流量 1500m<sup>3</sup>/s 时的大桥年撞损概率。设计代表船型为 300 吨级货船。

(1) 桥墩年撞击频率  $F_{imp}$  按以下公式计算：

$$F_{imp} = NP_A P_C$$

式中： $N$  为分类船舶年预测通航量； $P_A$  为船舶偏航概率； $P_C$  为船舶与桥墩撞击的几何概率。

(2) 参照美国指导规范，船舶偏航概率  $P_A$  为：

$$P_A = (BR)R_B R_C R_{XC} R_D$$

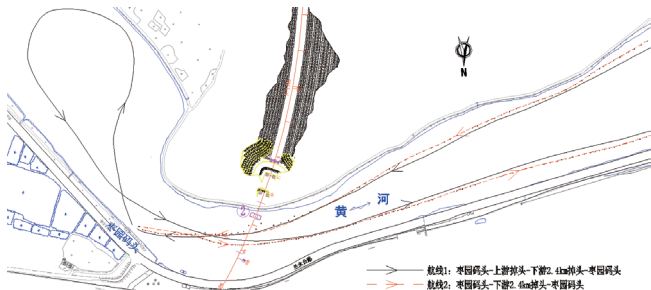


图 4 工程河段实测船舶航迹线

式中： $BR$  为船舶偏离航线的基本发生率，对轮船取  $BR=0.6 \times 10^{-4}$ ； $R_B$  为桥位修正系数，大桥位于转向（弯道）水域时  $R_B=1.0 + \theta/45^\circ$ ， $\theta$  为弯道转角  $66.5^\circ$ ； $R_C$  为平行于航向的水流修正系数，与平行于航向的水流流速

有关， $R_C=(1+v_c/19)$ ，其中  $v_c$  为平行于航线的流速 1.01m/s，由于枣园黄河大桥涉河的 2# 桥墩位于凸岸缓流区，因此该区域流速较小； $R_{XC}$  为垂直于航向的水流修正系数，与垂直于航向的水流流速有关， $R_{XC}=1.0+0.54v_{XC}$ ， $v_{XC}$  为垂直于航线的流速 0.54m/s； $R_D$  为航行密度修正系数，与过桥船舶密度有关，低密度时  $R_D=1.0$ 。

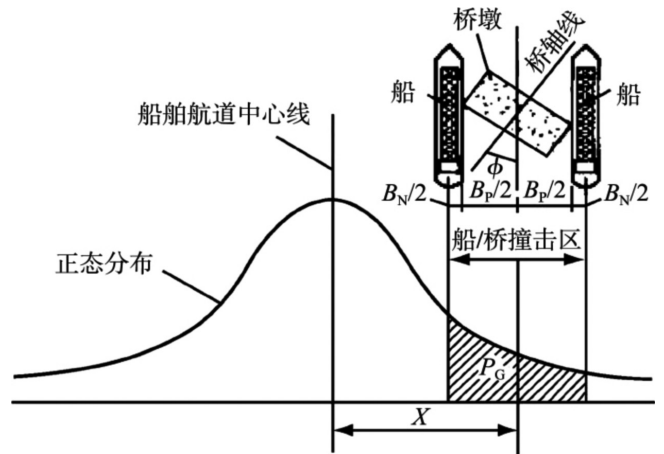


图 5 船舶碰撞桥墩的几何概率

(3) 几何概率  $P_C$ 。统计资料表明船舶撞击桥墩的几何概率密度为正态分布，取  $P_C$  为正态分布函数，标准差为设计船长，以航道中心线为正态曲线的中值位置，对应的船舶撞击区以下的面积即为  $P_C$ <sup>[6]</sup>。船舶撞击桥墩的几何概率见图 5。

(4) 参照美国指导规范，各桥墩的年撞损概率为：

$$AF = NP_A P_C P_C$$

式中：撞损率  $P_C$  取决于船撞抗力  $H$  和船舶最大撞冲击力  $P$  的比值，其中  $H$  取大桥设计值， $P=1.2 \times 10^5 V \sqrt{M}$ ，其中  $M$  为船只载重质量， $V$  为船只撞击速度。

根据水运量预测结果，2030 年桥区年通航量为 1500 艘次/年。经计算，通航孔 2# 桥墩的年撞损概率为  $0.93 \times 10^{-4}$ /年，小于容许概率  $10^{-4}$ /年。

#### 4.3 洪水期

在洪水期，本研究采用基于 V.Dragon-4000 型大型船舶操纵模拟器的船舶通航安全模拟试验分析桥区河段最不利工况（表 3，5 年一遇流量  $Q=4060\text{m}^3/\text{s}$ ）下的航道通航条件，设计代表船型为 300 吨级货船。

表 3 通航安全模拟试验工况（ $Q=4060\text{m}^3/\text{s}$ ）

序号	航向	载态	风向	风力
1	上行、下行	重载	西北	4 级
2	上行、下行	重载	西北	6 级
3	上行、下行	重载	西南	4 级
4	上行、下行	重载	西南	6 级
5	同时上下行	重载	西南	4 级