



# 黄河上游典型崩岸碍航河段航道整治

于广年

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 针对黄河上游河段堤防或护岸崩塌、后退导致河道放宽、航槽淤积问题, 进行了崩岸碍航河段航道整治方案研究。采用二维水流数学模型, 计算黄河黑峡滩河段崩岸前后航槽内水动力条件变化, 并对不同航道整治方案进行分析。结果表明: 1) 优良河段因崩岸或采砂等因素导致河床形态突变前航槽内水流条件(流速、流态等)改变, 可为航道整治方案实施后航槽内通航水流条件提供重要参考。2) 根据工程实施后效果观测, 利用整治工程适当调整中、枯水的河宽, 使挖槽内流速大小接近崩岸前流速, 对维持挖槽稳定十分有效。

**关键词:** 崩岸碍航河段; 分流比; 航道整治

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0111-05

## Waterway regulation for typical bank collapse obstructing reach in the upper Yellow River

YU Guang-nian

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T,

Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** In view of the collapse and retreat of the embankment or revetment in the upper reaches of the Yellow River, which leads to the widening of the river channel and the siltation of the waterway, a waterway regulation plan for bank collapse obstructing reach is studied. A two-dimensional mathematical model of water flow is used to calculate the changes in hydrodynamic conditions in the navigation channel before and after the bank collapse in the Heixiatan section of the Yellow River, and the different channel regulation schemes are analyzed. The results show that: 1) The flow conditions(velocity, flow pattern, etc.) in the navigable channel before the river bed morphology changes due to bank collapse or sand mining in the excellent river section can provide an important reference for the navigable flow conditions after implementation of the waterway regulation plan. 2) According to the observation of the effect after the implementation of the project, using the regulation project to appropriately adjust the width of the middle and low waters to make the flow velocity in the navigable channel close to the flow velocity before the bank collapse, is very effective in maintaining the stability of the navigable channel.

**Keywords:** bank collapse obstructing reach; split ratio; waterway regulation

河流堤防或护岸损毁后, 往往导致堤后自然河岸淘刷后退。尤其是山区河流, 汛期流量暴涨, 防护堤岸一旦崩塌, 在洪峰水流淘刷下, 自然岸线不断后退, 河道放宽, 洪峰过后航道出浅碍航。黄河上游青海段具有典型的山区河流特征, 近年来, 随着三江源生态保护和水土保持措施的进一

步实施, 黄河上游来流量明显增加<sup>[1-2]</sup>, 汛期护岸损毁时有发生。

黄河黑峡滩河段位于尼那电站下游约 27 km 处, 2014 年以前, 该河段中、枯水时为优良的单一窄深河段(图 1), 枯水河宽 100~130 m, 水深 2~5 m, 航槽内流速为 2~3 m/s, 通航条件优良

(图 2), 但 2014 年汛期左岸防洪堤水毁坍塌, 堤后自然河岸不断淘刷后退, 汛后水利部门在崩岸后边坡处修筑了新堤防, 2015 年测图(图 3, 虚线为原堤防位置)显示, 左岸侧岸线最大后退超过 100 m, 河道形态由窄深型转变为宽浅型。

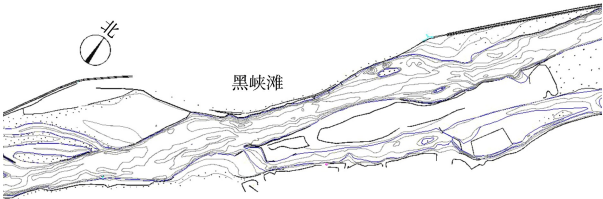


图 1 崩岸前黑峡滩河段河势

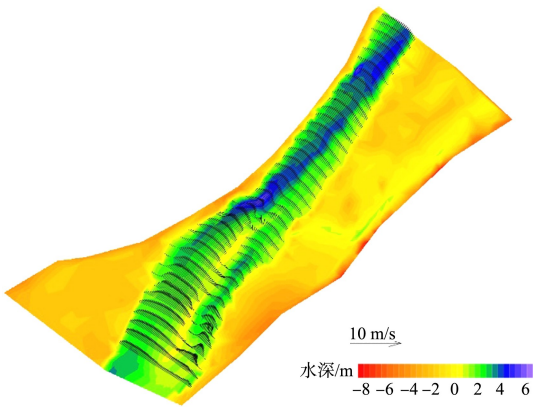


图 2 2014 年汛前黑峡滩河段水深及流场

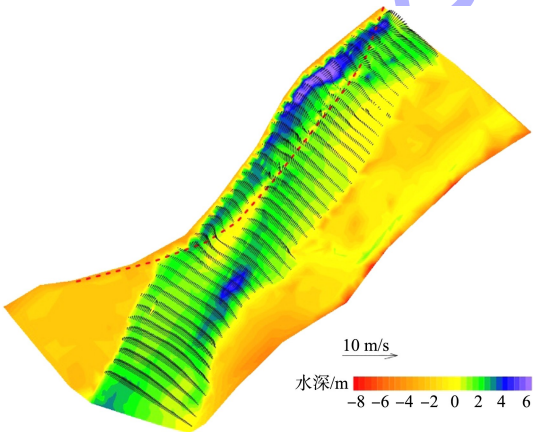


图 3 2015 年黑峡滩河段水深及流场

1 碍航分析

黑峡滩左岸淘刷后退, 原护岸抛石护脚及部分块石在河心形成狭长心滩, 将枯水河槽分为左右两汉, 心滩中部存在串沟, 中枯水流量下, 上心滩左右汉分流比约为 1:2, 下心滩左右汉分流比

约为 2:1, 两心滩间串沟由右向左分流(表 1)。原航槽由于水动力减弱, 泥沙淤积, 上心滩右汉分流比相对较大, 航道内流速略有降低, 航道水深可满足要求, 但下心滩流量仅为原来的 30%左右, 航道内沿程流速由崩岸前的 1.8~3.0 m/s 减小至 0.7~2.2 m/s(图 4), 航槽回淤严重, 出浅碍航。新形成的左汉河宽较小, 汉内水流湍急, 短丁坝附近局部流态恶劣, 加之原堤岸水毁后部分大块石散落在汉内, 航行条件较差, 无法作为通航汉道, 导致该河段断航。

表 1 不同流量各汉道分流比

汉道	分流比/%		
	380 m <sup>3</sup> /s	590 m <sup>3</sup> /s	800 m <sup>3</sup> /s
上-左	31	30	28
上-右	69	70	72
下-左	76	66	61
下-右	24	34	39

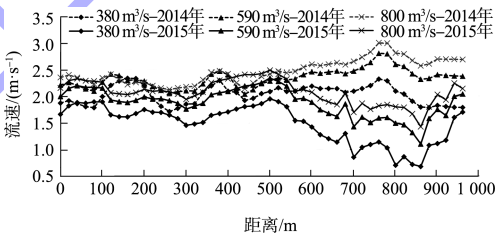


图 4 崩岸前后航槽内流速变化

2 数学模型的建立与验证

本河段在崩岸前为优良的单一窄深河段, 崩岸后河段放宽, 原航槽流速降低, 泥沙淤积, 出浅碍航, 由此确定本河段整治思路为利用整治工程缩窄崩岸后河宽, 束水攻沙, 使航槽内流速值尽量恢复至崩岸前, 因此, 建立了本河段二维水流数学模型<sup>[3-5]</sup>, 对崩岸前后及不同整治方案水流条件进行了计算。

2.1 数学模型的建立

模型上边界位于黑峡滩入口上游约 1 km, 采用流量控制; 下边界位于黑峡滩出口以下约 1.5 km, 采用水位控制。模拟河段长约 3.5 km。

模型计算网格采用正交曲线网, 直角坐标系下平面二维水流运动基本方程为:

水流连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{\partial(hu)}{\partial x}+\frac{\partial(hv)}{\partial y}=0$$

(1)

水流运动方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial Z}{\partial x}+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y}\right]-\frac{\tau_{bx}}{\rho h}+f_{\text{cor}}v$$

(2)

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial Z}{\partial y}+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x}+\frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y}\right]-\frac{\tau_{by}}{\rho h}-f_{\text{cor}}u$$

(3)

式中： $u$ 、 $v$  为沿  $x$ 、 $y$  方向速度分量； $h$  为水深； $f_{\text{cor}}$  为科氏力； $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yx}$  和  $\tau_{yy}$  为紊动应力。

2.2 模型验证

模型验证采用 2015 年 3—8 月实测水文资料。验证结果表明，沿程测点计算水位与天然水位差绝对值在 0.05 m 内(表 2)，各流量级断面垂线平均流速与天然实测分布趋势一致，流速差值在 5% 以内(图 5)，验证结果满足相关规范要求。

根据验证计算，本河段糙率取值范围为 0.027~0.045。

表 2 不同流量下沿程水位计算值与实测值偏差

流量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	水位计算值与实测值偏差/m			
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>
400	0.02	0.03	0.03	0.04
620	0.03	-0.01	-0.03	-0.02
800	-0.01	0.01	0.05	0.03

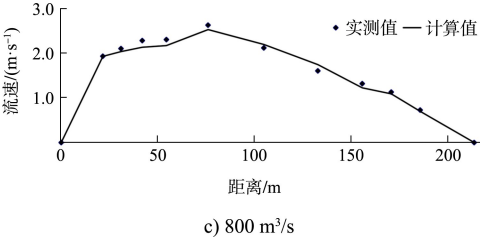
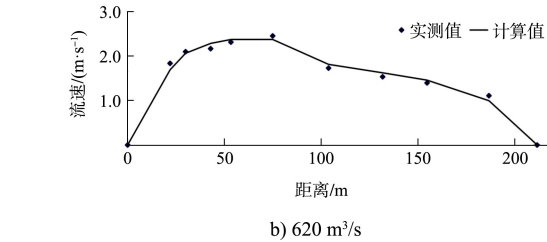
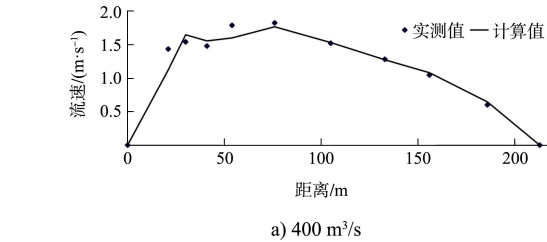


图 5 断面流速分布验证

3 航道整治方案

3.1 方案 1

3.1.1 工程布置

对航槽内水深不足处进行疏浚；左岸侧修筑丁、顺坝恢复塌岸前枯水河宽，束水攻沙，增加主槽流速，维持挖槽稳定，顺坝尽量利用原护岸抛石护脚，减少工程量<sup>[6]</sup>。方案 1 工程布置见图 6。

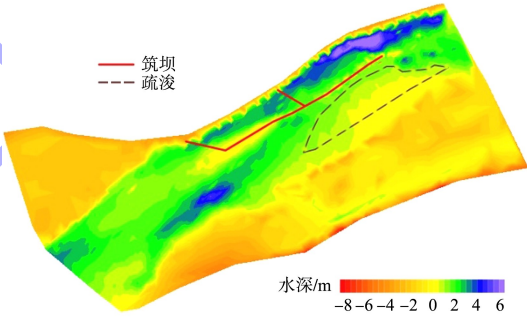


图 6 方案 1 工程布置

3.1.2 工程效果

工程后，上游河段受水位抬高影响流速降低，航槽内流速降低 0.3~0.4 m/s。上心滩段，枯水时水流全部从右汊通过，受水位抬高影响，航槽内流速仅略有增加，中、洪水时，坝顶漫流，右汊分流比较工程前增加 10%~15%，但受水位壅高影响，流速较工程前减小 0.1~0.2 m/s；下心滩段，枯水流量时水流全部从右汊通过，流速明显增加，航槽内流速增加 1~2 m/s，局部最大流速超过 4 m/s，中、洪水时，右汊分流比较工程前增加 40%~50%，航道内最大流速超过 4 m/s。见图 7、8。

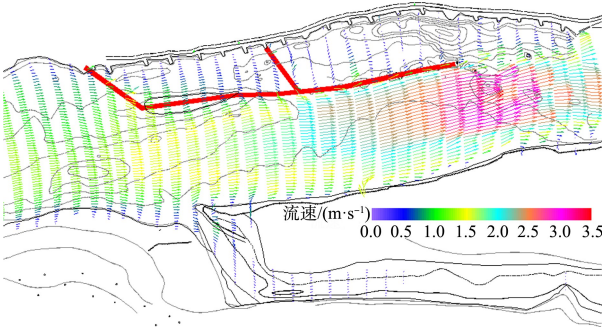


图 7 方案 1 流量 590 m³/s 时流场

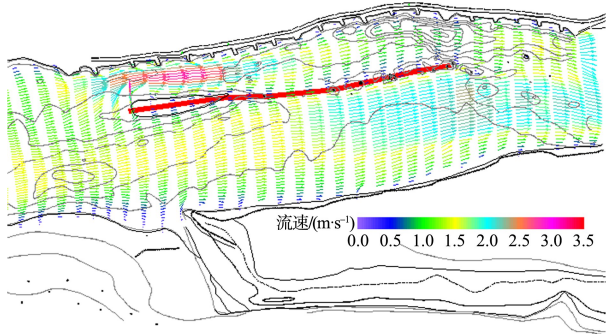


图 10 方案 2 流量 590 m³/s 时流场

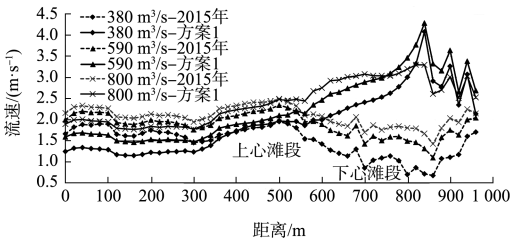


图 8 方案 1 工程前后航槽内流速变化

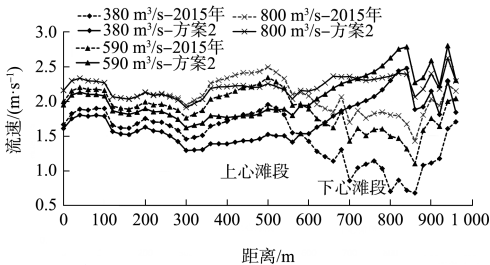


图 11 方案 2 工程前后航槽内流速变化

3.2 方案 2

3.2.1 工程布置

方案 2 取消了左汊丁坝，顺坝及挖槽与方案 1 相同，见图 9。

3.3 方案 3

3.3.1 工程布置

在方案 2 基础上，在上心滩左汊水深较小位置布置潜坝，坝顶高程 2 190 m(设计水位下 1 m)，坝顶宽度 4 m，见图 12。

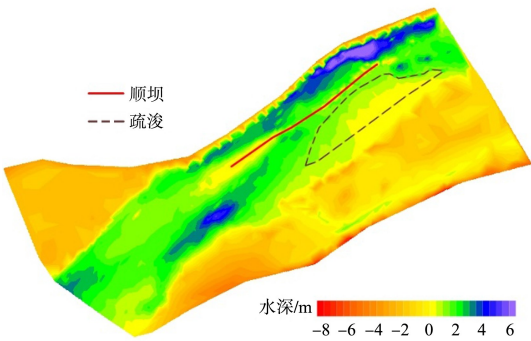


图 9 方案 2 工程布置

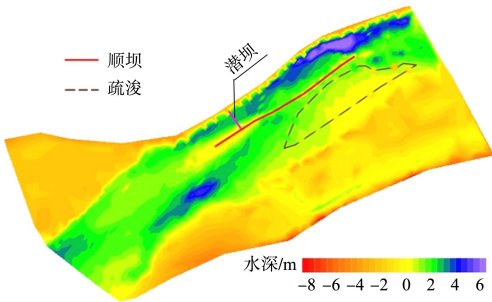


图 12 方案 3 工程布置

3.2.2 工程效果分析

与工程前比较，顺坝的修建将上下心滩连为整体，枯、中水流量下，左右两汊分流比为 40%、60%，原上心滩右汊分流比较工程前减小 10%，航槽内流速降低约 0.3 m/s；原下心滩右汊分流比较工程前增加约 35%，航槽内流速增加至 2.0~2.5 m/s，且水流流态较好；洪水流量下，原上心滩右汊分流比较工程前减小 5%，航槽内流速减小约 0.2 m/s；原下心滩右汊分流比较工程前增加约

3.3.2 工程效果分析

上心滩左汊修筑潜坝后，中、枯水流量下左汊分流比较方案 2 减小 6%左右，左右两汊分流比分别为 33%、67%，与原上心滩分汊段相比变化不大，受壅水影响，工程区上段及原上心滩段航槽内流速较工程前降低约 0.2 m/s；原下心滩段，工程后航槽内流速在 2~3 m/s，与崩岸前相当。洪



水流量下，研究河段航槽内流速在 2.0~2.5 m/s。整体来看，该方案挖槽内流速与崩岸前相差不大，可以较好地维持挖槽稳定。见图 13、14。

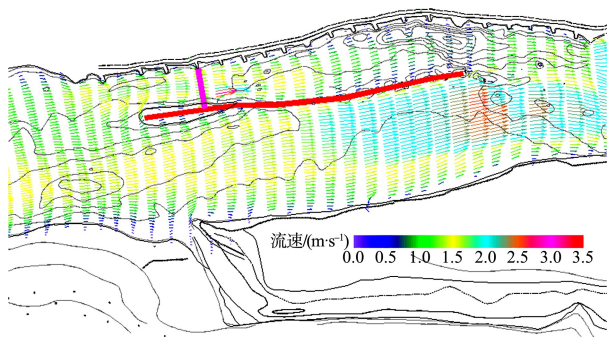


图 13 方案 3 流量 590 m³/s 时流场

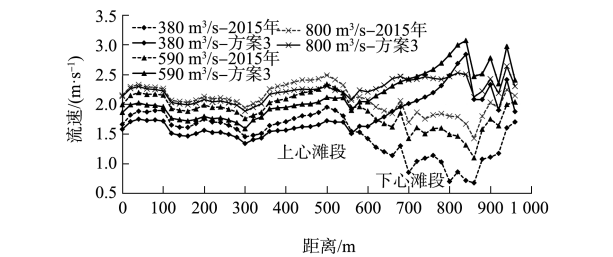


图 14 方案 3 工程前后航槽内流速变化

3.4 方案效果综合分析

受塌岸影响，工程河段河宽较 2014 年汛前最大增加约 100 m，方案 1 整治思路是利用整治工程将枯水河宽恢复至塌岸前宽度，但由于原主河槽淤积严重，工程后下心滩段局部比降超过 4‰，航

槽内最大流速超过 4 m/s(表 3)，在整治工程束水攻沙作用下，流速较大区域河床受冲刷下切后，流速会有所减小，但从该河段河床演变、河床质组成及以往整治经验看，分流比调整过大有可能对该河段河床整体形态产生较大影响，如右岸大面积侵蚀后退等；方案 2 左汉丁坝取消后，壅水现象明显减弱，最大水面比降由方案 1 的 4‰减小为 2.4‰，与工程前相当，顺坝的修建将上、下两心滩相连，各流量级右汉通航河道分流比基本保持在 60%左右(表 4)，挖槽内流速基本在 1.8~2.5 m/s，略小于崩岸前航槽内流速，但该方案原上心滩左汉内流速由原来的 2.0~2.5 m/s 增加至 3.0 m/s 左右，有可能使左汉河床进一步下切，而原上心滩右汉分流比减少，流速降低，可能导致航槽淤积；方案 3 在左汉增加锁坝调整两汉分流比，中、枯水流量下，原上心滩两汉分流比与工程前相近，右汉通航河道内流速在 1.8~3.0 m/s，挖槽内流速大小接近崩岸前，挖槽稳定性较好。

表 3 不同方案挖槽流速变化

流量/ (m³·s <sup>-1</sup> )	流速/(m·s <sup>-1</sup> )			
	崩岸前	方案 1	方案 2	方案 3
380	1.8~2.3	2.3~4.1	1.8~2.4	1.8~2.7
590	2.3~2.8	2.6~4.3	2.3~2.7	2.3~3.0
800	2.6~3.0	2.5~3.3	2.0~2.4	2.1~2.6

表 4 不同流量不同方案分流比变化

汉道		380 m³/s				590 m³/s				800 m³/s				%
		崩岸前	方案 1	方案 2	方案 3	崩岸前	方案 1	方案 2	方案 3	崩岸前	方案 1	方案 2	方案 3	
上心滩	左	31	0	39	32	30	15	38	32	28	28	33	30	
	右	69	100	61	68	70	85	62	68	72	72	67	70	
下心滩	左	76	0	40	34	66	17	39	33	61	61	42	39	
	右	24	100	60	66	34	83	61	67	39	39	58	61	

4 工程效果观测

本河段于 2015 年汛后按方案 3 实施了航道整治工程。工程实施后，经 5 a 的运行，航道保持畅通，未出现碍航现象。2019 年汛后对该河段进行测量(图 15)，通航河道 1.2 m 等深线贯通良好，最小通航流量航槽内水深满足要求，挖槽保持稳定，工程效果良好。

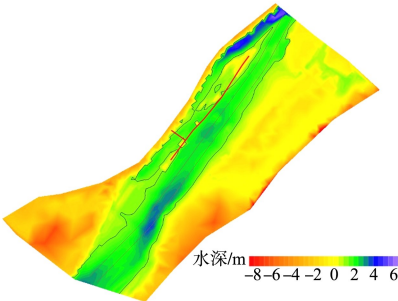


图 15 2019 年汛后水深