



平陆运河与沙坪河交汇河段 通航水流条件试验研究^{*}

喻 涛¹, 李 娅¹, 何俊辉², 杨胜发¹, 高成岩³

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 平陆运河集团有限公司, 广西 南宁 530200; 3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 平陆运河沿线支流众多且支干落差大, 支流突发洪水对运河通航水流条件影响较大。选取入汇角度大、支干江流比大、河底落差大的沙坪河入汇河段为研究对象, 采用 1:50 正态河工模型试验, 对沙坪河入汇河段通航水流条件进行系统试验研究。模型试验结果表明, 受支流突发较大洪水和支干河底落差较大影响, 运河航道内横向流速大且流态紊乱, 加之支流口上游铁路桥限制, 消能措施布置长度有限, 不能达到较好的消能效果。分析认为主要问题在于支流洪水汇入运河后运河横向流速较大, 因此治理方案主要解决“调顺水流+消能”的问题。在交汇处布置导流堤、透空消能墩、底部斜向透空式隔流堤, 在支流内采取消力池、消力槛等消能措施并进行系列方案对比试验, 发现优化方案Ⅲ的通航水流满足通航要求且不会对支流内铁路桥造成影响。

关键词: 平陆运河; 沙坪河; 底部斜向透空式隔流堤; 通航水流条件

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0093-08

Experimental research on navigable flow conditions in intersection of Pinglu Canal and Shaping River

YU Tao¹, LI Ya¹, HE Junhui², YANG Shengfa¹, GAO Chengyan³

(1. National Inland Waterway Rehabilitation Engineering and Technology ResearchCenter,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530200, China;

3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: There are many tributaries along Pinglu Canal with large branch drop, and the sudden flood of tributaries has a great impact on the navigable flow conditions of the canal. This paper selects Shaping River reach with large inlet angle, large branch and trunk confluence ratio and large river bottom drop as the research object, and adopts 1:50 normal river model test to carry out systematic experimental study on navigable flow conditions in this reach. The model test results show that due to the large sudden flood of tributaries and the large bottom drop of the branch river, the lateral flow velocity in the canal channel is large and the flow pattern is disordered. Coupled with the restriction of the railway bridge upstream of the tributary estuary, the arrangement length of the energy dissipation measures is limited, and the energy dissipation effect cannot be achieved. The analysis suggests that the main problem is that the lateral flow velocity of the canal is large after the tributary flood flows into the canal, so the treatment plan mainly solves the problem of “regulating water flow + energy dissipation”. Diversion levees, diversion piles and bottom inclined permeable separation levee are arranged at the interchanges, and energy dissipation measures such as deadling pool and dissipation sill are adopted in the tributaries. A series of scheme comparison

收稿日期: 2023-07-31

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700); 广西创新驱动发展专项基金项目(桂科 AA23023009)

作者简介: 喻涛 (1982—), 男, 博士, 教授, 从事港口及航道工程教学及科研。

tests are carried out. It is found that the navigable water flow under optimization scheme III meets the navigable requirements and does not affect the railway bridge in the tributaries.

Keywords: Pinglu Canal; Shaping River; bottom inclined permeable separation levee; navigable flow condition

干支交汇区及下游河道的水流条件普遍较差，需要通过合理的治理措施以改善其通航条件。影响交汇区通航水流条件的因素众多，包括支流汇入口布置形式、河道水文河势、汇合口周边涉水建筑物等。交汇口附近类似于船闸引航道，为改善其水流条件，目前国内外常采取的措施包括支流口内消能措施(丁潜坝挑流、消力池、消力槛等)、调整导流堤长度和堤头形式、堤身开孔引流、导流堤浮式结构、导流墩等^[1-7]。吴文亮等^[8]采用布设隔流堤、导流墩以及二维水流数学模型等综合手段研究并优化了船闸在河道缩窄时的通航水流条件；王熔荣等^[9]研究了导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用；孙爱萍等^[10]通过调整枢纽运行方式以及疏浚局部下游河道等综合措施改善招贤枢纽船闸上下游引航道及其口门区通航水流条件；郑红杰^[11]分析了隔流堤与导流墙夹角和上游引航道口门区水流条件之间的关

系；张羽等^[12]通过改变节制闸调度方式对船闸上游引航道及口门区通航水流的水力特性进行研究。由于不同河段具有不同的河势，汇合口千差万别，通航需考虑的因素亦有所差异。这也导致了目前国内汇合口通航研究无法实现以点代面、全面覆盖各个汇合河道，尤其在水流条件复杂、河势弯曲狭窄的河段研究稍显薄弱，故研究中需要根据实际情况展开分析。

1 工程概况

1.1 平陆运河及沙坪河概况

平陆运河是我国自京杭大运河后1 000多年来第一条运河，以发展航运为主，兼顾供水、灌溉、防洪、改善水生态环境等。其干流航道是由原西津水库沙坪河、旧州江、钦江以及分水岭开挖形成的人工运河。平陆运河、沙坪河流域和钦江流域的关系见图1。

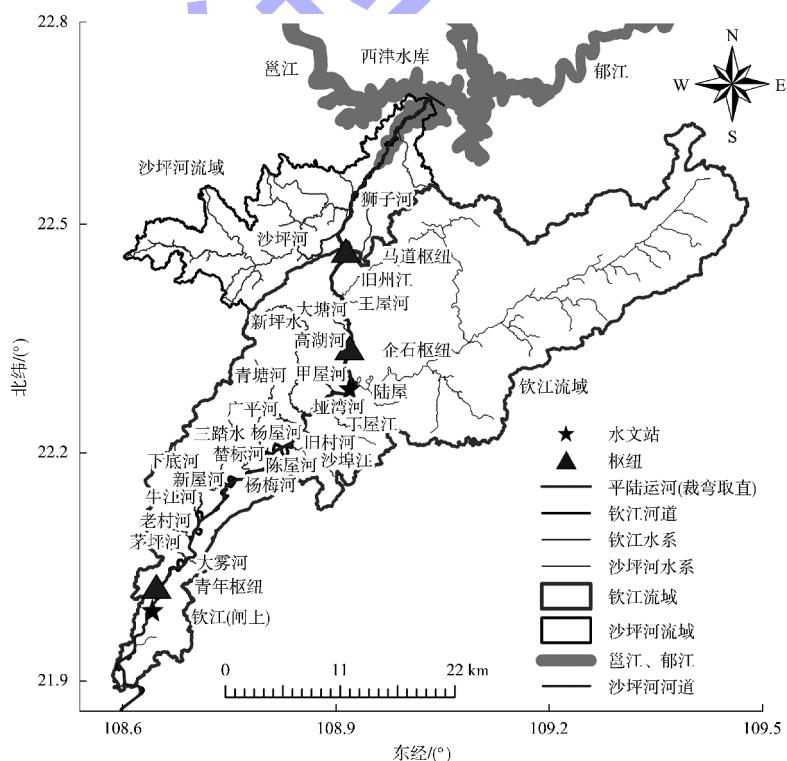


图1 平陆运河、沙坪河流域、钦江流域关系

整个干流航道长 135.0 km, 其中内河航道部分长 100.5 km, 由马道、企石和青年枢纽 3 个梯级库区构成。平陆运河与沙坪河交汇河段上距马道枢纽 8.7 km, 下距平塘江口(沙坪河郁江交汇口)21.0 km。沙坪河作为平陆运河支流在沙坪镇企石村汇入运河, 入汇角度约 40°且支流口上游有铁路桥等涉水建筑物。沙坪河集水面积 528.42 km², 干流长 81.52 km, 坡降 0.79‰。此河段运河干流 5 a 一遇流量 672 m³/s, 沙坪河支流 20 a 一遇流量 1 260 m³/s; 其支干高程落差较大, 为 5.3 m。沙坪河枯水期河段平均河宽 50 m, 水深 2 m, 河床比降约 0.4‰。运河航道底高程 52.7 m, 航道底宽 8 m, 两侧边坡坡比 1:2, 根据两岸地形设置不同高程、宽 3 m 的马道。

综上所述, 平陆运河与沙坪河交汇河段的支干落差 5.3 m, 入汇角与汇流比均较大, 造成交汇区通航条件复杂, 影响通航安全, 且受限于支流口上游铁路桥, 治理难度大。

1.2 通航标准

根据 JTS 180-2—2011《运河通航标准》6.2.3 节规定, 支流汇入口对应的运河航道内横向流速不应大于 0.3 m/s^[13]。

本文采用河工模型对平陆运河与沙坪河交汇河段通航水流条件开展试验研究, 通过在交汇处布设不同导流结构建筑物和支流段消能措施研究其对通航水流条件的影响, 分析不同方案组合对通航水流条件的改善效果。

2 模型建立与验证

模型范围干流段共长 2.5 km, 其中支流口上游侧长 1.5 km, 下游侧长 1.0 km; 支流段(原沙坪河干流)长 1.5 km。该范围能够合理分配进入模

型的流量; 进口有足够的长度和弯曲段, 让各时段进入试验段的水流得到充分调整; 出口较为顺直, 确保模型尾水流态的相似性。

采用比尺为 1:50 的正态定床模型。根据河工模型水流相似基本准则, 需满足几何、重力、阻力以及连续等相似条件, 由此可得其他相似比尺:

$$\lambda_v = \lambda_H^{1/2} = 7.07 \quad (1)$$

$$\lambda_r = \lambda_L / \lambda_v = 7.07 \quad (2)$$

$$\lambda_Q = \lambda_L \lambda_H \lambda_v = \lambda_L \lambda_H^{3/2} = 17.678 \quad (3)$$

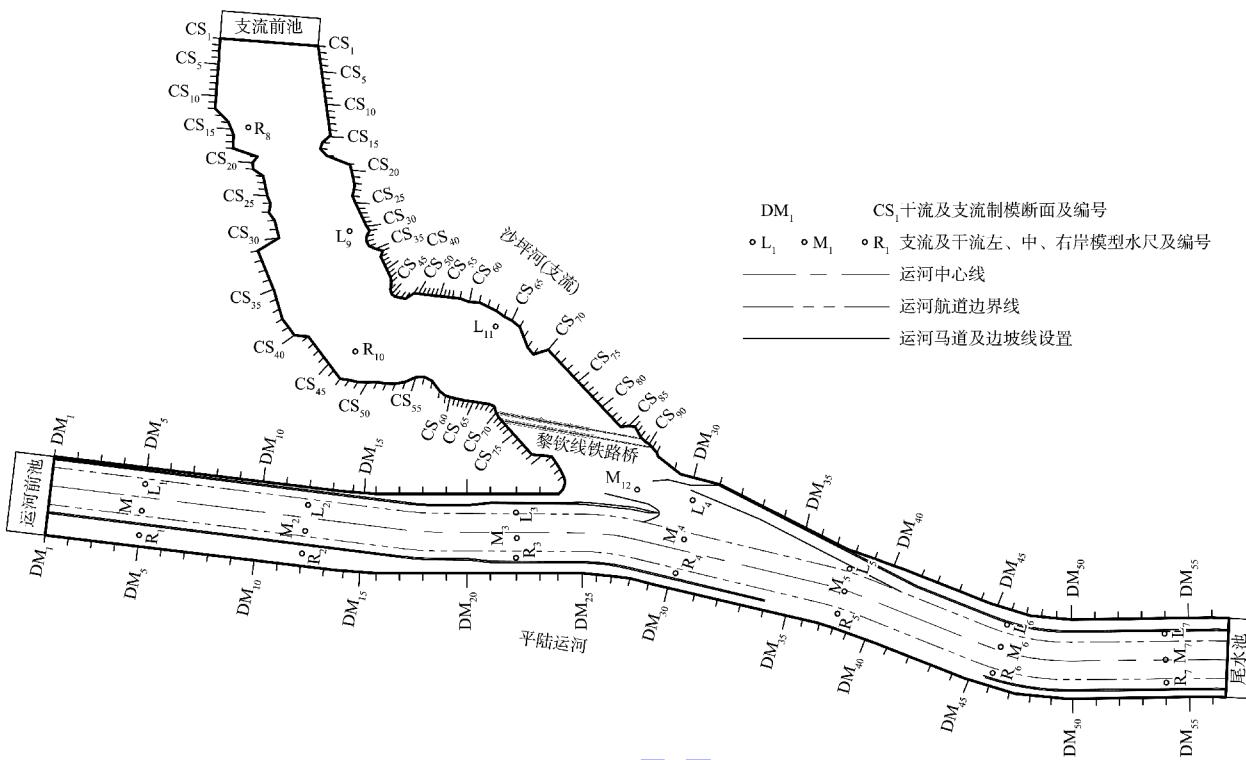
$$\lambda_n = \frac{\lambda_H^{2/3} (\lambda_H / \lambda_L)^{1/2}}{\lambda_v} = \lambda_H^{2/3} / \lambda_L^{1/2} = 1.92 \quad (4)$$

式中: λ_L 为平面比尺, 取 50; λ_H 为垂直比尺, 取 50; λ_v 为流速比尺; λ_Q 为流量比尺; λ_n 为糙率比尺。

在设计水位情况下, 支流深泓最小水深 1.8 m, 则模型最小水深 3.6 cm, 符合避免表面张力影响对模型最小水深 1.5 cm 的要求。根据现场调研资料, 枯水期支流流速一般为 0.2~0.5 m/s, 最小水深约 3.0 m, 则模型最小雷诺数 $Re_m = 1200$; 由此估算, 洪水期模型水流满足进入紊流状态($Re > 1000$)的要求, 本次研究水文组合均为支流发生洪水工况, 因此可以认为模型满足紊流状态相似要求。

模型制作依据的主要地形资料是 2022 年 9 月实测 1:1 000 河道地形图(2000 国家大地坐标系、1985 国家高程基准), 同时参考 2021 年 11 月 1:2 000 地形测图。

模型共布置 148 个断面, 其中支流布置断面 84 个, 间距 15 m; 干流布置断面 56 个, 间距 50 m(干支交汇处及弯道段干流断面间距做加密处理); 干支交汇处布置断面 8 个, 间距根据地形特点设置, 平均约 18 m。沙坪河汇入口模型布置见图 2。



本河段缺少实测流速、流向资料，只有 2022 年 8 月实测沙坪河水面线成果。因此，模型试验主要进行水面线的验证。原型在沙坪河支流左岸布置 4 把水尺进行瞬时水面线观测，水位验证成果见表 1。

表 1 左岸水位验证成果

水尺编号	原型水位/m	模型水位/m	偏差/m
SZ ₁	60.860	60.895	0.035
SZ ₂	60.860	60.883	0.023
SZ ₃	60.850	60.876	0.026
SZ ₄	60.840	60.846	0.006

对比原型、模型水面线可知，二者水面线吻合较好，水面比降一致性程度较高。从数值对比看出，水位偏差洪水偏差均在 ± 0.05 m 内，未超过 ± 0.10 m。水位验证结果满足《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》^[14]规定的误差要求。模型试验水位验证结果满足定床河工模型的相似性要求，表明模型与原型的阻力基本相似，可进行水流特性、工程方案等下一步试验。

3 治理方案及效果分析

3.1 控制工况

从对通航条件最不利角度出发，支流流量选取 20 a 一遇洪水流量进行模拟；干流流量按 5 a 一遇洪水标准选取；尾水位受下游西津枢纽蓄水调度运行影响，取高水位 63.45 和 60.60 m 两种水文组合。控制工况见表 2。流速采用西南水运工程科学研究所研制的 XKVMS 系列表面流场测量系统测量，水文采用重庆北碚水文仪器厂生产的水文测针测量，可满足模型测量精度要求。

表 2 控制工况

控制工况	支流流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	干流流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	尾水位/ m	备注
1	1 260	672	63.45	高水位
2	1 260	672	60.60	低水位

3.2 原方案试验

3.2.1 原方案布置

为减弱支流洪水对运河通航的影响，原方案支流段从原泥面 58.0 m 放坡至航道底高程 52.7 m，

坡比为4%, 并拓宽支流口与运河平顺衔接; 干支交汇处布置导流堤, 顶高程从交汇处65.0 m逐渐放坡至运河河底高程52.7 m, 坡比6.7%, 见图3。

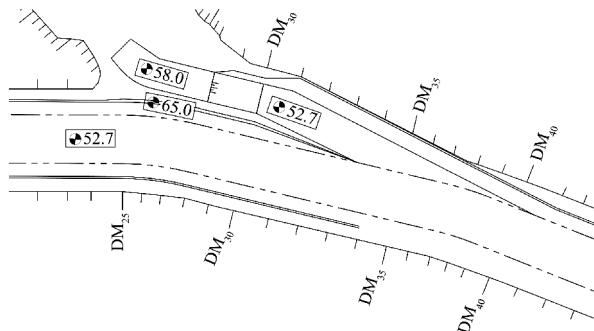


图3 原方案布置 (单位: m)

3.2.2 原方案效果分析

沙坪河支流流量较大, 河道地形狭窄, 起伏变化大, 导致汇入口河段航道内的流速大、流态紊乱。试验结果表明, 流速从 DM_{34} 断面开始至 DM_{40} 断面逐渐增大, 并且越靠近航道左边界线其流速越大, 见图4。

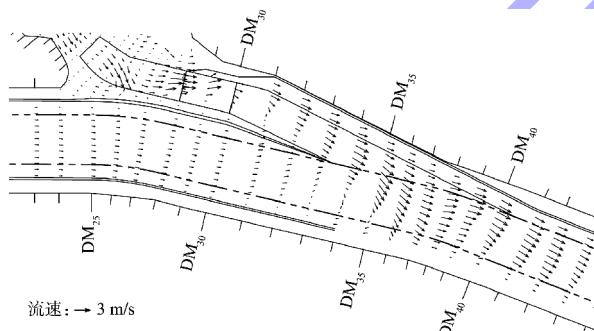


图4 原方案工况1航道流速分布

支干流河道高程比降大, 汇流比大于1, 支流水流流速变快且与航道中心线夹角大。横向流速比较大, 不满足规范要求。航道范围内最大横向流速1.76 m/s, 横向流速分布超标区域见图5。

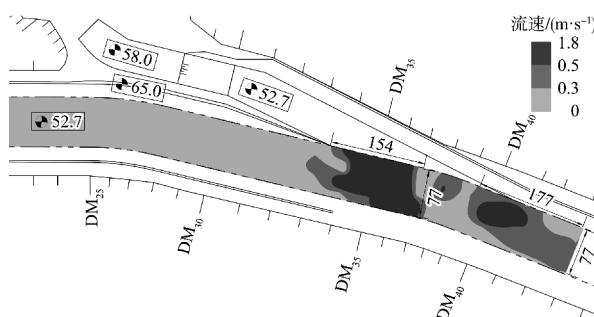


图5 原方案工况1航道横向流速分布 (单位: m)

原方案下通航水流条件不满足要求, 因支流流量大、流速大, 干流流量小、水面宽、流速小, 导致支干流流速梯度大, 航道中心线与主流夹角较大, 应对该方案进行优化。

3.3 优化方案I试验

3.3.1 优化方案I布置

结合原方案成果, 采取进一步优化措施: 缩短交汇处导流堤的长度, 使支干水流尽早掺混以减小交汇区横向流速梯度; 优化消能措施进一步消能。

优化方案I如图6所示。1) 对支流段 $CS_{84} \sim CS_{92}$ 和 $DM_{28} \sim DM_{30}$ 区域分两部分进行开挖。第1部分为控制点1 236, 高程52.7 m; 第2部分为控制点3456, 高程49.7 m。2) 支流左岸边坡线修改, $DM_{30} \sim DM_{33}$ 的边坡线衔接处由原方案的 DM_{31} 为拐点, 改为 $DM_{30} \sim DM_{33}$ 平顺衔接; 3) 干支交汇处修改, 干支流交汇处导流堤由 DM_{34} 缩短至 DM_{29} , 前端设计为弧形缓坡; 4) $DM_{29} \sim DM_{35}$ 干支交汇处设置透空消能墩, 由18个消能墩组成, 消能墩平面为长方形(长×宽为3.0 m×2.5 m)和2个半圆弧(直径2.5 m), 消能墩间距11.5 m、顶部高程64.2 m, 见图7。

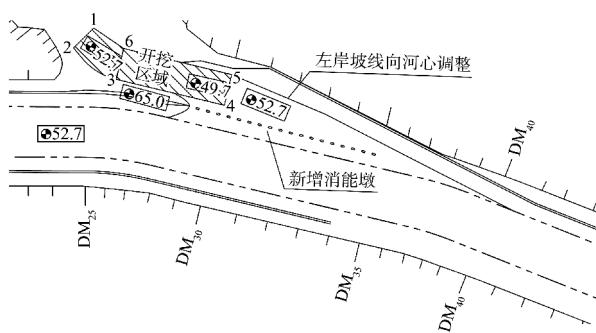


图6 优化方案I布置 (单位: m)

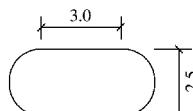


图7 消能墩结构尺寸 (单位: m)

3.3.2 优化方案I效果分析

试验结果表明, 支流内开挖使得航道内流速

有很大改善，整体流速减小，干支交汇区无复杂水流现象，见图 8。

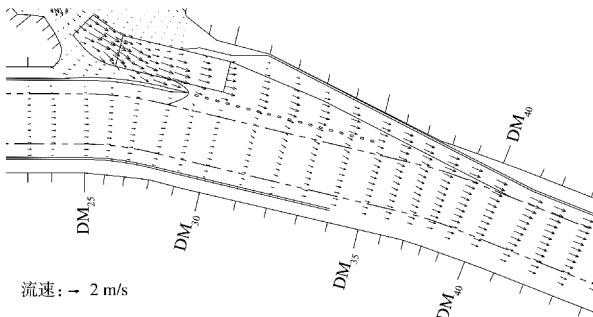


图 8 优化方案Ⅰ工况 1 航道流速分布

消能墩的布置使得航道内横向流速分布有较大改善，但仍有部分区域超出流速限值。在航道范围内，最大横向流速为 0.52 m/s，横向流速超标区域分布见图 9。

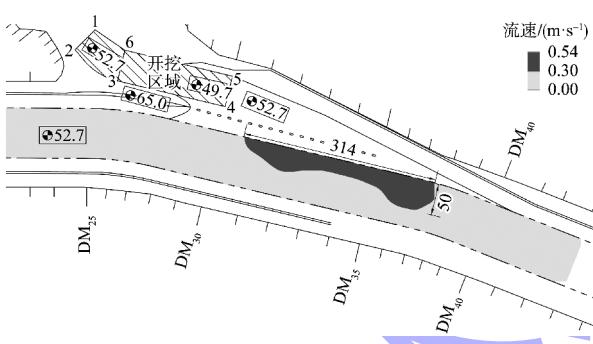


图 9 优化方案Ⅰ工况 1 航道横向流速分布 (单位: m)

综上所述，优化方案Ⅰ采用开挖支流和交汇区消能墩结合的方法，但该方案的通航水流条件仍然不能满足通航标准，由此判断消能墩只能起到一定的导流及消能作用，但对干支流交汇区水面流向改变作用不大，无法有效改善通航条件。

3.4 优化方案Ⅱ试验

3.4.1 优化方案Ⅱ布置

将透空消能墩改为底部斜向透空式隔流堤，距离航道边界约 20 m，开孔方向与运河主流方向基本一致，总长 317 m，顶高程 64.2 m，上部实

体隔流堤高 5.5 m，下部透空部分孔高 5.5 m，孔宽 6.5 m，孔心距 11.5 m，见图 10、11。

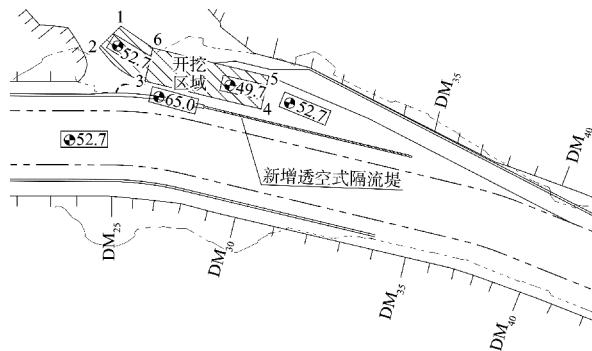


图 10 优化方案Ⅱ布置 (单位: m)

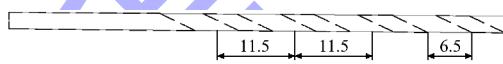


图 11 透空式导流堤局部结构尺寸 (单位: m)

3.4.2 优化方案Ⅱ效果分析

试验结果表明，将透空消能墩改为底部斜向透空式隔流堤后，效果尤为明显。河道内水流整体流速方向大多与航道中心线持平，仅在断面 DM_{33}、DM_{36} 和 DM_{38} 处出现较小的夹角，水流的整体流速分布均匀，具有良好的通航条件，航道范围内最大横向流速为 0.21 m/s，见图 12、13。

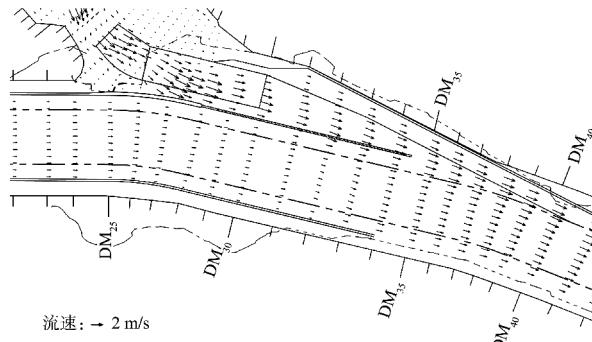


图 12 优化方案Ⅱ工况 1 航道流速分布

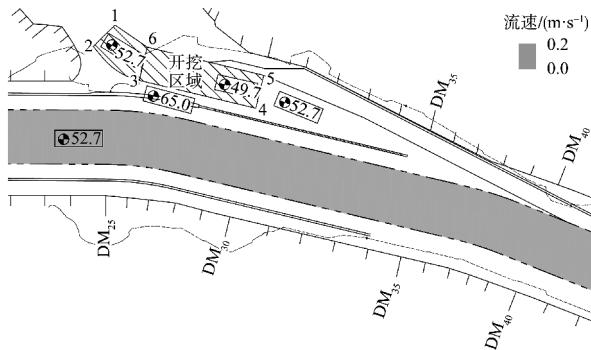


图 13 优化方案Ⅱ工况1航道横向流速分布
(单位: m)

优化方案Ⅱ在保持其他条件不变的情况下,底部斜向透空式隔流堤对航道内的水流流速及流向有明显改善,横向流速均小于规范值,达到了通航标准。但该方案底部斜向透空式隔流堤的长度较长,容易阻挡上游漂浮物,会对支流河道行洪产生一定影响。加之支流口内规划有黎钦线铁路桥,导致开挖坡顶线需下移,故本方案中开挖1、2、3、6区域的措施无法实施。

3.5 优化方案Ⅲ试验

3.5.1 优化方案Ⅲ布置

结合优化方案Ⅱ成果、存在的问题及开挖线调整后的限制,对治理方案进一步优化:缩短底部斜向透空式导流堤长度;调整开挖区域,利用台阶消能及调整台阶的布置方向使支干流尽早掺混。优化方案见图14、15。1)以开挖顶坡线为控制断面向下游开挖,一级消力池和两级台阶消能,其中消力池底高程53.5 m,消力池尾槛高程56.5 m,两级台阶高程分别为53.5和51.0 m;消力池底高程49.7 m。且台阶呈斜向布置,以引导水流逐渐汇入运河。2)运河DM₂₂~DM₄₂和长消力池前一定区域进行开挖底高程50.0 m处理。3)干支交汇处横梗缩短约90 m,底部斜向透空式隔流堤长180 m,上接横梗末端,相较优化方案Ⅱ上提220 m。

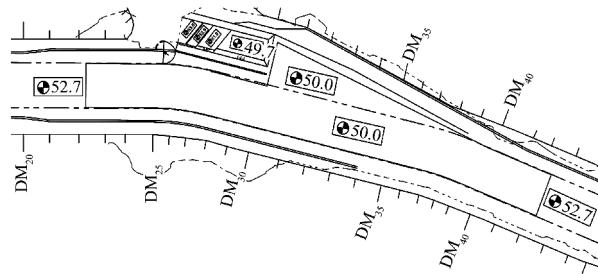


图 14 优化方案Ⅲ布置 (单位: m)

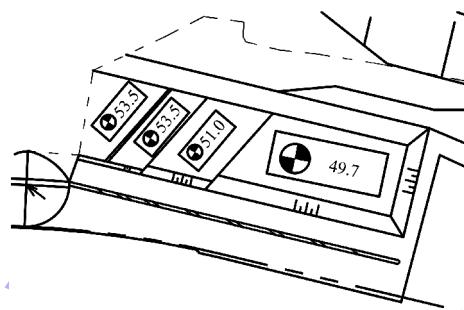
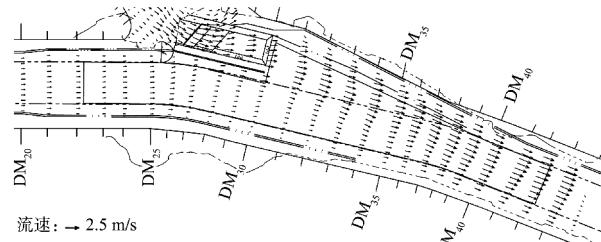


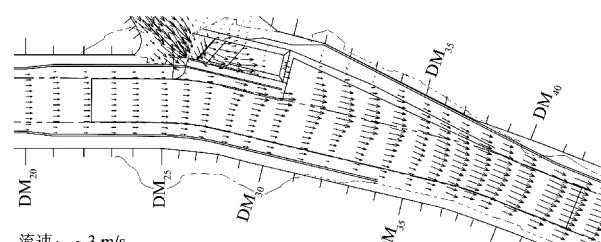
图 15 优化方案Ⅲ布置局部放大 (单位: m)

3.5.2 优化方案Ⅲ效果分析

该方案测量2组工况。试验结果表明,航道内水流的纵向流速相较于优化方案Ⅱ虽然有一定的变化,但航道中心线与主流的夹角较小,且航道内无复杂的水流流态,见图16。



a) 工况1



b) 工况2

图 16 优化方案Ⅲ航道流速分布

航道内的横向流速相对于原方案和优化方案Ⅱ有了很大改善。在航道范围内，最大横向流速为0.29 m/s，见图17。

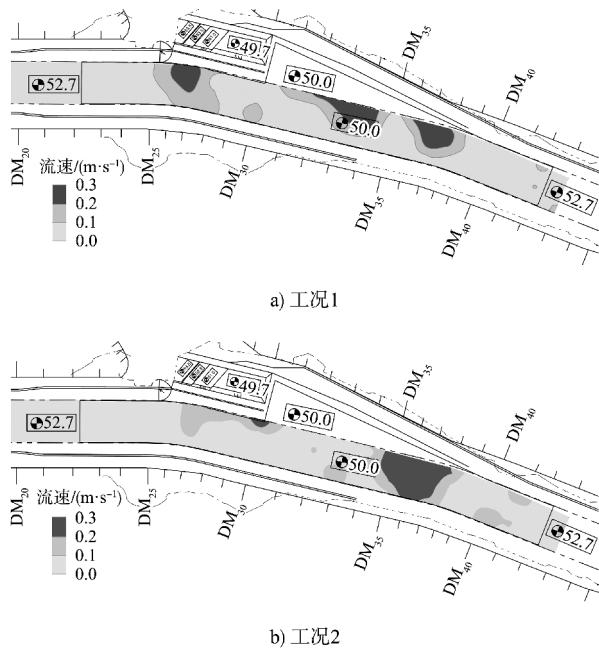


图 17 优化方案Ⅲ航道横向流速分布 (单位: m)

优化方案Ⅲ在交汇区底部斜向透空隔流堤大幅缩短的情况下，通过在支流口内布置消能措施并调整进入运河水流方向的措施，高水位时运河航道内横向流速虽然有一定幅度增大，但横流仍在规范限值内，通航水流条件满足安全通航要求；低水位时航道内横向流速虽然有部分区域超标，但超标范围不大，也基本满足安全通航要求。说明该方案下有良好的治理效果，且支流口工程量较小，优化方案Ⅲ更具可行性。

4 结论

1) 沙坪河支流入汇角度和支干河底落差均较大，控制工况支干汇流比约2:1，导致支干流流速梯度大、航道内横向流速大；且支流口内规划有铁路桥，限制消能措施布置范围，因此沙坪河支流口治理难度大。

2) 针对运河航道内横向流速大的问题，沙坪河汇入口通航问题采取“调顺水流+消能”相结合的思路对治理方案进行设计和改进。

3) 模型试验结果表明，导流堤、透空消能

墩、底部斜向透空式隔流堤在交汇处布置后可起到调顺水流和消能的作用，其中底部斜向透空式隔流堤能够起到支干水流逐渐掺混降低交汇区横向流速梯度的作用，治理效果最佳。

4) 支流口有限区域内布置消力池和斜向消力槛等消能措施后，水流流速减小的同时运河航道内水流也更加平顺，能有效改善其横流过大问题，通航水流满足通航要求且不会对支流内铁路桥造成影响。

参考文献：

- [1] 吴惠国,孙逸豪,史英标,等.曹娥江清风船闸引航道通航水流条件[J].水运工程,2022(4): 138-145.
- [2] 李顺超,李欢.山区河流弯曲分汊型河段航道整治方案[J].水运工程,2023(S1): 34-42.
- [3] 符蔚,王能,李志威,等.分汊河段船闸引航道整治试验研究[J].长江科学院院报,2019,36(8): 17-22.
- [4] 俞锋.北运河与凉水河汇合口水流特性及榆林庄闸枢纽布置研究[D].北京:清华大学,2016.
- [5] 李霞,侯极.入汇角60°时入汇口泥沙淤积试验研究[J].水电能源科学,2011,29(8): 75-76, 212.
- [6] GUAN M, ZHANG M, HAN C, et al. Research on the non-constant navigable water flow conditions of the river channel downstream of the navigable facilities of Baise water control project[C]// Proceedings of the 10th PIANC smart rivers conference on green waterways and sustainable navigations. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 1522-1534.
- [7] WANG R, SUN A, ZHANG S, et al. Improvement measures of navigable flow conditions in the Baihutan hydro-junction in Changshangjiang River, China [C]// Proceedings of the 10th PIANC smart rivers conference on green waterways and sustainable navigations. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 454-463.
- [8] 吴文亮,胡颖,邓涯,等.昌江新建丽阳枢纽上游引航道口门区通航水流条件研究[J].中国水运(下半月),2023,23(3): 56-58, 105.
- [9] 王熔荣,赵根生,张首元,等.导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用[J].水运工程,2023(3): 99-104.

(下转第156页)