

# 船闸引航道隔流墙物理模型试验优化研究

马兴佳, 康雄才

(湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011)

**摘要:** 引航道通航水流条件是航运安全的关键, 为研究不同形式隔流墙整流效果, 依托浔溪枢纽二线船闸工程, 建立定床物理模型通过测量表面流速分布评价船闸通航水流条件, 系统地对比研究全实体形式隔流墙、实体与多型透空隔流墙组合、排桩整流等方案的整流效果, 并提出排桩与桩基插板隔流墙组合方案。结果表明: 延长隔流墙长度可以降低横、纵向流速, 有效改善引航道水流条件; 合理布置浮式隔流结构可以满足引航道水流条件, 整流效果优于全实体隔流墙; 排桩方案的整流效果较佳; 排桩与桩基插板隔流墙组合方案综合浮式隔流结构、排桩整流技术的优势, 在保障整流效果的同时降低了工程造价。

**关键词:** 引航道; 通航水流条件; 隔流墙; 排桩整流技术; 物理模型试验

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0172-07

## Optimization on physical model test of separation wall in ship lock approach channel

MA Xingjia, KANG Xiongcai

(Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China)

**Abstract:** The navigable water flow conditions of the approach channel are crucial for shipping safety. To study the rectification effect of different types of separation walls, this paper relies on the Wuxi Hub second-line ship lock project to establish a fixed bed physical model. By measuring the surface flow velocity distribution, the navigational flow conditions of the ship lock is evaluated. The rectification effect of the full-solid separation wall, the combination of solid and multi-type permeable separation wall, and the row pile rectification and other schemes are systematically compared and studied. The combination scheme of row piles and pile foundation insertion plate separation wall is proposed. The results show that extending the length of separation wall can reduce the transverse and longitudinal flow velocity and improve the water flow conditions in the approach channel effectively. Reasonable arrangement of floating separation structure can meet the water flow conditions of the approach channel, and the rectification effect is better than that of full-solid separation wall. The rectification effect of pile row scheme is better. The combination scheme of pile row and pile inserted separation wall synthesizes the advantages of floating separation structure and pile row rectification technology, which can guarantee the rectification effect and reduce the project cost.

**Keywords:** approach channel; navigational flow condition; separation wall; pile rectification technology; physical model test

我国内河航道通航里程数高居世界首位<sup>[1]</sup>, 船闸是其中最常见的通航建筑物。引航道作为连接船闸与河道的纽带, 其通航水流条件是航运安

全关键影响因素。当通航水流条件较差时, 极易导致通航船舶(队)出现横漂、扭转以及失控现象, 无法保证船舶(队)通行与停靠安全。

收稿日期: 2023-10-30

作者简介: 马兴佳(1990—), 男, 工程师, 从事港口航道及船闸等水工建筑物建设工作。

影响引航道水流条件的因素众多,包括船闸总体布置形式与运行方式、河道河势以及周边基础设施布局等。改善引航道水流条件的常见方法包括:隔流墙(堤)外扩、透空式隔流结构及排桩整流技术等。隔流墙(堤)作为船闸引航道常用隔流结构,可以将引航道水域与通过枢纽的水流隔开,但在工程实际应用中存在施工工艺复杂、施工围堰造价较高、引航道内极易产生泥沙淤积等一系列问题,一味地通过外扩挡墙结构进行整流往往适得其反。浮式隔流结构多采用长条形围船的上下浮动,以达到维持水体表面流场稳定的目的<sup>[2]</sup>;透空式隔流结构稳定上部流场,且下部透空以保持底部水流流动<sup>[3]</sup>;排桩整流技术<sup>[4]</sup>则通过合理布置排桩结构,达到阻流、降低流速的目的,此类措施均可达到较好的整流效果,降低施工难度,提高工程效益。然而关于隔流结构布置形式的研究较少<sup>[5]</sup>,对排桩整流技术应用及整流效果的研究更为缺乏。

目前关于通航水流条件的研究主要采用定床物理模型试验方法。韩康等<sup>[6]</sup>通过定床物理模型试验指出采用河道疏浚方法并优化航线布置,可有效改善引航道水流条件;普晓刚等<sup>[7]</sup>、吴琼琳等<sup>[8]</sup>基于定床物理模型试验方法,研究桩基导流屏对通航水流条件的改善效果;李华勇等<sup>[9]</sup>通过定床物理模型试验研究新建船闸对已有船闸引航道及口门区通航水流条件的影响。定床物理模型试验可较好地研究整流技术对引航道水流条件的改善效果。此外对于实体隔流结构延长、实体隔流结构与浮式隔流结构相结合等方案的研究较少,对于桩基整流方案的研究则更为有限。因此,本文基于定床物理模型试验,选取典型案例分析不同形式隔流墙对通航水流条件的影响。

## 1 工程概况

浯溪枢纽位于湖南省永州市祁阳县,上游2.4 km

处为马头岭急弯,水流条件较为复杂。浯溪枢纽二线船闸(简称二线船闸)级别为Ⅲ级,按通航1 000吨级货船标准设计,有效尺寸为200 m×23 m×5.0 m(长×宽×门槛水深),通航净高为10 m。工程位于湘江干流,平均水深达10 m以上,为深水施工条件,隔流墙施工难度较大。如果隔流墙采用全实体形式,施工围堰范围较大,工程造价巨大。拟建的二线船闸与一线船闸上游分设引航道,下游共用口门区;船舶过闸上行采用曲进直出,下行采用曲进曲出。

二线船闸建设受一线船闸、地形河势的制约,其位置与轴线没有选择余地,应考虑优化隔流结构形式,以改善通航水流条件,同时降低施工难度和工程造价。因此选取二线船闸为典型案例,采用定床物理模型试验方法,研究引航道隔流墙对通航水流条件的影响。

## 2 模型设计与验证

枢纽物理模型基于弗劳德相似准则进行设计,将模型设计为几何比尺1:100的正态模型。根据枢纽河段的综合糙率0.024~0.036,设定模型综合糙率为0.011~0.017,采取水泥砂浆抹光抹面(糙率0.010~0.015)进行局部加糙,保证模型与原型糙率相似。

浯溪枢纽所在河段整体较为顺直,上游马头岭弯段凹岸处存在深潭,需考虑该特殊地形对模型制作与试验的影响;在充分考虑河段地形地势特点与模型试验目的的基础上,结合试验场地模型布置与供水等条件,选定此次物理模型范围由枢纽上游马头岭弯段起,至枢纽下游顺直河段处共约5 km。物理模型选取的上、下游长度可以保证枢纽水工建筑物范围及二线船闸引航道相应位置河道上游流态的相似性。基于枢纽现场实测资料,采用断面板法制作河道地形。模型试验整体布置及各水尺位置、名称见图1。

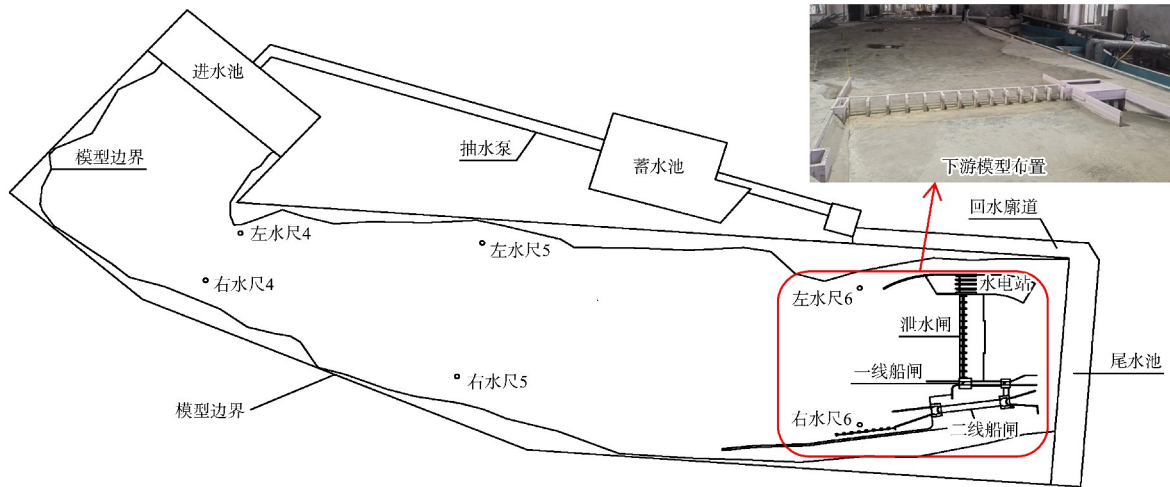


图1 模型试验整体布置

枢纽物理模型制作后进行验证以保证水流运动相似。依据实测枢纽中水水文资料(相应中水流量  $6\ 342.95\ \text{m}^3/\text{s}$ )，对物理模型水位、断面流速等进行验证。验证情况见图2、表1，可知模型水面线和断面流速分布与原型相似。

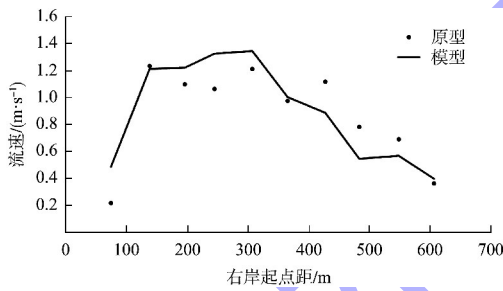


图2 涪溪枢纽模型试验流速验证

表1 涪溪枢纽模型试验水位验证

水尺名称	水位/m		
	模型	原型	差值
左水尺4	88.45	88.44	0.01
右水尺4	88.45	88.44	0.01
左水尺5	88.40	88.40	0.00
右水尺5	88.40	88.40	0.00
左水尺6	88.37	88.37	0.00
右水尺6	88.37	88.37	0.00

综合考虑上游最低通航水位，结合枢纽具体运行方式，上游来流  $7\ 550\ \text{m}^3/\text{s}$ 、坝前水位  $84.99\ \text{m}$  为最不利工况，此时上引航道水位最低，过流面

积最小。针对最不利工况进行试验及分析，研究二线船闸上游引航道通航水流条件。

### 3 判别标准

隔流墙布置可以分隔引航道内静水区与外侧河床动水流动，从而保障船舶通航靠泊安全，是船闸安全运行的关键。通过通航水流条件的好坏可以评价相应方案整流效果，从而保证船舶过闸安全。

船闸引航道表层流速是判断船闸通航水流条件的重要指标之一，在 GB 50139—2014《内河通航标准》<sup>[10]</sup> 和 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》<sup>[11]</sup> 中均做出了相关规定：引航道隔流和调顺段宜为静水区，制动段、停泊段水面最大流速纵向不应大于  $0.50\ \text{m/s}$ ，横向不应大于  $0.15\ \text{m/s}$ 。因此将水面最大流速作为判别通航水流条件的重要依据。

### 4 试验方案

#### 4.1 全实体隔流墙(方案1)

方案1上游引航道导航墙及隔流堤采用全实体形式，见图3。其中直线段导航墙  $130\ \text{m}$  保持不变，直线段上游实体隔流墙分别为  $40、80、120、160$  及  $220\ \text{m}$ ，形成对停泊段的掩护。为了解船闸引航道通航水流条件，对船闸上游引航道流场进行观测。

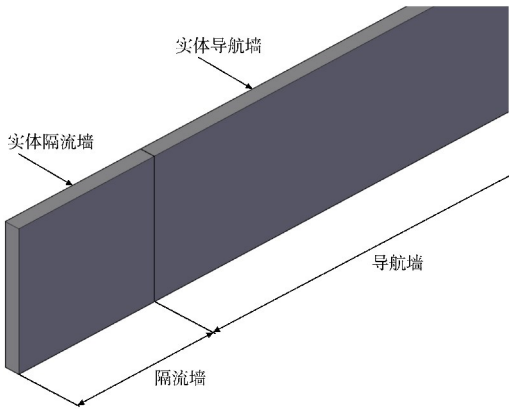


图 3 全实体形式隔流墙

如图 4、5 所示, 随着隔流墙长度的增加, 引航道最大纵、横向流速随之降低, 其中 220 m 实体隔流堤布置方案下, 二线船闸上游停泊段纵、横向流速均未超过规范要求最大值, 该方案最大纵、横向流速分别为 0.27、0.06 m/s。测点中各方案纵、横向流速超过标准值数量占测点总数的比值见图 6, 随隔流墙长度的增加, 引航道内水流条件得以改善。

隔流结构外延方案对于通航水流条件的改善效果较好, 但建设条件通常为深水, 施工围堰的标准较高、工程量大且成本高。

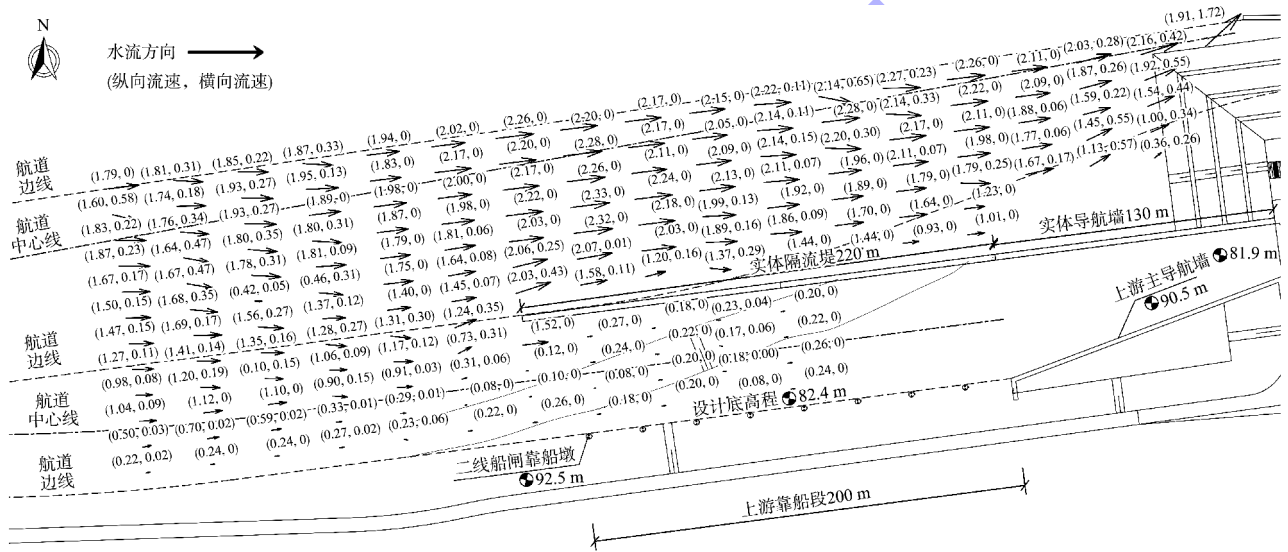


图 4 二线船闸上游引航道 220 m 全实体形式隔流墙方案流场 (单位: m/s)

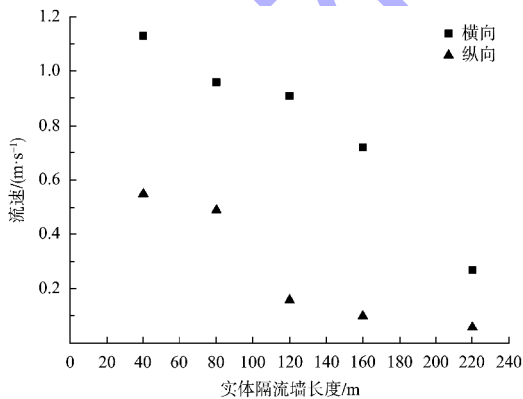


图 5 全实体隔流墙方案最大纵、横向流速

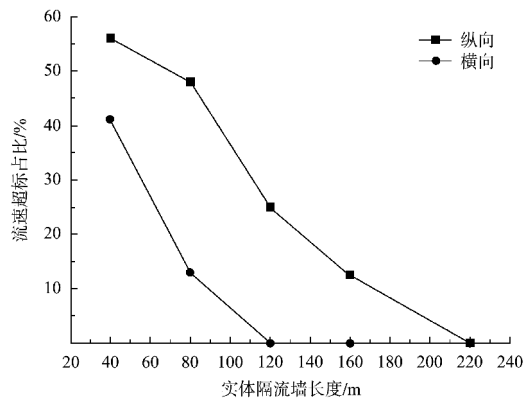


图 6 全实体隔流墙方案超标流速占比

### 4.2 实体与透空式隔流墙组合(方案 2)

方案 2 上游引航道导航墙及隔流墙采用实体与透空式隔流墙组合形式, 见图 7。其中直线段导航墙 130 m 保持不变, 直线段由不同长度实体隔

流墙与浮式隔流结构组成, 浮式隔流结构在导航墙上游沿线打入钢管桩, 并在钢管桩间设置可随水位上下浮动的长条形钢浮箱, 形成对停泊段的掩护。

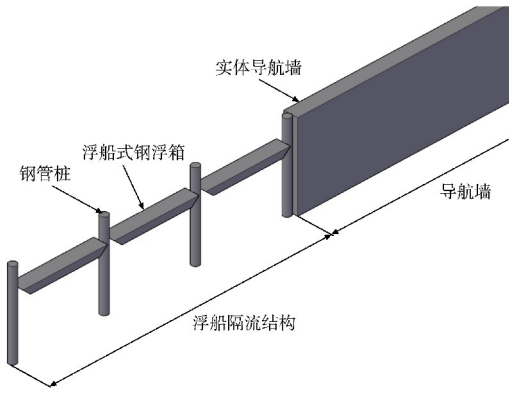


图7 浮式隔流结构

图8、9显示除“100 m 实体+120 m 透空式隔流墙的组合方案”外，其余方案的纵、横向流速均存在不满足规范要求的情况。流场纵、横向流速

随实体隔流墙长度的增加而降低，结合试验结果可知通过提高实体隔流墙长度可以改善其纵、横向流速。

对比图4、8，相比220 m 全实体隔流墙方案，“100 m 实体+120 m 透空形式隔流墙的组合方案”通航水流条件更好，二线船闸上游引航道内流线整体平顺，120 m 透空隔流堤掩护范围内的流线更为平顺，可能因为透空式隔流墙采用浮箱阻挡表层水流，而允许下部水流由浮箱下方通过，更多的上游来流可以平顺地通过隔流墙汇入主流，水流整体受隔流堤阻碍而偏转的程度更小。方案2可以缩短围堰长度，降低造价，但浮箱结构存在维护工程量较大、高水位易脱离等问题。

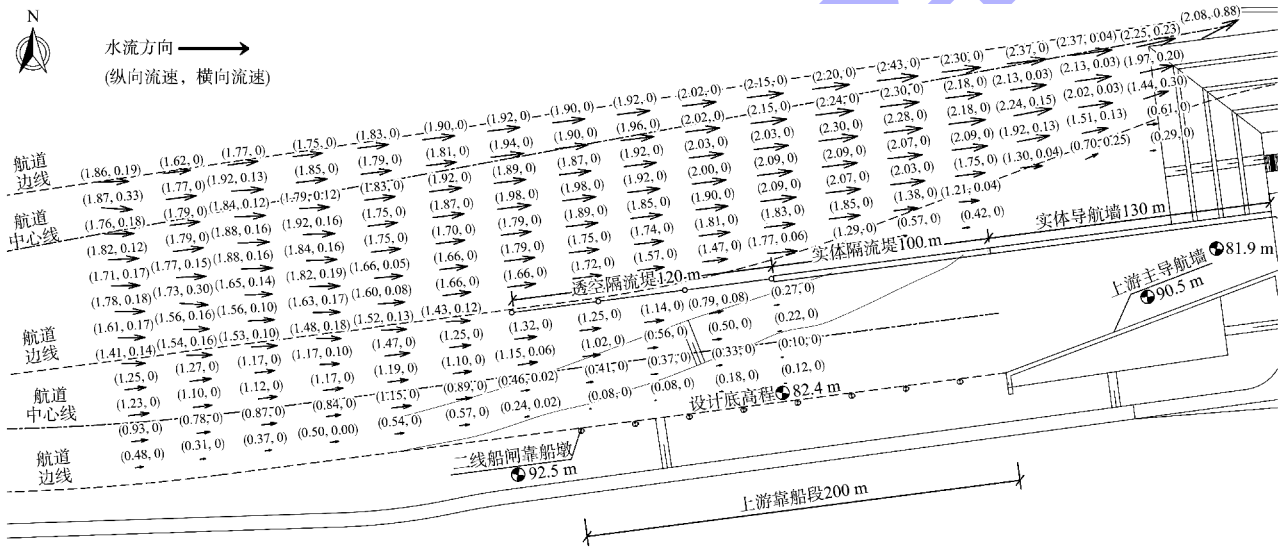


图8 二线船闸上游引航道 100 m 实体+120 m 透空式隔流墙组合方案流场 (单位: m/s)

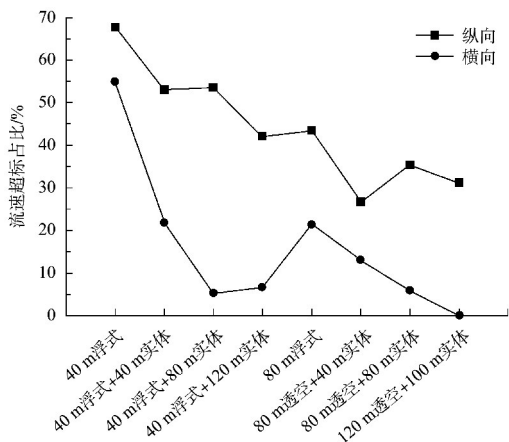


图9 实体与透空式隔流墙组合方案超标流速占比

### 4.3 排桩整流技术方案(方案3)

方案3排桩整流技术即由多个单桩联排组成排桩形式，见图10。通过调整桩心距改变排桩透水率，实现整流的目的。排桩透水率可视为单桩间隔长度与排桩总长度之比。当单桩之间不存在间隔时，排桩透水率为零，此时排桩整流效果与全实体隔流墙整流效果相同；通过调整桩心距大小，增加单桩之间的间隔长度，排桩透水率也随之增大，实现整流的目的。

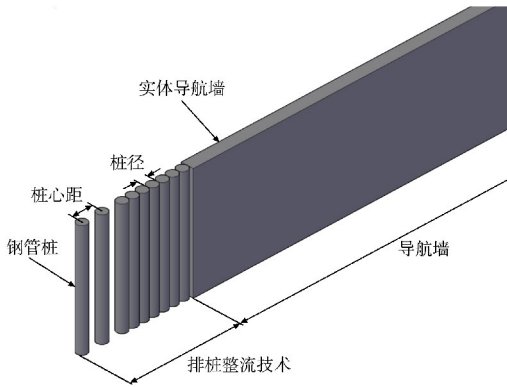


图 10 排桩整流技术

排桩整流技术方案保持二线船闸上游 130 m 实体导航墙不变, 其上游段隔流墙采用排桩整流技术, 排桩桩径为 1.5 m, 对不同桩间距、总长的布置方案进行试验。

试验结果见图 11。1.5 m 桩径的排桩, 桩心距在 2.0 m 以上时各工况二线船闸上游引航道停泊段通航水流条件均不满足规范要求; 桩心距小于等于 2.0 m 时(1.5 m 桩心距与 2.0 m 桩心距组

合) 排桩能够起到对引航道停泊段的掩护作用, 此时停泊段虽然小范围流速较大, 但具有下行船舶停泊的水流条件, 基本满足规范要求。“1.5 m 桩心距长 120 m + 2.0 m 桩心距长 60 m” 方案流场分布见图 12, 方案 3 通航水流条件较好, 仅很小部分区域流速超过规范要求, 可以认为行船安全影响较小。

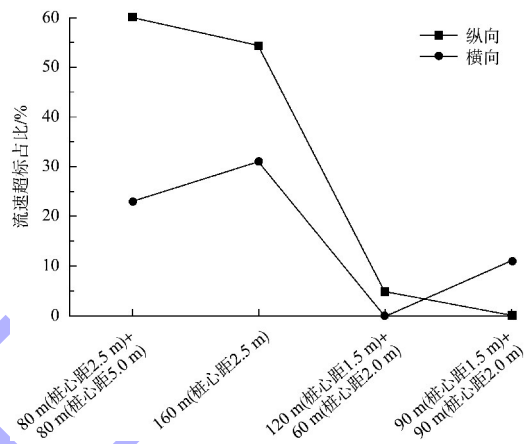


图 11 排桩整流技术方案超标流速占比

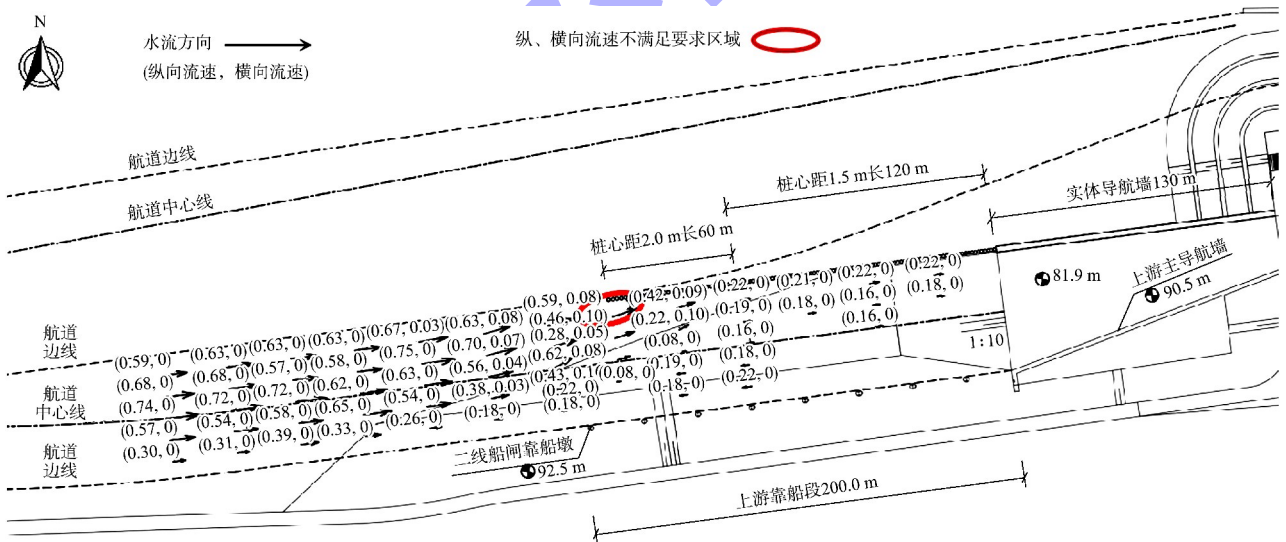


图 12 120 m (桩心距 1.5 m) + 60 m (桩心距 2.0 m) 排桩整流技术方案流场 (单位: m/s)

#### 4.4 排桩整流与桩基插板组合方案(方案 4)

方案 4 保持二线船闸上游导航墙 130 m 实体形式不变, 其上游隔流墙将排桩整流技术与桩基

插板组合, 见图 13, 在排桩上游段采用一部分淹没在水下的桩基插板, 达到阻挡面流的目的, 插板高度由坝前水位综合确定。

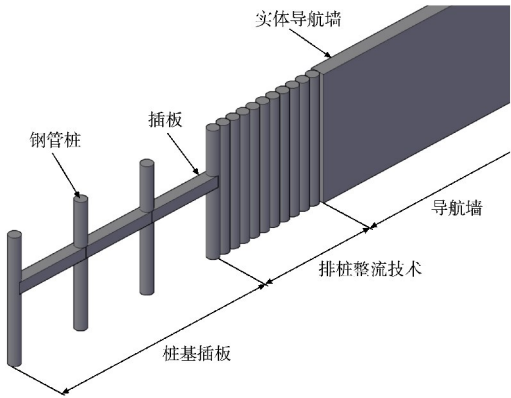


图13 桩基插板隔流墙

试验结果如图14、15所示，该方案整流效果较好，其中排桩120 m(桩心距1.5 m)+桩基插板80 m方案下二线船闸上游引航道停泊段整体流速较小，最大纵向、横向流速分别为0.41、0.14 m/s，满足规范要求通航水流条件。方案4综合考虑“实体与透空式隔流墙组合方案”和“排桩整流技术方案”优势，结合排桩整流技术减少围堰长度、降低造价的优势，以及透空式隔流墙分隔航道面流的优势，并将浮式隔流结构改为固定式插板，克服了难于维护的缺点。

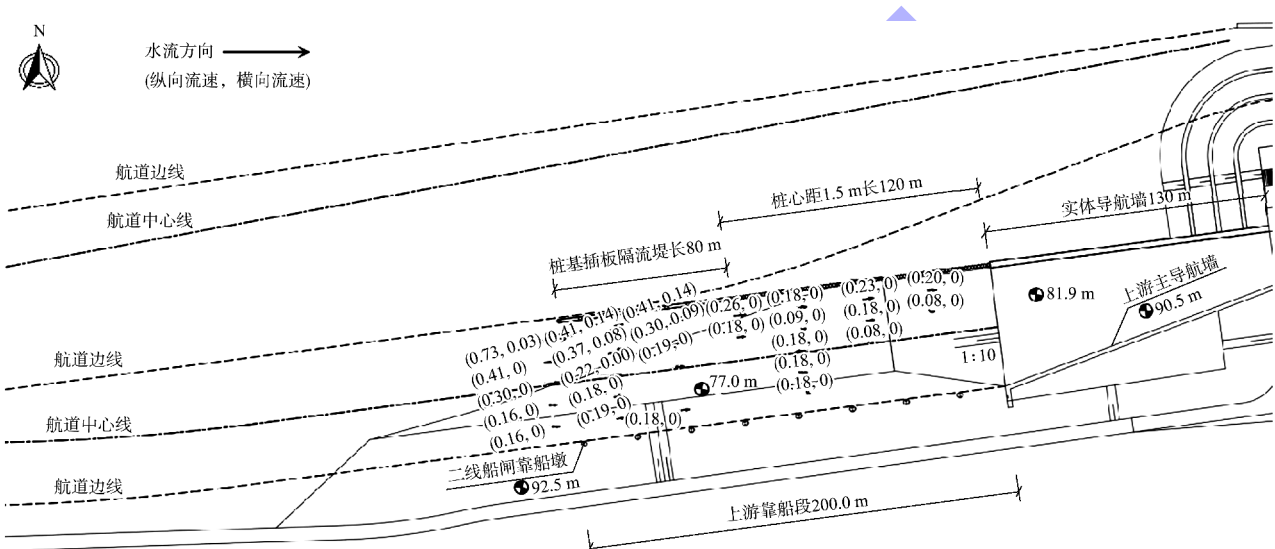


图14 排桩120 m(桩心距1.5 m)+桩基插板80 m方案流场(单位:m/s)

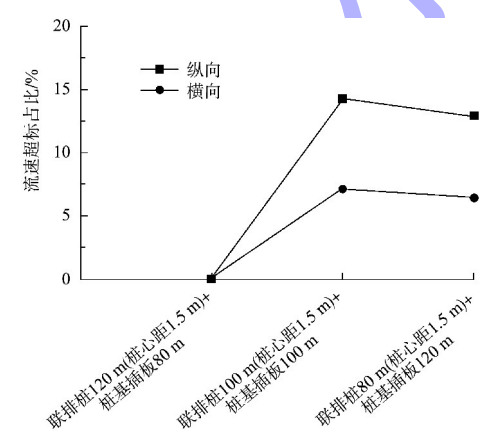


图15 排桩整流与桩基插板组合方案流速超标占比

5 结论

1) 通过延长隔流墙长度可有效改善引航道水

流条件。随着隔流墙长度增加，引航道水流条件也随之改善。

2) 浮式隔流结构满足上游引航道水流条件。与全实体隔流墙形式相同，采用钢管桩间布置钢浮箱的形式可满足上游引航道水流条件，减少工程造价。

3) 排桩整流技术较好地满足上游引航道水流条件，对于桩径、桩间距的研究尚有较大探索空间，未来可针对排桩整流方案的技术与机理进行研究。

4) 提出排桩与桩基插板隔流墙组合方案。该方案综合了浮式隔流结构与排桩整流技术的优势，保障引航道水流条件，且节省工程造价。

(下转第216页)