

内河弯曲航道维护性疏浚的流场特性及安全通航阈值研究

梅松竹

安徽省交通勘察设计院有限公司, 中国·安徽 合肥 230011

摘要: 内河弯曲航道因特殊的水流形态, 疏浚施工与通航安全的矛盾尤为突出。本文分析了弯道流速横向重分布、弯道环流结构演变以及疏浚扰动引起的局部流场响应, 系统探讨了弯曲航道疏浚期间的水深通航阈值、流速安全阈值、航速控制阈值、边坡稳定阈值及船舶尺度阈值。研究表明, 弯曲航道疏浚应充分考虑流场非对称性对船舶航行的影响, 合理确定施工期通航控制指标, 为内河弯曲航道维护性疏浚的施工组织与通航管理提供技术依据。

关键词: 弯曲航道; 维护性疏浚; 流场特性; 通航阈值; 船舶安全

Research on flow field characteristics and safe navigation thresholds for maintainable dredging of meandering inland river channels

Mei Songzhu

Anhui Provincial Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd., China Anhui Hefei 230011

Abstract: Due to the special flow patterns in inland river meandering channels, the contradiction between dredging construction and navigation safety is particularly prominent. This paper analyzes the lateral redistribution of flow velocity in bends, the evolution of circulation structure in bends, and the local flow field response caused by dredging disturbance. It systematically discusses the water depth navigation threshold, flow velocity safety threshold, navigation speed control threshold, slope stability threshold, and ship size threshold during dredging in meandering channels. The study indicates that the impact of flow field asymmetry on ship navigation should be fully considered during dredging in meandering channels, and the navigation control indicators during the construction period should be reasonably determined, providing a technical basis for the construction organization and navigation management of maintenance dredging in inland river meandering channels.

Keywords: Meandering channel; Maintenance dredging; Flow field characteristics; Navigation threshold; Ship safety

0 引言

内河弯曲航道在航道维护中处于关键和困难地段。在弯道水流形态的作用下, 凹岸冲刷和凸岸淤积明显, 维护性清淤频繁。弯曲航道特殊的流场结构和船舶航行轨迹之间具有复杂的耦合关系, 疏浚施工对原有流场进一步干扰, 使得通航安全风险加大, 本文以内河弯曲航道维护疏浚情景为主线, 在对疏浚扰动下流场特性进行分析的基础上, 对合理安全通航阈值进行了研究与确定, 从而为弯曲航道疏浚设计及施工期通航管理等提供了科学依据。

1 内河弯曲航道维护性疏浚的流场特性

1.1 弯道流速的分布情况

在水流经过弯道的过程中, 由于离心力的作用, 表面的水流开始向凹岸方向偏移, 导致凹岸的水位上升和流速加快, 而凸岸的水位则下降, 流速也相应减少。通过实

际测量数据, 发现在弯顶附近, 流速的横向梯度达到了峰值, 而在凹岸侧, 表层流速比凸岸侧高出 30% 至 50%, 这种流速的差异会随着弯道曲率半径的缩小而变得更加明显。流速在横向上分布不均造成泥沙输移不均, 凹岸冲刷、凸岸淤积演变方式是该规律在宏观上体现^[1]。在纵向分布上, 弯道进口段的水流在边界约束作用下, 其流速分布向凸岸方向倾斜。当进入弯顶段时, 离心力得到了充分的发展, 流速分布转向凹岸方向; 出口段的水流渐渐恢复顺畅, 流速分布也趋向均匀。这种演变过程一般要求河宽为过渡段长度的 3~5 倍。流速垂向分布也有相同变化, 弯道表层流速比底层流速相差比顺直段明显。

1.2 弯道环流的演变特点

弯道环流作为弯曲航道不同于顺直航道最核心的流场特征之一, 实质上就是水流受离心力与重力联合作用而产

生的螺旋流流动,其特点是表面的水流偏向凹岸,而底部的水流则偏向凸岸,从而形成了一个横向的环形流动。环流的强弱可以用环流系数来表示,与水流惯性呈正比,与弯道曲率半径呈反比,水的深度越大、流速越大、弯道越急则环流越大。弯道环流在航道演变过程中起着决定作用,凹岸冲刷深槽、凸岸淤积浅滩恰恰是环流输沙过程中直接造成的结果,在环流的垂直结构中,可以观察到表层环流的强度较高,而底层环流则相对较弱,而环流的中心位置大约在水深的 0.4 倍处。疏浚工程给弯道环流带来了复杂的影响。开挖加深引起流速垂向分布变化,从而引起环流强度变化。

1.3 疏浚扰动的流场响应

疏浚开挖增加了局部过流断面的范围,由连续性方程可知,当流量恒定时,过流断面的增加引起流速的减小。在挖槽中,流速的下降幅度可以在 30% 到 50% 之间,而这种下降的幅度是由开挖的宽度与原始航道宽度的比率决定的。开挖宽度大于 1.3 倍原航道宽度后,挖槽可能产生回流区,回流区存在将显著减小有效通航断面和提高船舶航行不确定性。地形突变的影响中。疏浚造成的坑槽改变了局部的地形曲率,这可能会触发二次流和湍流结构的变化。在坑槽的上游存在减速区,坑槽中流速减小,坑槽的下游发育流速恢复区。地形突变处会出现水流分离现象,分离区湍动能明显增大,给船舶稳性带来负面影响。坑槽坡脚处容易形成马蹄涡局部冲刷边坡,同时施工船舶自身对流场造成的堵塞使得有效过流面积变小、局部流速变大。挖泥船在工作过程中,尾流及侧向绕流会对周围流场产生 3~5 倍的干扰范围,可能影响船长。在多艘施工船舶并行运行的情况下,流场扰动相互叠加,其影响区域进一步增大。施工船舶螺旋桨射流对河床的直接撞击可能会引起局部冲刷坑并改变当地地形及流场。疏浚扰动流场响应在时间和空间上都存在明显的不均性。施工前期扰动最强烈,且扰动程度随坑槽的逐渐回淤充填而衰减。

2 内河弯曲航道维护性疏浚的安全通航阈值

2.1 水深通航阈值

弯曲航道疏浚过程中水深通航阈值作为保证船舶安全航行的基础性指标,在确定过程中需要兼顾船舶航行富余水深与疏浚作业富余水深维度。相对于顺直航道而言,弯曲航道内船舶航行所面临的横流作用更大,船体横向漂移及倾斜风险也更大,从而要求有更多富余水深做安全储备。通过模型试验及实船观测资料,提出弯曲航道内船舶通航需要的富余水深取为 0.4~0.6 倍的船舶吃水时,弯顶区域因

环流最强烈、流速横差也最大,应取为上限的 0.6 倍^[2]。该值比顺直航道 0.3~0.4 倍吃水明显增大,疏浚作业需要的水深超过了正常通航水深。挖泥船在工作过程中,船舶吃水、挖斗或者绞刀的下放深度与安全富余的总和就形成了对工作水深的要求。各种类型的挖泥船有着不同的需求,绞吸式挖泥船在作业时通常需要的水深要大于其吃水加 0.5 至 0.8 米,而抓斗式挖泥船则需要考虑抓斗下落时的动力效应。疏浚作业区通航水深阈值应当根据作业船舶需求和通航船舶需求之比较大的数值来设定。当船型组合经过后,水深阈值应取每个船型所需最大,同时应考虑船队编组过程中额外吃水增量。弯曲航道浅水效应比顺直航道明显。当水深和吃水比值在 1.5 以下时,船舶下沉量非线性增加,船底和河底之间流速增加、压力减小,这可能会使船舶触底或者产生吸附效应。当船舶在弯曲段行驶时,为了克服横流的影响,需要保持一定的舵角,这会导致下沉量比直线段增加 15% 至 25%,因此水深阈值也应该相应地提高。在枯水期疏浚作业中,如果实测水深小于阈值,则要采取限制船舶吃水、单向控制航行甚至停航等控制措施。水深不足不但会造成船舶触底、搁浅事故的发生,而且会使螺旋桨在河底作用下发生剧烈的振动而降低推进效率,严重时会对螺旋桨及舵系统造成破坏。

2.2 流速的安全阈值

弯曲航道疏浚期流速安全阈值,是船舶是否能安全通航的关键控制目标,流速在船舶航行过程中的作用体现在向上阻力加大、向下操纵难度加大两方面。当船舶在上升过程中,如果流速超出了航行速度的 30%,船舶的推进能力将很难抵抗水流的阻力,从而导致航速明显减缓,甚至可能出现不前进反而后退的危险状况^[3]。船舶在向下航行过程中,流速过大会使舵效减弱、船舶反应迟缓、紧急避让能力降低、对岸坡及疏浚边坡冲刷增强。弯曲航道内,因流速横向分布不均匀,不同航路船舶所受流速作用存在差异,加大航迹控制难度。在综合权衡船舶的推力、载重状况以及弯道曲率半径等多个因素后,流速的安全阈值可以被设定在 1.5 至 2.0 米每秒之间。对于曲率半径不超过船长 3 倍的急弯河段,建议将其设定为较低的 1.5 米每秒;对于弯曲较为平缓的河段,建议的最大长度是 2.0 米每秒。由于疏浚扰动区的流速分布存在不均匀性,船舶在通过时可能会遭遇短时间内的流速急剧变化,因此在此基础上,安全阈值应额外预留 10% 至 15% 的余量。当流速大于安全阈值时应采取分级管控措施。一级预警指出,当流速接近 90% 的阈值时,建议重载船只进行减载航行,二级预警

是指流速到达阈值时禁止大型重载船舶行驶,当流速超出设定的阈值 10% 或更多时,除了紧急抢险的船只,其他所有船只都将被暂停航行。船舶的流速安全阈值与其吨位有着紧密的联系,小型船舶在抵抗横流方面的能力相对较弱,因此其流速安全阈值应当比大型船舶低出 10% 到 20%。当洪水期内流速大于安全阈值时应停止疏浚作业,挖泥船应疏散到安全水域内锚泊以保障船舶及人员的安全。同时在确定流速安全阈值时应考虑风向风力叠加作用,在横风和横流联合作用下船舶受力明显增加,阈值要进一步减小。

2.3 航速控制阈值

在弯曲航道疏浚期,合理地控制航速是确保船舶操纵安全、降低对疏浚工程冲击的重要环节,航速控制的关键问题就是要在确保船舶舵效情况下尽量减小船行波对岸坡及疏浚边坡冲刷破坏。航速过快将使船行波强度增强,结果表明:船行波的波高正比于航速平方,航速由 5 节至 8 节时波高可以增大 1.5 倍多。船行波多次作用岸坡可加速边坡侵蚀并造成坍塌后退;疏浚边坡的影响可能导致已经开挖的边坡发生二次变形,从而增加了维护的工作量。航速过慢会有舵效下降的危险,在弯曲航道内舵效不充分会削弱船舶抗横流能力,易出现偏航及碰撞事故。兼顾操纵安全与边坡保护双重需求,弯曲航段推荐航速控制阈值取为 6~8 节。重载船舶因其惯性较大、操纵响应较慢,应去掉 6 个节段的下界;空载船舶的长度可以适当增加到八节车厢,但是需要结合实际风浪情况进行调节。疏浚作业区周围航速要进一步减小以 5 节为限。其原因是作业区有施工船舶、排泥管线和其他障碍物,局部流场受到干扰,需要在船舶经过时保持足够安全余量。施工船舶和通航船舶在相交过程中双方都需要减速慢行到 5 个节段以内,当相交船型的尺度相差很大的时候,大型船舶要积极减速慢行躲避。航速控制也要考虑船型匹配的因素,小船抗风浪能力较弱,航速不能过快,宜控制在六节以内;大型船舶的惯性较大、制动距离较远,在入弯之前要先减速并在弯顶上保持匀速行驶,出弯时要逐步提速。航速控制阈值实施需有相应的监管措施作为支撑。在弯道上、下游布设航速监测点,通过雷达或者视频测速技术监测过往船只的航速,并对超速行驶的船只给予警告或者惩罚。同时在航道图和航行通告上对弯道段航速限制作了清晰标记,以便船员事先了解和准备。合理控制航速既能保证航行安全又能降低船行波给疏浚工程带来的负面影响,达到通航和施工共赢。

2.4 边坡的稳定阈值

疏浚边坡稳定是确保航道工程长期高效运营的基本条

件,而弯曲航道由于环流作用加剧了岸坡侧向冲刷,需要严格控制疏浚后岸坡稳定阈值,边坡失稳主要形式有坡面坍塌、滑移及渐进式侵蚀等,产生机制涉及水力作用、土体力学特性及疏浚几何形态等多种因素复杂交互影响。水下边坡的稳定阈值一般用边坡坡比来表示。考虑到沙质河床的特点,如其较低的内聚力和较弱的抗冲刷能力,建议疏浚边坡的坡度比不应太陡于 1 比 3,也就是说,当水平投影达到 3 米时,其垂直方向应增加 1 米。在粘土构成的河床中,土壤显示出一定的内聚力,因此可以适当地调整到 1 比 2.5 的比例。边坡稳定临界坡比因土体颗粒组成、密实度和含水率等因素而异,工程设计应结合现场土工试验成果验算。在弯曲航道疏浚期,船行波对边坡失稳具有显着的诱发作用。经过实际测量,当船行波的波高超出 0.5 米时,边坡的土壤开始逐渐变得疏松;当波的高度超出 0.8 米,边坡的表层土壤会被直接冲走,导致坡面的形态发生变化。船行波对于边坡的影响存在累积效应,一次影响并不显着,而多次反复影响会导致边坡逐渐退缩。船舶航行引起的船行波波高和航速、排水量、船型系数等因素有着密切的联系。当大型船只以极高的速度航行时,其波高能超过 1.0 米,并对斜坡产生明显的冲击。所以通过航速控制来间接地控制船行波强度是保护边坡的一种行之有效的措施。疏浚边坡的稳定性也需要考虑水位变幅对边坡的作用。水位迅速下降时边坡内部孔隙水压力无法及时耗散,有效应力减小,边坡的稳定性减弱。施工期遇到水位骤降时应停止疏浚作业,加密边坡监测。边坡监测可以通过固定断面定期测量结合水下声呐扫描等手段,着重监测坡脚及坡面中部变形。一旦检测到边坡的变形速度出现异常或累计变形超出了设计的预设值,应当迅速实施一系列的加固措施,这些措施包括但不限于抛石保护脚部、使用模袋混凝土进行护坡以及对土工格栅进行加筋处理。合理设置边坡稳定阈值可以有效防止疏浚期岸坡坍塌事故的发生,确保航道长期平稳运行和降低后期养护疏浚频率。

3 结语

内河弯曲航道维护清淤流场特性及安全通航阈值的研究是确保航道安全通畅的一项基础工作。弯道流速横向重分布、环流结构演变以及疏浚扰动流场响应,构成了弯曲航道特殊的水动力学环境,这三类流场特性相互关联、逐层递进,共同确定弯曲航道疏浚期通航风险在空间上的分布特点。今后的研究可以进一步将实船试验与数值模拟相结合,精细化标定不同曲率半径和不同流量下阈值体系,从而形成操作性更强的分级管控标准。

参考文献:

- [1] 张震. 内河航道疏浚土资源化利用技术与环境影响研究[J]. 珠江水运, 2025(12):154-156.
- [2] 文全. 内河航道疏浚工程施工技术分析[J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(25):130-132.
- [3] 吴文祥, 俞亚成. 基于环保理念的内河航道疏浚施工技术优化与实践研究[J]. 新发现, 2025(21):118-120.

作者简介: 梅松竹 (1991.03-), 男, 汉族, 江苏省江阴市, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向: 水运工程。