

• 水工岩石力学 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202401011



本刊网刊

勾头角度与长度对透水丁坝周围水流结构影响的研究

樊新建¹, 李 拙¹, 庞翠超^{2,3}, 侯慧敏¹, 程扬威¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 上海河湖工程咨询有限公司, 上海 200080)

摘 要: 勾头透水丁坝作为河道治理的重要工程结构, 其结构设计与体型参数的选定对河道缓流促淤影响较大。本文以勾头透水丁坝为研究对象, 通过开展室内水槽试验, 采用多普勒流速仪(ADV)精确测量不同勾头角度、长度条件下坝体周围的3维瞬时流速, 深入分析非淹没状态下勾头透水丁坝作用区域内的水流流速分布规律和紊动特性, 诠释勾头体型参数对丁坝周围水流缓流效果的影响。结果表明: 1) 透水丁坝融合勾头设计后, 勾头角度与长度显著影响坝体下游水流结构; 2) 随着勾头角度的增大, 坝体下游水流流速呈下降的趋势, 紊动强度与紊动能呈上升的趋势, 坝体下游区域内缓流效果与流速分布均匀性得到明显改善, 当勾头角度为60°时, 缓流率达27.69%; 3) 随着勾头长度的增加, 坝体下游水流流速与紊动强度均呈现下降的趋势; 4) 在下游回流区及过渡区内, 流速波动近似呈“M”形分布特征; 紊动强度在下游回流区内波动最为剧烈, 在过渡区内变化幅度达到最大, 变幅约为回流区的1.7~2.3倍; 5) 紊动能受勾头角度的影响, 峰值出现在透水孔与坝体外侧区域, 并随着勾头角度的增大逐渐向右岸偏转, 因此, 适当增加勾头透水丁坝的勾头角度与长度, 对优化水流结构具有积极影响。研究成果可为勾头透水丁坝在实际工程应用中体型参数选择与结构设计提供理论参考。

关键词: 勾头透水丁坝; 勾头角度; 勾头长度; 水流结构; 紊动强度

中图分类号: TV863

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0057-11

丁坝作为河流治理和航道整治的重要工程结构, 其结构型式直接关系到河道的治理效果。随着工程技术的发展, 对现有丁坝进行合理的设计和改造已成为一种必然趋势^[1-2]。勾头丁坝作为一种特殊形式的丁坝, 在河流治理、防洪减灾、海岸防护等领域发挥着关键作用, 有助于推动相关领域的科学研究和技术创新, 展现出广阔的应用前景。

近年来, 国内外学者对勾头丁坝的研究已经取得了一系列重要成果。吴伊平等^[3]通过数值模拟, 揭示了丁坝挑角长度对回流区水流紊动特性的影响。田伟平等^[4]基于室内模型试验, 得出了非淹没状态下上挑丁坝的冲刷量大于下挑丁坝的结论。程昌华等^[5]通过开展水槽试验, 探讨了实体勾头丁坝在不同勾头比配置下, 坝头冲淤特性的差异。陈宇豪等^[6]运用 RNGk- ϵ 模型, 构

建了勾头丁坝水流计算模型并进行验证, 结果表明, 上伸勾头丁坝对水流挑流影响最大, “T”形勾头丁坝对流向改变最大。胡旭跃等^[7]利用 RNGk- ϵ 模型, 揭示了实体勾头丁坝周围水流的3维流动过程。Vaghefi 等^[8]利用 SSIIM 模型, 对不同淹没率下弯道“T”形丁坝周围的流场和3维速度进行数值模拟分析, 发现纵向流速最大值出现在坝轴线上。Akbari^[9]、Tripathi^[10]和 Ghod-sian^[11]等通过物理试验和数值模拟等方法, 研究了丁坝体型参数、河道类型对“T”形丁坝周围水流结构的影响。Masjedi 等^[12]通过室内弯曲水槽试验, 研究了不同体型参数条件下“L”形丁坝在水槽弯曲处的局部冲刷深度, 结果表明, 坝后最大局部冲刷深度与丁坝挑角密切相关。Patel 等^[13]分析了“L”形丁坝的渗流速度对丁坝周围河床形态、冲刷深度及流态的影响。Kang

收稿日期: 2024-12-04 修回日期: 2025-02-09 网络出版日期: 2025-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(513798128); 甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA238); 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2023nkms06); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广项目(24GSLK019; 24GSLK023); 兰州市科技计划项目(2024-3-84)

作者简介: 樊新建(1979—), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 生态水力学. E-mail: fanxj008@163.com

等^[14]采用求解 3 维 Navier–Stokes 方程的大涡模拟 (LES) 模型和曲线浸没边界 (CURVIB) 方法, 研究了“W”形堰附近水流的湍流特性。魏文礼等^[15]运用 LES 模型结合体积流体 (VOF) 方法, 得出了在弯道中, “T”形丁坝相对于传统直丁坝来说, 无论是在改善弯道水流方面还是在保障自身安全性上都有更大的优越性。尽管国内外学者对勾头丁坝的研究已取得一定成果, 但这些研究成果大多集中于实体结构型式, 而较少关注勾头透水丁坝。

勾头透水丁坝展现出较好的协调性与稳定性, 有效规避了实体丁坝在复杂工程实践中的应用局限, 改善了坝体周围的水流结构, 减少了冲刷和淤积现象, 提高了河道的通航能力和防洪能力。基于此, 本文针对勾头透水丁坝开展水槽试验, 探究勾头角度与长度的变化对坝体周围水流结构变化规律的影响, 旨在为实际工程中勾头透水丁坝体型参数的优化设计提供理论支撑, 推动该坝型的应用与推广。

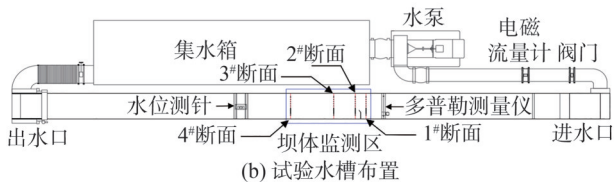
1 试验装置及方案

1.1 试验水槽概况

试验采用高精度多功能变坡水槽, 构造如图 1 所示。水槽长为 13.0 m、宽为 0.6 m、高为 0.6 m, 接触面为矩形有机玻璃材质, 属直线型明渠。主要结构由试验水槽、流量控制系统 (DCMS)、供回水系统、翻板式尾门及测控系统等组成。底部变坡调节范围为 0~1%, 变坡控制精度为 ± 0.1 mm。



(a) 试验装置实物



(b) 试验水槽布置

图 1 高精度多功能变坡试验水槽

Fig. 1 High-precision multi-functional variable slope test flume

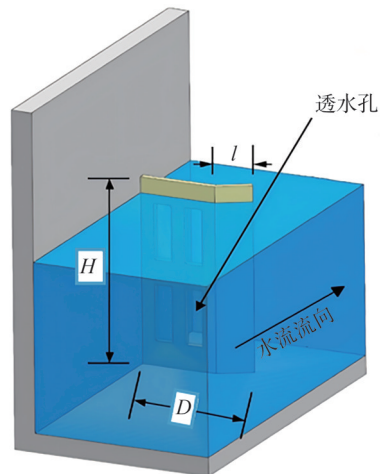
1.2 数据测量与采集

数据测量与采集工作主要由 3 维声学多普勒测量仪 (ADV) 主机和智能网关协同完成。在进行流速测量时, ADV 主机需保持垂直于水面, 每个测点测量时间均不低于 30 s。经过配套的后筛选机制, 严格筛选信噪

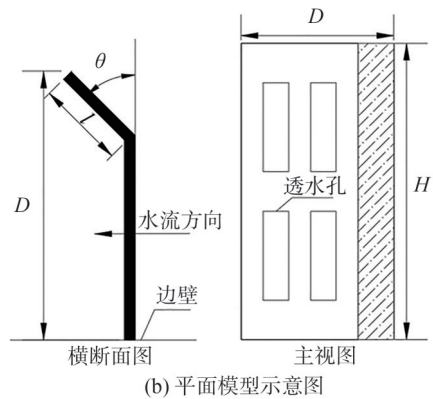
比超过 20 dB 且相关性高于 75% 的测点, 以进行后续数据处理分析。测量系统的精度为 ± 0.5 cm/s, 流速测量范围为 0~3 m/s, 最大测量水深为 2 m, 确保了测量结果的准确性和可靠性。

1.3 丁坝模型设计

丁坝模型详细结构如图 2 所示。图 2 中, θ 为勾头角度, l 为实际勾头长度, 根据行业技术规范, 丁坝的有效坝长不宜超过河宽的 1/3, 本试验将丁坝模型的有效坝长 D 设定为水槽宽度的 0.3 倍 ($D=18$ cm), 坝体高度 H 设定为 35 cm。在透水孔型的配置上, 采用具有良好缓流效果的双层矩形布置方式^[16]。当透水丁坝的透水率在 20%~30% 之间时, 坝后回流区逐渐消失形成缓流, 满足河道治理和坝身防护要求。因此, 本试验将丁坝的透水率控制在 20%, 具有较高的可行性^[17-18]。



(a) 3维模型示意图



(b) 平面模型示意图

图 2 丁坝模型详图

Fig. 2 Detail of the spur dike model

1.4 试验布置及工况

试验工况参数如表 1 所示。选取透水丁坝勾头角度 θ 为 30°、45°、60°, 勾头长度 l 分别取 $D/4$ 、 $D/3$ 、 $D/2$, 试验中水槽流量为 35 L/s, 控制水深为 0.32 m, 共设置 5 组试验工况。

测量断面布置如图 3 所示。丁坝模型与水槽左边

壁呈正交布置,以丁坝中心线与水槽边壁的交点为原点建立坐标系,顺水流方向为 x 轴,横断面方向为 y 轴,沿水深方向为 z 轴。沿水流方向共设置4个测量断面,1[#]断面位于距坝体上游10 cm($x=-0.6D$)处,2[#]、3[#]、4[#]断面分别位于距坝体下游10 cm($x=0.6D$)、50 cm($x=2.8D$)、130 cm($x=7.2D$)处。每个断面沿横向共布置22个测点,单测点测量时长30 s,采集频率50 Hz。

表1 工况参数

Tab. 1 Operating parameters					
工况	勾头长度	勾头角度 $\theta/$ (°)	水深/ cm	流量/ ($L \cdot s^{-1}$)	透水率/ %
1	$D/3$	30	32	35	20
2	$D/3$	45	32	35	20
3	$D/3$	60	32	35	20
4	$D/4$	60	32	35	20
5	$D/2$	60	32	35	20

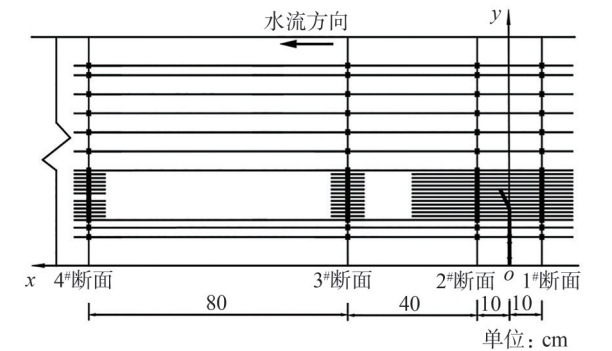


图3 测量断面布置
Fig. 3 Measurement section layout

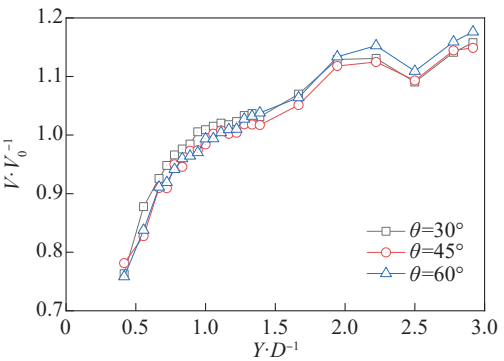
2 试验结果与分析

为了便于对比分析,对相关物理量进行无量纲处理。分析流速、紊动强度与紊动能时,横坐标为 $Y \cdot D^{-1}$,纵坐标分别为 $V \cdot V_0^{-1}$ 、 $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 和 E^+ 。其中, Y 为横断面测点至左岸的垂直间距, V 为丁坝布置后的时均流速, V_0 为进口水流的平均流速, σ 为丁坝布置后的紊动强度, σ_0 为进口水流的平均紊动强度, E^+ 为紊动能 E 与 V_0 的比值。

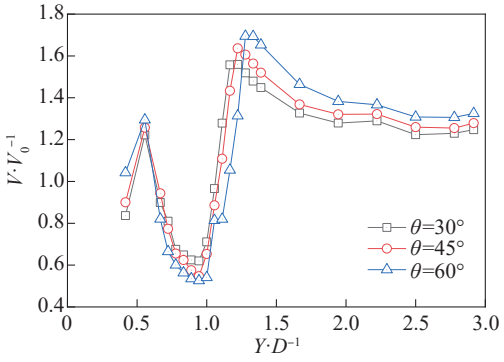
2.1 流速分布特征

2.1.1 勾头角度对流速分布规律的影响

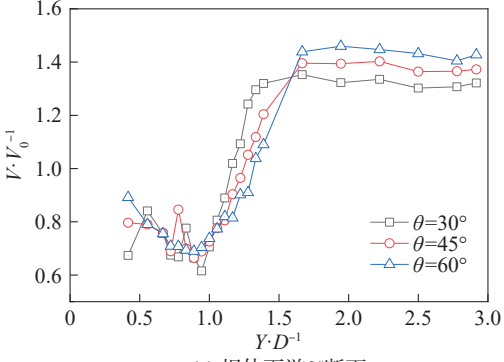
图4为 L 为 $D/3$, θ 为 30° 、 45° 、 60° 时坝体作用区内(1[#]~4[#]断面)流速沿横向分布的情况。由图4(a)可见,不同勾头角度下,1[#]断面($x=-0.6D$)流速变化规律基本一致,沿横向呈现出逐渐增大的变化趋势,其中,坝长范围内流速增长梯度较大。主要原因是布置丁坝挤占了河道左侧过水空间。在非淹没时,来流触坝后难以越过坝顶,少量水流穿孔流过,而多数水流则被迫绕过坝体,收缩至主流区继续向右岸移动,导致流速增



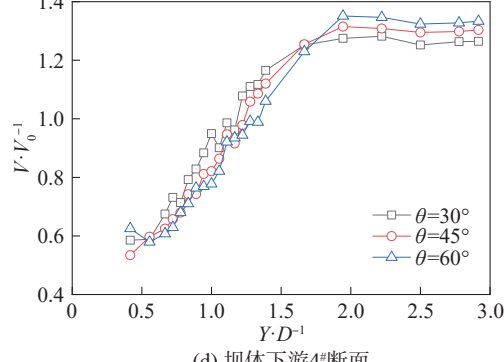
(a) 坝体上游1[#]断面



(b) 坝体下游2[#]断面



(c) 坝体下游3[#]断面



(d) 坝体下游4[#]断面

图4 勾头角度影响下各断面沿横向流速分布
Fig. 4 Distribution of flow velocity along the transverse direction in each section under the influence of hook angle 大.当 θ 为 30° 、 45° 、 60° 时,对应的 $V \cdot V_0^{-1}$ 均值分别为1.01、1.00、1.00,极差为0.01,这表明勾头角度对坝体上游流速影响较小。

图 4(b)~(d)为不同勾头角度下坝体下游流速沿横向分布情况。丁坝透水性导致各区域的流速分布规律存在显著差异。在坝后回流区($Y \cdot D^{-1} < 1$),流速相对较小,水流经过混掺与碰撞,流态变得极为复杂且波动较大, $V \cdot V_0^{-1}$ 在区间[0.5,1.3]内。进入过渡区($1 \leq Y \cdot D^{-1} \leq 1.5$),流速迅速升高,无明显波动, $V \cdot V_0^{-1}$ 位于区间[0.5,1.7]内。而在主流区($Y \cdot D^{-1} > 1.5$),流速相对较大,流态趋于平稳, $V \cdot V_0^{-1}$ 维持在区间[1.0,1.5]内。

坝体下游各区域内,沿横向相对流速随 $Y \cdot D^{-1}$ 及勾头角度的变化呈现显著差异。对于 $Y \cdot D^{-1} < 1$ 与 $1 \leq Y \cdot D^{-1} \leq 1.5$ 的情况, θ 为 30° 时流速最大, θ 为 45° 时次之, θ 为 60° 时流速最小;而对于 $Y \cdot D^{-1} > 1.5$ 的情况,规律则相反。造成该差异的主要原因在于,随着勾头角度的增大,坝体对水流的阻挡和挑引效果增强,使得水流向右岸偏转,后逐渐向左岸恢复。相反,当勾头角度较小时,坝体作用减弱,主流区水流向回流区扩散加快,使得回流区流速增大,主流区流速减小。另外,主流区最大流速随勾头角度的增大而升高,且出现最大值的位置逐渐右移。

坝体下游各断面沿横向流速分布特征同样存在差异。2[#]断面($x=0.6D$)流速变化最为剧烈,整体受透水孔和坝头外侧水流增速的影响,呈“双峰单谷”形分布特征。相比之下,3[#]断面($x=2.8D$)和4[#]断面($x=7.2D$)由于距离丁坝较远,受坝体影响有限,使得水流内部能量交换减弱,流速分布更为均匀,水流流态相对稳定。

对比坝体下游沿横向相对流速均值可知,当 θ 为 60° 时, $V \cdot V_0^{-1}$ 均值相较 θ 为 30° 和 45° 分别降低了2.87%和1.61%。这表明勾头角度的变化显著影响了坝体下游流速,且随着勾头角度增大, $V \cdot V_0^{-1}$ 均值呈现减小趋势。

本文对比了勾头透水丁坝与传统透水直坝的缓流效果,结果显示,工况参数一致时,勾头透水丁坝下游近坝区内的水流平均流速降低约17.04%,证明勾头透水丁坝在减缓流速方面具备明显优势。

2.1.2 勾头长度对流速分布规律的影响

图 5 为 θ 为 60° , L 为 $D/4$ 、 $D/3$ 、 $D/2$ 时坝体作用区内流速沿横向分布情况。由图 5(a)可见,不同勾头长度下,1[#]断面($x=-0.6D$)流速变化规律基本一致,沿横向呈现出先增大后趋于平稳的变化趋势。主要原因在于来流受丁坝导流作用影响,流向转向坝头,主流带右偏,导致回流区与过渡区流速增加。而主流区因远离丁坝,流速分布平稳。

图 5(b)~(d)展示出不同勾头长度下坝体下游流速沿横向分布情况。各区域流速分布规律差异显著。

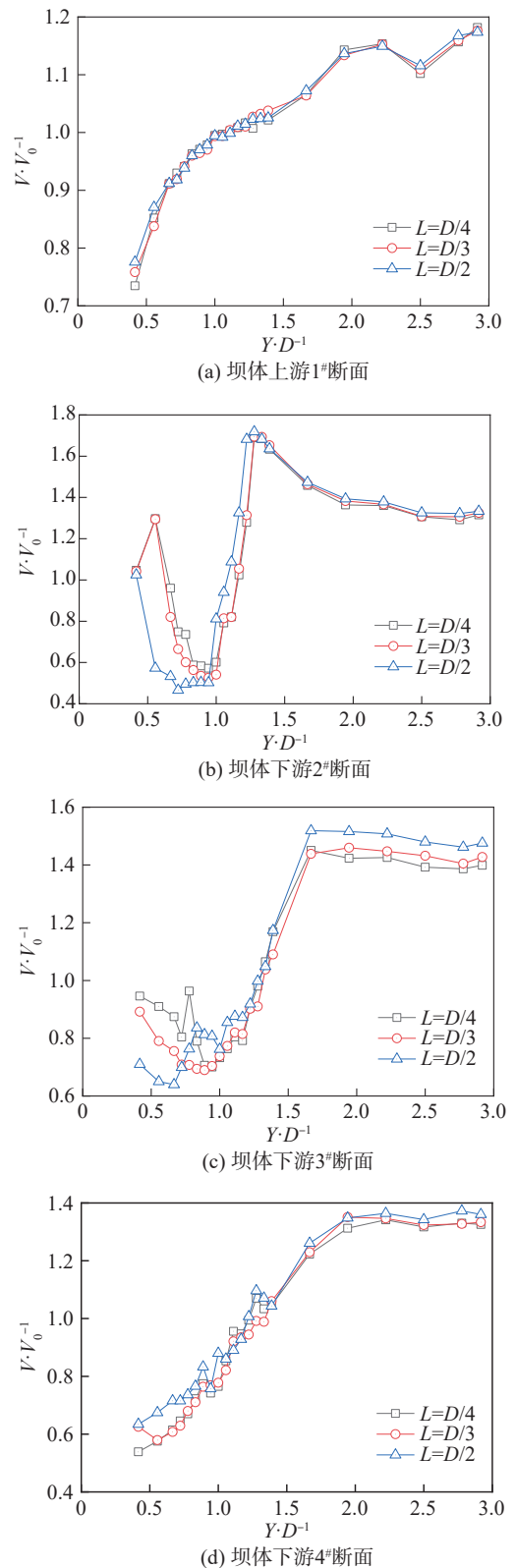


图 5 勾头长度影响下各断面流速沿横向分布

Fig. 5 Distribution of flow velocity along the transverse direction in each section under the influence of hook length

在坝后回流区($Y \cdot D^{-1} < 1$),流速相对较小,波动较为剧烈, $Y \cdot D^{-1}$ 在[0.46,1.30]之间。在过渡区($1 \leq Y \cdot D^{-1} \leq 1.5$),

流速迅速增大,无显著波动, $Y \cdot D^{-1}$ 在 $[0.54, 1.72]$ 内。在主流区($Y \cdot D^{-1} > 1.5$),流速整体较大,流态趋于平稳, $Y \cdot D^{-1}$ 维持在 $[1.22, 1.52]$ 内。

在坝体下游各区域内,沿横向相对流速随 $Y \cdot D^{-1}$ 与勾头长度的变化呈现出显著差异。在 $Y \cdot D^{-1} < 1$ 的情况下, L 为 $D/4$ 时流速最大, L 为 $D/3$ 时次之, L 为 $D/2$ 时流速最小;而在 $Y \cdot D^{-1} \geq 1$ 的情况下,规律则相反。此差异归因于勾头长度的变化影响了坝体的承接效果,当勾头长度较大时,来流能够更早地调整流动方向,从而减少水头损失,增加水流动能,促使流速增大。

对比分析2[#]断面($x=0.6D$)沿横向流速最大值情况。随着勾头长度的增加, $V \cdot V_0^{-1}$ 的最大值由1.68增至1.71, $V \cdot V_0^{-1}$ 的最小值由0.57降至0.47,极值位置随着勾头长度的增加逐渐趋近坝头。原因在于勾头长度的增加使正挑坝身段长度减小,导致坝体挑流作用降低。相比之下,3[#]断面($x=2.8D$)、4[#]断面($x=7.2D$)距丁坝较远,体型差异对水流的影响可忽略。在3[#]断面($x=2.8D$)处,当 L 为 $D/3$ 时,于 $Y \cdot D^{-1}$ 为0.8处观测到流速分布规律存在差异,此现象归因于 L 为 $D/3$ 时丁坝的挑流作用更为显著,其能有效引导水流进入主流区,从而阻止高速水流在该断面渗透至回流区,确保该区域流速维持稳定。

对比坝体下游沿横向相对流速的均值可知,当 L 为 $D/2$ 时, $V \cdot V_0^{-1}$ 均值相较于 L 为 $D/4$ 、 $D/3$ 时分别降低了8.75%、3.11%。由此可见,增加勾头长度能够增强丁坝对水流的阻力,从而削弱坝头区域的高速水流,导致流速显著降低。另外,当 L 为 $D/2$ 时,主流区 $V \cdot V_0^{-1}$ 均值相较于 L 为 $D/4$ 、 $D/3$ 时分别上升8.78%、3.20%。表明勾头长度的增加对河道的通航条件及水流环境产生了显著的改善作用。

2.1.3 勾头角度对缓流效果和流场均匀性的影响

通过计算缓流率对不同勾头角度条件下坝后回流区的缓流效果进行分析^[19],缓流率计算式如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{V_1}{V_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为缓流率, V_1 为放置丁坝后的断面平均流速。

由式(1)计算得,当勾头角度 θ 为 30° 、 45° 、 60° 时,缓流率分别为25.81%、26.67%、27.69%。当 θ 为 60° 时,缓流率最高,较 θ 为 30° 、 45° 时缓流率分别提高6.79%、3.69%。表明勾头角度的增大对提升丁坝下游回流区内的缓流效果具有积极作用。

流场均匀性对丁坝性能评价至关重要。理想丁坝需具备减缓流速、保证流场均匀性及避免产生显著涡流的能力。为探究勾头角度对下游回流区流场均匀性

的影响,采用相对标准偏差进行流场均匀性量化分析^[20],计算式如下:

$$C_v = \frac{S}{\bar{V}} \times 100\% \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{V} - V_i)^2} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, C_v 为流速均匀值, S 为标准偏差, $\bar{V}$ 为采样点的平均速度, V_i 为第 i 个测点的瞬时流速, n 为测点总数。

流速均匀性值作为评估流场均匀性的重要指标,当该值较小时,表明该流场中各点的流速差异相对较小,流速分布更为均匀。由图6可见,在同一横断面, θ 为 60° 时流速均匀性最佳, θ 为 45° 时次之, θ 为 30° 时最弱。结果表明,勾头角度的增大使得流场均匀性得到改善。主要归因于其增强了坝体对上游来流的阻碍与消能作用,有效减缓了水流的流速并降低冲击力,减少了水流中的湍流和涡流现象,从而提升了流体的均匀性和稳定性^[21]。

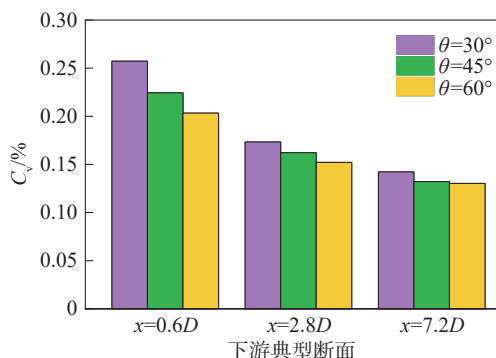


图6 坝体下游回流区内流速均匀值对比

Fig. 6 Comparison of flow uniformity values within the return zone downstream of the dike

2.2 紊动强度变化特征

坝体阻碍原本处于平稳流动状态的水流,产生各种不规则的流动形态,其中漩涡的产生和分离使坝头附近水流呈现出极为复杂的紊动特性^[22-23]。紊动强度作为反映流速脉动强度的物理量,用脉动流速均方根表示^[24],计算式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \quad (4)$$

式中, σ 为紊动强度。

2.2.1 勾头角度对紊动强度的影响

图7为 L 为 $D/4$, θ 为 30° 、 45° 、 60° 时坝体作用区内沿横向紊动强度分布情况。由图7(a)可见,不同勾头角度下,1[#]断面($x=-0.6D$)紊动强度变化规律基本一致,沿横向呈现出先减小后趋于平稳的变化趋势,且近坝区紊动强度相对较大。主要原因在于来流受坝体

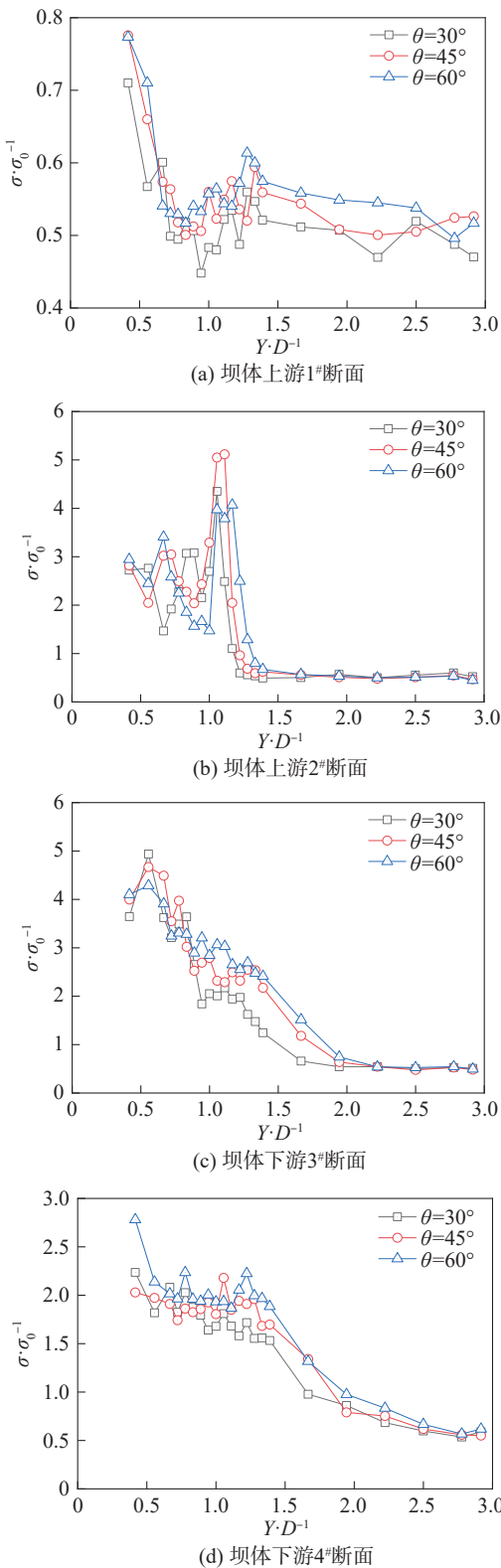


图7 勾头角度影响下各断面紊动强度沿横向分布

Fig. 7 Distribution of turbulent strength along the transverse direction for each section under the influence of hook angle

阻挡,部分动能转化为势能,并导致水流改变原本的流动方向。随后,变向水流被迫沿坝面向下流动,在坝根处诱发了漩涡与折冲水流,逐渐发展为紊动强度较

大的上游回流区。 θ 为 30° 、 45° 、 60° 时, $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 均值分别为0.52、0.55、0.57。表明在该断面,紊动强度与勾头角度呈正相关关系。

图7(b)~(d)展示出不同勾头角度下坝体下游沿横向紊动强度分布情况。由于丁坝具有透水性,各区域水流紊动强度分布规律存在显著差异。在坝后回流区($Y \cdot D^{-1} < 1$),紊动强度较大,呈现“多峰”形分布特征,峰值出现在透水孔区域, $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 在区间 $[1.4, 5.0]$ 内。在过渡区($1 \leq Y \cdot D^{-1} \leq 1.5$),紊动强度变幅最大,坝头外侧紊动强度受水流能量衰减的影响迅速减小, $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 位于区间 $[0.4, 5.2]$ 。在主流区($Y \cdot D^{-1} > 1.5$),紊动强度较小,与未布置丁坝时无明显区别, $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 维持在区间 $[0.4, 1.5]$ 内。主要原因在于穿孔高速水流与回流区内的低速水流之间存在速差,导致“交接面”产生了剪切作用,使回流区水流混乱无序,紊动强度增大。相比之下,主流区流态相对平顺,紊动强度较小^[25]。

对比下游沿横向相对紊动强度均值可知,当 θ 为 60° 时, $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 均值相较于 θ 为 30° 、 45° 时,分别降低了18.95%、7.58%,表明紊动强度与勾头角度呈正相关关系。主要原因在于勾头角度的差异对坝体的挑流效果产生显著影响,勾头角度较大时,坝头对来流的抑制作用增强,导致水流分离程度加剧,使得过坝水流的流态变得更为复杂,紊动强度增大。

2.2.2 勾头长度对紊动强度的影响

图8为 θ 为 60° , L 为 $D/4$ 、 $D/3$ 、 $D/2$ 时坝体作用区内沿横向紊动强度分布的情况。由图8(a)可见,不同勾头长度下,1[#]断面($x = -0.6D$)紊动强度变化规律基本一致,沿横向呈现出先减小后趋于平稳的变化趋势,其中,坝长范围内紊动强度减小梯度尤为显著。当 L 为 $D/4$ 、 $D/3$ 、 $D/2$ 时,对应的 $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 均值分别为0.53、0.57、0.55。结果表明,随着勾头长度的增加,其对水流方向的导控作用增强,诱导流态展现出更为复杂的演变特征,从而引发紊动强度上升。但当勾头长度增至一定程度时,其对水流的阻碍和引导作用趋于一种相对平衡的状态,此时紊动强度呈现出下降趋势。

图8(b)~(d)展示出不同勾头长度下坝体下游沿横向紊动强度分布情况。受坝体固有透水性能以及挑流效果的联合作用,下游水流呈现出较为复杂的紊动特性。在2[#]断面($x = 0.6D$),紊动强度波动显著,呈现“双峰双谷”形分布特征。在 $Y \cdot D^{-1}$ 为0.75处,穿孔水流与坝后水流发生交汇,两者间流速梯度明显,形成较大的剪应力,导致紊动强度增大;在 $Y \cdot D^{-1}$ 为1.0处,受勾头结构影响,紊动强度降至波谷;在 $Y \cdot D^{-1}$ 为1.2处,水流产生分离,高速与低速水流间的相互作用使得紊动强度升至峰值;当 $Y \cdot D^{-1}$ 超过1.2时,紊动强度迅速衰减,

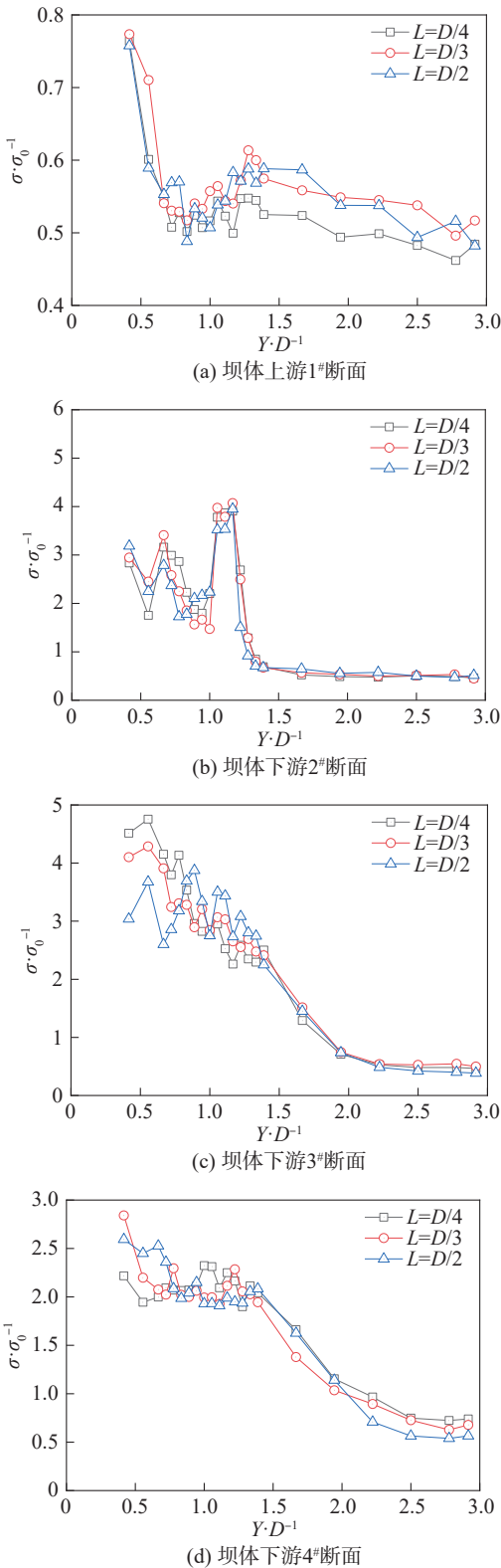


图 8 勾头长度影响下各断面紊动强度沿横向分布
Fig. 8 Distribution of turbulent strength along the transverse direction for each section under the influence of hook length

并最终与主流区的紊动强度趋于一致;而在主流区($Y \cdot D^{-1} > 1.5$)紊动强度波动相对平缓,其值与未设置丁坝时的比值接近 1。当 L 为 $D/4$ 、 $D/3$ 、 $D/2$ 时, $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 均值分

别为 1.89、1.83、1.76,表明随着勾头长度增加,该断面的紊动强度呈现降低的趋势。主要原因在于勾头长度的增加增强了坝体对来流的承接作用,使得水流在流经丁坝后的流态变得更加稳定,从而有效降低了水流的紊动强度。

3[#]断面($x=2.8D$)相较于 2[#]断面($x=0.6D$),水流紊动强度显著升高。原因在于 3[#]断面距丁坝相对较远,水流受丁坝的直接影响减弱,过坝水流由收缩状态转变为扩散状态,主流区动能降低,流速减缓。同时,回流区紊动水流向主流区扩散,两区水流交换频繁且复杂,边界层逐渐变得模糊,导致该断面的整体水流紊动强度显著提高。

对比坝体下游沿横向相对紊动强度均值,当 L 为 $D/2$ 时, $\sigma \cdot \sigma_0^{-1}$ 均值相较于 $D/4$ 、 $D/3$ 分别下降了 3.86%、1.97%,表明紊动强度与勾头长度呈负相关关系,即增加勾头长度有助于降低坝后水流的紊动强度,充分彰显了勾头结构在调控坝后水流稳定性方面发挥的积极作用。

2.2.3 勾头角度对紊动能的影响

流体内部不规则运动所产生的复杂且难以预测的能量被称为紊动能。紊动能往往呈现不均匀分布状态,集中分布于涡旋的核心区域^[26]。本文从 3 维角度出发,基于紊动强度研究,进一步探讨坝体周围水流紊动能的分布规律。紊动能作为衡量流体某点整体紊动强弱的物理量^[27],其计算式如下:

$$E = \frac{1}{2} (\overline{V_u'^2} + \overline{V_v'^2} + \overline{V_w'^2}) \quad (5)$$

式中, E 为紊动能, $\overline{V_u'}$ 、 $\overline{V_v'}$ 和 $\overline{V_w'}$ 分别为纵向、横向和垂向的瞬时脉动流速。

图 9 为 L 为 $D/4$ 、 θ 为 30° 、 45° 、 60° 时坝体作用区内沿横向紊动能分布情况。由图 9(a) 可见,不同勾头角度下,1[#]断面($x=-0.6D$)紊动能分布规律基本一致,沿横向呈现出先减小后趋于平稳的变化趋势。 θ 为 30° 、 45° 、 60° 时, E^+ 均值分别为 0.32、0.33、0.36,表明紊动能随着勾头角度的增大呈现上升趋势。主要原因在于勾头角度的增大显著增强了坝体对上游来流的阻挡与挑流效果,从而在坝体周围诱发了回流、涡旋等复杂的水流形态,加剧了水流的紊动性。

图 9(b)~(d) 展示出不同勾头角度下坝体下游沿横向紊动能分布情况。丁坝透水性导致各区域的紊动能分布规律存在显著差异。在坝后回流区($Y \cdot D^{-1} < 1$),紊动能整体较高且表现出显著的波动性,峰值出现在坝体透水孔区域, E^+ 位于 $[1.2, 7.4]$; 进入过渡区($1 \leq Y \cdot D^{-1} \leq 1.5$),紊动能变化幅度较大,并且达到最大值, E^+ 位于 $[0.4, 13.4]$; 而在主流区($Y \cdot D^{-1} > 1.5$),紊动能显著降

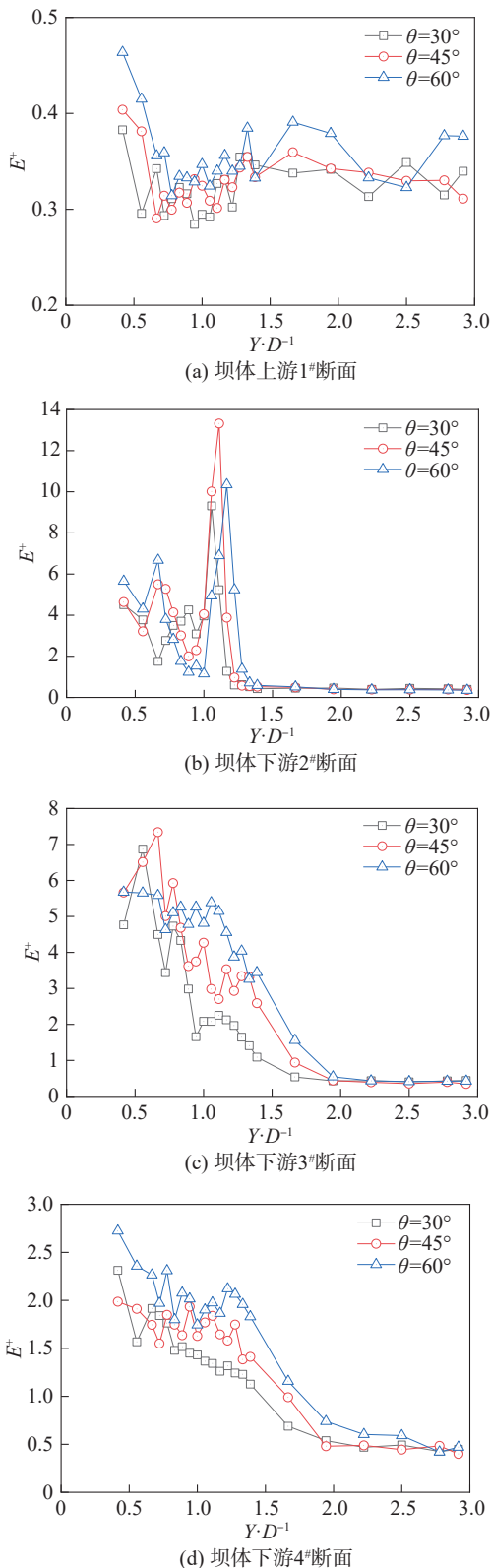


图9 勾头角度影响下各断面紊动能沿横向分布

Fig. 9 Distribution of turbulent kinetic energy along the transverse direction for each section under the influence of hook angle

低,波动趋于平缓,呈现出平稳的“一”字形分布特征, E^+ 在维持在[0.3,1.6]内。其中,4#断面($x=7.2D$)在回流

区内紊动能较高,主要原因在于坝头漩涡下移耗散能量,导致漩涡内部的动能逐渐减小,迫使整体运动轨迹偏向动能相对较低的左岸区域,与水槽边壁发生碰撞加剧紊动。

由图9(b)可见,在2#断面,坝头区域的紊动能呈现显著的增长梯度,并且在坝头外侧($Y \cdot D^{-1} \approx 1.2$)达到峰值,这是因为绕坝水流使坝头周围流量增大,受勾头挑流分离后的大体量高速水流带动下流侧低速水流填补回流区,从而在坝头处形成漩涡,紊动能剧增,峰值远超透水孔区域。

坝体下游各断面沿横向紊动能均值同样受到勾头角度的显著影响。在2#断面($x=0.6D$),当勾头角度 θ 增至60°时, E^+ 均值相较于 θ 为45°时呈现下降趋势,造成这一现象可归因于当勾头角度达到60°时,坝头处的边界条件发生显著变化,导致被分离的水流与主流区水流发生更为剧烈的碰撞,从而造成水头损失增大,使 E^+ 均值有所降低。在3#断面($x=2.8D$)、4#断面($x=7.2D$),情况则不同,当 $\theta=60^\circ$ 时, E^+ 均值最大,且随着勾头角度的增大,紊动区域逐渐向右发生偏移。

对比坝体下游沿横向紊动能均值,当 $\theta=60^\circ$ 时, E^+ 均值相较于30°、45°分别上升27.39%、5.93%,表明紊动能与勾头角度呈正相关,主要原因为勾头角度的增大使坝体对水流引导作用变强,使下游区域产生更剧烈的波动。另外,增大勾头角度使下游水流分离点和附着点位置发生改变,进一步影响了紊动能的分布。

3 讨论

1) 传统丁坝与勾头透水丁坝概述

传统丁坝在工程实践中已取得一定的应用成效,但在回流区与过渡区内,其呈现的复杂流态特征仍存在一定的局限性。研究发现,透水丁坝在增设勾头结构后,上述两个区域内的流场均匀性得到显著提升。这一积极变化主要归因于勾头结构能有效引导水流沿坝头外侧顺畅流动,从而大幅度降低局部涡旋的生成。具体而言,勾头角度与长度的调整对水流路径产生了显著的调控效果。适度增大勾头角度能进一步促进水流平滑过渡,增强水流整体稳定性。另外,透水丁坝孔型的布设同样具有关键作用^[28],其孔型多由木桩、钢筋混凝土板构成单层或多层矩形栅格状;本试验选取的双层矩形结构利于坝后缓流促淤,护岸防冲效果好,已广泛应用于黄河中下游、塔里木河等流域。

2) 勾头透水丁坝对水流结构的影响

勾头透水丁坝的布置对原有水流结构产生了显著影响,将附近水流划分为回流区、过渡区及主流区。随着勾头角度与长度的递增,缓流效应呈现显著增强

的趋势,主流区流速亦相应提升,该变化不仅对河道缓流促淤具有重要影响,同时也为航道工程中船舶安全航行提供了更为有利的条件。该结论在前人研究成果基础上,进行了更为深入的阐释与补充^[29-30]。但在实际工程应用中,河道断面形式多样,诸如梯形、“U”形等,增加了水流结构复杂性。因此,针对多种形式的河道断面开展研究,将成为后续研究阶段的任务。

3) 勾头透水丁坝周围的紊动特性

勾头透水丁坝周围的紊动特性分布规律与勾头角度和长度的变化密切相关。勾头角度的适度增大能够显著加剧坝体下游水流的扰动效应,促使水流在流经坝体时产生更为剧烈的混合与掺混现象。反之,勾头长度的适当增加,则对降低坝后水流的紊动程度具有积极作用,有助于减少水流的能量耗散并抑制涡旋的形成。在分析影响因素的过程中发现,在所选取的勾头角度与长度区间范围内,存在一个或多个尚未明确的临界值,使得其附近的水流紊动特性可能呈现出非线性变化,从而对准确判断紊动特性的整体变化规律构成一定的干扰。为避免在揭示规律时可能存在的局限性,需对相关参数进行更为精细化的设定,深入开展后续的研究工作。

4 结 论

本文以勾头透水丁坝作为研究对象开展了水槽试验,结合试验结果与理论计算,系统全面分析了勾头角度与长度对坝体周围水流结构变化规律的影响。主要结论如下:

1) 坝体下游流速与勾头角度与长度均呈现负相关。随着勾头角度与长度的逐渐增大,丁坝对水流产生的缓流效果愈发显著。下游主流区流速呈现上升趋势,这表明勾头角度与长度的增加有助于优化河道的通航条件及改善水流环境。

2) 坝体下游紊动强度与勾头角度呈现正相关,而与勾头长度则表现为负相关。因此,增大勾头角度会加剧丁坝对水流的扰动,导致水流紊动强度上升。相反,适当延长勾头长度则有助于削弱水流的紊动强度,促进水流趋于平稳状态。

3) 勾头角度与长度对流速影响显著,流速分布近似呈现“M”形曲线。在回流区内,流速波动剧烈,峰值主要集中于透水孔及坝头前侧;而在主流区内,流速变化梯度则趋于平缓。紊动强度在回流区内同样经历剧烈波动,进入过渡区后,受卡门涡街效应影响,其数值变化幅度达到最大,约为回流区的1.7~2.3倍。另外,在回流区与过渡区内,紊动能也展现出显著的波动特性,峰值位置同样集中于透水孔及坝头前侧,且随着勾

头角度的增大,紊动能峰值位置逐渐向右岸偏转。

本文是基于恒定流状态下的物理模型试验,但实际工程中的水流条件通常是携带泥沙的非恒定流。这一差异导致丁坝周围的水流流态、流速分布及紊动特性均呈现出复杂的动态变化,可能对实验结果产生一定干扰和影响。此外,研究侧重于分析勾头角度与长度对勾头透水丁坝周围水流结构的影响,并未将透水率这一参数的变化纳入考量范围,一定程度上制约了试验结果的全面性。因此,后续可围绕更为复杂多变的水流条件及透水率等相关参数开展进一步研究。

参考文献:

- [1] Peng Xiuzhu, Xu Xiangzhou, Zhao Ying, et al. Study of effects of spur-dike group on river-regime control in lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(4): 378-385. [彭秀竹, 徐向舟, 赵莹, 等. 黄河下游丁坝群对河势控制效果研究[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(4): 378-385.]
- [2] Tabassum R, Guguloth S, Gondu V R, et al. Scour depth dynamics in varied spacing spur dike configurations: A comprehensive analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2024, 135: 103638.
- [3] Wu Yiping, Zhang Yan, Cui Pengyi, et al. Numerical simulation of the influence of spur dike angle and length on flow characteristics in recirculation zone[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2020, 42(1): 79-87. [吴伊平, 张岩, 崔鹏义, 等. 丁坝挑角及长度对回流区流动特性影响的数值模拟[J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(1): 79-87.]
- [4] Tian Weiping, Li Huiping. Influence on scour depth of spure dike parameter[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2002, 22(5): 42-44. [田伟平, 李惠萍. 丁坝挑角等参数对坝头冲刷深度的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(5): 42-44.]
- [5] Cheng Changhua, Liu Jianxin. Characteristics of scour-deposition around hooked spur-dike[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 1994, 13(3): 75-82. [程昌华, 刘建新. 丁坝勾长比对坝头冲淤特性的影响[J]. 重庆交通学院学报(自然科学版), 1994, 13(3): 75-82.]
- [6] Chen Yuhao, Liu Chenglin. Research on water characteristic of submerged bend-ended spur dike[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(6): 70-73. [陈宇豪, 刘成林. 淹没式勾头丁坝水流特性研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 70-73.]
- [7] Hu Xuyue, Yang Luxin, Shen Xiaoxiong, et al. Effects of bend head length on flow characteristics around non-submerged spur dike[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(10): 88-95. [胡旭跃, 杨陆鑫, 沈小雄, 等. 勾头长度对非淹没丁坝周围水流特性的影响[J]. 水运工程, 2015(10): 88-95.]
- [8] Vaghefi M, Safarpour Y, Akbari M. Numerical investigation of flow pattern and components of three-dimensional velocity around a submerged T-shaped spur dike in a 90° bend[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(11):

- 2984–2998.
- [9] Akbari M, Vaghefi M, Chiew Y M. Effect of T-shaped spur dike length on mean flow characteristics along a 180-degree sharp bend[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2021, 69(1): 98–107.
- [10] Tripathi R P, Pandey K K. Numerical investigation of flow field around T-shaped spur dyke in a reverse-meandering channel[J]. *Water Supply*, 2022, 22(1): 574–588.
- [11] Ghodsian M, Vaghefi M. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(2): 145–158.
- [12] Masjedi A, Nadri A, Taeedi A, et al. Control of local scour at single L-shape spur dike with wing shape in flume bend[J]. *The Journal of American Science*, 2010, 6(10): 893–897.
- [13] Patel H K, Qi Meilan, Kumar B. Downward seepage effects on flow near a L-shape spur dike and bed morphology[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2024, 39(2): 194–208.
- [14] Kang S, Khosronejad A, Hill C, et al. Mean flow and turbulence characteristics around multiple-arm instream structures and comparison with single-arm structures[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 146(5): 04020030.
- [15] Wei Wenli, Li Panpan, Shao Shipeng, et al. Study on effects of T-spur-dikes on flow characteristics in 90° bend channel by large eddy simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(6): 1419–1425. [魏文礼, 李盼盼, 邵世鹏, 等. T型丁坝对90°弯道水力特性影响的大涡模拟研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(6): 1419–1425.]
- [16] Fan Xinjian, Fu Wenwen, Wang Zhijun, et al. Study on influence of the shape of permeable spur dike on flow characteristics near the dam body[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(3): 204–207. [樊新建, 浮文文, 王之君, 等. 透水丁坝孔型对坝体附近水流特性影响研究[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(3): 204–207.]
- [17] Huang Yicai, Xu Lijun, Cheng Yongzhou, et al. Numerical analysis of flow characteristics of perforated deposit-promoting plate[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(2): 24–33. [黄伊偲, 徐立君, 程永舟, 等. 促淤板水流特性数值分析[J]. *水利水运工程学报*, 2023(2): 24–33.]
- [18] Zhou Yinjun, Liu Huanfang, He Chunguang, et al. Rational selection of the designing parameter for the permeable groin engineering[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2006, 17(5): 42–45. [周银军, 刘焕芳, 何春光, 等. 透水丁坝工程设计参数的合理选择[J]. *水资源与水工程学报*, 2006, 17(5): 42–45.]
- [19] Shen Shuaihui, Li Yujian, Li He, et al. Numerical simulation on optimization scheme of permeable hole of permeable sheet piling spur dike[J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2020, 51(4): 159–165. [申帅辉, 李玉建, 李鹤, 等. 插板透水丁坝透水孔优化方案数值模拟[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(4): 159–165.]
- [20] Li Tan, Jin Shiping, Huang Suyi, et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity: Comparison and application[J]. *Thermal Power Generation*, 2013, 42(11): 60–63. [李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. *热力发电*, 2013, 42(11): 60–63.]
- [21] Cheng Fei, Liu Shanjun. Numerical simulation and experimental investigation for deflecting stilling basin[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(Z1): 12–17. [程飞, 刘善均. 微挑消力池的数值模拟与试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(Z1): 12–17.]
- [22] Ning Jian, Li Guodong, Ma Miao. 3D numerical simulation for flow and local scour around spur dike[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(1): 46–53. [宁健, 李国栋, 马淼. 丁坝绕流流场及局部冲刷三维数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2017, 32(1): 46–53.]
- [23] Zhou Meirong, Xia Junqiang, Zhang Xiaolei, et al. Study on the hydrodynamic and resistance characteristics of open-channel flow with vegetation in the floodplain of the Lower Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(3): 7–14. [周美蓉, 夏军强, 张晓雷, 等. 黄河下游滩区含植物水流运动及阻力试验研究[J]. *泥沙研究*, 2023, 48(3): 7–14.]
- [24] Wang Duoyin, Jiang Mingjie, Mu Junshuai, et al. Experiment on flow characteristics around pile group under unsteady flow[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(5): 2118–2127. [王多银, 蒋明杰, 穆军帅, 等. 非恒定流下桩群绕流特性试验[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(5): 2118–2127.]
- [25] Xu Xiangyu, Zhong Liang, Li Guoji, et al. Characterization of turbulent flow in open channel with non-uniform bulk rough bed[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(3): 137–142. [徐翔宇, 钟亮, 李国际, 等. 非均匀散粒粗糙床面明渠紊流特性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(3): 137–142.]
- [26] Huang Xiaoli, Guo Zhixue, Li Bin, et al. Experimental study on three-dimensional flow structure of river affected by accumulation body[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(Z1): 14–20. [黄小利, 郭志学, 李彬, 等. 受堆积体影响的河道3维水流结构试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(Z1): 14–20.]
- [27] Kuang Cuiping, Cong Xin, Fan Jiadong, et al. Review of physical experiments on mechanisms of coastal protection by vegetation[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2024, 52(3): 378–387. [匡翠萍, 丛新, 范家栋, 等. 海岸植被防护机制的物理模型试验研究进展[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(3): 378–387.]
- [28] Fan Xinjian, Cheng Yangwei, Zhang Youming, et al. Influence of Permeable Hole Arrangement on Flow Characteristics of Permeable Spur Dike Action Zone[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(12): 204–208. [樊新建, 程扬威, 张永明, 等. 透水孔布置方式对透水丁坝作用区水流特性的影响[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(12): 204–208.]
- [29] Cheng Changhua, Liu Jianxin, Xu Guangxiang. Experimental study on the influence of Goutou spur dike on water flow structure[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*

sity(Natural Science),1994,13(1):58–69.[程昌华,刘建新,许光祥.勾头丁坝对水流结构影响的试验研究[J].重庆交通学院学报(自然科学版),1994,13(1):58–69.]

[30] Iqbal S,Pasha G A,Ghani U,et al.Investigation of flow dynamics around a combination of different head shapes of spur dikes[J].Tehnički vjesnik,2022,29(6):2111–2120.

Research on the Effects of Hook-angle and Length on the Structure of Water Flow Around Permeable Spur Dike

FAN Xinjian¹, LI Zhuo¹, PANG Cuichao^{2,3}, HOU Huimin¹, CHENG Yangwei¹

(1.School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2.The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3.Shanghai Hehu Engineering Consulting Company Limited, Shanghai 200080, China)

Abstract:

Objective The selection of the hook-head permeable spur dike’s structural design and body parameters is of great importance for reducing river flow velocity and promoting siltation. Compared to conventional dike designs, the permeable design exhibits enhanced coordination and stability. It effectively overcomes the constraints of solid dike design in complex engineering applications. In addition, it enhances the flow structure surrounding the dike, mitigates scouring and siltation, and increases the navigability and flood control capacity of the river. However, research on the effects of body parameters on water flow structure remains limited. This study presents an in-depth investigation of the influence of hook-head angle and length modifications on water flow structure around the dike. The objective is twofold: to provide a theoretical foundation for optimizing body parameter design of the hook-head permeable spur dike in practical projects and to raise the adoption and advancement of this dike type.

Methods The research utilized a physical model test with a hook-head permeable spur dike. An ADV was employed to accurately measure the three-dimensional instantaneous flow velocity around the dike under different hook-head angles and lengths. The test apparatus consisted of a linear open channel, in which the permeable holes of the spur dike model were arranged in a double-layer rectangular configuration, characterized by a controlled permeability of 20%. The measurement sections, which numbered five in total, were positioned circumferentially around the spur dike, with 22 measurement points established at each section. Each measurement point underwent continuous measurement for 30 seconds. The collected data underwent processing, during which the theoretical calculation methods were applied to calculate the slow flow rate, flow field uniformity, turbulence intensity, and turbulence energy around the spur dike. The dimensionless processing was conducted to enhance the intuition of the data. The study further analyzed the specific effects of different body parameters on the flow velocity, slow flow rate, flow field uniformity, turbulence intensity, and the change rule of turbulence energy.

Results and Discussions The findings of the research indicated that the hook-angle and length of the permeable spur dike had a substantial impact on the flow structure downstream of the dike when integrated with the hook head design. It was observed that as the hook-angle increased, the flow velocity downstream of the dike decreased, while the turbulence intensity and turbulence energy increased. Specifically, when the hook-angle was set at 60°, rather than 30° and 45°, the flow velocity downstream of the dike body decreased by 2.87% and 1.61%, respectively. Simultaneously, the retardation rate increased by 6.79% and 3.69%, the turbulence intensity increased by 18.95% and 7.58%, and the turbulence energy increased by 27.39% and 5.93%, respectively. Increases in hook-length resulted in decreases in downstream flow velocity and turbulence intensity of the dike body. At hook-length $D/2$, the flow velocity downstream of the dike body decreased by 8.75% and 3.11%, and the turbulence intensity decreased by 3.86% and 1.97%, compared to $D/4$ and $D/3$. In the downstream reflux zone and transition zone, the flow velocity fluctuation was characterized by an “M” type distribution. The turbulence intensity fluctuation was most intense in the downstream reflux zone, and the variation in the transition zone reached a maximum, which was about 1.7 to 2.3 times that in the reflux zone. The turbulence energy was influenced by the hook-angle, with a maximum observed in the area between the permeable hole and the outer part of the dike head. As the hook-angle increased, the peak value gradually deflected toward the right bank. In addition, compared to the conventional permeable straight dike, the average flow velocity in the downstream near-dike area of the hook-head permeable dyke dike decreased by approximately 17%, which substantiated the effectiveness of the hook-head permeable dyke dike in reducing flow velocity.

Conclusions The study demonstrated a negative correlation between the downstream flow velocity of the dike and the hook-angle and length. As the hook-angle and length increase, the slowing effect of the spur dike on the water flow becomes more pronounced. In contrast, the flow velocity in the downstream main stream area exhibited an upward trend, indicating that increasing hook-angle and length can enhance river navigability and improve the flow environment. In addition, the turbulence intensity downstream of the dike was found to be positively correlated with the hook-angle and negatively correlated with the hook-length. Therefore, an increase in hook-angle aggravates the disturbance of the water flow by the spur dike, resulting in higher turbulence intensity. An appropriate extension of the hook-length can weaken the turbulence intensity of the water flow and raise its movement toward a more stable state.

Key words: hook-head permeable spur dike; hook-angle; hook-length; water flow structure; turbulence intensity

(编辑 吴芝明)

引用格式: Fan Xinjian, Li Zhuo, Pang Cuichao, et al. Research on the effects of hook-angle and length on the structure of water flow around permeable spur dike[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(1): 57–67. [樊新建, 李拙, 庞翠超, 等. 勾头角度与长度对透水丁坝周围水流结构影响的研究[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(1): 57–67.]