DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0335
文章编号:1671-8844(2026)09-1399-10

基于VDMS技术的三联丁坝区水力特性及根石走失试验研究

刘明潇[1],孟奔[1],周子熙[1],侯艳艳[2],胡昊[3]

(1. 华北水利水电大学港口、航道与海洋发展研究中心,河南 郑州 450046; 2. 中国南水北调集团中线有限公司河南分公司,河南 郑州 450016; 3. 黄河水利职业技术大学,河南 开封 475004)

摘要: 以黄河常见的控导工程(三联丁坝)为研究对象,基于相似理论建立了几何比尺为1∶30的概化实体模型(包括根石),并采用VDMS(velocity distribution measuring system)流场监测技术开展丁坝区水动力特性与根石走失的试验研究。对不同来流角度、不同来流弗劳德数Fr的10种工况进行研究,分析了丁坝区流场流线与流速分布、根石稳定性及运动特征,获取了丁坝上跨角、下跨角和迎流面处的垂线流速分布与根石走失时的水流临界条件。在Fr接近0.7的大水顶冲时,坝头表面流速为3.5~6.0 m/s,下跨角漩涡区流速为3.0~4.0 m/s,迎流面回流流速为1.2~2.5 m/s,坝间回流区长度约为丁坝长度的2/3。根石区流速大于3.6 m/s的阈值后,部分根石开始失稳,下跨角根石走失最多,大部分停滞在坝头前下游约30~50 m的区域;四面体根石的水下稳定性优于普通根石,丁坝上跨角是需要重点监测和防护的关键部位。研究成果深化了对丁坝区水流流场与根石走失特点的认识,可为丁坝区流场结构及根石走失规律研究提供技术支撑。

关键词: 丁坝;相似准则;VDMS系统;流场分析;涡旋;回流;根石

中图分类号: TV 147　**文献标志码:** A

Experimental study on hydraulic characteristics and root stone loss in a triple spur dike area based on VDMS technology

LIU Mingxiao[1], MENG Ben[1], ZHOU Zixi[1], HOU Yanyan[2], HU Hao[3]

(1. Research Center for Port, Channel and Ocean Development, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Branch of China South-to-North Water Diversion Middle Route Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 3. Yellow River Conservancy Technical University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Taking the common control and regulation structures (triple spur dikes) of the Yellow River as the research object, a generalized physical model (including the root stones) with a scale of 1∶30 is established based on the similarity theory, and VDMS (velocity distribution measuring system) flow field monitoring technology is adopted to conduct experimental research on the hydrodynamic characteristics of the spur dike area and the root stone loss. Ten different working conditions with different inflow angles and different inflow Froude numbers Fr are studied. The flow field streamlines, flow velocity distribution, stability and movement characteristics of the

收稿日期: 2024-08-13

作者简介: 刘明潇(1986-),女,副教授,博士生导师,主要从事水力学及河流动力学研究,E-mail:liumingxiao@ncwu.edu.cn。

通信作者: 胡昊(1979-),男,教授,博士生导师,主要从事智慧水利研究,E-mail: hh@ncwu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号:2023YFC3011400;2023YFC3011402);中央引导地方科技发展资金项目(编号:Z20241471035);水利部重大科技项目(编号:SKS2022030);华北水利水电大学研究生创新基金(编号:NCWUYC-202416010)。

本文引用格式: 刘明潇,孟奔,周子熙,等.基于VDMS技术的三联丁坝区水力特性及根石走失试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1399-1408.

Citation: LIU Mingxiao, MENG Ben, ZHOU Zixi, et al. Experimental study on hydraulic characteristics and riprap loss in the area of three spur dikes based on VDMS technology[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9):1399-1408.

root stones in the spur dike area are collected and analyzed, and the vertical flow velocity distribution at the upstream convex point, downstream convex point of the spur dike head, and the flow-facing surface of the spur dike, as well as the critical conditions of the water flow when the root stones are lost, are obtained. When a large water surge with a *Fr* approaching 0.7 occurs, the surface flow velocity at the spur dike head is 3.5-6.0 m/s, the flow velocity in the downstream convex point vortex area is 3.0-4.0 m/s, the flow velocity in the reflux area of the flow-facing surface of the spur dike is 1.2-2.5 m/s, and the length of the reflux area between the spur dikes is about 2/3 of the length of the spur dike. When the flow velocity in the root stone area exceeds the threshold of 3.6 m/s, some root stones begin to lose stability. The root stones at the downstream convex point are lost the most, and most of the lost root stones remain in the area about 30-50 m downstream of the spur dike head. The underwater stability of the tetrahedral root stones is better than that of ordinary root stones. The upstream convex point of the spur dike should be the key area that requires focused monitoring and protection. The research results deepen the understanding of the flow field and the root stone loss characteristics in the spur dike area, and can provide technical support for the study of the flow field structure and root stone loss patterns in the spur dike area.

Key words: spur dike; similarity criterion; VDMS; flow field analysis; vortex; reflux; root stones

丁坝群是冲积性河流中最常见的河道整治建筑物,可以调整来流方向,避免堤防受水流直接冲刷,在黄河下游游荡型河道治理中尤为常见。丁坝建成后会在局部范围内影响河流的流态[1]。坝头附近的旋涡在形成、分离到衰减的过程中,会使水流呈现出强烈的三维紊动特性,造成丁坝区水流结构复杂多变。因此,深入研究丁坝附近水流结构不仅具有重要的水动力学理论意义,还可以为丁坝设计与基础防护提供技术指导,具有显著的工程应用价值[2]。

20世纪70年代,长江水利科研团队研究了平顺、矶头及丁坝3种护岸的适用水流条件以及水流冲刷特性[3]。在工程应用层面,目前针对护岸工程已有大量深入研究,学者们采用相似理论开展试验,研究各种护岸工程材料的破坏机理、适用条件以及防护功效[4]。屈孟浩等[5]提出了具有代表性的动床模型相似律,并将其应用在黄河三盛公枢纽动床模型试验中;ZHANG等[6]利用高分辨率激光位移计、电磁测速仪和粒子图像测速仪(particle image velocimetry,PIV)等先进设备,对丁坝冲刷形态和流速进行了精确测量;VAGHEFI等[7]采用SSIIM(sediment simulation in intakes with multiblock option)模型对弯曲河段T形丁坝周边流场的三维流速分布进行了数值模拟;RAJARATNAM等[8]开展丁坝绕流试验,提出丁坝附近沿水深方向存在内层、中间层以及表面势流层3个特性不同的区间;TOMINAGA等[9]借助PIV技术,发现丁坝附近水平涡流与垂直涡流间的相互作用使水流结构呈现强三维性;ROSGEN[10]通过模型试验研究指出,若丁坝布置不当,其上下游会产生强烈旋涡,进而加剧堤岸冲刷;AZINFAR等[11]通过试验研究了单丁坝的阻水作用,提出丁坝阻力系数取决于丁坝宽高比、淹没程度以及来流弗劳德数;DUAN[12]利用激光多普勒流速仪(laser Doppler velocimetry,LDV)对丁坝附近的水流速度和水深进行了精确测量,分析了丁坝水流的三维紊动特性;李冰冻等[13]利用LDV进行了丁坝绕流试验,发现丁坝的不同配置对周边流场影响显著,进而引发局部冲刷现象;李志勤等[14]和胡志毅[15]通过三维数值模拟研究了不同挑角下丁坝周围的流场特性,结果表明,各丁坝坝后形成的回流区范围大致相同;基于Flow-3D,YAO等[16]研究了水流冲刷作用下支墩的根石流失现象及其影响因素;魏文礼等[17]通过数值模拟研究指出,丁坝群在优化河道流态、减轻岸坡冲刷方面可以发挥显著作用;杨旭亮等[18]研究了不同长度组合的双丁坝对河道流场结构及河床局部冲刷的影响;XU等[19]研究了河床冲刷对丁坝水动力特性的影响;ETTEMA等[20]通过水槽试验得出,丁坝导流会导致回流产生,且坝长增加会引起回流长度相应增加,从而对丁坝水流结构产生显著影响。

三联丁坝是反映河流控导工程中丁坝群特性的基本组合单元,可以体现主坝与上下游邻坝间的流场特征及相互影响机制。丁坝坝头绕流形成的涡旋从分离、发展到衰减的过程会使水流呈现高强度紊动,流动结构异常复杂,相邻两坝坝裆间的摩擦回流十分强烈。丁坝冲刷破坏的主要诱因是主

坝与邻坝间回流区的淘刷作用造成的根石走失，这也是河道工程安全关注的焦点[21]。然而，坝裆间流态复杂，水下根石状态无法观察、不易感知，相关险情通常在丁坝工程出险后才被发现。目前，针对三联丁坝间复杂水动力特性的精细研究以及根石在复杂流场中失稳、走失机制的研究尚不充分，加之试验观测技术有限，严重制约了丁坝防护与抢险技术水平的发展。

1　研究对象与方法

1.1　研究对象

黄河下游河道宽浅、主槽不稳，为了控制河势、保护堤防，丁坝群被大量采用作为控导工程。本文选择该河段一个典型三联丁坝群作为研究对象，其平面布置与立面结构如图1、2所示。该丁坝为下挑式，坝轴线与来流流向的夹角为30°，横断面为梯形，迎流面和背流面边坡坡度均取1∶1.5；根石台宽度1.5 m，坡度为1∶1；坝长70.0 m、高15.0 m，坝顶宽15.0 m；坝头顶部圆弧半径7.5 m、底部圆弧半径30.0 m；三联丁坝的坝间距为1.6倍坝长。丁坝区河流水深一般为6～8 m，流速为2～5 m/s，来流弗劳德数Fr=0.25～0.72，来流角度为60°～70°，底坡3/10 000，丁坝基础根石块径一般为30～60 cm。

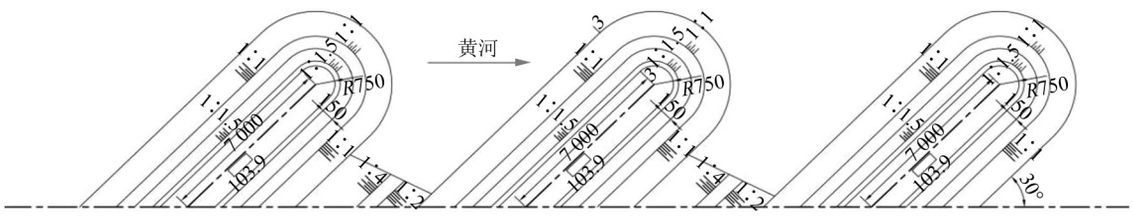


图1　丁坝平面布置（单位：mm）

Fig.1　Layout plan of the spur dike(unit:mm)

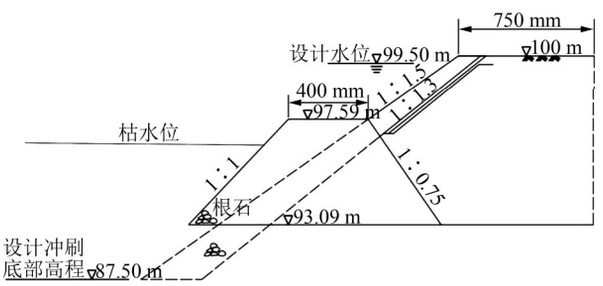


图2　丁坝横剖面

Fig.2　Cross-sectional view of the spur dike

1.2　研究方法

黄河丁坝周围水流运动现象复杂，通过物理模型试验揭示丁坝群间的水流运动规律是开展堤防工程安全评价的重要手段。本文基于水流运动相似理论，建立概化三联丁坝群水槽模型，通过水力模拟试验研究单个丁坝的绕流特点及上下游丁坝间的相互影响机制；为了精细、全面地采集丁坝区流场流态及流速分布，本文采用基于VDMS（velocity distribution measuring system）的表面流场实时监测技术探寻丁坝区复杂流场特性。

1.3　流场监测原理与技术

1）流场动态实时监测原理

VDMS是基于数字摄像与粒子跟踪测速技术（particle tracking velocimetry，PTV）研发的大范围表面流场同步测速系统，测速技术原理是将识别到的运动粒子的位移除以连续2帧图像之间的时间间隔，进而得到流速，基本关系见图3，计算式如下：

$$\boldsymbol{u}=\lim_{t_1\to t_0}\frac{\boldsymbol{X}_1-\boldsymbol{X}_0}{t_1-t_0}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{X}}{\Delta t} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{u}$为粒子水面运动速度，亦为水面流速；$\boldsymbol{X}_0$、$\boldsymbol{X}_1$分别为单个示踪粒子的初始曝光位置和下一帧曝光位置的矢量值；t_0和t_1分别为粒子各位置对应的时刻；$\Delta\boldsymbol{X}$为时间Δt内粒子经过的位移矢量。

2）VDMS流场监测技术

VDMS由采集系统与后处理系统组成。采集系统主要利用摄像机采集流场水面示踪粒子的运动图像，后处理系统用来解析数字化流场。VDMS适用于大范围表面流场的实时测量，能够快速、精确地得到观测区域内的流场速度分布、沿流程各断面流速分布以及单个或多个测点的流速矢量变化

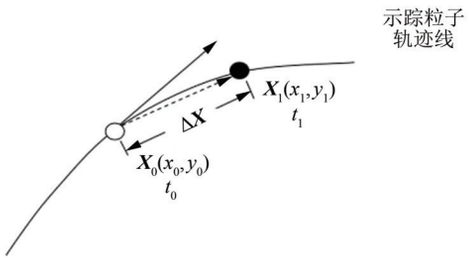


图3　单个示踪粒子的运动状态

Fig.3　Motion state of a single tracer particle

过程。该监测系统在大型水工与河工模型试验的流场监测、流态分析中得到了较好的应用,技术应用流程如图 4 所示,图中:CCD(charge-coupled device)为电荷耦合器件。

2 丁坝区水力模拟试验设计

2.1 物理模型设计与制作

1)相似比尺

为满足流动的相似性,本文模型设计依据弗劳德相似准则。综合考虑原型水流边界条件、试验场地、供水条件等,选取几何比尺 λ_L 为 30.00,其他主要控制比尺如下:流速比尺 $\lambda_v=\lambda_L^{0.5}$,取 5.48;流量比尺 $\lambda_Q=\lambda_L^{2.5}$,取 4 929.50;糙率比尺 $\lambda_n=\lambda_L^{1/6}$,取 3.11;粒径比尺 $\lambda_d=\lambda_L$,取 30.00。

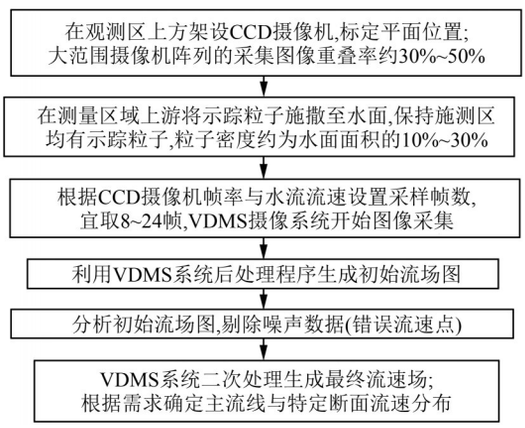


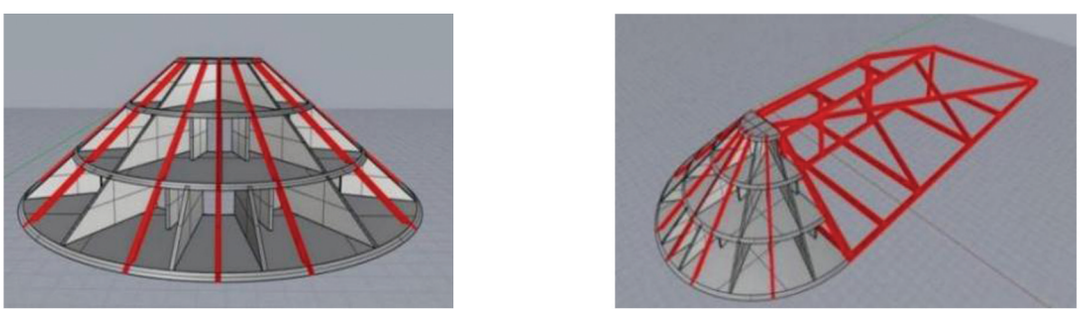
图 4 VDMS 流场监测技术流程

Fig.4 Process of VDMS flow field monitoring technology

2)丁坝模型设计与制作

根据《堤防工程设计规范》、黄河下游水流流势、岸线冲刷情况和所选研究对象,在宽 3 m 的水槽内建立丁坝群概化模型。为了确保丁坝在模型试验过程中的稳定性,坝头由薄铝面板和钢支挡结构组成,如图 5 所示,通过支挡结构保证坝头的安全稳定。水槽模型进口设置整流栅,以保持河道来流条件;三联丁坝上游对岸侧设置导流栅,使近坝水流与丁坝保持一定的顶冲角,一般控制在 50°~70°之间,如图 6 所示。

为了体现水流对丁坝的淘刷破坏作用,本模型基础按起动相似理论铺设了模型丁坝根石,块径为 1~2 cm。模型供水系统由进水系统、回水系统以及流量控制系统组成,采用平水塔进行稳流,模型尾水返流回水库,形成稳定的水力循环系统;流量采用电磁流量计(electromagnetic flowmeter,EMF)控制。模型详细布置如图 7 所示。



(a) 整体结构 (b) 钢骨框架结构

图 5 丁坝模型坝头结构

Fig.5 Structure of the head of the spur dike

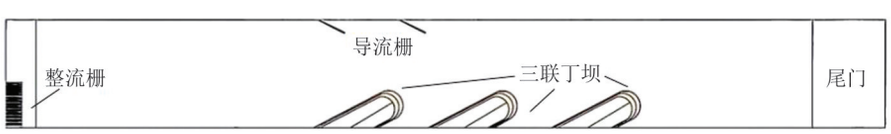


图 6 试验水槽模型区域俯视图

Fig.6 Top view of the test flume model area

2.2 丁坝模型 VDMS 的设计与建立

丁坝区流场结构复杂,流速、流向变化显著,采用 VDMS 流场监测系统对丁坝区流场进行监测可以精准获取该区域各种流场信息。根据丁坝群水槽模型试验的特点,模型流场影像采集由 4 台 CCD 摄像机完成。由于流场观测区域较大,摄像头布置于模型区上方 4.0 m 处,因此在水槽外壁侧架设高 5.0 m、悬臂臂长 1.6 m 的桁架,将 400 万像素的全景监控摄像机安装在桁架悬臂外侧 1.5 m 处,使其位于试验丁坝区正上方。摄像机监控覆盖范围为顺水流方向 9 m、垂直水流方向 3 m,满足丁坝上下游回流区的监控覆盖要求。

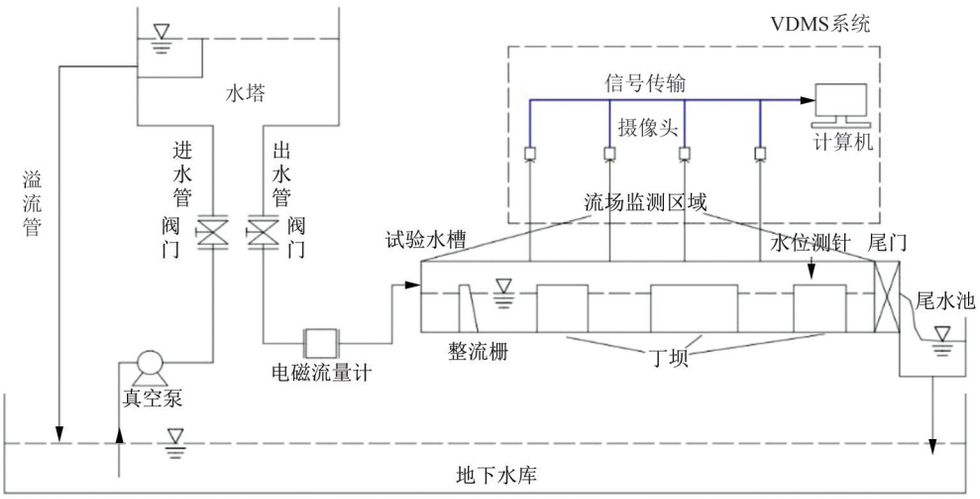
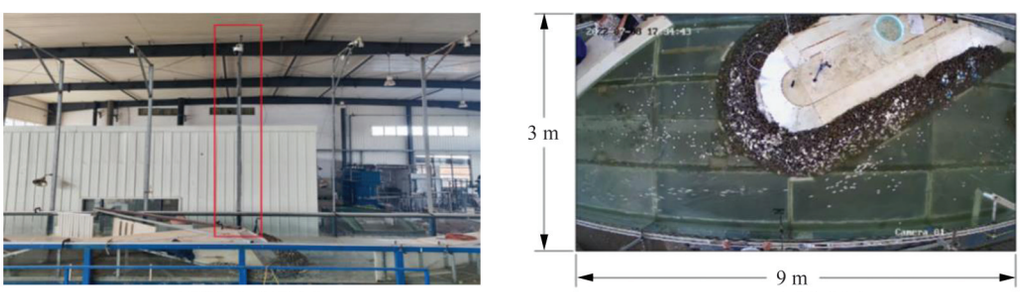


图 7　模型整体范围布置主视图

Fig.7　Main view of the overall layout of the model

为使VDMS能准确检测模型区水面示踪粒子的运动并解析出可靠的流场图，拍摄时需保证监测区无眩光和阴影。为了避免自然光影响图像质量，通常在摄像机正前方加装LED（light-emitting diode）强光灯，利用斜射光消减试验区照明灯引起的水面眩光。VDMS流场监测系统在丁坝群模型区的布置如图8所示。



(a) 摄像机架设位置　　(b) 覆盖范围

图 8　试验监测摄像机架设位置和覆盖范围

Fig.8　Installation position and coverage area of the test monitoring camera

3　丁坝区水力特性试验研究

3.1　流场试验研究工况

为研究丁坝区水流运动规律及根石走失时的流场特征，本文利用已建丁坝群的概化模型开展不同流量、不同来流方向的模型试验。根据黄河下游河道常见的洪水流速、水深条件，利用比尺关系确定主要试验工况，如表1所示，表中：Q_m为模型流量；q_p为对应原型单宽流；H_m为模型下游控制水深。试验工况均采用模型试验数据，分析时将试验成果转换为原型数据。

表 1　模型试验水流条件

Table 1　Flow conditions for model tests

工况	Q_m/(m³·s⁻¹)	q_p/(m²·s⁻¹)	H_m/m	Fr
1	0.19	13.87	0.30	0.25
2			0.25	0.32
3			0.16	0.63
4			0.14	0.77
5	0.18	13.14	0.24	0.33
6			0.20	0.53
7			0.16	0.69
8	0.16	11.68	0.40	0.13
9			0.35	0.16
10			0.20	0.38

3.2　流场流态特征

1）丁坝区流场水位变化特征

为研究丁坝区附近流场及流态特征，本文模拟不同来流强度、来流角度、水深等水力条件，系统观测丁坝区各部位的流态。在丁坝典型部位布设多条测线，测量丁坝区流场水位与流速，坝头典型测

点分布如图 9 所示,插值后的丁坝区水深分布如图 10 所示。由图可以看出,水流过坝后水位明显降低,上跨角附近的水面急剧跌落。实测过坝水位落差变化特征显示,过坝前后水头差一般在 0.4 m 左右,且受水流强度影响,随流量和 Fr 增大而增大;在 Fr 接近 0.7 时,过坝落差较大,接近 0.7 m。

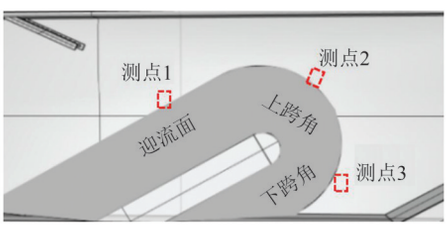


图 9 丁坝坝头典型测点位置图

Fig.9 Layout of typical measuring points at the spur dike head

2)丁坝区流场流态特征

本文使用 VDMS 采集丁坝区表面流场图像,分析坝区附近关键部位的流线图,各水流条件下的流态对比如图 11 所示。由图 11 可知,当来流与丁坝存在一定夹角时,水流进入丁坝影响区后受边界约束,在接近丁坝时水流逐渐收缩并调整流向,丁坝区流线呈现先疏后密的特点。这表明受丁坝影响,水流呈现接近丁坝坝头时汇聚加速、越过丁坝后扩散减速的流态特征。主流进入丁坝区后,在坝头受

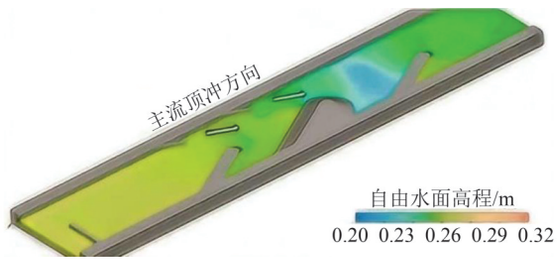
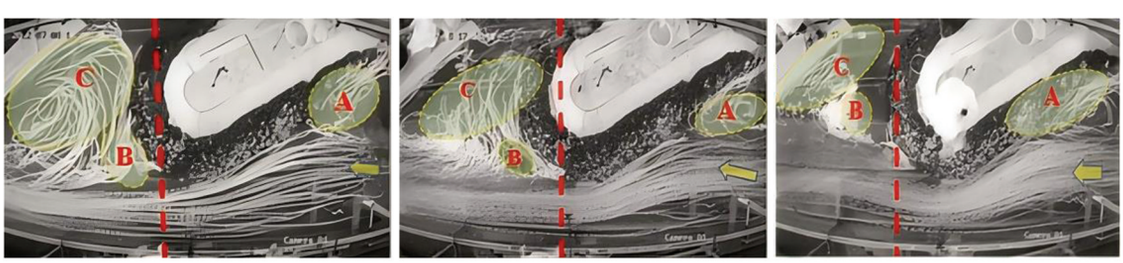


图 10 模型丁坝区水深分布(Q_m=0.16 m³/s, H_m=0.25 m, Fr=0.23)

Fig.10 Distribution of water depths in the model spur dike area (Q_m=0.16 m³/s, H_m=0.25 m, Fr=0.23)

阻形成局部壅水,同时被迫调整方向,趋向河心。在水流绕过坝头的过程中,惯性作用使其进一步收缩,从而使得上跨角附近区域的比降与流速急剧增大,下跨角处水位降低,并产生强烈的局部涡旋。

由图 11 可见,丁坝区流态的纵向发展规律基本一致。水流在坝头附近收缩,流线汇聚,形成下切水流与底部马蹄形漩涡,导致坝头区流态高度紊乱。受丁坝挑流影响,坝头迎流面和背流面(下跨角)的坝裆区形成流线回旋的平面摩擦环流,如图 11 中丁坝迎流面区的摩擦回流 A、下跨角处旋度很强的立轴漩涡 B 以及背流面区的摩擦回流 C 所示。这些回流及涡旋对丁坝根石具有强烈的淘刷作用,回流 A 的强度及淘刷影响均大于回流 C,回流范围与强度均与来流流速有关。



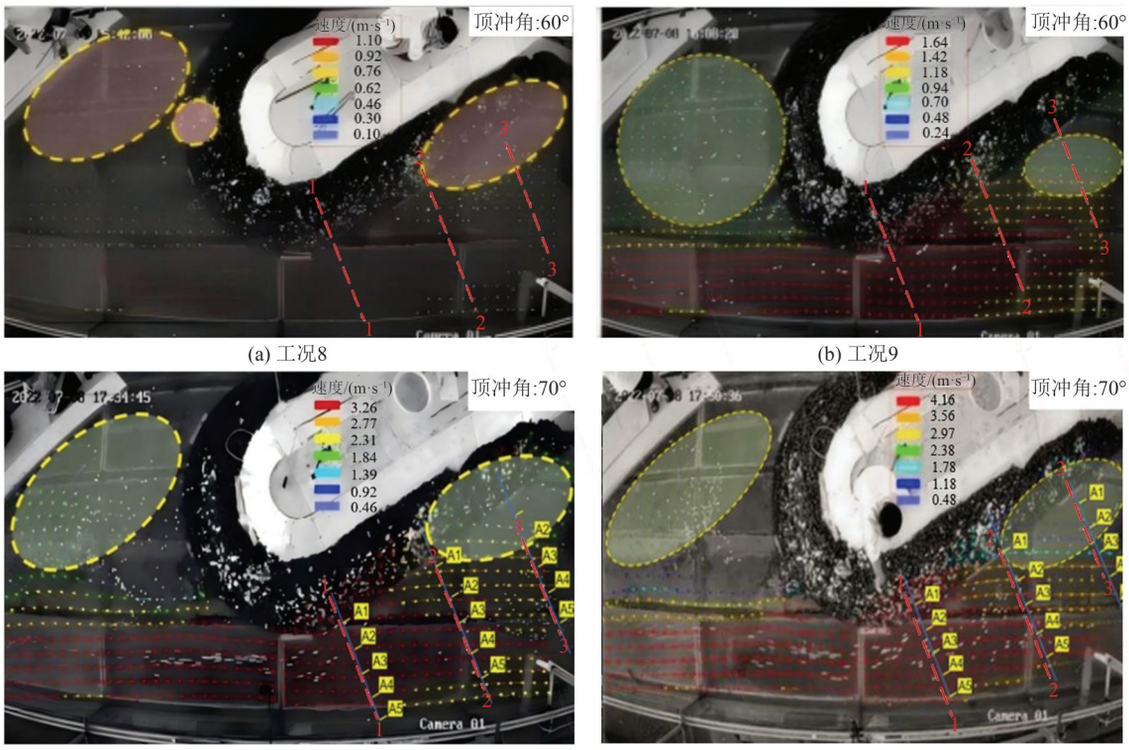
(a) 工况4 (b) 工况2 (c) 工况3

图 11 VDMS 测取的丁坝区流场流线(顶冲角 60°)

Fig.11 Streamlines of flow field in the spur dike area measured by VDMS (impact angle of 60°)

3.3 丁坝关键部位水流结构(流速分布)特征

本文采用 VDMS 对丁坝区表面流场进行流速采集与解析,得到不同工况下丁坝区矢量化流速场,同时采用旋桨流速仪对丁坝坝头典型测点进行不同水深下的流速测量。经整理,得到顶冲角为 60°、70°时,不同水流强度(Fr=0.13~0.69)下主丁坝区流速矢量场,如图 12 所示。来流在丁坝坝头附近加速,形成顶冲之势,Fr=0.13~0.16 时,坝头前流速为 3.26 m/s;Fr=0.53~0.69 时,坝头前流速达到 4.16 m/s。丁坝对来流产生了明显的阻挡作用,迎流面水流湍急、流态复杂。选取图 12(c)、(d)中 3 个不同断面,给出迎流区的流速分布状况,如表 2 所示,表中:h_c 为测点处水深;H_c 为测点处总水深。丁坝迎流面近坝表面流速为 3.0~4.0 m/s,近底流速为 1.0~1.5 m/s;近坝头的 1-1 断面流速较大,而近岸的 3-3 断面流速相对较小。丁坝上下游坝裆区均有回流产生,回流强度与 Fr 呈正相关关系。丁坝迎流面的回流强度大、流态变化复杂:Fr=0.53 时贴岸反向流速达到 2.0~2.4 m/s,Fr=0.69 时贴岸反向流速达到 2.5~3.4 m/s。丁坝背流区回流强度



(a) 工况8　(b) 工况9

(c) 工况6　(d) 工况7

图 12　主丁坝区流场实测模型流速分布

Fig.12　Measured model flow velocity distribution in the flow field of the main spur dike area

低，回流区流速一般在0.50～0.80 m/s，最大流速为1.6 m/s。

分析三联丁坝区流场流速分布可知，丁坝区水流结构受来流与丁坝挑流的共同影响。来流以一定顶冲角作用于丁坝，主流在接近坝头时流速逐渐增大，经过丁坝上跨角时局部比降与流速达到最大，丁坝上游不同断面的流速分布见表3；坝头附近表面流速一般在3.5～5.0 m/s之间，最大流速接近5.5 m/s。一方面，主流被挑向河心；另一方面，过丁坝的水流逐渐扩散。受主流卷吸作用，水流绕经坝头后在下跨角附近形成强烈的局部剪切漩涡区，涡旋区流速可达3.0～4.0 m/s。丁坝阻水使坝前迎流面水体在主流剪切摩擦与卷吸作用下形成摩擦回流，回流区流速约为1.2～2.5 m/s，贴坝局部流速可达3.5 m/s。丁坝背流面同样存在由水体剪切摩擦形成的坝间回旋滞留区，回流强度远低于迎流面。

模型试验表明，水深7 m、Fr＞0.36时，丁坝上跨角及迎流面部分根石开始起动。在临界条件下，选取丁坝迎流面、上跨角、下跨角3个代表点位，测取不同水深位置的流速，典型测点流速垂向分布如

表 2　丁坝上游迎流区不同断面的流速分布（Fr=0.53）

Table 2　Distribution of flow velocity at different sections in the upstream area of of spur dikes（Fr=0.53）

断面	测点位置（h_c/H_c）	流速/(m•s^{-1}) A1	A2	A3	A4	A5	流速均值/(m•s^{-1})
	0	3.15	3.10	3.11	3.10	3.19	3.13
1-1	0.4	2.59	2.59	2.43	2.52	2.62	2.55
	0.8	1.08	1.08	1.10	1.10	1.08	1.09
	0	2.83	2.83	2.75	2.85	2.85	2.82
2-2	0.4	2.48	2.48	2.58	2.55	2.55	2.53
	0.8	1.15	1.15	1.18	1.15	1.15	1.16
	0	2.40	2.33	2.45	2.45	2.48	2.42
3-3	0.4	2.13	2.20	2.18	2.18	2.20	2.18
	0.8	1.38	1.40	1.30	1.18	1.18	1.29

表 3　丁坝上游迎流区不同断面的流速分布（Fr=0.69）

Table 3　Distribution of flow velocity at different sections in the upstream area of of spur dikes（Fr=0.69）

断面	测点位置（h_c/H_c）	流速/(m•s^{-1}) A1	A2	A3	A4	A5	流速均值/(m•s^{-1})
	0	4.09	4.02	4.00	4.02	3.99	4.02
1-1	0.4	4.16	4.13	4.10	4.11	4.01	4.10
	0.8	1.35	1.38	1.35	1.31	1.31	1.34
	0	3.46	3.88	3.92	3.78	3.78	3.76
2-2	0.4	3.57	3.67	3.53	3.53	3.46	3.55
	0.8	1.28	1.28	1.24	1.24	1.21	1.25
	0	3.46	3.39	3.5	3.46	3.43	3.45
3-3	0.4	3.11	3.25	3.18	3.18	3.36	3.22
	0.8	1.52	1.52	1.52	1.35	1.45	1.47

图 13所示。流速分布曲线显示,受坝头强紊动水流影响,上跨角流速最大,垂线流速分布较为均匀,沿水深各点流速均在 3 m/s以上,水面流速超 4 m/s;迎流面流速较上跨角小约 30%,流速沿水深分布梯度较大,底部流速仅为表面流速的 45%;下跨角受滞流区影响流速较低,下切水流使其流速垂线分布较为均匀。

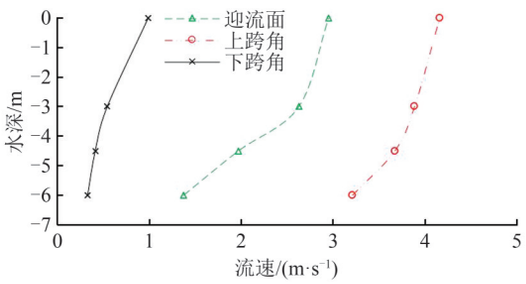


图 13 坝头典型测点流速垂线分布
(原型水深 H=7 m,Fr=0.36)

Fig.13 Vertical distribution of velocity at typical measurement points at the spur dike head
(prototype water depth H=7 m,Fr= 0.36)

本文利用粒子图像测速法给出了黄河下游某丁坝群在原型流量 Q=2 000 m³/s、Fr=0.22时的实测流速矢量场及平面流态图,如图 14所示。可以看出,利用无人机航测获取的原型丁坝流速矢量场及平面流态与试验获取的流场流态及流速分布(见图 12(c))比较接近,最大流速均在 2~3 m/s,回流区位置与范围也基本一致,表明模型试验结果基本反映了实际丁坝工程的水流结构。

3.4 丁坝坝间回流及根石走失特征

丁坝区产生的坝间回流会引起河道局部水流结构的显著改变与流速分布的调整。本文通过水槽模型试验,借助 VDMS 测速技术,对坝间回流特性与丁坝根石走失现象进行分析。

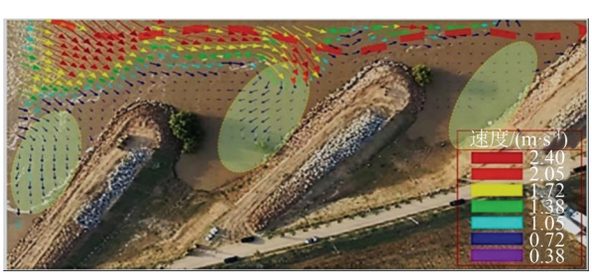


图 14 黄河下游某典型丁坝群的流态及流速分布(无人机航测,Q=2 000 m³/s,Fr=0.22)

Fig.14 Flow pattern and velocity distribution of a typical spur dike group in the lower Yellow River (UAV, Q=2 000 m³/s, Fr=0.22)

1)回流区位置与范围

主流受丁坝挑送后,原有运动方向发生改变。在坝间滞留水体的静水摩擦与主流卷吸作用下,上下丁坝间形成了较大的回流区,如图 15所示。从连坝坝根起算,回流区长度接近坝长的 2/3,该长度一般与流量呈正相关关系、与顶冲角度呈负相关关系。上回流区对本坝影响较大,而下回流区更贴近下坝。利用 VDMS 采集回流区图像时,会受光照、水面剧烈波动等因素干扰,导致图像数据产生噪点,因此需检验流速矢量与流动轨迹的一致性,剔除无效噪点数据,获取可靠的回流区流场。上回流区近坝(迎流面)流速较高,一般在 2.0~3.0 m/s之间,淘刷作用强,又接近上跨角,是仅次于上跨角的根石走失(坝体滑塌)高发区,如图 16所示。回流区中心流速相对稳定,且小于主流流速;下跨角附近有强烈的立轴涡旋,形成局部回流区,涡旋流速在 2 m/s左右。下回流区近坝(背流面)流速相对较低,一般在 1.0~1.5 m/s之间。

2)丁坝淘刷与根石走失特征

根据起动相似准则,本文在三联丁坝水槽试验中采用 2类模型根石作为丁坝根石基础开展根石走失模拟试验:一类是密度 2 650 kg/m³、当量粒径

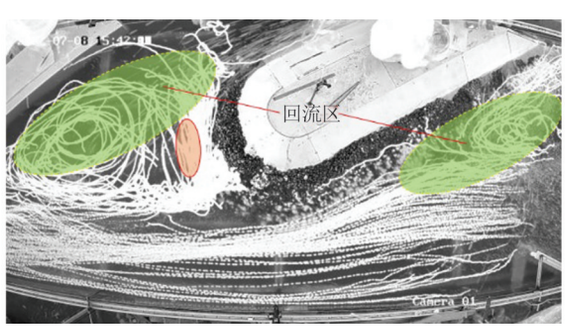


图 15 丁坝区上、下回流区特征

Fig.15 Characteristics of upstream and downstream reflux zones in spur dike area

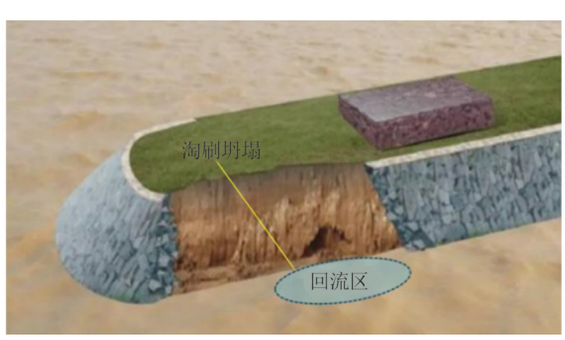


图 16 迎流面回流区及淘刷部位

Fig.16 Reflux zone and scour location on the upstream face

16～22 mm的砾石模拟，用于模拟模型自然块石；另一类是密度2 400 kg/m^3、高27 mm、边长34 mm的混凝土四面体，用于模拟模型预制根石。试验观测表明，改变根石的密度和形状会影响根石的水下稳定性与走失程度。总体来看，丁坝基础根石受水流冲击及漩涡剪切淘刷作用，当水流速度超过起动流速（来流流速2.94 m/s，上跨角根石区流速3.60 m/s）时，在下切水流与底部马蹄涡的剪切作用下，部分丁坝根石脱离坝基走失，该现象主要发生在丁坝上跨角和迎流面区。利用Tracker视频追踪软件追踪根石走失轨迹可知，上跨角流速最大、水流切应力强，根石起动最早、走失最多、下移距离最远；迎流面受回流淘刷影响也发生根石走失，但此区域流速相对较低，在回流淘刷剪切作用下走失下移距离相对较短，多在坝头前。走失的根石大部分散落在坝头前下游30～50 m区域内，如图17所示。



(a) 根石走失观测模型试验　　(b) 根石走失轨迹

图17　模型试验中根石走失后的运动轨迹

Fig.17　Motion trajectories of the root stones after loss in the model experiment

分析不同根石走失轨迹与停滞位置发现，砾石根石走失较多（占60%），相对运动距离较远，其中约33%的走失根石集中停滞在坝头正前方附近区域，约67%的走失根石则运动至较远的坝间回流区停滞（见图17(b)中白色虚线圆内）；四面体根石走失相对较少（占40%），走失距离相对更近，且停滞部位分布更集中，说明四面体根石的水下稳定性优于一般砾石根石。

根石走失体现了丁坝区特殊水流结构在达到一定强度时对坝体基础的侵蚀破坏作用。试验结果给出的根石起动流速阈值与易走失部位，可为汛期丁坝工程的安全预警提供基础参数。为了减少根石走失，应当在险情易发的丁坝区设置监测设备，重点监测丁坝迎流面、坝头前等关键部位的流速与流向，以提高险情识别和预警能力；另外，使用新材料制作的正四面体根石、采用格宾网石笼等措施也可以增强丁坝基础的稳定性。

4　结论

本文通过大型水槽三联丁坝实体模型试验，借助VDMS测速技术，对连续丁坝区的水力特性及根石走失现象进行观测与分析，得到以下结论：

1）丁坝区水流结构十分紊乱，来流遭遇丁坝后，一方面调整流向，在坝头下跨角区形成立轴分离涡；另一方面在坝头受阻后局部壅水，致使坝头附近的流速与比降急剧增大，同时形成下切水流与底部马蹄形漩涡。上述现象是坝头区的典型流态特征，也是根石不稳定、易走失的水力根源。

2）在Fr接近0.7的大水顶冲条件下，坝头表面流速约为3.5～6.0 m/s，最大流速接近6.5 m/s，下跨角附近漩涡区流速为3.0～4.0 m/s。丁坝挑流使主流与丁坝间的静水区产生强烈的剪切与卷吸作用，进而引发坝间回流现象。丁坝迎流面回流区流速一般为1.2～2.5 m/s、背流面回流流速约为0.5～0.8 m/s。回流淘刷是根石失稳的重要原因，回流强度与来流Fr呈正相关关系。

3）在顶冲水流达到一定强度、根石区流速大于3.6 m/s时，部分丁坝根石开始失稳并脱离坝基，根石走失部位主要集中在丁坝上跨角和迎流面。上跨角根石起动最早、走失最多、下移距离最远，迎流面根石走失下移距离相对较短，这主要与流速有关。总体来看，走失根石大部分停滞在坝头前下游30～50 m区域内，四面体根石的水下稳定性优于普通砾石根石，丁坝上跨角应是需要重点监测和防护的关键部位。

参考文献：

[1]　武永新，王建家，苑希民．丁坝工程冲刷与防护措施研究综述[J]. 自然灾害学报，2020，29(1)：1-10.
WU Yongxin，WANG Jianjia，YUAN Ximin. Re-

search summary on scouring and protection safety of spur dike[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1): 1-10.

[2] 胡海洲, 贾全民, 任付运. 河道工程坝岸根石走失原因及防护措施分析[J]. 科技信息, 2009(13): 722.
HU Haizhou, JIA Quanmin, REN Fuyun. Cause analysis and protective measures of dam bank root stone loss in river engineering[J]. Science & Technology Information, 2009(13): 722.

[3] 刘超华, 王长兴, 杨允霞. 大中型河道护岸工程的规划选型[J]. 河南水利与南水北调, 2015, 44(2): 35-36.
LIU Chaohua, WANG Changxing, YANG Yunxia. Planning and selection of large and medium-sized river revetment projects[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2015, 44(2): 35-36.

[4] 孙占胜. 堤防护岸工程常用技术及建设的对策[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(8): 35.
SUN Zhansheng. Common technologies of embankment revetment engineering and countermeasures for smooth construction[J]. Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2021, 50(8): 35.

[5] 屈孟浩, 钟绍森. 三盛公枢纽保持有效库容的试验研究[J]. 人民黄河, 1980, 2(3): 50-56.
QU Menghao, ZHONG Shaosen. Experimental study on maintaining effective storage capacity of Sanshenggong hub[J]. Yellow River, 1980, 2(3): 50-56.

[6] ZHANG H, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dike[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(1): 33-45.

[7] VAGHEFI M, SAFARPOOR 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.

[8] RAJARATNAM N, NWACHUKWU B A. Flow near groin-like structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(3): 463-480.

[9] TOMINAGA A, YOSHIROU N. Flow structures in spur-dike region by using PIV method[J]. Journal of the Visualization Society of Japan, 1999, 19 (Supplement1): 413-416.

[10] ROSGEN D L. The cross-vane, W-weir and J-hook vane Structures... Their description, design and application for stream stabilization and river restoration [C]//Wetlands Engineering & River Restoration 2001. Reston: ASCE, 2012: 1-22.

[11] AZINFAR H, KELLS J A. Backwater effect due to a single spur dike[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(1): 107-115.

[12] DUAN J G. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(10): 803-811.

[13] 李冰冻, 李嘉, 李克锋. 丁坝水流的水槽试验及数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2013, 28(2): 176-183.
LI Bingdong, LI Jia, LI Kefeng. Flume experiment and numerical simulation on flow around a spur dike[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(2): 176-183.

[14] 李志勤, 李洪, 李嘉, 等. 溢流丁坝附近自由水面的实验研究与数值模拟[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 53-57.
LI Zhiqin, LI Hong, LI Jia, et al. Experimental study and numerical simulation of flow in the vicinity of a submerged spur-dike[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(8): 53-57.

[15] 胡志毅. 丁坝挑角对周围流场影响的三维数值模拟研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(18): 19-20.
HU Zhiyi. Three-dimensional numerical simulation study on the influence of spur dike angle on surrounding flow field[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(18): 19-20.

[16] YAO C, YANG C M, LAN Y, et al. Numerical simulation study on root stones loss in dam buttress engineering[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(1): 5132760.

[17] 魏文礼, 陈晓朋, 李强, 等. 丁坝群对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 146-152.
WEI Wenli, CHEN Xiaopeng, LI Qiang, et al. Numerical simulation of the influence of spur dikes on the hydraulic characteristics of a bend channel[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 146-152.

[18] 杨旭亮, 戚蓝, 曾庆达, 等. 双丁坝间流场及局部冲刷的数值模拟研究[J]. 水力发电, 2020, 46(11): 56-60.
YANG Xuliang, QI Lan, ZENG Qingda, et al. Study on numerical simulation of flow field and local scour between double spur dikes[J]. Water Power, 2020, 46 (11): 56-60.

[19] XU J Q, XUE Y, HUANG S J, et al. Effects of groin type and bed properties on flow in groin fields: comparison of fixed- and mobile-bed experiments[J]. Water, 2022, 14(14): 2265.

[20] ETTEMA R, MUSTE M. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 635-646.

[21] VAGHEFI M, SHAKERDARGAH M, FIOUZ A R, et al. Numerical investigation of the effect of Froude number on flow pattern around a single T-shaped spur dike in a bend channel[J]. International Journal of Engineering Research, 2014, 3(5): 351-355.

(编辑:贾丽娜)