



长江中游航道整治建筑物作用区 水沙特性研究综述*

辛玮琰, 刘晓菲, 刘鹏飞, 程小兵
(交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 关于航道整治建筑物作用区水沙运动以及由此产生的建筑物变形和损毁的研究是航道治理研究的重要组成部分, 有着重要的现实意义。文章对长江中游航道整治建筑物中丁坝、护滩(底)和护岸 3 种形式建筑物结构形式及作用区水沙特性研究进行了梳理和总结, 发现目前相关理论推导和数值计算的成果众多, 列举了代表性较强的研究成果, 从研究角度和考虑因素两方面对比分析了已有成果, 提出今后可在床面冲刷位置和规模综合作用下的破坏阈值问题、床面冲刷发展模式及修复方式、极端水文条件对建筑物运行损毁的影响等方面继续深入研究。

关键词: 长江中游; 航道整治建筑物; 水沙运动; 综述

中图分类号: U 617; TV 143

文献标识码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0185-07

Overview of research on flow and sediment characteristics of action areas of waterway regulation structures in middle reaches of the Yangtze River

XIN Wei-yan, LIU Xiao-fei, LIU Peng-fei, CHENG Xiao-bing

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: The research on the flow and sediment movement in the action areas of waterway regulation structures and the resulting deformation and damage of such structures is an important part of waterway regulation research and has important practical significance. This paper summarizes the research on the structural forms of the three types of waterway regulation structures, namely spur dikes, beach protection(bottoms), and revetments, in the middle reach of the Yangtze River and the flow and sediment characteristics of their action areas. It reveals that relevant theoretical derivation and numerical calculation are fruitful. Then, it exemplifies the representative research results and compares them from the two aspects of the research perspective and factors considered. It suggests that further research can focus on the damage threshold under the combined effect of the location and scale of bed scouring, the development mode of bed scouring and repair methods, and the impact of extreme hydrological conditions on the operation and damage of waterway regulation structures, etc.

Keywords: middle reach of Yangtze River; waterway regulation structure; flow and sediment movement; overview

航道整治建筑物在修整河型、稳定滩槽格局、提高通航条件等方面发挥了重要作用。航道整治建筑物服役过程中, 由于水沙动力的不断变化导致动力条件、床面景况与建筑物结构设计的相互适应性降低, 建筑物经常出现水毁现象。当建筑

物出现水毁时, 河流水沙动力、滩势形态和航道条件将会迅速恶化, 危及船舶航行安全和水路运输效率。明晰各类航道整治建筑物作用区内水沙运动特性是研究建筑物损毁机理以及建筑物修复和优化设计等工作的前提。为此, 本文总结了长

收稿日期: 2021-12-03

*基金项目: 国家三峡后续工作科研项目(SXHXGZ-2020-4)

作者简介: 辛玮琰(1987—), 女, 博士, 助理研究员, 从事内河航道研究。

江中游现有主要航道整治建筑物类型的水沙运动研究成果。在前人大量研究的基础上，笔者选取了具有开创性或代表性较强的中外研究成果进行论述和分析，按照不同建筑物形式进行了阐述。

1 坝体

1.1 坝体结构形式

坝体类航道整治建筑物常用的有丁坝、顺坝、锁坝(潜坝)和鱼骨坝等，长江中游的坝体类建筑物以丁坝为主，其在航道整治过程中主要用于固滩导流、束水归槽，控制航槽摆动。

1.2 丁坝水沙运动研究

应强等^[1]指出丁坝作用下水力特性的研究应包括水流表面形态、上游压缩和下游扩散水流的特性与边界形状、环流和回流的形成条件及位置范围等。以下将从回流、局部冲刷、受力、紊动特性、数值模拟几方面总结丁坝水沙运动方面的研究成果。

1.2.1 回流

回流现象是丁坝作用于水流的直接后果，坝后回流尺度是反映丁坝作用强度的重要指标。学者们是通过 2 种方式得出回流长度的：一是以试验数据为基础导出经验公式；二是在一定假设条件下给出简化的二维结果。各计算方法中有的将回流长度与水流边界条件直接联系，或者将其与水流本身各参数联系。

窦国仁等^[2]根据丁坝压缩水流的动量方程获得矩形水槽回流长度 L 公式：

$$L = \frac{C_0^2 H \left(1 + \ln \frac{B}{B-D} \right)}{1 + \frac{C_0^2 H}{12D}} \tag{1}$$

式中： C_0 为无尺度谢才系数； D 为坝长； H 为水深； $\frac{B-D}{B}$ 为河宽缩窄率。

乐培九等^[3]根据水流分离区局部水头损失，将反映水流本身特征的参数纳入计算公式中，得到矩形断面单丁坝回流长度 L 计算式为：

$$L = 160 \left(\frac{1}{1-0.5\eta} \right)^2 \eta^{0.5} \left(\frac{h^{1/6}}{n} \right)^{1.1} Re^{-0.44} h \tag{2}$$

式中： η 为丁坝对河流的压缩比； h 为水深； Re 为水流雷诺数； n 为曼宁系数。

李国斌等^[4]通过对主回流紊动切应力、主流流速横向分布规律、紊动黏滞系数等进行了一些与前人不同的假定，从而得出非淹没丁坝后回流长度(矩形断面) L 的表达式：

$$L = \frac{C_0^2 H \ln \frac{A}{A-A'}}{K_b + K_c C_0^2 \frac{H}{D} \ln \frac{B}{B-D}} \tag{3}$$

式中： $\frac{A}{A-A'}$ 为面积缩窄率； K_b 、 K_c 为与垂线上紊动黏滞系数相关的系数。

实际上，回流长度同时受边界条件和水流自身条件影响，还与坝体形式、结构甚至材料等相关，可谓影响因素复杂。如何得出兼具准确性与适应性的回流长度计算方法仍是下一步研究工作中需要解决的重要问题。

1.2.2 局部冲刷

丁坝存在于河流环境中将导致流动分离和三维流场的出现，这可能导致局部冲刷和沉积，而局部冲刷深度是衡量丁坝附近床面变形程度及其对建筑物影响的重要指标。

部分研究分析了丁坝局部冲刷的位置特点和影响因素。长江航道规划设计研究院^[5]针对坝基局部冲刷问题分别总结了长江干线有、无护底坝基局部冲刷的位置特点。喻涛^[6]通过实验方法研究了非恒定流下丁坝附近冲刷坑的发展过程、最大冲刷深度及影响因素，认为坝头附近的下潜水流和绕过坝头的水流相互作用所生产的漩涡系是形成丁坝冲刷坑的主要因素。Duan 等^[7]分析了两种流场的平均速度、湍流强度和雷诺应力的差异，试图从剪切应力的角度解释局部冲刷发展的内在机制。Pandey 等^[8]认为无量纲时间冲刷深度变化随着临界流速比、床面沉积物混合物密度弗劳德数等变量的增加而增加，并分析了混合物不均匀性对冲刷深度的影响。

大多数早期关于丁坝周围冲深的研究都是关于最大冲刷深度的预测^[9-10]，计算多以试验和观测

数据为基础, 基于弗劳德数 Fr 、泥沙中值粒径、水流深度、丁坝横向长度、水流平均流速、临界流速、丁坝与水流夹角、河道宽度等系数而得。Froehlich^[11]以 164 组已发表的清水冲刷试验数据为基础, 通过回归分析提出了计算丁坝附近冲深的方法:

$$d_s/y=0.78K_1K_2(L'/y)(y/d_{50})^{0.43}Fr^{1.16}\sigma^{-1.87} \quad (4)$$

式中: K_1 和 K_2 为修正系数; $L'=A_e/y$, A_e 为被丁坝阻挡的水流区域面积; y 为水流深度; σ 为 $(d_{84}/d_{16})^{0.5}$ 标准差。

黄志才等^[12]以量纲理论为基础, 考虑了水深、流速、坝长、丁坝与水流夹角、坝头边坡、泥沙不均匀性等因素, 通过分析国内外试验资料建立了不漫水丁坝清水冲刷的局部最大冲刷深度计算式:

$$\frac{h_s}{h}=14.96Fr^{1.743}\left(\frac{L_D}{h}\right)^{0.488} \quad (5)$$

式中: h_s 为冲刷稳定深度; h 为坝头行近水深; L_D 为丁坝在水流垂直方向上的投影长度; Fr 为行近水流的弗劳德数。

坝体周围局部冲深同时受多重因素影响, 来水来沙条件、下潜水流、漩涡系、单宽流量、泥沙特性、坝体特征等都是影响坝体周围局部冲深程度和范围的因素, 探究不同水沙条件下各影响因素对于冲刷的作用程度, 以此为基础探讨局部冲深程度和范围的计算方法仍是下一步工作的方向之一。

1.2.3 紊动特性

丁坝附近的局部流态非常复杂, 呈现出强烈的三维紊流特性。

高桂景等^[13]通过水槽试验研究了丁坝附近的水流紊动, 把脉动动能分布分为上游区、对岸区、坝后区和强紊动区, 研究了坝长、流量和水深对丁坝附近水流脉动动能分布的影响。曹艳敏等^[14]对丁坝坝头附近水流和回流区水流的紊动形态进行观测, 给出了两个区域紊动动能的分布。Duan^[15]通过试验对丁坝周围的紊流结构进行研究, 发现回流区内湍动能、雷诺应力在下游方向上的

分量在每个断面上的尾流中心附近达到最大。有学者对更复杂的弯道内丁坝周围水流紊动特性进行了研究, 如: 郭维东等^[16]测量了弯道内丁坝附近水流的紊动强度, 并研究其分布特点。还有学者研究了坝体结构形式对丁坝周围水流紊动特性的影响, 如: 张可等^[17]通过水槽试验研究不同结构形式坝体周围水流脉动动能和紊动强度的分布, 探讨不同坝体挑角对丁坝附近水流紊动强度和脉动动能分布的影响。

目前丁坝作用区的水流紊动研究多为定性描述, 理论成果应用于工程实践尚有困难, 故对于变化水沙条件下的紊动动能分布和移动规律的理论模拟研究有必要继续深入。

1.2.4 受力

丁坝各部位受力是引起丁坝损毁最直接的因素, 关于丁坝不同部位受力的研究主要包括动水压力和脉动压力两个方面。其中动水压力是导致丁坝坝面损毁、影响坝体稳定性的关键原因之一; 受漩涡和水面波动所影响的脉动压力可大大加强瞬时水压力而导致坝头冲刷和坝体破坏。

喻涛通过水槽试验测量了非恒定流条件下坝体所受动水压力分布, 认为坝顶部与迎水坡交界区域、坝顶上游侧及坝头迎水坡一侧中间区域所受动水压力较大, 落水期坝体所受动水压力明显大于涨水期动水压力。路鼎等^[18]通过水槽试验研究了流量、水深、坝长对动水压力和脉动压力变化的影响。王平义等^[19]观测了坝头测压区几个断面测点的脉动压力大小、分布、频率分布、平均周期等, 研究了床面受力和流量、水深的关系。

目前丁坝不同部位受力的研究还多停留在试验测量阶段, 受力计算方法须依赖建筑物周围流速分布结果, 鉴于建筑物周围水流流速的计算和模拟结果尚须完善, 丁坝受力的理论计算和数值模拟工作还须继续深入开展。

1.2.5 数学模型

近年来, 随着计算机技术的迅猛发展, 数值计算技术已成为研究丁坝周围水流特性和床面变形的有效手段。由于一维计算分析需要大量近似

处理,对复杂流动条件的计算和模拟存在困难,因此近年来丁坝水流的数值模拟研究主要集中在二维和三维两方面,涉及非淹没丁坝和淹没丁坝附近流场的模拟。

丁坝二维水流模型一般分为平面和垂向二维水流模型,平面二维水流模型主要用于模拟平面内水沙运动和泥沙冲淤规律;垂向二维水流模型能够反映水流垂向变量情况。程年生等^[20]采用二维水深平均 $k-\varepsilon$ 模型、忽略水深变化求解了非淹没丁坝绕流问题。蒋昌波等^[21]采用大涡模拟法,通过考虑小尺度紊动和忽略 Leonard 应力项的方法将模型简化成二维形式,模拟丁坝群上下游流场和涡特征量。潘军峰等^[22]针对控制体积法和有限分析法计算的漩涡区范围偏小的问题,建立了边界拟合曲线坐标变换下的平面二维变水深流函数-涡量数值模型。

为了更准确地反映丁坝附近水流在垂向上的分布,学者们利用水流三维数值模拟方面做了大量的紊流模拟研究。彭静等^[23]在垂向上引入 Sigma 坐标变换,利用三维泥沙运动数值模型模拟丁坝周围局部地形发展变化。关于紊流模型,目前大部分都采用标准的 $k-\varepsilon$ 紊流模型、修正后的 $k-\varepsilon$ 紊流模型和非线性紊流模型。Zhang 等^[24]使用三维非线性 $k-\varepsilon$ 模型模拟冲刷区域附近的复杂流场,研究单一非淹没丁坝周围冲刷坑内的紊流。Acharya^[25]采用三维数值模型 FLOW-3D 模拟了丁坝群在平坦和冲刷河床中的紊流流场,研究普朗特混合长度模型、单方程模型、标准双方程 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、大涡模拟湍流模型的模拟效果。彭静等^[26]将非线性三维紊流模型应用于丁坝绕流的数值模拟中,结果表明非线性紊流模型在模拟坝头分离流区的流速结构上更精确。

2 护滩(底)

护滩工程是通过在受保护滩面上铺设整治建筑物以隔离较大流速水流的直接冲刷作用来维持河床稳定的,但在实际工程中,受一定的水沙作用,护滩工程往往会出现不同程度的破坏。

2.1 护滩(底)结构形式

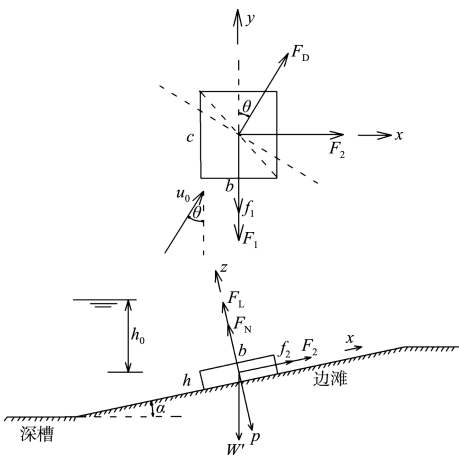
护滩带结构形式主要有软体排护滩结构、散抛块体护滩结构、坝体护滩结构 3 种形式。其中软体排护滩结构种类繁多,包括软体排(土工布护底、块石压载)、系结压载软体排(X 型混凝土块软体排、系沙袋软体排)、连锁块压载软体排(混凝土连锁块软体排、混凝土块穿绳排等)、混凝土块铰链排;散抛块体护滩结构主要采用抛石或抛混凝土构件护滩;坝体护滩结构主要指通过修建丁坝群破坏沿堤水流结构,损耗水流能量,以达到护滩保堤作用。

2.2 护滩(底)水沙运动研究

现有关于护滩(底)损毁机理的研究主要涉及受力分析、滩体附近水流结构、紊动特性变化几个方面。

2.2.1 受力分析

陈飞^[27]对位于边滩斜坡上的护滩带边缘混凝土块体进行了损毁受力分析,护滩带边缘块体受力分析见图 1。



注: u_0 为水流底速; h_0 为块体淹没水深; W' 为混凝土块在滩体上主要有效重力; F_D 为拖曳力; F_L 为上举力; p 为动水压力; F_1 和 F_2 为排垫阻碍块体运动的拉力; f_1 和 f_2 为滩面对块体的摩擦力; F_N 为滩体对混凝土块的支持力; α 为边滩沿滩宽方向坡度; b 为块体宽度; c 为块体长度; h 为块体高度。

图 1 护滩带边缘块体受力分析

马爱兴等^[28]分析了混凝土块体受力平衡,给出了力的计算方法。

基于以往的研究,目前对于护滩带受力情况的了解已比较清晰,如何将已有方法中的微观参数取值与特定条件下的宏观水沙状况对应起来,

将理论计算方法用于护滩(底)建筑物损毁的预测和防范的实践中去,是接下来工作的一个重要方向。

2.2.2 水流结构

喻涛^[29]通过模型试验的方法对比有无护滩结构时心滩附近水流结构(水面线分布、流速分布、水流流态等特点,分析了 3 种护心滩建筑物(鱼骨坝、透水框架、软体排)的护滩效果。梁碧^[30]对软体排、四面体透水框架、鱼骨坝护滩带的稳定性(风浪作用下排体稳定性、排体的抗掀起稳定性、排体顺坡下滑核算等)进行了研究,通过计算得出,排体边缘不致被掀起的条件为该处流速 v 小于某临界流速 v_{cr} :

$$V_{cr} = \theta \sqrt{\rho' g \delta_m} \tag{6}$$

式中: ρ' 为排体的相对浮密度; g 为重力加速度; δ_m 为排体厚度; θ 为系数(取值 1.4)。排体边缘流速可用下式计算:

$$v = v_{水面} (Y/h_0)^x \tag{16}$$

式中: Y 为水下计算点距排块距离; h_0 为排前水深; x 为指数(取值 1/3); $v_{水面}$ 为水面流速。

文献[5]分析了护滩(底)工程周围的水流结构,认为压载体厚度较小,在垂向上对水流结构的改变主要集中在压载体附近且影响范围较小。刘玉成等^[31]通过模型试验证实护滩带上游迎流面存在一个横轴环流区,上游侧横向流速指向外侧而靠下游侧开始指向内侧,水流在护滩带头部发生了绕流。

目前探究护滩建筑物周围水流结构的研究多通过试验方法实现,试验条件下能够测量某一水沙条件下护滩(底)建筑物周围的水流结构,但相关理论研究较缺乏,导致模拟护滩(底)建筑物周围水沙运动尚有困难、护滩(底)建筑物损毁的预测缺乏必要的理论基础。

2.2.3 紊动特性

刘晓菲^[32]通过模型试验研究了护滩建筑物不同工况下周围测点的拉力大小和分布,以及护块之间的脉动拉力随时间的变化情况,总结了脉动动能随流量和水深的变化规律。王伟峰^[33]分析了水流脉动对心滩周围(上下游区、右汊尾部、下游心

滩尾部)泥沙运动和冲刷变形的影响。

护滩(底)建筑物周围紊动特性的研究仍多停留在试验阶段,且紊动强度等指标的计算依赖流速结果,要完成对护滩(底)建筑物周围水流紊动精确的理论计算和准确的数值模拟还有许多工作要做。

3 护岸

3.1 护岸结构形式

护岸工程通常建在原有岸坡不够稳定、易发生崩岸和垮塌的部位。我国相关部门根据不同地域河道特性及设计实施护岸工程的经验,将护岸形式分为坡式护岸、墙式护岸、坝式护岸、桩式护岸和生态护岸 5 类。其中,坡式护岸被广泛运用于长江中下游的航道整治工程中,是沿河流岸坡抵御水流冲刷的防护工程,通过将构筑物 and 材料直接铺护在滩岸临水坡面,以防止水流对岸坡的冲刷。

3.2 护岸水沙运动研究

现有关于护岸水沙运动的机理研究主要涉及崩岸研究、守护方式对于护岸结构破坏的影响、不同护岸结构破坏机理等。

3.2.1 崩岸类型

在水流和岸滩相互作用下,岸滩失稳的过程称为崩岸。王延贵^[34]通过模型试验模拟了河岸崩塌的现象和崩塌过程,提出新的崩岸分类(窝崩、滑崩、挫崩、落崩和洗崩)及相应的分析模式,从河岸崩塌稳定性角度出发,同时考虑河岸土质、边坡形态、渗透力、侧向淘刷等多种因素,推导得出一般的河岸稳定系数的计算公式。王路军^[35]、徐永年等^[36]、余文畴等^[37]将长江中下游河道崩岸类型按照平面形态大致划分为 3 类:窝崩、条崩和洗崩。高清洋等^[38]总结对比了窝崩、条崩和洗崩的形态特征、分布特点和发生频率。

3.2.2 守护方式

护岸工程可按布局、结构、形式、材料及水流关系等分为不同类型^[39]。水上护坡工程采用的材料和措施有:砌石护岸、预制混凝土六方块、生态混凝土、模袋混凝土、草皮护坡、石垫护坡等;水下护坡工程主要采用水下抛石、钢丝网石

笼、混凝土铰链排、土工织物砂枕(排)、四面六边透水框架等。

3.2.3 破坏机理

高清洋^[40]对自然岸坡和护岸岸坡 2 种条件下的崩岸进行试验研究,对比分析了不同护岸结构(散体和排体护岸)下河岸的冲刷演变特征、不同守护宽度及不同重点守护区域(坡趾和坡脚区域)的守护效果,分析了“坡折点”持续上移对护岸结构及岸坡稳定的危害。文献[5]研究了护底排边缘冲刷坑深度影响因素、护底排长度对岸坡稳定性的影响、护岸工程水下边坡的损毁机理,认为流速条件对护底排边缘冲刷坑最大深度影响较大,排长对流速变化不敏感,水下稳定边坡系数仅与河床组成有关。刘刚^[41]从影响因素、糙率计算、边壁校正几个方面进行了四面体透水框架的水流特性试验研究。Yu 等^[42]通过水槽概化模型试验研究四面体透水框架群附近的纵横向水面线变化趋势和流速变化,并与无护岸结构的岸滩附近的水流结构进行了比较。路鼎^[43]分析了 2 种护岸结构(螺母、菱形)的破坏机理,认为普通块体下滑导致护岸稳定性丧失和上游护岸裹头部位出现较大切口是 2 种护岸结构破坏的主要原因,从块体位移、切口两个角度对比了 2 种块体护岸结构的稳定性。Gao 等^[44]基于商业计算流体力学软件 Fluent,建立了一个三维流体力学模型预测混凝土四面体框架护岸的流场和阻力,绘制了阻力系数-雷诺数、升力系数-雷诺数关系曲线。

河道崩岸表面上是由于河道内水流淘刷、顶冲河岸造成,而内在原因涉及河岸沉积物土力学性质、岸坡形态、河岸渗流、一定水沙条件和岸坡形态条件下水流淘刷岸坡沉积物等多种因素的耦合作用,其机理涉及因素多、过程复杂。厘清崩岸类型和机理是进行护岸工程的基础,护岸工程实施后,其与河岸局部环境形成了新的相互作用系统,新系统内诸多因素之间作用和反馈的机制目前还不明晰,数值模拟工作的开展还有难度。

4 结语及建议

1)对于床面冲刷的位置和规模综合作用下的

破坏阈值问题尚没有清晰的结论,关于航道整治建筑物周围冲刷坑的发展模式及相应干预修复方式的研究也亟待开展。

2)极端水文条件对整治建筑物结构完整性及其功能发挥有着重要影响,建筑物在极端水文条件下的损毁预测研究对长江中游整治建筑物的维护具有重要意义,但整治建筑物在极端水文条件下的变形损毁机理尚不明晰,故极端水文条件下航道整治建筑物周围水流结构特性和床面变形规律的研究需要加强。

3)有必要从实际工程出发,在拓展研究视角和维度的基础上深化航道整治建筑物损毁机理研究,为航道整治建筑物修复方式选择和建筑物设计改进等工作奠定基础。

参考文献:

[1] 应强,焦志斌. 丁坝水力学[M]. 北京:海洋出版社,2004.

[2] 窦国仁,柴挺生,樊明. 丁坝回流及其相似率的研究[J]. 水利水运科技情报,1978(3): 1-24.

[3] 乐培九,李旺生,杨细根. 丁坝回流长度[J]. 水道港口,1999(2): 3-9.

[4] 李国斌,韩信,傅津先. 非淹没丁坝下游回流长度及最大回流宽度研究[J]. 泥沙研究,2001(3): 68-73.

[5] 长江航道规划设计研究院. 长江干线航道整治建筑物损毁机理与修复技术研究[R]. 武汉:长江航道规划设计研究院,2018.

[6] 喻涛. 非恒定流条件下丁坝水力特性及冲刷机理研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.

[7] DUAN J G, LI H, FU X, et al. Mean flow and turbulence around experimental spur dike [J]. Advances in water resources, 2009, 32(12): 1717-1725.

[8] PANDEY M, VALYRAKIS M, QI M L, et al. Experimental assessment and prediction of temporal scour depth around a spur dike[J]. International journal of sediment research, 2021, 36(1): 17-28.

[9] AHMAD M. Experiments on design and behavior of spur dikes[C]//Proceeding of the Conference on International Hydraulic Convention. New York: [s.n.], 1953.

[10] GARDE R J., SUBRAMANYA K., NAMBUDRIPAD K D. Study of scour around spur-dikes[J]. Journal of hydraulic engineering, 1961, 87(6): 23-27.

[11] FROELICH D C. Local scour at bridge abutments [C]//

- Proceeding of the National Conference on Hydraulic Engineering, New Orleans: [s.n.], 1989: 13-18.
- [12] 黄志才, 吴国雄, 程尊兰. 丁坝局部冲刷深度的计算[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 2(2): 13-15, 23.
- [13] 高桂景, 王平义, 杨成渝, 等. 丁坝附近水流动能分布研究[J]. 水运工程, 2007(11): 75-79, 119.
- [14] 曹艳敏, 张华庆, 蒋昌波, 等. 丁坝冲刷坑及下游回流区流场和紊动特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2008, 23(5): 560-570.
- [15] DUAN J G. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike[J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 135(10): 803-811.
- [16] 郭维东, 周阳, 梁岳, 等. 丁坝对弯道水流紊动强度影响的试验研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(5): 70-72, 1.
- [17] 张可, 王平义, 喻涛. 不同坝型丁坝坝体周围水流紊动特性试验研究[J]. 水运工程, 2012(7): 1-7.
- [18] 路鼎, 王平义, 刘怀汉, 等. 丁坝受力试验研究[J]. 水运工程, 2014(6): 85-89.
- [19] 王平义, 高桂景, 刘怀汉. 丁坝周围床面受力的试验研究[J]. 水运工程, 2012(3): 1-6.
- [20] 程年生, 李昌华. 丁坝绕流的 $k-\varepsilon$ 紊流模型数值解[J]. 水利水运科学研究, 1989(3): 11-23.
- [21] 蒋昌波, 吕昕, 杨宜章. 丁坝绕流的二维大涡数值模拟[J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15(3): 68-72.
- [22] 潘军峰, 冯民权, 郑邦民, 等. 丁坝绕流及局部冲刷坑二维数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(1): 15-18.
- [23] 彭静, 玉井信行, 河原能久. 丁坝坝头冲淤的三维数值模拟[J]. 泥沙研究, 2002(1): 25-29.
- [24] 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.
- [25] ACHARYA A. Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes[D]. Tucson: The University of Arizona, 2011.
- [26] 彭静, 河原能久, 玉井信行. 线性与非线性紊流模型及其在丁坝绕流中的应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003, 18(5): 589-594.
- [27] 陈飞. 长江中游沙质河床航道整治护滩带破坏机理及对策研究[J]. 水运工程, 2012(10): 81-86.
- [28] 马爱兴, 曹民雄, 王秀红, 等. 长江中下游航道整治护滩带损毁机理分析及应对措施[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 32-38.
- [29] 喻涛. 心滩守护前后水力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [30] 梁碧. 护心滩建筑物稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [31] 刘玉成, 辛红, 刘蕊, 等. 长江中游航道整治建筑物护滩带局部水流结构研究[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(5): 167-168, 208.
- [32] 刘晓菲. 护滩建筑物破坏机理及模拟技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [33] 王伟峰. 心滩守护前后泥沙运动规律及冲刷变形特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [34] 王延贵. 冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析及试验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2003.
- [35] 王路军. 长江中下游崩岸机理的大型室内试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [36] 徐永年, 梁志勇, 王向东, 等. 长江九江河段河床演变与崩岸问题研究[J]. 泥沙研究, 2001(4): 41-46.
- [37] 余文畴, 卢金友. 长江河道崩岸与护岸[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [38] 高清洋, 李旺生, 杨阳, 等. 长江中下游河道崩岸研究现状及展望[J]. 水运工程, 2016(8): 99-105.
- [39] 林木松. 新材料新工艺在长江河道整治工程中的应用[G]//中国河道治理与生态修复技术专刊. 北京: 中国水利技术信息中心, 2009: 80-84.
- [40] 高清洋. 长江中下游河道基于坡脚冲刷的崩岸试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- [41] 刘刚. 透水框架体水流特性及护岸应用试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [42] YU T, WANG P Y, LIU Q Y, et al. Study on the beach protection with the tetrahedron Like penetrating frame groups[J]. Applied mechanics & materials, 2011(90/93): 2533-2536.
- [43] 路鼎. 新型生态护岸结构破坏机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [44] GAO Z, LI X, GU T. Three-dimensional hydrodynamic model of concrete tetrahedral frame revetments[J]. Journal of marine science & application, 2009(8): 338-342.