



# 非恒定流条件下

## 丁坝水力特性及冲刷机理研究

喻涛 王平义 王梅力 陈里 / 著

Study on Hydraulic Characteristics and  
Scour Mechanism of Spur Dike in Unsteady Flow

非  
外  
借



科学出版社

# 非恒定流条件下丁坝水力 特性及冲刷机理研究

喻 涛 王平义 王梅力 陈 里 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书以山区河流最常用的航道整治建筑物——丁坝为研究对象,在对山区河流坝体类整治建筑物水毁类型、特征及原因进行统计分析的基础上,采用现场调研、理论分析、仿真模拟和概化水槽模型试验的研究手段,对非恒定流条件下丁坝水流结构、紊动特性、受力分布、坝体及其周围河床冲刷的变化规律进行了较系统和深入的研究。这些研究成果为山区河流丁坝设计及其周围水沙运动规律的研究提供相应的理论基础和技术支持,对于提高航道整治建筑物的稳定性及确保航道整治工程的质量和效果具有重要的参考价值与指导意义。

本书可供从事航道整治、河床演变、流域规划与管理等方面研究的科技人员及高等院校有关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

非恒定流条件下丁坝水力特性及冲刷机理研究 / 喻涛等著. —北京:科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-057303-2

I. ①非… II. ①喻… III. ①丁坝-水利工程-研究 ②丁坝-水力冲刷-研究 IV. ①TV863

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 086097 号

责任编辑: 张 展 唐 梅 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年11月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018年11月第一次印刷 印张: 9.25 插页: 10 页

字数: 200千字

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

长江是货运量位居全球内河第一的黄金水道,但目前长江航运潜能尚未充分发挥,高等级航道占比不高,中上游航道梗阻问题突出,高效疏运体系尚未形成。长江航道建设是长江水运发展的基础,若要充分发挥长江运能大、成本低、能耗少等优势,就必须加快推进长江干线航道系统治理。航道整治成败的关键在于治理效果,而整治建筑物的稳定性是确保治理效果的重要基础,目前内河航道整治中已建整治建筑物受损或破坏的问题较为突出,如岷江、大渡河、嘉陵江已建的300多座整治建筑物大多出现了不同程度的水毁破坏。当整治建筑物出现水毁溃决时,滩势形态将会迅速恶化,甚至引起河流变迁改道,危及船只安全,造成海损事故。因此,为更好地弄清山区通航河流丁坝破坏的机理,有效地预防或减少水毁灾害的发生,急需研究解决非恒定流作用下丁坝水力特性及冲刷机理,提出增强丁坝稳定性的措施,对于指导山区河流航道整治、防洪护岸和环境治理等工程,保障长江黄金水道的畅通具有十分重要的意义。

本书为国家自然科学基金项目“非恒定流作用下山区通航河流丁坝水毁机理及计算仿真研究”(51079165)的主要研究成果,采用调研总结、理论分析、仿真模拟、水槽模型试验等研究手段,在对寸滩水文站日平均流量过程进行随机模拟的基础上,对非恒定流条件下丁坝水流结构、紊动特性、受力分布、坝体及其周围河床冲刷的变化规律进行了较为系统的研究。全书共7章。第1章为绪论,指出研究目的与意义,介绍国内外研究现状并进行简要的述评。第2章为长江上游航道整治建筑物损毁类型及特征,对长江上游整治建筑物类型及损毁基本情况、不同类型整治建筑物损毁特点和整治建筑物损毁影响因素及原因进行系统分析和总结。第3章为天然河流日均流量过程的随机模拟,对寸滩水文站连续55年日平均流量过程进行分析,应用两变量 Gumbel-logistic 模型和自回归马尔可夫模型(AR 模型),得到不同水文因素遭遇组合下的不同重现期的洪水随机过程,为模型试验研究奠定基础。第4章为概化模型试验设计及试验设备,给出模型设计的依据及比尺的确定方法,介绍试验使用的设备,确定试验方案及内容。第5章为非恒定流条件下丁坝水流结构及紊动特性研究,从丁坝附近水流流态、水面线及平均流速分布规律、三维流速及紊动强度变化等方面进行系统研究,并给出涨水期与落水期丁坝上下游跌水高度、坝头流速及坝轴线断面主流区流速分布公式。第6章为非恒定流条件下丁坝稳定性及受力特性研究,对坝面块石稳定性进行理

论分析,通过实测数据分析坝体所受动水压力及脉动压力沿时间及整个测区的变化和分布情况,对比分析不同时刻坝体受力紊动强度分布规律,并指出丁坝水毁主要发生在洪峰流量及流量较大的落水期的原因。第7章为非恒定流条件下丁坝冲刷机理研究,在对丁坝水力特性有了较全面认识的基础上,通过非恒定流条件下丁坝动床试验,分析坝体块石滚落塌陷的特点及坝头冲刷坑发展及变化过程,弄清坝头局部冲刷的敏感因素,在此基础上建立非恒定流条件下散抛石坝冲刷坑深度计算公式,并通过实例计算表明该公式具有较高的计算精度,可以用于工程实际。

参加本课题研究及本书编写的人员主要有:喻涛、王平义、杨成渝、李晓玲、张秀芳、王梅力、陈里、张可、苏伟、门永强、韩林峰、杨振华、张帆、杜飞等。在项目研究过程中得到了国家自然科学基金委员会、重庆交通大学、长江航道局、长江航道规划设计研究院等单位的领导和专家的关心及大力支持,在此深表感谢。

囿于撰写时间仓促,加之作者和研究者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请有关专家和广大读者批评指正。

作者

2018年10月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 研究目的与意义 .....            | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....            | 2  |
| 1.2.1 丁坝水力特性研究现状 .....       | 2  |
| 1.2.2 丁坝冲刷深度研究现状 .....       | 5  |
| 1.2.3 丁坝水毁机理研究现状 .....       | 7  |
| 1.2.4 明渠非恒定流研究现状 .....       | 10 |
| 1.2.5 随机水文学研究现状 .....        | 11 |
| 1.2.6 小结 .....               | 14 |
| 第2章 长江上游航道整治建筑物损毁类型及特征 ..... | 15 |
| 2.1 整治建筑物类型及损毁基本情况 .....     | 15 |
| 2.1.1 已建航道整治建筑物基本情况 .....    | 15 |
| 2.1.2 已建坝体类型及功能 .....        | 18 |
| 2.1.3 已建整治建筑物工程结构特征 .....    | 20 |
| 2.2 不同类型整治建筑物损毁特点 .....      | 20 |
| 2.2.1 丁坝 .....               | 20 |
| 2.2.2 顺坝 .....               | 23 |
| 2.2.3 潜坝 .....               | 25 |
| 2.2.4 锁坝 .....               | 25 |
| 2.3 整治建筑物损毁影响因素及原因 .....     | 26 |
| 2.3.1 整治建筑物损毁的主要影响因素 .....   | 26 |
| 2.3.2 整治建筑物损毁主要原因 .....      | 29 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第3章 天然河流日均流量过程随机模拟       | 33 |
| 3.1 寸滩站日均流量过程分析          | 33 |
| 3.1.1 水文资料的审查            | 33 |
| 3.1.2 日均流量过程统计参数估计       | 34 |
| 3.1.3 日均流量过程频率计算         | 35 |
| 3.2 日均流量过程随机模拟方法         | 39 |
| 3.3 两变量联合分布日均流量过程模拟      | 40 |
| 3.3.1 两变量极值分布函数          | 40 |
| 3.3.2 两变量联合作用日均流量随机过程    | 42 |
| 3.4 小结                   | 43 |
| 第4章 概化模型试验设计及仪器设备        | 44 |
| 4.1 水槽概化模型设计             | 44 |
| 4.1.1 模型丁坝设计             | 44 |
| 4.1.2 模型水流及时间比尺确定        | 46 |
| 4.1.3 模型沙材料及粒径的确定        | 47 |
| 4.2 试验设备及系统稳定性           | 48 |
| 4.2.1 流量控制系统             | 48 |
| 4.2.2 水位自动测量系统           | 49 |
| 4.2.3 流速测量系统             | 50 |
| 4.2.4 丁坝受力测量系统           | 51 |
| 4.2.5 三维地形测量系统           | 52 |
| 4.2.6 仪器率定及系统稳定性         | 52 |
| 4.3 试验方案及内容              | 56 |
| 4.3.1 清水定床试验             | 57 |
| 4.3.2 清水动床试验             | 60 |
| 4.4 小结                   | 62 |
| 第5章 非恒定流条件下丁坝水流结构及紊动特性研究 | 63 |
| 5.1 丁坝附近的水流流态            | 63 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 5.1.1 | 非淹没丁坝附近的水流流态 .....        | 63  |
| 5.1.2 | 淹没丁坝的水流流态 .....           | 64  |
| 5.2   | 水面线分布规律 .....             | 65  |
| 5.2.1 | 单个测点水位随时间变化规律 .....       | 65  |
| 5.2.2 | 纵向水面线分布 .....             | 68  |
| 5.2.3 | 横向水面线分布 .....             | 71  |
| 5.2.4 | 坝身上下游跌水高度确定方法 .....       | 73  |
| 5.3   | 纵向平均流速分布规律及计算公式 .....     | 78  |
| 5.3.1 | 横断面流速分布 .....             | 78  |
| 5.3.2 | 整个测区流速分布 .....            | 82  |
| 5.3.3 | 坝轴线断面流速计算公式 .....         | 84  |
| 5.4   | 三维流速及紊动强度变化分析 .....       | 89  |
| 5.4.1 | 丁坝周围三维流速变化分析 .....        | 89  |
| 5.4.2 | 丁坝布置前后坝头处三维流速对比分析 .....   | 90  |
| 5.4.3 | 丁坝周围紊动强度分析 .....          | 92  |
| 5.5   | 小结 .....                  | 94  |
| 第 6 章 | 非恒定流条件下丁坝稳定性及受力特性研究 ..... | 96  |
| 6.1   | 丁坝坝面块体稳定性分析 .....         | 96  |
| 6.1.1 | 块体受力情况分析 .....            | 96  |
| 6.1.2 | 坡面块石受力分析 .....            | 98  |
| 6.1.3 | 水流脉动对块体稳定的分析 .....        | 99  |
| 6.2   | 丁坝坝体受力沿时间分布 .....         | 100 |
| 6.3   | 丁坝坝体在受力整个测区的分布 .....      | 102 |
| 6.3.1 | 水流作用于坝体动水压力分布 .....       | 102 |
| 6.3.2 | 水流作用于坝体脉动压力分布 .....       | 104 |
| 6.4   | 水流对坝体作用力紊动强度变化 .....      | 106 |
| 6.5   | 小结 .....                  | 108 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第7章 非恒定流条件下丁坝冲刷机理研究          | 109 |
| 7.1 坝体块石滚落和坝体塌陷的特点           | 109 |
| 7.1.1 坝头块石运动特点               | 109 |
| 7.1.2 坝身块石运动特点               | 110 |
| 7.1.3 冲刷坑内块石运动特点             | 111 |
| 7.1.4 丁坝水毁程度分析               | 112 |
| 7.2 坝头局部冲刷的范围和冲刷深度的变化规律      | 115 |
| 7.2.1 坝头局部冲刷敏感因素分析           | 115 |
| 7.2.2 坝头冲刷坑发展过程分析            | 117 |
| 7.2.3 坝头冲刷坑长度及宽度变化规律         | 119 |
| 7.2.4 坝头冲刷深度变化规律             | 122 |
| 7.3 非恒定流作用下丁坝局部冲刷机理          | 124 |
| 7.4 非恒定流作用下山区河流散抛石坝冲刷坑深度计算公式 | 125 |
| 7.4.1 丁坝冲刷坑的影响因素             | 125 |
| 7.4.2 山区河流散抛石坝冲刷坑深度计算公式      | 127 |
| 7.4.3 丁坝冲刷坑计算实例              | 131 |
| 7.5 小结                       | 132 |
| 参考文献                         | 135 |
| 彩图                           |     |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究目的与意义

我国山区通航河流众多,如长江上游、嘉陵江、乌江、岷江、澜沧江、西江等。这些河流坡陡流急、泥沙颗粒粗、级配宽,航道弯曲狭窄,通航条件差。为此,近几十年来我国对上述河流开展了大量的整治工作,除修建水利枢纽,提高航道等级外,整治措施大多以筑坝和疏浚相结合并辅以护岸。这些整治建筑物起到了修整河形、稳定洲滩、塞支强干、调整分流角和分流比、减缓比降、改善流态等作用。但受水沙动力、结构设计、人类活动及维护管理等因素的影响,整治建筑物经常出现水毁现象,如岷江、大渡河、嘉陵江已建的 300 多座整治建筑物大多出现了不同程度的水毁破坏。当整治建筑物出现水毁溃缺时,滩势形态将会迅速恶化,甚至引起河流变迁改道,危及船只安全,造成海损事故(唐银安和吴安江, 1997)。

丁坝是山区河流最常用的航道整治建筑物,布置在砂卵石浅滩上的抛石丁坝是常见的几种丁坝类型之一。布置在砂卵石浅滩上的抛石丁坝因河床基础条件差,受洪水、水利枢纽泄洪等形成的非恒定水流的冲击、水流的渗透、泥沙和漂木的撞击等,坝体水毁十分严重。根据调查发现,20 世纪 90 年代,泸州至重庆段航道整治工程中 80%左右的抛石整治建筑物出现了不同程度的水毁现象,其中水毁最为严重的是抛石丁坝。丁坝损毁可分为直接损毁和间接损毁两类:直接损毁主要是由于散抛石坝护面块石的粒径偏小,稳定重量不足,在受到不稳定的中洪水主流、横向环流或斜向水流的强烈冲击时,坝体表面块石逐渐被水流冲移,形成缺口,继而扩大冲深,从而导致坝体的损毁;间接损毁主要是因为散抛石坝周边基础被破坏,导致坝体损坏。有些散抛石坝经常会由于坝基(多为砂卵石)处理不当,导致坝体基础在水流作用下被淘空,使坝体外侧失去支撑或坝根衔接处形成缺口,从而导致坝体损毁(张玮等, 2003)。

自 20 世纪 90 年代末期以后,部分丁坝坝面开始采用浆砌条石,下部仍为散体块石坝体的结构形式,整治建筑物的水毁现象有所减少。但在一些流速较大、受水流顶冲或某个水位期会集中冲刷的整治建筑物,其水毁现象还是比较常见,特别是每年进入汛期,由于洪水陡涨陡落,洪水波波高大、传播速度快,水流流速加快,水流冲击力加大,流态紊乱,河床变形剧烈,滩险演变非常复杂,出现

丁坝基础被淘空、坝体块石从顶部脱落、坝体局部或整体水毁溃缺现象,造成枯水期施工或维护完成的大部分滩险丁坝整治建筑物受到不同程度的破坏(王平等, 2009)。

因此,为更好地弄清山区通航河流丁坝破坏的机理,有效地预防或减少水毁灾害的发生,急需解决非恒定流条件下丁坝水流结构、紊动特性、受力分布、水毁部位和形态特征、坝体块石运动及河床冲刷规律等基础理论问题。该研究成果对指导山区河流航道整治、防洪护岸和环境治理等工程,具有重大的科学意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 丁坝水力特性研究现状

丁坝的水力特性研究主要是指,丁坝和水流及其边界的相互作用。1928年 Windel 对不透水丁坝水槽试验是对单丁坝水力特性的最早的研究,而后苏联 C. T. 阿尔图宁、日本富水正博士和我国南京水利科学研究院做了大量的室内水槽试验研究。应强等(2004)指出,丁坝作用下水力特性的研究包括水流表面形态,上游压缩和下游扩散水流的特性与边界形状,环流、回流形成条件、位置与范围等。同时,还要研究这些水流现象的实质,即水流的某些内部结构。比如势能与动能的相互转化,流速与切应力的分布,作用力与反作用力的平衡条件,紊动与漩涡等原因造成的能量损耗等(Molls and Chaudhry, 1995)。

目前对丁坝水力特性的研究方法主要有物理模型试验和数学模型。物理模型试验是按照相似准则,把实际工程缩制成模型,在模型上重演并模拟与原型相似的自然现象,然后进行观测,取得数据,得到模型规律性,从而达到工程成功的目的。数学模型则是以电子计算机为手段,采取反映问题本质的数学方程和相应的定解条件,通过数值计算及其图像显示的方法,达到对工程问题乃至自然界各类问题进行研究的目的。

早在 20 世纪 50 年代初期,国外已经开始对丁坝绕流问题进行理论研究和试验(Ettema and Muste, 2004)。然而由于丁坝附近水流流动有强烈的三维特性,所以直至 20 世纪 70 年代仍未能从理论上或试验上准确描述丁坝绕流的一些细节问题。因此在解决丁坝问题时,时常借助于模型试验。丁坝在非淹没情况下其主要作用是束窄河床,提高坝下流速以冲刷浅滩,或者阻挡来流,壅高水位,减缓水流比降。当水流流向丁坝时,受丁坝阻力,使得流速降低、上游比降减缓、水位壅高。当水流到达丁坝位置时,由于河面束窄,比降和流速快速增大。当水流过坝后,由于惯性作用,水流继续收缩,流速和比降迅速变大,水位降低,然后逐渐扩散与天然河流相接,恢复到天然情况。丁坝对水流作用主要产生两种影响:

一是坝头涡系的扩散传播对紊动场的影响；二是对主流时均运动的影响。试验表明：丁坝坝头诱发剪切涡带在向下游传播过程中与主流叠加，形成一条狭长的高能量强冲刷带向下游延伸(高桂景，2006)。坝头涡系的作用和单宽流量集中是坝头冲刷的主要原因。

近几十年来，丁坝绕流研究取得了很大的进展(Molinas et al., 1998)，这些进展主要表现在：对坝后回流区宽度、长度的认识；对丁坝绕流机理的探讨；对丁坝上、下游平面流场的理论探讨；对丁坝局部水头损失和丁坝作用下河床的演变规律以及丁坝绕流的数值模拟等(李洪，2003)。对水面和近坝区流场的研究一般采用原型观测、理论计算和模型试验等方法。目前在航道整治设计中，大多依赖物理模型试验。尽管物理模型可以给人较为直观和比较准确的试验数据，但是物理模型试验研究周期较长。这使多方案之间的比较、调整和优化都受到限制。因此，研究可以借助计算机模拟技术和计算流体力学的最新研究成果。与国内其他行业相比，在航道整治领域，数值计算技术研究较为薄弱，存在一定的差距。近十年来，国外集中大量的精力开发研究了许多计算流体力学软件，其模拟结果得到应用部门的认可，数值模拟方法在工程设计领域得到了越来越多的应用。近年来，国内也引进了一些软件，并在此基础上针对不同应用进行开发，取得了一系列科研和实践进展。

大多数文献中将丁坝绕流分成以下七区：上游壅水区、主流压缩区、主流扩散区、上游角涡区、下游角涡区、下游回流区、水流恢复区。对丁坝回流的研究大多是在下游回流区，即用经验或半经验方法提出一个满意的回流长度计算公式。应强等(2004)指出对下游回流区尺度的理论研究，主要有以下两种方法：第一，是从流体运动的动量方程入手，以主流的收缩扩散段为研究对象，列出脱离体的动量守恒方程，并对主流的水面比降，主流和回流分界线上的紊动切应力等因素提出假设，然后积分求解。第二，即保角变换方法。从事这方面的学者认为，丁坝绕流应遵循二元势流规律，并把丁坝对水流的影响当作挡板置于无限平面内形成的流动问题来处理，用保角变换方法求解分离曲线表达式。保角变换法对丁坝水流的无黏性处理，虽然是比较近似的，但是此法的计算误差可能会很大，特别是当床面的糙率影响较大时。吴小明等(1996)曾在长 16m、宽 0.5、高 0.5m 的活动玻璃水槽上对单侧突扩水流进行了一系列的模拟试验，采用流速测量、流线观测、流场显示等手段，多次对不同尺度回流的水流流态进行观测。观测发现在主流与回流之间存在一个水流紊动强烈的过渡区，主流与回流在此区间发生了剧烈的动量与水体交换。虽然对于丁坝回流长度的研究，已经有了不少成果，但是各家的结果都不一样，有些甚至差别较大，这再一次证明了该问题的复杂性，也说明对丁坝回流区的研究还很不深入。马永军(2013)对以前的研究结果进行分析发现，各家都只是把回流长度和水流边界条件直接联系起来，并没有找出回流长度

和水流本身各参数之间的关系。

丁坝附近的局部流态非常复杂,呈现三维紊动特性,所以研究丁坝附近的紊动特性比较困难(崔占峰和张小峰,2006)。高桂景等(2007)对丁坝动能分布进行研究,主要是对不同水平面上的紊动动能分布进行对比。张华庆等(2008)对坝头区及回流区这两个紊动较强烈和集中的区域进行研究,分析其流场特点及紊动动能分布,进而得出两区的紊动特性规律,对丁坝水流机理的认识具有一定意义。吴桢祥等(1994)指出丁坝的阻水作用导致坝前水流形成绕坝水流,水流绕过丁坝头部,其压力梯度、速度旋度的垂直分量以及流线曲率都很大。水流绕坝头一定角度后,其边界层发生分离,分离点以下形成旋转变角速度较大的垂直轴漩涡。由于丁坝头部、边界层分离处和下游都是水流流速梯度较大或者水流紊动强烈的地区,所以紊动分布较为密集。丁坝头部是涡源所在,漩涡每隔一段时间发生并往下游移动,在向下游运动的漩涡之间,频繁发生因相互碰撞而破碎或合并的现象。漩涡在平面上的排列及移动路径都是随机的,它们既可侵入回流区,也可以楔入主流区,能量较大漩涡在回流末端以下一定距离才会消散。漩涡的产生、所具有的能量、运动的路径以及消灭的过程都是随机的,因此在丁坝下游较大范围内,水位、流速、流向等因素的脉动量都较大,呈现明显的紊动分布。水流形态是影响紊动动能分布的重要因素,水流梯度、漩涡以及环流的存在都使得紊动动能发生改变。关于丁坝回流区尺度的研究,应强等(2004)指出在丁坝作用后,水流在丁坝上游和下游形成两个回流区,上游回流区较小,下游回流区较大,它对河道水沙条件的改变亦大,故对它的研究较多。

丁坝附近动水总压力和脉动压力的研究。丁坝的存在使得周围的水流状况变得较为复杂。高桂景等(2007)提出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从而导致坝头冲刷和坝体破坏。此外,脉动水流还可以沿泥沙和坝体缝隙传播,使坝头区泥沙在瞬时更易起动。荣学文(2003)通过比较和分析试验数据得出,坝体迎水面所受动水总压力的分布规律是:相同水深情况下动水总压力沿坝体的纵轴线从坝根到坝头逐渐增大,坝头区的动水总压力最大。王平义等(2012)通过一系列试验提出:坝头测压区几个断面的脉动压力在靠近坝头处较大,接着上升到最大值,最后跌落;距坝头较远的测压点,脉动压力变化不大,趋于均匀分布。脉动压力的空间分布是坝头后面有一个较强脉动压力带,然后向左右岸两边递减。随着流量的增大,水流脉动流速也增大。在整个测压区,脉动压力的值都增大,强脉动带的分布范围也越来越大。随着水深的增加,水流流速减小,坝后水流紊动减弱,脉动压力变小。

尽管丁坝在航道整治中有广泛应用,而且运用一维分析方法可以解决其中一些不复杂的情况,但是仍有许多水力学基础问题尚待进一步深入的研究(于守兵等,2012)。比如丁坝附近流动具有很强的三维非恒定流特性,采用一维和二

维方法追踪自由水面需要大量近似处理和参数估计工作,这使得对流动条件复杂、尚未建成工程的流动影响的预测变得十分困难。显然一维方法更难以对流场作出精确的描述。而且在试验研究中,一般都采用测压管或旋桨流速仪进行测量(周阳等, 2006),无疑这样的研究手段都难以获得对丁坝附近流场和紊动场信息的精确描绘。

### 1.2.2 丁坝冲刷深度研究现状

丁坝冲刷的研究是一个非常复杂的课题,自 20 世纪 20 年代初著名的水工专家 H.Engels 对此进行过试验以来,不少学者也进行过专门性的试验研究(Kuhnle et al., 2002; Haque, 2004; Oliveto and Hager, 2005)。但由于丁坝冲刷问题的复杂性,丁坝局部冲深计算大多数还局限在半经验半理论的回归分析计算上(Radspinner et al., 2010; Yossef, 2010; Masjedi et al., 2010; Rodrique-Gervais and Biron, 2011; Shuttleworth, 2012),也有些学者开始从理论分析的角度出发,提出了一些丁坝冲刷计算的理论公式(Shields and Thackston, 1991; Duan, 2006; Barkdoll et al., 2006; Duan et al., 2011)。

早在 20 世纪 60 年代,苏联学者马卡维也夫(张俊华, 1998)根据水槽丁坝模型试验资料得出适用于细沙河流的丁坝坝头冲刷公式。对于细沙河床(张俊华, 1998),苏联学者阿尔图宁以水流结构为基础,应用连续原理及泥沙起动和平衡输沙的河流动力学有关理论,根据水槽中正交平板丁坝试验结果,提出了坝头冲刷的计算公式;张红武(1988)根据试验结果,对其进行了率定,应用量纲分析,得到了修正公式,他认为丁坝坝头局部冲刷坑是水流冲刷作用和河床抗冲条件下的矛盾统一体,在冲刷坑形成过程中,作为矛盾的主体水流,流速随着坑深的不断增大而减小,当流速降到床面泥沙粒径的临界起动条件时,冲刷趋向停止,冲刷终止时的坑顶处水深即为冲刷的最大水深,利用泥沙起动平衡理论,根据黄河细沙河床正交直立圆头形丁坝模拟试验结果,推广到一般情况,得到适用于细沙河流丁坝局部冲刷坑最大冲刷深度计算公式。Kuhnle 等(1999)根据牛津大学国家泥沙实验室的水槽试验结果,在 Melville 提出的桥墩局部冲深公式的基础上,提出了适用于正交丁坝的局部冲深公式。Lim 等(1994)根据与水流方向成  $90^\circ$  的竖墙式丁坝的清水动床试验,应用量纲分析法和试验数据的回归分析法,得到丁坝的最大冲刷深度公式,这类公式还有科罗拉多州立研究小组公式(Kothyari et al., 2007)、M. A. 吉尔(Vaghefi et al., 2012)公式等。

林炳尧等(1996)根据丁坝坝头局部冲刷的终极冲深和冲刷坑深度的发展规律,计算了丁坝坝头局部冲刷在一次水文过程中的最大冲深,并用此方法估算了长江口航道整治工程中 16 条整治丁坝坝头冲刷坑的深度,并与崇明岛丁坝调查结

果进行比较发现,估算结果是合理的。应强等(1999)在分析影响冲刷坑深度的变量的基础上,采用因次分析的方法(以正交丁坝为例,其他形式丁坝可作相应修改)确定了冲刷坑深度的表达形式。方达宪等(1992)从坝头附近床沙起冲流速观点出发,通过水槽概化试验和单因素(上游行进水深 $h$ 、丁坝长度 $D$ 、床沙中值粒径 $d_{50}$ 、丁坝挑角 $\theta$ 等)分析回归计算得出起冲流速公式。王军(1998)从丁坝坝头泥沙起冲流速点入手,通过水槽试验和已有文献资料,结合无量纲原理得到冲深公式,最终得出冲刷深度随上游行进流速增加而增加,清、浑水冲刷无明显分界点。苏德慧(1993)通过长历时的水槽试验认为,丁坝周围冲刷坑的发展分为三个阶段:第一阶段主要为马蹄涡冲刷,冲刷迅速,冲刷开始后两个小时内可达最大冲深的40%~50%;第二阶段为垂向涡旋水流冲刷,在冲刷开始后第二至第八小时内,冲刷达最大冲深的20%~30%;第三阶段由于螺旋水流扩散基本停止,冲深缓慢发展,经过长时间的发展趋于冲刷平衡,并得出恒定流清水试验冲刷深度计算公式。赵世强(1989)认为绕坝水流的下降水流是坝头冲刷的主要动力,并由下降水流的冲刷机理和试验数据导出局部冲刷公式。张义青等(1997)认为丁坝坝头冲刷分为三个阶段:初始段、发展段、平衡段,并通过清水水槽试验和无量纲分析得出冲深公式。

王军(1999)根据流体力学原理、试验现象和数据,从理论分析出发,尝试性地提出了丁坝局部冲深计算理论公式,经与试验结果比较发现:理论公式结构合理,与试验结果相符,从而为半经验半理论回归公式的进一步研究提供了理论基础。王军(2002)依据试验,分析了浑水冲刷下的丁坝冲深变化情况,得出结论:平衡冲刷深度与加沙量无关;局部冲刷深度在变化的过程中,有一个较大值,并且该值大于平衡值;上游水流速度增加,冲深增加;坝高增加,冲深增加,但最大冲深不出现在非淹没情况;随水深增加,冲深先增后减。沈波(1997)通过丁坝局部冲刷试验结果和地形特征分析,结合水力学基本原理建立了丁坝局部最大冲深公式。黄志才等(2004)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 etc 对冲深有影响的因素,通过对国内外试验资料的分析,建立了不漫水丁坝清水冲刷的局部最大冲刷深度的计算公式。沈焕荣等(2011)根据其下降水流的冲刷机理,分析了影响冲深的各种因素,结合现有资料进行比较分析,得出了冲刷深度计算公式。

毛佩郁等(2001)将局部冲刷计算式应用到丁坝坝头和堵口截流冲坑深度的计算,并引用绕板桩渗流场势流理论计算水流绕坝头的单宽流量(或流速),进而给出了进占堵口或丁坝坝头护脚抛石的稳定性计算式,并验证了冲深与抛石稳定性的计算与实际工程的结果较为一致。冯红春等(2002)通过量纲分析和现有资料建立了非淹没透水丁坝局部冲刷公式。詹义正等(2002)基于丁坝坝头水流结构,提出了坝头绕流挤压流动模式,按流量连续定律最终得出非淹没透水丁坝冲深公式。

汪德胜(1988)通过水槽试验认为:冲深随流速增大而增大,流速大于泥沙起动流速后,速率明显减小,随流速增大而趋于一个极限值;冲深随丁坝挑角而变化,当挑角为上挑 $120^{\circ}$ 时冲深最大,为最不利状态;冲深随坝厚增加,并趋于一限值。程永舟等(2000)分析了群坝的水流结构,并得出群坝冲刷公式。宗绍利等(2007)通过对山区河流丁坝的分析,结合水槽试验,运用量纲分析法得出山区河流丁坝冲深公式。何春光等(2007)通过动床模型试验,对透水丁坝的局部冲刷问题展开了研究,根据典型水沙过程及边界条件下的试验结果,指出了丁坝透水率与冲刷深度之间的关系。高先刚等(2009)通过动床模型试验,对透水丁坝展开了一系列研究,得出了适用于宽浅河道坝头的最大冲刷深度计算公式。周银军等(2009)根据试验观察,当坝前的主槽水流绕过坝头时,坝前水流的环形运动会通过桩式丁坝空隙向坝后水体传递,那么过坝水流受坝前水流的影响,流向指向坝后河底,带动坝后水体产生另一种平行丁坝轴线、强度较弱的平轴螺旋流,这组螺旋流则是形成桩式丁坝桩根部V形冲槽的原因,并从桩式丁坝壅水特性出发,建立了透水丁坝冲刷深度计算公式。方达宪(2006)从加强丁坝基础防护措施的抗冲能力来提高丁坝自身的安全观点出发,通过水槽试验结合量纲分析方法得出丁坝基础设置平台加齿坎的冲刷深度计算公式。我国现行的《堤防工程设计规范》(GB50286-98)规定,丁坝冲刷深度计算公式应根据水流条件、边界条件,并应用观测资料验证分析选择,非淹没丁坝冲深计算可按马卡维也夫公式的另一种形式计算。同时,规范规定,如果非淹没丁坝所在河流河床沙质较细,丁坝冲深可按阿尔图宁公式计算。

### 1.2.3 丁坝水毁机理研究现状

航道整治建筑物水毁是世界上许多国家都共同关注的一个问题。21世纪初开始,国外不少学者对整治建筑物的平面布置和结构形式等问题进行了深入调查和分析(Kuhnle et al., 2008; Azinfar and Kells, 2008; Duan 2009; Sharma and Mohapatra, 2012; Giménez-Curto, 2012),为航道整治技术的发展开辟了道路。新中国成立后,我国航道整治工程技术得以飞速发展。目前,国内对航道整治建筑物的研究主要采用概化模型试验、实体模型试验、数学模型计算和实测资料对比分析。专门针对水毁的研究较少,大多数为恒定流作用下的水毁问题研究,而非恒定流条件下的水毁问题研究很少。

研究丁坝水毁问题的一个主要内容就是研究丁坝坝头冲刷及其附近泥沙的运动等,已有丁坝局部冲刷的研究基本上是基于丁坝模型试验进行的(Conaway, 2005; McCoy, 2005; Li et al., 2005; Karami et al., 2008; Duan and He, 2009)。卢无疆等(2001)通过正态物理模型对长江口深水航道南导堤丁坝群坝头的局部冲

刷问题进行了研究,结果表明,坝头局部冲刷主要受落潮流控制,并提出合适的护坦尺度能较好地保护坝头前沿滩地。林发永(2004)针对丁坝回流冲刷,提出利用勾坝结构截断丁坝回流能较好控制回流冲刷坑的发育演变,这是治理丁坝坝身侧冲刷坑比较理想的工程方案。窦希萍等(2008)通过长江口北槽深水航道概化物理模型试验,对清水和浑水的潮流、潮流波浪作用下的丁坝坝头冲刷试验资料进行了分析,得出了不同动力条件下的丁坝坝头冲刷深度。吴学文等(2006)认为丁坝局部冲刷实质主要是坝头的绕流作用,由此建立了坝头绕流挤压流动物理图式,考虑了非均匀沙的起动问题,得出了非均匀河床上的丁坝局部冲深公式。葛跃明等(2006)通过单丁坝防护的沿河公路弯道凹岸冲刷模型试验,指出弯道处布设丁坝位置在 $45^\circ$ 断面或稍向上游移动时,坝头抗冲效果好。周银军等(2008)通过矩形水槽模型试验,对不同透水率的透水丁坝进行清水冲刷动床试验结果对比分析,得出了透水丁坝的局部冲淤规律。王先登等(2009)通过实地调查发现了丁坝在整治工程中的各种毁坏情况,详细分析了淹没和非淹没状态下丁坝附近的水流流态,进而得出了局部冲刷坑的形成和累积是坝体失稳破坏的主要原因。张我华等(2005)从结构可靠性的角度,详细分析了防护丁坝冲刷的机理和坝体失效的主要影响因素,提出了丁坝抗冲刷破坏的安全(稳定性)准则。张伟等(2003)根据块石粒径与起动流速的关系,指出块石稳定重量与起动流速的高次方成正比,起动流速增长50%可能导致块石稳定重量接近40倍的变化。王平义等(2001)探讨了山区河流航道整治建筑物水毁灾害过程中各物相(固态、液态、气态)之间耦合破坏作用的特征,耦合作用物理模型及仿真模型的概念和关系,为深入研究整治建筑物水毁机理提供理论依据。

随着航道整治技术的快速发展,很多新型结构材料被应用于丁坝防冲设计中,并取得了很好的效果。王明进(1997)通过对长江中下游部分河段丁坝水毁资料进行分析,提出采用四面六边透水框架对丁坝的坝头抛设防护,并进行冲刷试验对比研究,肯定了透水框架的防冲作用。杨火其等(2002)通过调查研究钱塘江河口丁坝坝头防冲异型块体失败案例,结合室内模型试验,提出了坝头异性块体嵌固块石混合料抗冲新方法。林发永(2003)分析了崇明岛环岛丁坝坝体失稳的影响因素,采用砂肋软体排和铰链排护底结构保护坝头,这在环岛保滩工程中得到了广泛应用。陈文江等(2003)在钱塘江北岸海宁强涌潮区海塘建设中,采用了新型的单排桩式丁坝,其能更好地承受涌潮的冲击,不易损毁。随后赵渭军等(2005)从实地观测资料、模型试验和水毁机理研究三个方面作了进一步研究,详细分析了桩式丁坝的减冲促淤效果。张俊华等(2006)认为丁坝坝头局部水流结构是造成丁坝冲刷形态及过程的决定因素,通过丁坝局部模型试验,提出整流桩可以有效改善坝头局部水流结构,进而使冲刷坑深度减小和冲刷部位偏离,以达到稳定坝体的目的。

丁坝的数学模型主要有平面二维水流模型和三维水流模型,初期的丁坝绕流