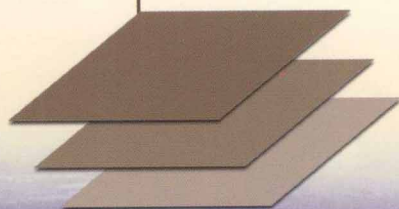


DINGBA-SHUILIU-HECHUANG DE XIANGHU ZUOYONG

丁坝—水流—河床 的相互作用

于守兵 韩玉芳 著



黄河水利出版社

内 容 提 要

本书建立了基于平面非结构网格和垂向 σ 坐标系的三维浅水紊流模型,针对三维丁坝水流模拟中的动边界、陡坡、高程间断和边壁阻力问题提出了相应处理方法;经过水槽试验资料验证,采用三维水流模型研究具有迎水边坡、背水边坡和坝头端坡的丁坝在不同淹没程度与端坡系数条件下对附近流场和单宽流量分布的影响;通过动床模型试验,研究单丁坝和丁坝群作用下的河床调整过程、潮汐往复流条件下的丁坝群作用特点以及丁坝在调整宽浅河床地形中的作用,并对潮汐河口航道整治的一些基本原则问题进行了探讨。

本书可作为水利专业人士和大中专院校人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

丁坝—水流—河床的相互作用/于守兵,韩玉芳
著. —郑州:黄河水利出版社,2011. 12

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0175 - 9

I. ①丁… II. ①于…②韩… III. ①丁坝—水
流模拟—研究 IV. ①TV863

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 263368 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail: hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:850 mm × 1 168 mm 1/32

印张:8.25

字数:205 千字

印数:1—1 000

版次:2011 年 12 月第 1 版

印次:2011 年 12 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

丁坝的布置改变了原有河床过水断面的形态,引起周围水流结构的改变,并导致河床的重新调整。河床形态的改变反过来又对水流结构发生作用。在丁坝影响下水流与河床发生的相互作用,最终必然达到二者的相互协调与平衡。作为一种典型的航道整治建筑物,丁坝常以群体出现,组成一定规模和某种形态的整治线。其中,整治线宽度研究的关键就在于整治建筑物对水流和河床的调整作用。本书即围绕这两个重要的问题进行研究。

丁坝可以按照很多标准进行分类,其中按照坝顶高程与水位的关系可分为淹没丁坝和非淹没丁坝。当坝顶高程低于水位时,坝顶出现越坝水流,这时丁坝被称为淹没丁坝;反之,被称为非淹没丁坝。在内河航道整治中,坝顶高程通常按整治水位确定,此类丁坝在汛期被淹没。在以前进波为主的潮汐河口航道整治中,通常采用中潮位整治的原则,丁坝交替处于淹没状态。淹没条件下受坝顶溢流影响,丁坝附近流态更为复杂。在众多的影响因素中,淹没程度是影响淹没丁坝附近水流结构的一个重要参数。

实际工程中应用的丁坝与水槽试验中较多采用的规则的长方体丁坝有很大不同,通常有一定的迎水边坡、背水边坡和坝头端坡,另外,附近还铺设一定的护底。端坡的存在能够显著影响坝头附近水流结构,并对单宽流量分布起一定的调节作用,进而影响丁坝局部冲刷形态、冲刷深度和冲刷的动态调整过程。护底的存在能够减少或削弱丁坝头部无效冲刷,增加河床主流区的有效冲刷,使得整治工程实施后河床调整基本上是均匀的。为实现试验成果与实际工程应用的相似性,必须考虑坝头型式和护底铺设。

由于坝头附近水流形态的复杂性,采用一般的水槽试验不足以提供详细的流场变化信息,尤其是与底床冲刷有关的底部流速和切应力等的变化,而三维水流数学模型则能够满足这些要求。本书建立了基于平面非结构网格和垂向 σ 坐标系的三维浅水有限体积模型,并就丁坝水流模拟中存在的三维动边界、陡坡、边壁模拟和高程间断等难点提出相应的处理方法。

在动床水槽试验中,运用先进的仪器设备记录了丁坝对流场和河床的调整过程,以动态、变化的观点从新的角度对丁坝的作用进行了深入研究。通过往复流水槽试验,研究局部冲刷坑的形态、最大深度和发展过程,并对潮汐河口的航道整治的一些基本原则问题进行探讨。结合实际工程丁坝布置的概化试验,研究了丁坝群在调整宽浅河床地形中的作用,研究了潮汐河口航道整治中运用丁坝群调整河槽形态的实际可能性。

本书由于守兵和韩玉芳共同撰写。具体分工如下:第1、7章由于守兵和韩玉芳撰写,第2章至第5章由于守兵撰写,第6章由韩玉芳撰写。于守兵负责本书的撰写组织工作。在撰写过程中,我们查阅了大量外国学术论文和专著,在此向这些文献的作者表示由衷的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请各位读者给予批评指正!

作 者

2011年9月于郑州

主要符号说明

B	水槽宽度
b	丁坝下游回流区宽度
b_t	淹没丁坝坝轴断面横向流动影响范围
b/L	相对回流宽度
D	丁坝坝体高度
F_{diff}	σ 坐标系下水平扩散项
H	水深
h	静水深
k	单位质量水体紊动动能
k_s	粗糙高度
L	丁坝长度(有端坡时为按阻挡面积折算的有效近似长度)
L/B	丁坝断面束窄比
L_0	丁坝坝顶长度
l	丁坝下游回流区长度
l/L	相对回流长度
m	丁坝坝头端坡系数
m_1	丁坝迎水边坡系数
n	糙率
Q	总流量
Q_0	淹没丁坝坝顶过流量
Q_0/Q	淹没丁坝相对坝顶过流量
Q_b	丁坝阻挡流量
Q_b/Q	流量压缩比
q	单宽流量

q/q_{in}	相对单宽流量
q_{in}	上游控制边界处单宽流量
q_{max}/q_{in}	最大相对单宽流量
u	纵向流速
u_*	底摩阻流速
u/V_0	纵向相对流速
V	平面流速 ($V = \sqrt{u^2 + v^2}$)
V_0	行近流速
V/V_0	相对流速
v	横向流速
w	直角坐标系下垂向流速
x	直角坐标系下纵向分量
x/L	直角坐标系下相对纵向坐标
y	直角坐标系下横向分量
y/L	直角坐标系下相对横向坐标
z	直角坐标系下垂向分量
z/D	直角坐标系下相对垂向坐标
ΔH	坝顶水深
$\Delta H/H$	淹没程度
ε	单位质量水体紊动动能耗散率
ζ	水位
κ	卡门常数
λ_j	丁坝局部水头损失系数
λ_{jm}	端坡对局部水头损失的影响系数
ν_t	紊动黏性系数
σ	垂向拟合坐标系
τ_b	底床切应力
τ_0	未布置丁坝时的底床切应力

τ_b/τ_0 相对底床切应力

$\tau_{b\max}/\tau_0$ 最大相对底床切应力

ω σ 坐标系下垂向速度协变量

η 潮汐河口航道整治线宽度的沿程放宽率

目 录

前 言

主要符号说明

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 研究方法	(4)
1.3 研究进展	(6)
1.4 研究内容	(23)
第 2 章 三维浅水紊流模型	(27)
2.1 直角坐标系下模型	(27)
2.2 σ 坐标系下模型	(30)
2.3 非结构网格上的有限体积模型	(37)
2.4 三维浅水紊流模型离散	(53)
2.5 算例验证	(59)
2.6 本章小结	(62)
第 3 章 三维丁坝水流模拟	(64)
3.1 丁坝水流模拟研究	(64)
3.2 三维模型中丁坝处理	(68)
3.3 算例验证	(84)
3.4 本章小结	(95)
第 4 章 丁坝水槽试验及数学模型验证	(98)
4.1 水槽试验	(98)
4.2 数学模型试验	(108)
4.3 本章小结	(144)

第 5 章 丁坝对流场的调整作用	(145)
5.1 淹没与非淹没条件下丁坝附近流场	(145)
5.2 淹没程度对丁坝附近流场的影响	(152)
5.3 端坡系数对非淹没丁坝附近流场的影响	(160)
5.4 端坡系数对淹没丁坝附近流场的影响	(174)
5.5 淹没丁坝相对单宽流量分布	(189)
5.6 本章小结	(196)
第 6 章 丁坝对河床的调整作用	(200)
6.1 模型试验研究内容	(200)
6.2 单丁坝作用下的河床调整过程	(201)
6.3 丁坝群作用下的河床调整过程	(212)
6.4 潮汐往复流条件下丁坝群的作用	(216)
6.5 丁坝群在调整宽浅河床地形中的作用	(224)
6.6 本章小结	(235)
第 7 章 结 论	(237)
参考文献	(242)

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 丁坝的分类

丁坝是一种典型的水工建筑物。坝根与河岸连接,坝体伸入河中。丁坝轴线与水流的方向呈正交或斜交,在平面上与河岸构成丁字形,并因此而得名。按不同的标准,丁坝可分为:长丁坝和短丁坝;上挑丁坝、正挑丁坝和下挑丁坝;航道整治丁坝和护岸丁坝等;透水丁坝和不透水丁坝;单丁坝和丁坝群等。

其中,按照坝顶高程与水位的关系,丁坝可分为淹没丁坝(又称漫水丁坝)和非淹没丁坝(又称不漫水丁坝)。当坝顶高程低于水位时,坝顶出现越坝水流,这时丁坝被称为淹没丁坝;反之,被称为非淹没丁坝。在内河航道整治中,坝顶高程通常按整治水位确定,此类丁坝在汛期被淹没。在潮汐河口航道整治中,在以前进波为主的河段,通常采用中潮位整治的原则。当水位超过中潮位时,丁坝便处于淹没状态。因此,在工程实践中,淹没丁坝对水流及河床的作用是不可忽视的实际工况。

1.1.2 丁坝在航道整治中的应用

航道整治是根据河床演变的趋势,把冲淤导向有利的方向,使河床冲淤达到相对稳定。具体来说,就是利用整治建筑物调整水流结构,增强浅段的输沙能力,将多余的泥沙输送出去或改变泥沙

的输移方向,使其淤至航道以外,或使泥沙淤积到深潭中,以改善航道水深,从而获得较为稳定的航道。丁坝是航道整治中使用最为广泛的整治建筑物。

航道整治设计工作从拟定整治线(或治导线)开始。整治线设计主要包括整治水位、整治线宽度和曲率半径。整治水位是指确定整治建筑物顶部高程的水位。当水位降至整治水位时,水流被束至整治线宽度范围内,水流加速冲刷河床,达到增深航道的目的。整治线宽度是指整治水位时的河面宽度。对于具体河段,整治水位和整治流量根据有关的工程规范确定,而整治线宽度和平面形态的确定则较为复杂。

在浅滩整治中,丁坝用于调整水流冲刷浅区从而实现整治目的。王益良等^[1]探讨了各种类型丁坝在国内典型河段浅滩整治中的应用。荷兰境内莱茵河航道整治中的对口丁坝发挥了束窄河道、壅高水位、增加航运水深和保护河岸的作用,将经常发生洪灾破坏的天然河道改造成重要的航运干道^[2]。

在潮汐河口航道整治中,常运用丁坝群形成一定规模和某种形态的整治线。整治线必须根据现场资料分析、理论研究和试验研究的结果确定。对于大江大河及其入海河口,由于径流、潮流、波浪等动力因素的随机性及其组合情况的复杂性,以及河(海)床边界条件的多样性,整治工程实施后的现场观测至关重要。根据观测结果,对工程作适当调整,是达到良好治理效果的重要措施。丁坝是比较易于进行调整的整治建筑物。正在建设中的长江口深水航道治理工程,整治建筑物包括南北槽分汉口、南导堤、北导堤和导堤内 19 座丁坝(见图 1.1),其中丁坝是实现航道整治工程治导线的重要组成部分^[3]。1998 年开工以来,进行过 3 次调整,主要是通过改变丁坝长度实现的。

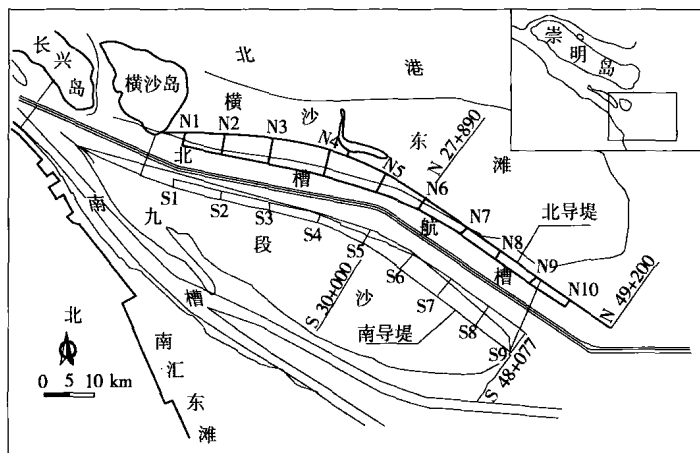


图 1.1 长江口北槽深水航道治理工程示意图^[3]

1.1.3 丁坝—水流—河床相互作用

整治线宽度研究的关键在于整治建筑物对河床的调整作用。作为最常用的整治建筑物,丁坝群对河床的调整作用研究对确定整治线具有重要意义。而单丁坝作用研究是丁坝群研究的基础,对单丁坝作用的深入研究有助于加深对丁坝群作用的认识。

已有的研究表明,丁坝的布置改变了原有河床过水断面的形态,引起周围水流结构的改变,并导致河床的重新调整。河床形态的改变反过来又对水流结构发生作用。在丁坝或丁坝群影响下水流与河床发生的相互作用,最终必然达到二者的相互协调与平衡。

恰当地运用丁坝群引起的河床普遍冲刷是一般整治工程所要达到的目的,而丁坝头部的局部冲刷一般是对整治工程不利的。坝头局部冲刷一方面危及坝体自身的稳定和安全,另一方面使较多流量集中于坝头,不利于主流区河床的普遍冲刷。关于坝头防护措施已有很多研究。实际工程中,丁坝头部通常设置一定的端坡,通过改变局部水流结构达到控制局部冲刷的目的。另外,实际

工程中的丁坝还具有一定的护底,以减少坝头附近的局部冲刷。

1.2 研究方法

丁坝的研究方法主要有理论分析、原型观测、水槽试验、物理模型研究和数学模型试验等。

1.2.1 理论分析

在非淹没丁坝下游回流长度和宽度研究方面,一般从二维水深平均运动控制方程出发,对主回流紊动切应力、主流流速横向分布规律和紊动黏性系数等因素作出假设,推导得到相应的计算公式。这些计算公式包括窦国仁正挑直立丁坝计算公式^[4]、程年生有边坡丁坝计算公式^[5]、冯永忠错口丁坝计算公式^[6]、乐培九计算公式^[7]和李国斌计算公式^[8]等。

在丁坝附近流速分布研究方面,孔祥柏等^[9]借助无界的理想流体中平板的平面绕流推导出矩形渠道中丁坝断面流速分布公式;Lu等^[10]根据丁坝下游流速分布的自相似性,将水深平均二维雷诺方程转化为常微分方程,并求解常微分方程得到丁坝下游流速分布公式;应强等^[11]推导出淹没丁坝下游主流区流速沿程变化公式。

此外,孔祥柏等^[12]应用平面绕流和旋涡理论,推导出非淹没单丁坝的局部水头损失系数公式。Azinfar等^[13]研究淹没单丁坝的阻水效应,并推导出丁坝阻力系数的计算公式。

1.2.2 原型观测

原型观测是直接观测丁坝所处河段的天然变化,掌握水流与河床变化的第一手资料,也是研究自然水流现象的最好手段。Muto^[14]采用大尺度PIV法对日本Yodo河上坝田区内流速进行观

测。Wu 等^[15]研究了黄河下游丁坝群的护岸效果。Anlanger 等^[16]采用声学 Doppler 流速仪对德国 Spree 河上的 7 条淹没丁坝进行定点流速测量。

1.2.3 水槽试验

水槽试验是将丁坝对水流或河床的作用经适当概化以后进行系统的试验研究,以揭示各种因素之间的内在联系的重要技术手段之一。

在较早的有关丁坝的研究中,多采用旋桨流速仪进行流场的定点测量。但是,旋桨流速仪只能测量流速大小,而不能测量流向,因此难以全面反映流场变化。有的研究者采用示踪剂观察流线,只能获得部分流场信息。近些年来,粒子测速技术的出现使得大范围流场测量成为可能,但是也只能提供表层流场。三维声学多普勒流速仪(ADV)和三维激光颗粒动态分析仪(3D-PDA)^[17]很好地解决了丁坝附近三维流速测量问题。颜料示踪和油膜技术等先进的可视化试验手段^[18]的运用同样有助于深入揭示丁坝近体的三维流动图像。

1.2.4 物理模型研究

物理模型研究是按照相似准则,把原型水流及其河床边界特征按相似比尺制成模型;在模型上复演自然水流现象,并进行观测分析;然后把观测结果换算到自然水流,以解决生产实践问题。如在长江口深水航道整治工程中,运用了整体物理模型、局部物理模型和正态系列物理模型对丁坝等整治建筑物的平面布置、高程以及放宽率等进行多组试验论证^[19]。

1.2.5 数学模型试验

数学模型试验是指以计算机为工具,从数学方程及其相应的

定解条件出发,采用合适的数值计算方法,将在空间上连续的物理量用有限个离散点上的值的集合来代替。

近几十年来,随着高性能计算机和数值模拟理论的飞速发展,数学模型发展很快。与水槽试验相比,三维数学模型能够提供平面和垂向流场。另外,可视化技术与数学模型相结合,使得计算过程和结果更直观。因此,数学模型在研究丁坝引起的水流变化和河床变形中发挥着越来越大的作用。

1.3 研究进展

1.3.1 非淹没单丁坝对水流和河床的作用

1.3.1.1 非淹没丁坝附近流态

在水流中设置丁坝后,水流的速度场和压力场都发生变化。上游水流直接冲击丁坝迎水面,受丁坝阻挡,一部分绕向坝头而下,另一部分则沿坝面垂直下降而后绕向坝头下泄。丁坝上游形成突然收缩区,下游则骤然扩大。从平面上看,丁坝的水流可分为四个区域:丁坝断面上游的壅水区、丁坝断面下游从丁坝头部到对岸的主流区、丁坝后面的回流区和位于两者之间的混合区(见图 1.2)。在描述与丁坝有关的流程尺度时,为具有对比意义,通常以丁坝长度 L 的倍数表示。

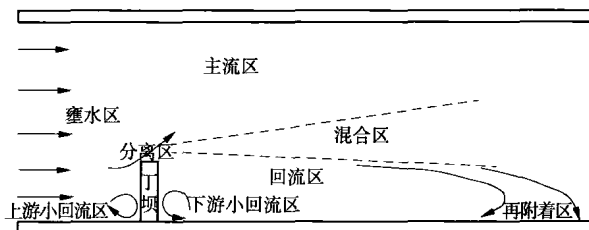


图 1.2 丁坝附近水流形态示意图

丁坝上游近坝水流在 $(1/2 \sim 2/3)L$ 处分成两部分^[9],一部分沿水面折向坝根一侧,形成上游小回流区,其长度一般为 $(1.1 \sim 1.4)L$ ^[5];另一部分绕过坝头下泄,与主流汇合。水流受坝体阻挡后回转折向底部,而后呈螺旋流流向坝头。至坝头附近与丁坝头部受阻水流汇合后,产生一股较强的下沉水流冲击槽底。

丁坝下游回流区存在两个旋转方向和尺度不同的回流区。尺度较小的回流区(又称角涡)靠近丁坝,其中心距丁坝约 L 。小回流区内流速很小,在天然河道中不会导致河岸和河床的冲刷,根据程年生等^[5]的研究是护岸的最理想区域。尺度较大的回流区在小回流区下游,距丁坝约 $6L$,是工程上重点研究的区域,简称回流区。

再附着区是主流重新附着岸壁的区域。根据 Chen 等^[20]的研究,其范围从距丁坝 $6L$ 到距丁坝 $(11 \sim 17)L$;再附着区通常被简化为时均流速为零的一个点,单丁坝回流区的附着点在时均位置附近周期性摆动,摆动周期约为旋涡周期的2倍,与 Re 无关。

1.3.1.2 非淹没丁坝下游回流区

丁坝下游回流区是工程实践中很关心的一个重要区域。在工程设计时计算回流区的长度和宽度及其边线对了解回流的掩护范围、决定丁坝间距和预估工程的效果等都是很有必要的。下面表述中以 l 表示回流区长度,以 l/L 表示相对回流长度。

早在20世纪50年代初,国外已开始相关的试验和理论研究。20世纪70年代,窦国仁^[4]从水流运动方程和连续方程出发,推导出回流边线方程、回流长度和宽度的计算公式。应强等^[21]总结了丁坝回流区尺度的理论及试验研究成果,包括挑角、边坡、岸坡和断面形状对回流区尺度的影响以及弯道丁坝、丁坝群和错口丁坝的回流尺度计算。

回流区长度受坝头端坡和坝头形式的影响。根据程年生^[22]的研究,实际工程中有端坡丁坝 l/L 一般为 $7 \sim 11$,而矩形薄板丁

坝 l/L 一般为 $10 \sim 14$; 当坝长相同时, 圆形坝头丁坝的坝头边界层分离点比方形坝头的丁坝更为靠近下游, 回流区范围也相应地变小。

回流区长度受丁坝迎水边坡和背水边坡的影响。程年生等^[5]从水流控制方程出发, 对水面纵比降作适当假设后, 推导出直立和有边坡丁坝的回流区长度及最大回流宽度公式, 并发现迎水边坡对回流区长度影响比背水边坡的影响大。

回流区长度受丁坝透水性影响, 杨元平^[23]根据基于沿水深方向积分的二维水流运动方程组, 推导出透水丁坝下游回流区长度计算公式。当透水量等于 0 时, 公式自动退化为李国斌公式^[8]。

然而, 相关的理论和试验成果与实际工程中丁坝的布置原则存在很大差异。一般认为, 实际工程中 l/L 为 $2 \sim 4$, 而水槽试验和理论计算的 l/L 一般在 10 左右, 甚至达到 13。关于这种差异存在以下解释。

丁坝试验研究多是在矩形水槽中进行的, 未布置丁坝时水深沿横断面基本相等, 侧壁影响不大。而天然河道断面形态以抛物线居多, 近岸单宽流量较河道中间的小得多。为此, 孔祥柏提出“丁坝水力长度”, 即丁坝阻挡的流量与坝头外未设置丁坝时的单宽流量之比。采用丁坝水力长度在一定程度上缩小了上述差异。

天然河流的平面尺度远大于垂直尺度, 尤其在河口地区, 宽深比 B/H 大于 500 的情况很常见。而水槽试验因场地所限, 一般 $B/H < 500$ 。韩玉芳等^[24]研究了不同 B/H 下的回流长度, 发现 l/L 随 B/H 的增大而减小。

更重要的是, 关于丁坝回流尺度的试验很多都是在定床条件下进行的。而在天然河道中, 丁坝的布置会引起附近河床进行调整, 尤其是在坝头部分由于水流过分集中出现局部冲刷坑。河床的调整对回流区尺度产生很大影响。

乐培九等^[7]和韩玉芳等^[24]采用动床模型试验研究了丁坝局