

长江中游航道

整治建筑物稳定性研究

Changjiang Zhongyou Hangdao

Zhengzhi Jianzhuwu Wendingxing Yanjiu



王平义 杨成渝 喻涛 韩林峰 / 著



科学出版社

长江中游航道整治建筑物 稳定性研究

王平义 杨成渝 喻涛 韩林峰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书紧紧围绕三峡蓄水后长江中游航道整治理论及实际问题进行研究,主要从整治建筑物水毁机理及稳定性、模型试验两方面展开。在前期研究工作的基础上,通过物理模型试验,对长江中游航道整治建筑物受三峡工程“清水”下泄及水库下游河床发生长距离、长时段的冲刷变形影响下,整治建筑物周围的水流结构、局部冲刷、破坏程度、受力分布等特征进行分析,并提出有效治理措施,以预防和根治水毁灾害的发生。

本书介绍的航道整治建筑物稳定性研究成果对于延长整治建筑物使用寿命、提高航道整治效果具有重要作用,对其他河段的航道整治建筑物设计、施工及维护也具有借鉴意义。本书可供大专院校、科研单位及工程设计和管理部门相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

长江中游航道整治建筑物稳定性研究 / 王平义等著. —北京: 科学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-03-049384-2

I. ①长… II. ①王… III. ①长江-中游-河道整治-建筑物-稳定性-研究 IV. ①TV867

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 160917 号

责任编辑: 杨 岭 唐 梅 / 责任校对: 韩雨舟

封面设计: 墨创文化 / 责任印制: 余少力

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张: 17 3/4

字数: 420千字

定价: 176.00元

前 言

内河航运是典型的资源节约、绿色环保的交通运输方式，具有运能大、能耗小、成本低、占地少、污染轻等优势。在当前交通拥堵、环境污染、能源短缺等问题日益严重的形势下，发展内河航运越来越受到重视。我国内河航道通航里程位居世界第一，但高等级航道开发利用还相当有限。

长江横贯东西、通江达海，是连通东、中、西部地区的水运主动脉，是我国最重要的内河水运主通道，也是世界上运量最大、运输最繁忙的通航河流，对促进流域经济协调发展发挥了重要作用，素有“黄金水道”之称。随着我国国民经济和对外贸易快速发展，提升长江黄金水道通航能力已成为支撑沿江经济社会发展的必然要求和迫切需要。而长江中游航道作为长江航道“承上启下”的交通枢纽，历来是长江航道养护的重中之重。随着三峡水库蓄水后长江航道通航环境的变化，长江中游航道通航能力不足的问题进一步凸显，其航道条件与日益增长的沿江经济对水运的需求有较大差距，航道的治理难度、整治建筑物的平面布置和结构型式也在发生变化，对整治建筑物的稳定性要求越来越高。针对三峡水库蓄水运行后对长江中游航道条件的不利影响及趋势，近年来航道部门陆续对一些重要浅险碍航滩段实施了航道整治控导工程，包括护心滩工程、分汊河段洲头守护工程、护边滩工程、筑坝工程、护岸工程及护岸加固工程等。航道整治的成败关键在于治理效果，而整治建筑物的稳定性是确保治理效果的重要基础。因此，深入研究三峡水库蓄水后，新水沙条件下整治建筑物的稳定性问题，对确保整治工程质量和降低工程维护成本，促进长江经济带的发展具有重要意义。

本书为作者等所组成的研究团队先后结合交通运输部科技项目专题“长江中游航道整治丁坝稳定性关键技术研究”、“长江航道整治护滩建筑物模拟技术研究”、“长江中游心滩守护工程关键技术研究”、“航道整治建筑物周围水沙运动规律研究”、“整治建筑物的可靠度及使用年限研究”及“新型生态环保型护岸工程结构型式试验研究”，紧紧围绕三峡水库蓄水运行后，新水沙条件下长江中游航道整治中的实际需求，以基础理论为导向，以研究工程实际技术问题为核心，以解决工程实际应用需求为目标，将原型观测、理论分析、数值模拟、模型试验等多种研究手段相结合，历经十多年对长江中游航道整治建筑物的整治效果及稳定性进行比较全面、系统、深入的研究所取得的主要成果。参加项目研究的主要人员有王平义、杨成渝、高桂景、高培、赵维阳、刘胜、刘晓菲、喻涛、王伟峰、梁碧、苏伟、张可、韩林峰、路鼎、杨渠锋、张秀芳、李晓玲、杜飞、李明龙、杨锐等。在研究过程中得到了交通运输部科技司、交通运输部水运局、长江航道局、长江航道规划设计研究院、南京水利科学研究院、交通运输部天津水运工程科学研究院等单位的大力支持和协助，同时也得到行业内有关专家的热情帮助与指导。在此，谨向所有给予支持与帮助的各级领导和专家表示衷心的感谢！

本书仅是作者近年来对长江中游航道整治建筑物模拟研究及应用的初步总结，参考了国内多家科研设计单位、高等院校及管理部门近十年来的研究成果，由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者
2016 年 4 月

目 录

第1章 概论	1
1.1 长江中游航道建设概况	1
1.1.1 长江中游航道概述	1
1.1.2 长江中游航道建设	2
1.1.3 长江中游航道治理规划	2
1.2 长江中游航道整治建筑物主要类型及研究现状	2
1.2.1 丁坝研究现状	3
1.2.2 护滩软体排研究现状	4
1.2.3 鱼骨坝研究现状	5
1.2.4 生态型护岸研究现状	5
1.3 航道整治建筑物模拟技术研究进展	7
1.3.1 物理模型试验	7
1.3.2 数学模型	7
第2章 长江中游航道整治建筑物水毁特征	9
2.1 坝体类整治建筑物水毁特征	9
2.1.1 破坏形式	9
2.1.2 损毁原因分析	11
2.2 护岸类整治建筑物水毁特征	12
2.2.1 破坏形式	13
2.2.2 损毁原因分析	14
2.3 护滩(底)类整治建筑物水毁特征	16
2.3.1 破坏形式	16
2.3.2 损毁原因分析	18
第3章 长江中游丁坝破坏机理及稳定性研究	20
3.1 概化模型试验设计及试验内容	20
3.1.1 水槽试验	20
3.1.2 试验设计	21
3.2 丁坝附近水流结构	27
3.2.1 试验方案	27
3.2.2 观测内容	28
3.2.3 水面线分布	30
3.2.4 水面线的二维分布	32

3.2.5	水头损失	32
3.2.6	不流速分布	36
3.2.7	丁坝附近的水流流态	39
3.2.8	水流紊动分析	42
3.2.9	丁坝周围水流脉动能分布	43
3.3	丁坝坝体及周围床面的压力分析	47
3.3.1	试验方案	48
3.3.2	压力数据信号的分析	49
3.3.3	丁坝受力理论分析	51
3.3.4	不同因素对丁坝受力的影响	53
3.3.5	丁坝周围床面受力分析	58
3.4	丁坝局部冲刷和护底防冲措施研究	60
3.4.1	清水冲刷试验方案	60
3.4.2	丁坝局部冲刷机理	61
3.4.3	冲刷坑的形成过程及影响因素	64
3.4.4	丁坝护底防冲试验及防冲措施的研究	73
3.5	抛投块石的稳定性及丁坝绕流流场理论分析	78
3.5.1	动水中抛投块石体的起动	78
3.5.2	动水中抛投块石体的止动	79
3.5.3	丁坝坝头漩涡的诱导流速	80
3.5.4	坝头漩涡的尺度和强度	81
3.5.5	丁坝头部附近床面泥沙的受力和起动、扬动条件	82
3.6	抛石丁坝安全性判别分析及坝体结构优化试验研究	82
3.6.1	抛石丁坝临界失效水毁体积	82
3.6.2	坝体水毁体积计算分析	83
3.6.3	水毁体积比公式的应用与抛石丁坝安全性判别模型	86
第4章	长江中游边滩守护建筑物稳定性研究	88
4.1	长江中下游滩型介绍	88
4.1.1	长江中下游主要滩型及基本特征	88
4.1.2	边滩的类型及形成机理	89
4.2	护滩带的布置形式、破坏形式及破坏机理	91
4.2.1	护滩带的平面布置形式	91
4.2.2	护滩带的破坏形式	93
4.2.3	X型系砗块软体排	96
4.3	模型试验设计及模拟技术	98
4.3.1	清水定床试验	98
4.3.2	清水冲刷试验	98
4.3.3	护滩建筑物受力试验	99

4.3.4	模型概化的设计依据	99
4.3.5	模型比尺	101
4.3.6	护滩建筑物模型设计	104
4.4	边滩滩体周围的水流结构	109
4.4.1	试验布置	109
4.4.2	水面线分布	112
4.4.3	流速分布	116
4.4.4	边滩附近的水流流态	118
4.4.5	水流紊动分析	121
4.5	滩体及护滩建筑物冲刷破坏研究	126
4.5.1	影响滩体冲刷破坏的主要因素	127
4.5.2	无护滩建筑物守护的滩体冲刷破坏情况	127
4.5.3	有护滩建筑物守护的滩体冲刷破坏情况	131
4.5.4	护滩建筑物的变形及破坏研究	135
4.6	护滩建筑物受力分析	138
4.6.1	护滩建筑物受力试验设计	138
4.6.2	护滩建筑物的受力分析	140
第5章	长江中游护心滩建筑物稳定性研究	144
5.1	护心滩建筑物的概化模拟技术	144
5.1.1	水槽概化模型设计依据	144
5.1.2	模型比尺的确定	147
5.1.3	护心滩建筑物模型设计	148
5.2	护心滩建筑物试验设计	152
5.2.1	清水定床试验	152
5.2.2	清水冲刷试验	154
5.3	软体排护滩带的稳定性研究	157
5.3.1	软体排周围的水流结构	157
5.3.2	软体排守护时河床变形分析	164
5.3.3	软体排排体稳定性分析	167
5.4	四面六边体透水框架的稳定性研究	175
5.4.1	透水框架周围的水流结构	175
5.4.2	透水框架周围河床变形分析	181
5.4.3	透水框架的水毁形式及机理分析	184
5.4.4	透水框架的稳定性分析	185
5.5	鱼骨坝的稳定性研究	186
5.5.1	鱼骨坝周围的水流结构	186
5.5.2	鱼骨坝守护时河床变形分析	192
5.5.3	鱼骨坝的水毁过程及机理分析	194

5.5.4 鱼骨坝结构的安全可靠性分析	196
5.6 护心滩建筑物护滩效果整体分析	199
5.6.1 软体排护滩带守护时护滩效果整体分析	199
5.6.2 四面六边体透水框架群守护时护滩效果整体分析	199
5.6.3 鱼骨坝守护时护滩效果整体分析	200
第6章 生态护岸建筑物稳定性研究	202
6.1 新型生态护岸结构型式	202
6.1.1 传统护岸结构	202
6.1.2 人工鱼礁结构	203
6.1.3 鱼礁型生态护岸	204
6.2 鱼礁型护岸结构尺寸设计	206
6.2.1 鱼礁护岸块体尺寸选定	206
6.2.2 鱼礁块体布置间距选取	208
6.3 新型生态护岸结构水动力特性研究	215
6.3.1 模型设计及试验方案	215
6.3.2 护岸块体周围水面线分布	221
6.3.3 护岸块体周围流速分布	226
6.3.4 护岸周围水流紊动分析	233
6.4 鱼礁型生态护岸产卵场水力学因子分析	246
6.4.1 河岸冲刷与破坏机理	246
6.4.2 常见崩岸类型及特征	247
6.4.3 新型结构护岸机理分析	248
6.4.4 鱼类产卵场水力学因子初探	249
6.5 护岸结构破坏机理分析及防护措施	253
6.5.1 螺母型护岸结构破坏机理分析	253
6.5.2 两种块体护岸结构稳定性比较	261
6.5.3 防护措施	261
6.6 护岸结构综合比较	263
6.6.1 因素分析	264
6.6.2 结构综合比较	266
6.6.3 新型结构适用条件	267
主要参考文献	269

(2)枝城(中游里程 570.0km)至城陵矶(中游里程 230.0km)段, 又称荆江河段, 以藕

池口为界分为上、下荆江。上荆江长约 175km, 河段内弯道较多, 弯道内有江心洲, 属微弯型河段, 河槽平均宽度为 1300~1500m。下荆江长约 165km, 属蜿蜒型河段, 河道迂回曲折, 河槽平均宽度约 1000m。目前该河段大部分严重崩岸已通过人工护岸得到控制, 河势总体上已趋于稳定, 但少数河段崩岸仍十分严重。

(3) 城陵矶(中游里程 230.0km)至武汉(中游里程 2.5km)段, 长 227.5km, 江面较宽, 河道较顺直, 航道较荆江河段稳定, 多为宽窄相间的藕节状分汊河段, 窄段一般有节点控制, 河道单一、稳定; 宽段河道内发育有洲滩, 形成分汊。河床演变主要表现为局部河段的深泓摆动, 洲滩的冲淤, 主支汊交替消长。

宜昌至武汉河段枯水期水流一般流速为 1.0~1.7m/s, 洪水期流速为 2.0~3.0m/s, 多年平均径流量为 4510 亿 m^3 (宜昌站资料)。

1.1.2 长江中游航道建设

自“九五”期以来, 以实施长江中游界牌水道治理工程为标志, 长江中游航道建设步入了系统治理的时期, 先后对界牌、碾子湾、罗湖洲、马家咀、瓦口子等浅险水道进行了系统有效、科学合理的整治, 使得严重碍航的局面得到一定缓解, 逐步摆脱蜿蜒曲折、演变频繁的天然状态, 通航尺度大幅提升。2009 年, 宜昌至城陵矶河段枯水期最小维护水深从 2.9m 提高到 3.2m, 打破了延续 56 年长江中游枯水期航道水深 2.9m 的局面。2010 年, 海轮航道成功实现了“双延”, 即延长武汉至巢湖河段海轮航道通航期、海轮航道上延至城陵矶, 同时提前一个月开放了武汉以下海轮航道。从 2011 年枯水期开始, 宜昌到武汉的最低水深已经正式提高到 3.2m, 可通航 5000t 级船舶。2011 年 1 月 21 日, 国务院颁布了《关于加快长江等内河水运发展的意见》(国发(2011)2 号), 标志着长江等内河水运发展已经上升为国家战略, 其中以长江干线中游荆江河段航道治理工程和南京以下 12.5m 深水航道建设工程为重中之重, 围绕这两个重点工程和“十二五”发展目标, 全面开展了长江中下游航道建设工作, 加快推进“十二五”期长江黄金水道建设。

1.1.3 长江中游航道治理规划

《长江干线航道总体规划纲要》(2009 年 3 月)中明确: 到 2020 年, 宜昌至城陵矶河段、城陵矶至武汉河段航道建设标准分别为 $3.5\text{m} \times 150\text{m} \times 1000\text{m}$ 和 $3.7\text{m} \times 150\text{m} \times 1000\text{m}$, 保证率均为 98%。根据《长江干线航道建设规划(2011~2015 年)》, 到 2015 年, 长江中游宜昌至城陵矶河段航道为内河 I 级、水深为 3.5m; 城陵矶至武汉河段的航道水深为 3.7m; 武汉至江西湖口河段的航道水深为 4.5m, 可通航由 2000t 或 5000t 级驳船组成的 2 万~4 万 t 级船队, 利用自然水深通航 5000t 级海船。

1.2 长江中游航道整治建筑物主要类型及研究现状

自 20 世纪 90 年代以来, 航道部门在长江中游河段实施了一系列航道整治工程, 工

程所建的航道整治建筑物有效改善了中游通航条件,对释放中游通航潜能起到了较大作用。从1994年至今,长江中游(宜昌至武汉河段)先后实施并竣工交付使用了12项航道整治(控导)工程,共建成丁坝、顺坝、锁坝、护滩(底)带、护岸、鱼嘴等各类整治建筑物75个。长江中游航道整治建筑物根据整治作用和守护位置的不同大致可以分为坝体类整治建筑物、护岸类整治建筑物和护滩(底)类整治建筑物等三类。其中坝体类整治建筑物主要包括丁坝(群)、顺坝、锁坝、潜坝、鱼骨坝、导流坝;护岸类整治建筑物主要包括抛石护岸、混凝土块护岸、四面六边透水框架护岸、钢丝笼护岸、土工织物软体排护岸及模袋混凝土护岸等;护滩(底)类整治建筑物主要包括抛石护滩(底)、砍肩护底、钢筋笼护滩(底)、混凝土铰链排、护滩(底)软体排、固化砂土新型护滩结构等。

下面简要介绍长江中游几种典型的整治建筑物应用情况及研究现状。

1.2.1 丁坝研究现状

丁坝是航道整治工程中最常用的整治建筑物,其坝根与河岸连接,坝头伸向河心,坝轴线与水流方向正交或斜交,在平面上与河岸构成丁字形,形成横向阻水的整治建筑物。在山区河流的急险滩航道整治中,丁坝多用于调整流向、改善流态,或壅高滩上水位,增加水深或调整比降,减缓局部地区流速,以便船舶利用缓流上滩。在浅滩航道整治中也常用于束窄河床,集中水流冲深航槽,或与疏浚结合,束水归槽,维护航道尺度等;在平原河流航道整治中,丁坝多用于加高或固定边滩,延长水流对浅滩的冲刷时间,或与疏浚结合,减小挖槽回淤量。

早在20世纪50年代初期,国外已开始对丁坝绕流问题进行试验和理论研究。我国从1954年开始对长江干流航道进行系统整治,共整治滩险188处,完成工程量约580万 m^3 ,其中大量使用了丁坝等航道整治建筑物。目前,国内对丁坝的研究主要有试验研究和数值计算两种手段。

(1)试验研究方面:窦国仁等(1978)对丁坝回流问题进行试验和理论研究;汪德胜(1988)在试验观测的基础上,对缓流时漫水丁坝的水流结构及局部冲刷进行了分析研究;赵世强(1989)通过水槽试验讨论了丁坝周围的水流流态和丁坝局部冲刷机理,并导出了丁坝局部冲刷计算公式;方达宪等(1992)对丁坝坝头床沙起冲流速进行较为全面、系统的试验研究,在单因素分析及丁坝附近水流结构的观察分析的基础上,用优化组合及多元线性回归的方法,提出了丁坝坝头床沙起冲流速的计算方法,进而得出了坝头局部最大冲深的计算模式;应强(1995)以水槽试验为基础,对淹没丁坝附近的水流现象进行了定性描述,采用量纲分析法,提出过坝流量的计算公式和坝前最大壅水值的计算公式;彭静等(2000)介绍了用颜料示踪和最新的油膜技术对流动进行可视化记录以研究淹没丁坝群的近体流场分布的试验结果,得到绕丁坝的近场流动具有强三维非恒定特性的结论;周银军等(2008)试验研究了透水丁坝附近河床的冲淤特性;童年虎等(2009)通过动床模型试验研究了黄河下游裴峪至官庄峪丁坝缩窄河段,在河道不同位置布设丁坝,不同情况下丁坝相对长度对河道泥沙冲淤变化的影响;韩林峰等(2013)通过水槽试验,将丁坝水毁近似看作由不同洪峰流量的洪水交替作用产生的结果,提出了三参数威布尔丁坝水

毁可靠度分析模型,并在水毁体积等效的基础上推导出受年际洪水交替作用后丁坝剩余寿命的计算公式;喻涛等(2014)通过水槽概化模型试验,以天然河流日均流量过程作为试验水流条件,进行非恒定流作用下丁坝局部冲刷研究。

(2)数值计算方面:陆永军等(1991)用 $k-\epsilon$ 紊流模型建立了丁坝绕流的水深平均运动特性的数学模型;沈波(1997)在水力方程中考虑环流对方程的修正,局部水深突然变化引起局部阻力对方程的修正,同时输沙方程中考虑环流输沙的基础上,建立了适合于河流丁坝局部冲刷的平面二维数学模型;周宜林(2001)通过大涡数值模拟研究了丁坝附近水流特性;彭静等(2002)对洪水条件下丁坝近体的局部冲淤进行了三维数值模拟;朱军政等(2003)采用 VOF 方法模拟涌潮翻越丁坝过程,得到定床情况下丁坝上游任意点任意瞬间的时均流速分布;崔占峰等(2006)采用标准 $k-\epsilon$ 模型结合壁面函数的方法,模拟分析了丁坝淹没情况下丁坝附近的流场、紊动能及耗散率的分布;刘玉玲等(2010)采用高精度 WENO 格式结合有限体积法建立了河道丁坝群二维水流的数学模型;张新周等(2012)针对局部冲刷和一般冲刷的不同,建立了考虑垂向水流作用的局部冲刷三维紊流泥沙数学模型,并对往复流和单向流作用下的丁坝局部冲刷进行了验证计算和数值模拟。

1.2.2 护滩软体排研究现状

长江中游为典型的平原冲积型河道,分布有大量的、形态各异的成形淤积体,其中具有一定规模的淤积体通常称为滩体(江心滩或边滩),是河道的重要组成部分。在航道整治工程中,为了稳固河岸和洲滩、稳定枯水航槽、控制河道格局,需对一些滩体加以保护和控制,从而维持其相对稳定。护滩软体排相对于其他类型的整治建筑物,具有施工方便、造价低等优点;同时,不占用过水面积,对滩槽周围流场影响较小,且不改变地形冲淤变化,能够较好地维持滩槽稳定,是目前长江中游常用的护滩建筑物型式。

在早期航道整治工程中,护滩建筑物的结构型式主要为在滩面上修筑低矮丁坝群或者散抛块石。20 世纪 80 年代,长江中开始采用单层聚丙烯编织布软体排+覆盖块石的结构型式,虽然起到了一定的作用,但是由于这种排体的排垫与压载体是分离的,压载块石易滚落,排体多有毁坏,所以总体效果不是很理想,现已不再采用。20 世纪 90 年代,长江航道整治进入快速发展期,软体排护滩结构在长江中下游航道整治工程中得到广泛使用,排体结构也由最初的排垫与压载体分离的形式变为系结压载软体排形式,由于其平面布置呈带状,所以又称为护滩带,其结构型式包括沙垫软体排、系小沙袋软体排等。由于系小沙袋软体排在施工和使用过程中存在一些问题,主要包括劳动力强度过大、压载重量不够、沙袋破损后影响排体稳定等不利因素,在 90 年代末期逐渐被系混凝土块软体排取代。

由于护滩软体排是近二十年才开始在长江中游航道整治工程中使用,且排体结构相对比较复杂,所以目前对软体排的研究主要采取现场观测和模型试验相结合的方法。刘怀汉等(2007)系统总结了长江中游已建护滩带的平面布置形式和破坏形式,对护滩带的破坏机理进行了分析,通过水槽概化模型试验,分析了护滩带周边水流泥沙运动特征,提出了护滩带宽度和间距的确定方法;刘晓菲(2008)针对 X 型系混凝土块软体排排体的

模拟技术展开深入研究,解决了X型排排体的几何相似、重力相似、平面布置相似以及变形相似等几个方面的问题,基本实现了X型排排体的实体模拟;张秀芳等(2010)以长江中游典型碍航心滩河段——沙市三八滩河段为原型,通过概化模型试验并结合理论分析,详细论述了软体排护滩前后心滩和河床的冲刷变化规律以及软体排护滩带对汊道分流分沙比的影响;马爱兴等(2011)通过对护滩带损毁过程的试验观测、损毁影响因素分析、护滩带块体间脉动力及受力分析,研究了护滩带常见的边缘塌陷、悬挂、排体中部鼓包或塌陷等破坏类型的损毁机理,并提出在护滩带边缘抛四面六边透水框架、增大排体自身的抗拉强度、选择合理的平面布置形式等应对措施;郑英等(2012)通过水槽试验,研究了四面六边透水框架结构的护滩效果;贾晓等(2013)以长江口深水航道治理工程为基础,对长江中下游及河口地区软体排的实际冲刷情况进行了梳理,根据引起排体局部冲刷的动力原因,将冲刷坑形态分为沿软体排冲刷槽、绕流冲刷坑和跌流冲刷坑,并具体分析了不同形态冲刷坑的特征及演变过程。

1.2.3 鱼骨坝研究现状

鱼骨坝一般依心滩或江心洲而建,由顺水流方向的脊坝和垂直于脊坝轴线的刺坝组成,脊坝主要用于分流、分沙和归顺水流方向,刺坝可调节环流的运动,并增强坝体的稳定。因此,在航道整治中,鱼骨坝在分流分沙的同时,还可用于改善不良流态、稳定洲滩、保持有利的河势和滩槽格局。

不同形式的鱼骨坝工程对整治河段的水、沙运动有着不同程度的影响。以固滩(护滩)、稳定洲头为主的鱼骨坝,依原有滩头或洲头的地形进行防护,其平面线型应顺滑、水流能够平顺过渡,以减少工程对原有水、沙运动的干扰;而以分流、分沙、调整不利流态为主的鱼骨坝,其方向和尺寸的选取非常关键,一般需进行多方案比较以确定最佳方案。因此,根据河道地形、水流特征以及整治建筑物功能的不同,鱼骨坝的布置形式也往往具有多样性。

鱼骨坝复杂的坝体结构决定了其周围水流条件的复杂性。目前对鱼骨坝的研究主要有原型观测与模型试验两种方法,胡旭跃等(2002)在对桃源大桥斜流碍航问题的研究中发现,在江心洲洲头修建鱼骨坝可以使斜流与航槽的最大的交角由 38° 减少到 $15^{\circ}\sim 24^{\circ}$;张少云等(2005)在沉水跑马滩的整治模型试验中发现,处于斜流区的鱼骨坝,刺坝长度越短,对斜流的约束作用就越小;周彬瑞等(2006)结合水槽实验数据,利用数学模型,对不同刺坝间距的鱼骨坝工程方案进行比较,根据坝体上游近岸水位单位长度壅高、坝体两侧及两岸岸边流速增加情况,确定刺坝布置的最佳间距;刘怀汉等(2008)结合水槽概化实验和二维水流数值计算成果,研究了鱼骨坝的水位、流速、流场和动水压强等水力特性,并对水毁原因进行了分析。

1.2.4 生态型护岸研究现状

以往人们在河道护岸过程中只考虑工程的安全性、耐久性,故多采用干砌石、浆砌

石、混凝土、预制块等材料修筑硬质护岸,隔断了水生生态系统和陆地生态系统之间的联系,导致河流失去原本完整的结构和作为生态廊道的功能,进而影响到整个河道生态系统的稳定。而生态型护岸工程是结合了航道工程学、环境学、生物科学、美学等学科于一体的治河工程,对改善水生生物的生存条件、提高河流水质提供一定的帮助。

1. 国外生态型护岸研究概况

国外最早从 20 世纪 50 年代就着手研究传统护岸工程对河流自然环境的影响,发现传统的混凝土护岸结构在一定程度上会造成河流生态功能退化和周边环境破坏。为了能够有效地守护河岸边坡和保持生态系统,许多国家相继提出了一系列生态型护岸技术。德国首先建立了“近自然河道整治工程”理念,提出河流的整治应满足生命化和植物化的原理;阿尔卑斯山脉的法国、瑞士、斯洛文尼亚等国家,在河道整治领域也有着非常成熟的经验,并且非常注重河流生态系统的完整性以及河流作为自然生态景观和生物基因库的作用;德国、瑞士等国于 20 世纪 80 年代提出了“自然型护岸”技术,广泛采用捆材护岸、木沉排、草格栅、干砌石等新型环保护岸结构型式,在大小河道均有广泛的实践。目前在欧美等国使用更为广泛的生态护岸技术是土壤生物工程(soil-bioengineering),该工程的实质是最大程度地利用植被对水体、气候、土壤的作用,以实现河岸边坡的稳固。这类技术比较常见的一般有以下几种。

(1)土壤保持技术:大都采用植物对岸坡进行遮盖,以避免岸坡表面受到水体的直接冲刷及侵蚀。其主要防护方法有遮盖草皮、种植乔灌木、播种草籽等。

(2)地表加固技术:重点是利用植物庞大的根系吸取土体水分来减小土壤中的孔隙水压力,以获得稳固土体的效果。其常见的技术方法有根系填塞、灌木丛层、枝条篱墙、活枝柴捆、草卷等。

(3)植被与建筑材料的搭配利用:其常见的技术方法有绿化干砌石墙、植物网箱、植物栅栏、渗透式植被边坡等。

日本的河道边坡治理技术主要师从于欧美国家,并在此基础上提升优化,主要有植物、石笼网、干砌石、生态混凝土等生态护岸技术,并在河道治理工程中取得了很多突破。日本在 20 世纪 70 年代末提出“亲水”的理念,90 年代初又提出了“多自然型河川建设”工程,并在探索新型护岸结构型式上做了大量的科学研究。例如,日本丰桥市的河道治理工程,以纵横排列的圆木作为坡脚附近的护岸,给水域中各类生物营造了优越的生态空间,在靠近河流的岸坡附近堆上适当大小的天然块石,以抵抗水流的冲刷。

2. 国内生态型护岸研究概况

我国对生态护岸的使用和研究起步较晚。从 20 世纪 90 年代后期开始,由于国内生态环境受到不同程度的破坏,严重影响了人们的正常生活,所以人们逐渐对生态环境的保护有了一定的意识;同时,受到来自欧美等发达国家先进环保技术及环保理念的影响,我国的水利工作者开始在航道整治工程中利用生态护岸技术实现对河道生态系统的保护。例如,胡海泓(1999)在桂林市漓江旅游景区生态河道治理工程中引进并应用了笼石挡墙、复合植被护坡、网笼垫块护坡等三种生态型护岸技术;陈海波(2001)在传统土渠护坡的

基础上,将砌筑工程技术与生物工程技术有机结合,提出了网格反滤生物组合护坡技术;李洪远等(2003)以多功能生态堤岸为基础,分析了海河堤岸的现状及存在的问题,针对海河综合开发改造方案提出了生态堤岸与亲水景观建设等建议;张玮(2007)通过种植水生植物的透空块体砌筑成河岸坡面,结合分格梁、柱来提升堤岸结构的整体稳定性,提出了生态河流治理的新方法;周明等(2008)针对长江护岸工程现状,围绕“产业化管理、体制改革、技术创新”的主题,论述了长江护岸工程特性、建设管理现状及存在的问题、改革目标模式及相关对策,探讨了适合新时期长江护岸工程现代化建设管理的优化模式;吴义锋等(2011)采用多孔混凝土为河渠生态护岸载体,联合绿色植物、微生物构建河渠岸坡特定生态系统,以岸坡硬质护砌的河渠为实验对照,研究该系统对河渠中微型生物群落的胁迫效应;曾子等(2013)通过极限平衡法结合有限元数值计算,提出了基于乔灌木根系加固及柔性石笼网挡墙变形自适应的生态护坡技术。

1.3 航道整治建筑物模拟技术研究进展

与土木、水利、港口等领域建筑物相比,航道整治建筑物密实度差、结构强度低、基础可动性强,加之其工作环境一般位于水下,条件复杂且难以进行实际测量,因此,传统航道整治建筑物模拟技术主要以物理模型试验为主。近年来,随着数值模拟技术的日趋成熟以及高性能计算机的出现,CFD(计算流体力学)模拟技术以其工作周期短、投入小等优点,而逐渐受到航道工作者的青睐。

1.3.1 物理模型试验

物理模型试验是较早用于整治建筑物模拟研究的方法。19世纪初比尺模型开始出现,由于当时试验和测量手段比较落后,控制由人工调节,模型的模拟精度较低。20世纪中期,河工模型试验有了较大的发展,测量手段有了显著改善,模型试验方法也在不断完善。但由于场地等因素限制,河工模型一般相比于真实河道要小得多,而且有时候不得不在某种程度上降低几何相似的要求,将模型做成变态,导致河工模型中整治建筑物通常做得很小,难以找到模型相似的材料,无法真实模拟其水毁过程。目前,航道整治建筑物模型试验通常是在概化的明渠或水槽中进行,通过定床和动床模型试验模拟整治建筑物局部范围内的水流、泥沙运动情况以及整治建筑物水毁过程。

1.3.2 数学模型

数学模型是将已知的水动力学基本定律用数学方程进行描述,在一定的定解条件下求解这些数学方程,从而达到模拟一些水动力学的理论问题及实际问题的目的。描述水流运动的控制方程组,多具有非线性和非恒定性,定解条件复杂多变,用解析法求解几乎不可能,因此长期以来,问题的解决主要借助于物理模型实验。但在大型水利、水运工程的规划设计时,不仅要考虑邻近区域的水利条件及其影响,还必须考虑工程对整个

流域或邻近流域的影响,物理模型对此一般难以解决。同时物理模型存在周期长、费用高等缺点,促使许多学者和工程技术人员寻求数值求解水流运动方程的方法和理论。1928年,Courant、Friedrichs和Lewy提出了有限差分理论,但因计算量太大而未能推广应用。直到电子计算机的问世,为求解水流运动方程提供了强有力的计算工具,数学模型受到重视并得到迅速发展。1952~1954年,Lsaacson和Twesch建立了俄亥俄河和密西西比河部分河段的数学模型,并进行了实际洪水过程的模拟。到20世纪60年代中期,为解决各种各样的设计和规划问题,建立了大量用途单一的数学模型。到20世纪70年代后,许多功能更加完善的数学模型先后出现,特别是紊流模式的不断完善,三维数学模型也进入实用阶段。今天,数值计算已广泛应用于水利、航运、海洋、环境、流体机械和流体工程等各个科学研究领域。

由于数学模型在求解过程中存在参数或系数确定的问题,如糙率、阻力系数、挟沙力公式及系数、推移质输沙率公式及系数等,这些经验公式如果应用不当就会脱离实际。在利用数学模型进行河床变形预测时,从理论上讲,可以在这些资料的范围内对未来进行准确的预报,但并不一定能够外延。另外,现阶段的数学模型计算结果的表达不直观,用户无法对模型计算进行跟踪操作,模型计算结果难于与其他信息集成,造成交流困难,这也影响了数学模型的进一步发展。