

HUANGHE XIAOBEIGANLIU FANGYUMOXING SHIYAN YANJIU

黄河小北干流 放淤模型试验研究

武彩萍 李远发 著



 黄河水利出版社

中国水利水电科学研究院科技图书出版项目

水利水电工程

散淤模型试验研究

王世军 李国英 著



中国水利水电出版社

黄河小北干流放淤模型试验研究

武彩萍 李远发 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书介绍了黄河小北干流放淤试验工程模型试验的研究成果。即结合小北干流放淤试验工程设计,开展了放淤闸闸位选择和引沙效果试验、连伯滩放淤试验工程原设计方案和实施方案试验、连伯滩放淤试验工程 2004 年放淤复演试验、输沙渠弯道溢流堰分沙效果试验,并针对小北干流“淤粗排细”关键技术问题,对“淤粗”“排细”粒径及其淤积比和排沙比、连伯滩放淤试验工程“淤粗排细”调度运用、小北干流“淤粗排细”放淤对下游河道的减淤作用等问题开展了研究。

本书可供从事河道整治、水文泥沙研究、河工模型试验等工作的科技人员及高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河小北干流放淤模型试验研究 / 武彩萍, 李远
发著. — 郑州: 黄河水利出版社, 2007.10
ISBN 978-7-80734-297-7

I. 黄… II. ①武… ②李… III. 黄河—放淤—水
工模型试验—研究 IV. TV882.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 150094 号

组稿编辑:王路平 电话: 0371-66022212 E-mail:wlp@yrcp.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 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: hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本: 787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张: 10

字数: 230 千字

印数: 1—1 000

版次: 2007 年 10 月第 1 版

印次: 2007 年 10 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-80734-297-7/TV · 526

定价: 28.00 元

前 言

黄河小北干流指黄河中游禹门口至潼关河段，简称禹潼河段。小北干流河道全长 132.5 km，河道总面积约 1 100 km²，滩地面积 682 km²。滩地中，耕地约 4.5 万 hm²，沼泽、沙荒地约 2.2 万 hm²。滩区人口约 8 万人，20 世纪 70 年代治黄规划中，小北干流大放淤曾作为黄河下游河道减淤措施进行过研究，规划放淤面积 530 km²，淤沙库容 80 亿 m³，放淤量 112 亿 t，38 年内可使下游减淤 53 亿 t。

国务院批准的《黄河近期重点治理开发规划》中，明确提出处理和利用黄河泥沙的基本思路是：拦、排、放、调、挖、控综合治理。黄河泥沙多，特别是粗泥沙淤积是造成黄河下游“悬河”的主要原因，为了遏制“悬河”的急剧发展和增大下游河道的输水输沙能力，黄河水利委员会(以下简称黄委)领导在长期研究和充分准备的基础上，于 2002 年 7 月 4~15 日，首次进行了调水调沙试验，经过 3 年连续调水调沙，实现了黄河下游全河段的冲刷，将 2.0 亿 t 泥沙输送入海，河槽过水能力提高到 3 000 m³/s，2005 年正式转入生产应用。2003 年黄委领导又对小北干流放淤重大战略进行了布置，修建了小北干流连伯滩放淤试验工程，探索“淤粗排细”的放淤效果。2004 年 7 月 26 日~8 月 26 日进行了 6 轮原型放淤试验，通过精心调度运用，在实现“淤粗排细”放淤目标方面取得很好的经验。

为探索研究小北干流“淤粗排细”的放淤目标，我们结合小北干流连伯滩放淤试验工程设计，进行了系统实体模型试验研究。淤区实体模型试验研究内容包括：放淤闸闸位选择和引沙效果试验研究、连伯滩放淤试验工程原设计方案和实施方案试验研究、连伯滩放淤试验工程 2004 年放淤复演试验研究、输沙渠弯道溢流堰分沙效果试验研究、“淤粗”“排细”粒径及其淤积比和排沙比研究、连伯滩放淤试验工程“淤粗排细”调度运用研究、小北干流“淤粗排细”放淤对下游河道的减淤作用分析等内容。

为了加强黄河小北干流放淤试验研究工作的组织和管理，黄河水利科学研究院成立了“黄河小北干流放淤试验工程”项目组 and 专家组。项目组负责人有时明立、姜乃迁。参加实体模型专题项目组的主要人员有：武彩萍、李远发、林秀芝、勾兆莉、王德昌、陈俊杰、宋莉萱、郭慧敏、吴国英、朱超等。

黄河小北干流连伯滩放淤试验工程“淤粗排细”试验研究涉及研究内容很多，实践经验相对较少，本书的试验研究成果仅是初步成果，还有待于在小北干流新民滩放淤试验工程试验研究中进一步完善和提高。由于作者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者指正。

作 者

2007 年 4 月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 任务缘由及试验工程的必要性	(1)
第二节 连伯滩放淤试验工程概况	(1)
第二章 放淤闸闸位选择及引沙效果试验研究	(4)
第一节 概化模型设计及预备试验	(4)
第二节 概化模型河道水流泥沙运动特征	(7)
第三节 放淤闸闸前水流泥沙运动特征	(12)
第四节 放淤闸引沙效果试验研究	(17)
第五节 连伯滩放淤闸闸位选择和大河来水来沙条件对引沙效果影响分析	(28)
第三章 连伯滩放淤试验工程原设计方案试验研究	(33)
第一节 原设计方案工程概况	(33)
第二节 模型设计及预备试验	(33)
第三节 原设计方案试验成果	(41)
第四节 试验成果与十八户放淤原型观测资料对比分析	(54)
第五节 结 语	(61)
第四章 连伯滩放淤试验工程实施方案试验研究	(62)
第一节 实施方案工程概况及模型平面布置	(62)
第二节 实施方案预报试验水沙条件及试验概况	(63)
第三节 实施方案试验成果	(65)
第四节 结语和建议	(82)
第五章 连伯滩放淤试验工程 2004 年放淤复演试验研究	(85)
第一节 原型放淤及模型设计情况	(85)
第二节 引水引沙条件及溢流堰、横格堤口门和退水闸控制	(86)
第三节 输沙渠冲淤变化验证	(87)
第四节 弯道溢流堰分流分沙效果验证	(91)
第五节 放淤过程淤区水沙要素变化验证	(94)
第六节 淤区“淤粗排细”放淤效果验证	(101)
第七节 与实施方案预报试验放淤效果对比	(108)
第八节 复演试验验证结果分析及评价	(109)
第六章 弯道溢流堰分沙效果试验研究	(110)
第一节 模型设计概述	(110)
第二节 弯道水流运动特征	(111)
第三节 弯道悬沙运动特征	(115)

第四节	弯道溢流堰分沙效果	(124)
第五节	结语和讨论	(129)
第七章	小北干流放淤工程淤粗排细粒径及其淤积比和排沙比研究	(131)
第一节	黄河洪水泥沙组成及运动特征	(131)
第二节	黄河下游河道冲淤规律及其粗细泥沙的输移和调整	(132)
第三节	黄河小北干流放淤工程淤粗排细粒径及其淤积比和排沙比讨论	(134)
第八章	黄河小北干流放淤试验工程淤区运用调度指标研究	(144)
第一节	小北干流放淤试验工程 2004 年淤区运用调度概况	(144)
第二节	连伯滩放淤试验工程 2004 年淤粗排细效果和淤区水量损失分析	(145)
第三节	淤区运用调度基本参数指标	(147)
第九章	小北干流放淤对下游河道冲淤影响分析及减淤效果粗估	(150)
第一节	黄河粗细泥沙对小浪底水库及下游河道冲淤影响分析	(150)
第二节	小北干流“淤粗排细”放淤效果对下游河道减淤效果粗估	(151)
参考文献		(154)

第一章 绪 论

第一节 任务缘由及试验工程的必要性

泥沙问题是黄河治理的症结所在,我国水利工作者总结多年的治黄实践,提出了处理和利用泥沙的基本方针:“拦、排、放、调、挖”综合治理。其中,水土保持及中游骨干工程“拦”沙已取得成效;下游河道一直在“排”沙入海;近年来实施了“挖”河固堤工程;2002年又有计划、有目的和有组织地成功开展了黄河首次调水调沙试验,2003年和2004年分别进行了第2次和第3次调水调沙科学试验,2005年开始投入生产运行;“放”主要是在黄河中下游两岸利用有利地形进行引洪放淤,处理和利用一部分泥沙。从自然条件看,小北干流很多滩地具备无坝自流引洪放淤条件;从目前社会经济条件看,该区人口密度相对较小,经济发展相对滞后,占压处理相对容易。黄河小北干流河段实施有控制的“淤粗排细”放淤,一方面可有效地拦减粗泥沙,减少小浪底水库入库泥沙,延长小浪底水库的使用寿命,还可以有效减轻下游河道淤积;另一方面细泥沙排回黄河,不仅有利于小浪底水库异重流的形成和异重流排沙,而且有利于下游河道粗泥沙的输送。因此,利用小北干流的自然地理条件实施大规模放淤是黄河泥沙处理的一项重要举措,也是一项复杂的系统工程,在开展小北干流大规模放淤之前,进行小规模放淤试验是非常必要的。经水利部批准,黄河水利委员会(以后简称黄委)于2004年在小北干流连伯滩开展放淤试验工作。黄河小北干流放淤试验的目标是“淤粗排细”,要实现这一目标,需对小北干流来水来沙条件、河势变化、引水条件、引水时机等问题进行研究;而淤区平面布置型式和运用方式等诸多因素,又是小北干流放淤的关键问题,也必须对其进行研究。因此,开展该项研究不仅可以为放淤试验工程设计和工程运用提供科学依据,确保放淤试验达到预期的目的,同时也可以为以后大规模放淤提供技术支撑。

为配合2004年汛期黄河小北干流放淤试验,并及时为淤区淤粗排细、工程运用方式等关键问题提供技术支撑,按照黄委领导的意见,我们先后承担了黄河小北干流放淤试验工程放淤闸引沙效果试验、小北干流放淤试验工程淤区实体模型预报试验、小北干流放淤试验工程淤区实体模型复演试验及弯道溢流堰分沙效果试验等研究项目。

第二节 连伯滩放淤试验工程概况

黄河小北干流指黄河中游禹门口至潼关河段(简称禹潼河段),为晋、陕两省的天然界河,左岸为山西省运城地区所属河津、万荣、临猗、永济、芮城5县(市),右岸为陕西省渭南市所属韩城、合阳、大荔、潼关4县(市)。黄河小北干流河道长132.5 km,河出禹门口后,由宽0.1 km左右的峡谷河槽骤然展宽为3~18 km宽的河漫滩,自北向南流

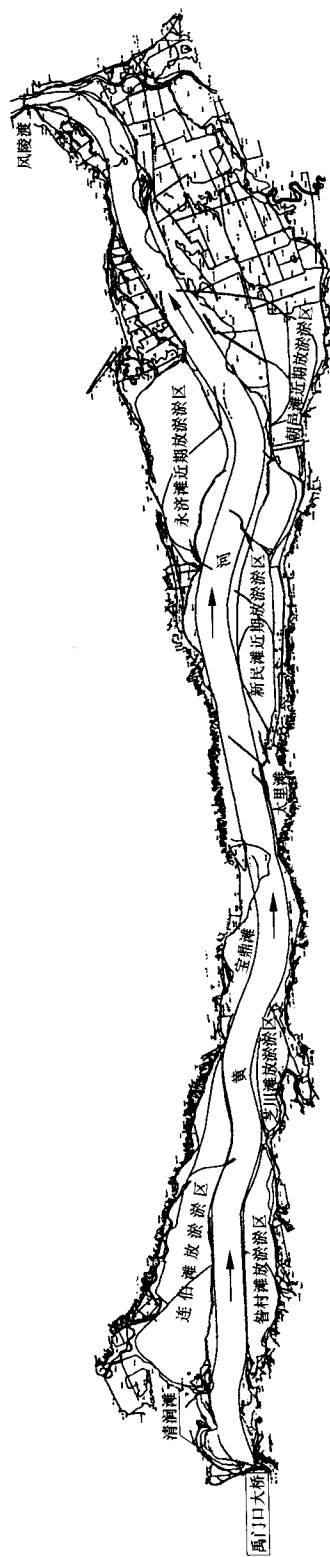


图 1-1 黄河小北干流河段放淤滩区位置

向潼关。河床纵比降一般为 $3\text{‰}\sim 6\text{‰}$ ，上陡下缓，平面形态呈哑铃状。河道总面积约 $1\,100\text{ km}^2$ ，其中滩区面积 682 km^2 ，由左岸的清涧、连伯、宝鼎、永济 4 个滩区和右岸的咎村、芝川、太里、新民、朝邑 5 个滩区组成，如图 1-1 所示。其中大于 60 km^2 的滩区有 4 个，分别是左岸的连伯、永济滩区和右岸的新民、朝邑滩区，这 4 个滩区的总面积为 616.9 km^2 ，占滩区总面积的 90%，两岸为高出河床 50~200 m 的黄土台塬。在滩地中，耕地约有 4.5 万 hm^2 ，沼泽、沙荒地约有 2.2 万 hm^2 ，是黄河中游最大的滞洪滞沙区之一，对洪水泥沙起较大的调节作用。滩区人口约为 8 万人，平均人口密度约 117 人/ km^2 。从自然条件看，很多滩地具备无坝自流引洪放淤条件，若采取有坝放淤，效果更好；从目前社会经济条件看，滩区人口密度相对较小，经济发展相对滞后，占压处理相对容易。

按照大河水位、滩区地形、社会经济情况等指标分析，小北干流具备自流放淤条件的滩区有 7 个，分别为清涧、连伯、永济、咎村、芝川、新民、朝邑。放淤面积约 318.7 km^2 ，估计堆沙总量为 7.46 亿 m^3 ，其中连伯、永济、新民与朝邑 4 个滩区近期放淤量均超过 1 亿 m^3 ，总计可达 7.19 亿 m^3 ，约占总放淤量的 96%。通过选定的试验淤区综合比较看，连伯滩试验淤区具有社会经济影响小、引水口靠流条件好、与放淤规划总体布局易于结合、可利用汾河围堤作为临河围堤节省工程量等优点，因此选择连伯滩滩区作为放淤试验的滩区。试验工程选择在临河东侧第一条淤区，位于黄淤 65 至黄淤 67 之间，连伯滩放淤试验工程主要包括放淤闸、输沙渠、淤区、退水闸等。

放淤闸位于左岸小石嘴工程 1# 坝附近，介于黄淤 67 至黄淤 68 断面之间，进水顺畅，放淤闸纵轴线与黄河主流方向形成的引水角约为 40° ，闸室总净宽为 24 m，总宽度 29.6 m。输沙渠长为 2.5 km，沿汾河口工程(上段)背河侧布置，利用现状工程作为输沙渠的右侧渠堤。淤区长为 8.6 km，平均宽 0.64 km，淤区面积约 5.5 km^2 ，由临河汾河口工程、背河围堤等组成，淤区分成 2 条渠；围堤长 9.4 km，进口段围堤呈喇叭口状布置。退水闸闸室总净宽 25 m，建在淤区末端的汾河口工程处，淤区退水经滩区排回黄河。

第二章 放淤闸闸位选择及引沙效果试验研究

第一节 概化模型设计及预备试验

为配合黄河小北干流放淤试验工程规划设计,我们进行了放淤闸引沙效果试验研究。众所周知,以往的灌溉引水口设计总是希望引出的水流含沙量要小,以减少输水渠道淤积。现在,随着引水目的的不同,则希望引出的水流有较高的含沙量和较粗粒径,这在已有的设计和研究中是不多见的,因此在设计中可能会遇到一些新的问题。通过物理模型试验对放淤闸位置、引水角度(引水渠轴线与河道主流的交角)、大河单宽流量、引水单宽流量比、悬沙粒径和含沙量对引沙效果的影响进行试验研究,其目的是使引出的水流具有较高的含沙量和较粗的泥沙粒径,以增加放淤的效果,为放淤闸工程设计提供科学的试验依据。

一、模型设计概况

引洪放淤闸引水流量与大河流量差别很大,放淤闸模型试验不可能在小比尺的河道整体模型上进行,一般做成大比尺的局部河宽模型,保证模型大河单宽流量与原型大河单宽流量相似,即保证所取局部河宽范围内,模型与原型水深和流速相似。

概化弯道水槽模型采用直线段(过渡河段)+弯道段+直线段(过渡河段)的布置形式。概化模型采用 2 m 宽的矩形河槽,进口直线段长 10 m,参照小北干流历年河势,弯道中心角选定 60° ,出口直线段长 4 m,总河段长 21.4 m。模型共设置 9 个放淤闸,即进口直线段设 3 个,弯道段设 6 个,弯道夹角 15° 、 30° 、 45° 及 60° 处凹岸各设一个;弯道夹角 15° 及 60° 处凸岸各设一个。放淤闸体型及尺寸参照放淤闸设计,净宽选定为 0.3 m。 $1^\circ\sim 7^\circ$ 放淤闸引水角度选定为 60° ,为了比较引水角对引沙效果的影响,在直线段上设 8° 、 9° 放淤闸,引水角分别为 30° 和 90° 。模型布置见图 2-1。

二、模型设计相似条件及比尺的选择

为了使概化水槽模型与原型水流、泥沙主要要素有一定的可比性,概化水槽模型仍按黄河悬沙动床模型相似律设计,模型主要满足水流重力相似、阻力相似、泥沙运动相似、悬沙悬移相似。考虑到放淤闸闸前水流结构复杂,水流紊动较大,保持悬沙沉速与垂线脉动流速比值相似;考虑到浑水采样和试验观测精度要求,模型水深不能太小,经多方案比较,模型概化成垂直比尺较大的局部河宽模型,保证概化模型的单宽流量与原型相似。概化模型选定的各项比尺如表 2-1 所示。

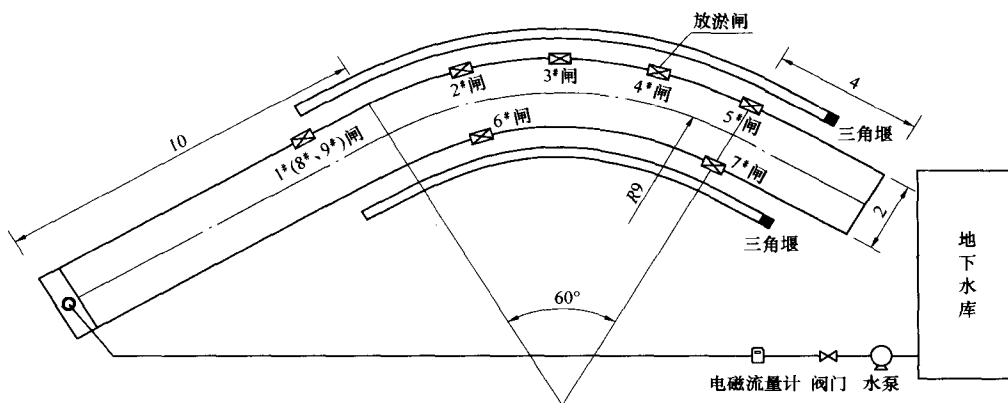


图 2-1 小北干流放淤闸闸位选择及引沙效果概化模型布置图 (单位: m)

表 2-1 模型比尺汇总表

比尺名称	比尺数值	说 明
平面比尺 λ_L	100	根据场地条件和供水系统确定
垂直比尺 λ_H	20	考虑观测精度
流速比尺 λ_v	4.47	$\lambda_v = \lambda_H^{0.5}$
单宽流量比尺 λ_q	89.44	$\lambda_q = \lambda_H \lambda_v$
糙率比尺 λ_n	0.737	$\lambda_n = \frac{\lambda_H^{2/3}}{\lambda_v} \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^{0.5}$
悬沙沉速比尺 λ_ω	2.00	$\lambda_\omega = \lambda_v \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^{0.5}$
悬沙粒径比尺 λ_d	1.03	$\lambda_d = \left(\frac{\lambda_\omega \lambda_v}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \right)^{0.5}$
含沙量比尺 λ_s	2.0	参照以往河工模型试验

由龙门水文站实测资料统计, 1962~1984 年汛期悬沙多年平均中值粒径 $d_{50} \approx 0.033 \text{ mm}$ 。试验选用郑州热电厂粉煤灰为模型沙, 为了对比悬沙粒径粗细对引沙效果的影响, 模型选取了粗沙、细沙和粗细混合沙 3 种级配。粗沙中值粒径 $d_{50} = 0.037 \text{ mm}$, 细沙中值粒径 $d_{50} = 0.023 \text{ mm}$, 混合沙中值粒径 $d_{50} = 0.031 \text{ mm}$ 。

三、概化模型预备试验

为了使概化模型实测水流和泥沙要素能与原型水流和泥沙要素相似，我们首先需要对小北干流 132.5 km 河段的河道水力几何要素进行概化。

根据小北干流河段河槽断面形态、河道水力特征和龙门站资料，参照黄河下游花园口游荡性河段冲淤平衡条件下水力几何要素，小北干流河段冲淤平衡条件下水力几何要素可概化为如下关系：

$$v = 0.18Q^{0.32} \tag{2-1}$$

$$B = 34.5Q^{0.42} \tag{2-2}$$

$$H = 0.16Q^{0.26} \tag{2-3}$$

由上述关系可得到：

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = 36.7Q^{-0.05} \tag{2-4}$$

$$q = 0.029Q^{0.58} \tag{2-5}$$

通过模型预备试验量测得模型糙率为 0.016，满足原型糙率 0.012 的要求。

大河各级单宽流量试验实测沿程水面线如图 2-2 所示，概化模型与原型水力要素见表 2-2。

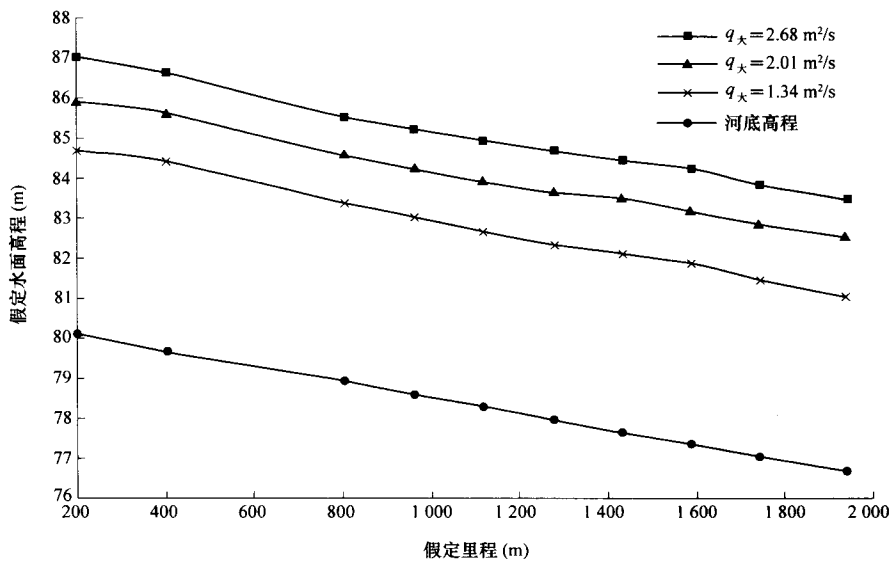


图 2-2 不同大河单宽流量模型实测水面线

表 2-2 概化模型与原型主要水力要素

水力要素名称	大河单宽流量(m ² /s)	平均水深(m)	平均流速(m/s)	比降	糙率
试验值	1.34	0.91	1.62	0.000 4	0.012
	2.01	1.16	1.96		
	2.68	1.36	2.08		
原型值	1.34	0.91	1.53	0.000 4	0.012
	2.01	1.09	1.91		
	2.68	1.21	2.17		

从图 2-2 中可以看出, 概化模型河段具有较好的二元均匀流流动特征, 这对正式试验研究不同闸位引沙效果试验提供了相同大河水流条件可比基础。从表 2-2 所示的概化模型与原型主要水力几何要素的对比结果中可以看出: 概化模型与原型基本相似, 概化模型试验成果可以按表 2-1 所示的比尺数值换算到原型。

第二节 概化模型河道水流泥沙运动特征

一、概化模型河道水流运动特征

模型水流进入进口直线河段后, 水流质点基本作平行的直线运动。水流从直河段进入弯道河段后, 行进水流受到岸边约束, 水流流向发生变化, 随流线弯曲, 并伴随产生离心力, 如图 2-3 所示。在离心力作用下, 河道凹岸水位升高, 形成横向比降。横比降的产生, 对垂线上单位面积的水体产生侧压力差, 根据静水力学原理, 这一压力差沿垂线呈均匀分布, 方向指向凸岸。水流纵向垂线流速一般按对数规律分布, 从水面到河底逐渐减小为零, 不同水深水流质点纵向流速 v 不同, 所产生离心力 $F_R = \rho v^2 / R$ 也不同, 侧压力差和离心力形成的合力, 上部方向指向凹岸, 下部方向指向凸岸。在这一横向环流与纵向流速作用下, 弯道中形成了水平轴螺旋流流动。弯道中的这种螺旋水流, 使水中的泥沙也作横向运动。人们利用这种螺旋流运动特征, 一般将灌溉引水闸布设在弯道凹岸, 以减少入渠泥沙。这种螺旋流同样对引洪放淤闸的引沙效果有一定的影响。

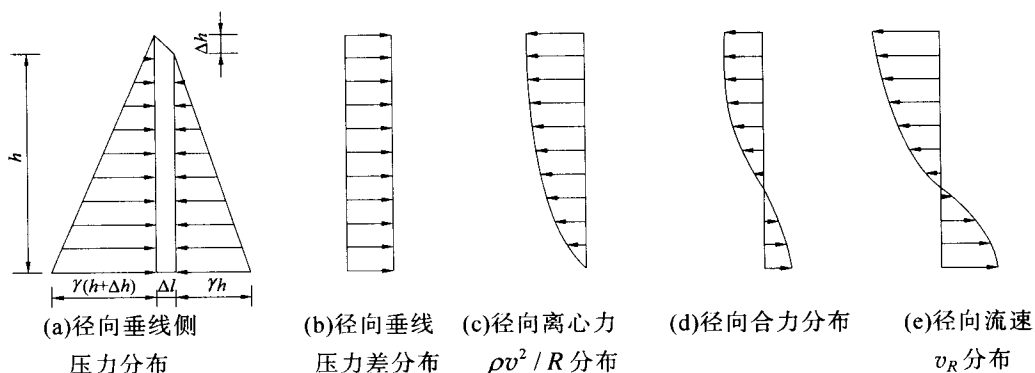


图 2-3 弯道水流单位水体受力分布和流速分布图

(一)概化模型表面流向和底部流向

预备试验观测结果表明，概化模型断面平均水深沿纵向分布基本相同，概化模型水流呈均匀流流态，这就为不同河段不同闸位的引沙效果提供了可比的基础。

为了便于观测分析概化模型河段的水流泥沙运动特征，在清水定床情况下，观测了概化模型河段的底部流线和表面流线(见图 2-4)，从图中可以清楚地看出，在直线河段底部流线和表面流线基本重合，各流线作平行直线运动。水流进入弯道河段后，在螺旋流作用下，弯道起始断面同一垂线的底部流线和表面流线呈逆向运动，底部流线偏向凸岸，表层流线偏向凹岸，从图上对比看出，大河单宽流量越大，流速越大，离心力也越大，螺旋流强度也越大，底部和表面流线的逆向偏离也越大。

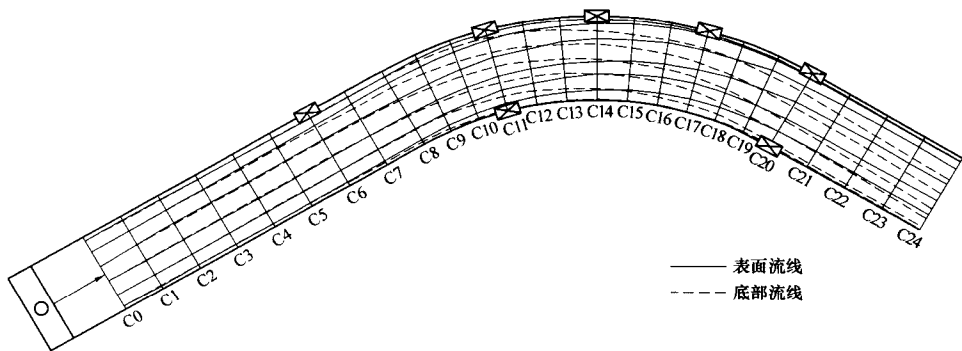


图 2-4 概化模型表面和底部流线图

(二)概化模型流速横向分布

放淤闸不引水时，在清水定床情况下，试验观测了大河单宽流量分别为 $1.34 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $2.01 \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $2.68 \text{ m}^2/\text{s}$ 时概化模型底部和表面的流速分布。图 2-5 选绘了当大河单宽流量

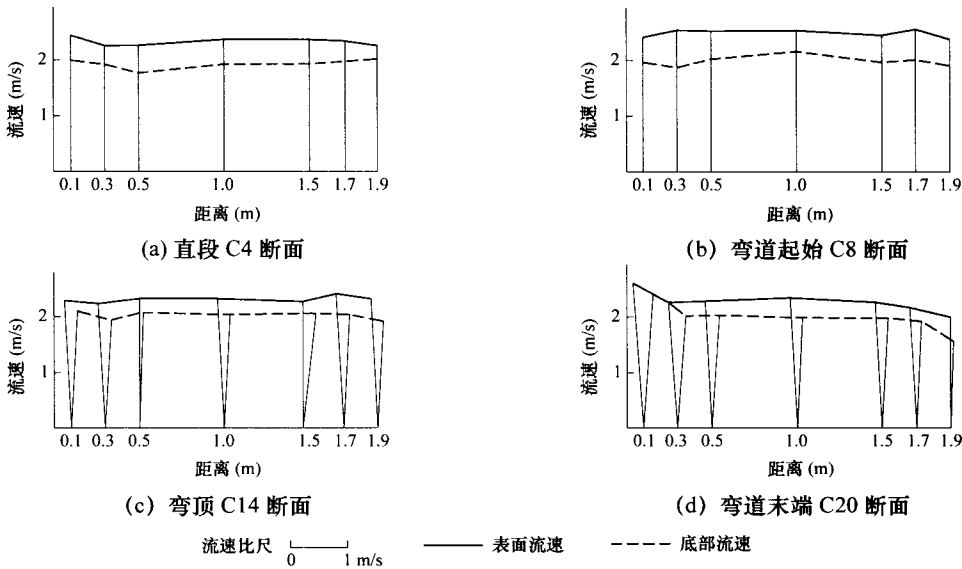


图 2-5 大河单宽流量 $q_{\text{大}} = 2.68 \text{ m}^2/\text{s}$ 概化模型典型断面流速分布图

为 $2.68 \text{ m}^2/\text{s}$ 时，不同河段典型断面底部流速和表面流速的横向分布。图 2-6 为垂线平均流速平面分布图。由此二图中可以看出，水流在入弯前的顺直河段上，垂线平均流速沿河宽对称分布，入弯后由于水流结构变化，在弯顶前凸岸流速稍增，而凹岸流速稍减，过了弯顶，至某一位置后，又出现了相反的调整。

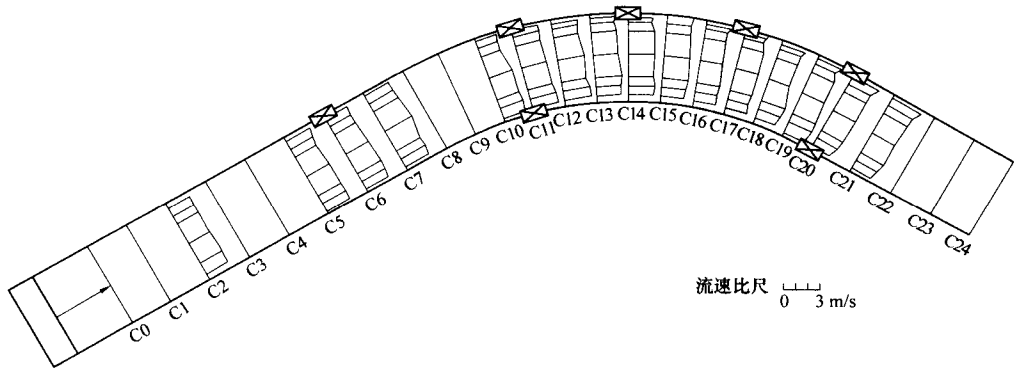
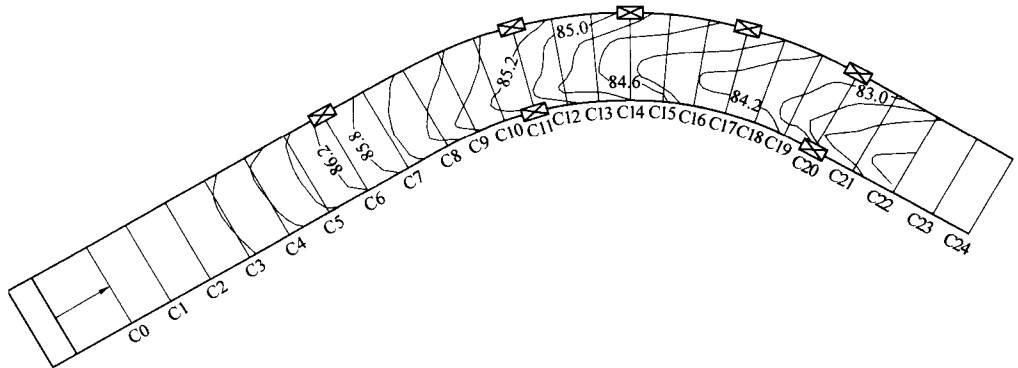


图 2-6 大河单宽流量 $q_{\text{大}}=2.68 \text{ m}^2/\text{s}$ 概化模型垂线平均流速平面分布图

(三)概化模型河段沿程水面高程线

在直线河段河道水流为直线均匀流流动，水流结构中，副流不明显，沿程水面高程线基本平行，等高线间距相等。水流进入弯道河段后，弯道水流在离心力作用下，产生横比降，弯道河段的水面等高线不再保持平行和等距的特点，图 2-7 绘出了单宽流量为 $2.68 \text{ m}^2/\text{s}$ 的沿程水面等高线图。从图中看出，水流由直线河段进入弯道后，弯道上段横向比降不明显，弯道下段又受下游直线河段影响，横向比降又逐渐减小，最大横向比降出现在弯道中段弯顶稍下一点位置。由于受边界条件影响，岸边流速减小，根据能量守恒定律，势能增加，岸边水位高于河道中部，在弯顶河段，槽中线偏凸岸的部位，出现一个凹槽，大河单宽流量越大，上述水面等高线特点越明显。



概化模型实测底部和表面流线、流速平面和横向分布、沿程水面等高线试验成果表明，概化模型能够较好地反映原型河道的水流运动特征。

二、概化模型河道泥沙运动特征

水中泥沙被水流紊动结构中的不同尺度漩涡挟带，悬浮在水中，泥沙纵向运动速度与水流纵向流速基本一致。由于泥沙比重比水要大，在悬浮纵向运动过程中，泥沙向下沉降，有向河底集中的趋势，使得含沙量在垂线上分布不均。悬沙颗粒越粗，含沙量在垂线上分布的不均匀性越明显。但是在含沙水流中，表层和底层泥沙的运动轨迹基本与水流运动轨迹是一致的，从河底沙浪运动方向可明显表现出来。在直线河段，如不考虑泥沙在垂线上的紊动，表层和底层泥沙也可视为作直线平行运动。在含沙水流进入弯道后，在弯道螺旋流作用下，表层泥沙逐渐向凹岸运动，底层泥沙逐渐向凸岸运动，这必然对不同闸位的引沙效果产生影响。

概化模型表层(相对水深为 0.9)和底层(相对水深为 0.1)含沙量沿程横向变化如图 2-8(a) ~ (c) 所示，悬沙中值粒径变化如表 2-3 所示。

表 2-3 概化模型河段悬沙中值粒径沿程变化

大河 单宽 流量 (m ² /s)	大河 含沙量 (kg/m ³)	悬沙 粒 径 (mm)	取 样 位 置	进口直线河段 C4 断面 <i>d</i> ₅₀ (mm)		弯道末端 C19 断面 <i>d</i> ₅₀ (mm)	
				起点距 10 m 和 50 m 两处	起点距 150 m 和 190 m 两处	起点距 10 m 和 50 m 两处 (凹岸)	起点距 150 m 和 190 m 两处 (凸岸)
2.01	100	0.037	底部	0.032	0.029	0.030	0.037
			表面	0.023	0.021	0.025	0.027
2.01	100	0.023	底部	—	0.019	0.020	0.024
			表面	0.023	0.018	0.014	0.014

从图 2-8(a)~(c)中可以看出，悬沙中值粒径 0.037 mm，大河含沙量 120 kg/m³ 时，在模型进口直线河段 C4 断面，表层和底层含沙量横向分布比较均匀，底部和表面含沙量比值在 1.12 左右变化，含沙量在垂线上的分布上小下大的趋势相对比较明显。含沙水流进入弯道后，在弯道螺旋流作用下，表层泥沙向凹岸运动，底层泥沙向凸岸运动，含沙水流沿程运动过程中，凹岸含沙量有减小趋势，凸岸含沙量有增大趋势。悬沙中值粒径 0.023 mm 情况下，大河含沙量 200 kg/m³ 时，在模型进口直线河段 C4 断面，底部和表面含沙量变化不大，其比值在 1.03 左右变化，含沙量在垂线上分布趋于均匀，含沙水流进入弯道后，含沙量在横向上的分布也没有明显区别。大河含沙量 400 kg/m³ 时，C4 断面底部和表面含沙量比值略大于 1.0，含沙量在垂线上的分布和进入弯道后的横向分布更趋均匀。在大河悬沙粒径较细情况下，含沙量增大到 400 kg/m³ 后，含沙水流已进入高含沙水流范畴，流变特性发生变化，高含沙浑水可视为均质流体，底部和表面含沙量没有明显区别。