

弯曲河道动力学

CURVED CHANNEL DYNAMICS

王平义 著



成都科技大学出版社



TV147
W104

弯曲河道动力学

王平义 著



0296850

成都科技大学出版社

625785

(川)新登字 015 号

责任编辑:王宗年

封面设计:光 光

版式设计:徐丹红

弯曲河道动力学

王平义 著

成都科技大学出版社出版发行

西南冶金地质印刷厂印刷

开本:787×1092

1/32

印张:9.25

1995 年 12 月 第 1 版

1995 年 12 月 第 1 次印刷

印数:1—1000 册

字数: 210 千字:

ISBN7-5616-3195-2/TU·34

定价: 9.80 元

625785



内 容 提 要

本书系根据弯曲河道动力学方面的研究成果撰写而成。书中对弯曲河道动力学的基本理论和方法及研究成果作了较全面系统地介绍,其中包括:总论、河流力学基础、弯道三维水流流速计算模型、弯道环流及其分析、弯道水流的动力特征、弯道泥沙运动、河湾演变及数值模拟、工程应用等。本书内容新颖、广泛,可供从事水利、航运、港口、取水及桥梁等工程的广大规划、设计和科研人员以及高等院校师生使用。

序

天然河流几乎都是弯曲的。弯曲河道水流泥沙运动特性及演变规律是河流治理、航道整治、港口兴建、取水防沙、桥墩防冲等工程规划设计的科学依据。迄今各国学者根据不同研究目的已做了许多研究工作,发表了不少有关这方面的论文和研究报告,但专门论述这一研究领域,内容比较系统全面,又能反映最新成就和水平的专著或教科书,尚属少见。王平义同志近期以来,应用流体力学、泥沙运动力学、河床演变学、地质地貌学和计算数学等多种学科的理论和方法,以理论、实验和计算相结合方法,对弯曲河道水沙运动特性及演变规律进行了较系统的研究,取得了一系列有较高理论水平和应用价值的研究成果。因鉴于教学和科研需要,王平义同志将其研究成果进行系统整理,撰写成现在出版的《弯曲河道动力学》一书。

该书在第1章总论中分野外工作、实验工作、理论分析和数值模拟等四个方面对前人研究成果作一简要回顾。第2章编写了要认识弯曲河道水沙运动及河床演变规律必需了解的基础知识。从第3章到第7章介绍弯曲河道动力学的主要内容,一章一个专题,对每一专题,在分析讨论前人研究成果的基础上,结合作者研究成果,比较全面系统地介绍了弯曲河道动力学的基本理论和方法。最后第8章介绍工程应用的几个实例。

本书的主要特点是:立论有据,内容新颖,叙述系统全面,

既是一本反映最新成就和水平的专著,又是一本很好的教科书。可供从事有关专业工程技术人员设计和科研时参考,也可作为高等学校有关专业师生教学用教材。

王平义同志曾在成都科技大学获得水力学及河流动力学专业博士学位,他是一位杰出的青年科技工作者,我相信在今后将会作出更大贡献。

吴持恭

1995年10月于成都

前 言

自然界中的河流几乎都是弯曲的。弯曲型河流的运动演变规律对防洪、航运、港口、取水及桥梁等工程的规划设计和正常运行有着重要影响,因此,对其水流运动、泥沙输移及演变规律等进行全面系统的研究是十分必要的。

自 1876 年 Thompson 从弯道水槽实验中发现螺旋流以来,国内外学者根据不同的研究目的,对弯曲河道水流泥沙运动特性及演变规律做了大量的研究工作。所取得的研究成果多散见于期刊、论文集和研究报告之中,并没有专门的教科书。1994 年,作者为了教学和科研的需要,撰写了《弯道水沙运动力学》(讲义),首次探索将弯曲河道动力学作为一门学科。经一年多来不断补充、修改和完善,即成现在出版的《弯曲河道动力学》一书。

全书共分八章,依次为总论、河流力学基础、弯道三维水流流速计算模型、弯道环流及其分析、弯道水流的动力特征、弯道泥沙运动、河湾演变及数值模拟、工程应用等。比较全面系统地介绍了弯曲河道动力学领域的基本理论和方法以及研究成果,尤其是作者近年来所取得的一系列关于弯曲河道动力学方面的研究成果(其中大部分内容已在国内外学术会议和有关刊物上发表过)。

四川联合大学(四川大学,成都科技大学)吴持恭教授和重庆交通学院的领导热情关心和鼓励本书的写作。有些研究成果曾得到四川联合大学吴持恭教授、陈远信教授、方铎教授

和蔡金德研究员及重庆交通学院赵世强研究员的指导。在出版之际,吴持恭教授于百忙之中审阅本书并欣然作序。此外,西南水运工程科学研究所李晓玲同志帮助搜集整理了部分资料并做了描图和植字工作。在此向他们谨致谢意。

限于作者水平,书中错误和缺点在所难免,诚恳希望读者批评指正。

作者

1995年10月于重庆

目 录

序

前 言

第1章 总论	(1)
1.1 野外工作	(2)
1.2 实验工作	(4)
1.3 理论分析	(7)
1.4 数值模拟	(10)
参考文献	(11)
第2章 河流力学基础	(18)
2.1 河道的水流特性	(18)
2.2 河流泥沙特性及运动	(35)
2.3 河型的分类	(57)
2.4 河弯基本概念	(58)
参考文献	(61)
第3章 弯道三维水流流速计算模型	(65)
3.1 引言	(65)
3.2 纵向流速分布规律的研究	(71)
3.3 常用假设及讨论	(76)
3.4 边界条件	(82)
3.5 三维水流模型的建立	(86)
3.6 摄动法在模型求解中的应用	(99)
参考文献	(109)

第4章 弯道环流及其分析	(113)
4.1 弯道环流理论	(113)
4.2 弯道水流的分离	(119)
4.3 影响弯道环流的因素	(122)
4.4 环流强度及其沿程分布	(126)
4.5 凹岸冲刷的环流分析	(133)
参考文献	(141)
第5章 弯道水流的动力特征	(144)
5.1 横向压力分布规律	(144)
5.2 纵向垂线平均流速的平面分布	(150)
5.3 弯道自由面形状	(164)
5.4 弯道边界剪切力分布	(169)
5.5 弯道中的能量损失	(178)
5.6 弯道水流的紊动特性	(181)
参考文献	(187)
第6章 弯道泥沙运动	(191)
6.1 弯道床面形态	(191)
6.2 弯道推移质输移	(200)
6.3 弯道中的悬移质运动	(220)
参考文献	(226)
第7章 河湾演变及数值模拟	(230)
7.1 弯道河床地貌的形成及规律	(230)
7.2 弯道横剖面的数值预报	(236)
7.3 河湾蠕动	(249)
7.4 河湾演变数学模型	(254)
参考文献	(264)

第8章 工程应用.....	(267)
8.1 港航工程	(267)
8.2 取水工程	(273)
8.3 三峡工程施工通航	(278)
参考文献.....	(285)

第 1 章 总 论

弯曲型河流不但具有迂回曲折的外形,还具有蜿蜒蠕动的动态特征。从总体来看,几乎所有的河流都呈现着弯曲的形态。河流在其整体的弯曲过程中,有的河段比较顺直,有些河段出现分汊。而每一分汊,也常常是弯曲的。我国海河流域的南运河,淮河流域的汝河、沙河和颍河下游,黄河流域的渭河下游,长江流域的汉江下游以及向有“九曲回肠”之称的长江下荆江河段等,都是典型的弯曲型河段。美国的密西西比河下游,也是世界有名的典型弯曲型河段。

弯曲型河流的运动演变规律,对防洪、航运、港口、取水以及桥梁等工程的规划设计和正常运行,有着重要的影响,对其特性、演变规律、形成条件等进行全面系统的研究是十分必要的。

自 1876 年 Thompson 从弯道水槽实验中发现螺旋流以来,国内外学者根据不同的研究目的,对弯曲河道水流泥沙运动特性及演变规律做了大量的研究分析工作。其中包括:野外观测分析、实验室水槽实验、理论分析和数学模拟。下面按年代顺序,对上述四个方面作一简要的回顾。由于有些研究者的工作涉及不同的几个方面,所以在不同的部分这些研究者的工作会重复提及。

1.1 野外工作

最早对弯道水流进行野外观测研究的,当推 Bule 等,他们于 1934 年发表了依阿华河(Iowa River)的观测结果^[1]。在八年的观测中,他们发现依阿华弯道仍保持它的形态,但向下游蠕动了 100 英尺。1935 年,Eakin 发表了密西西比河(Mississippi River)弯道水流观测的研究结果,他的侧重点是弯道水面超高问题^[2]。П. В. 鲍戈柳鲍娃(П. В. Богоянцова)和 О. В. 马卡里诺娃(О. В. Макаринова)在 1946 年研究了尤利亚——约基河(Р. Юзя-юки)上弯道水流的情况^[3]。在布置的六个观测断面上观测了沿水深各点的流速、流向,并绘成断面内横向流速分布图,发现在弯道中央四个断面内具有很明显的单向环流。前苏联乌克兰科学院水文及水工研究所,在 1951~1952 年间在斯诺夫河(Р. Снов)和迭斯纳河(Р. Десна)上进行了弯道水流的观测研究,发现在观测断面上均有横向环流产生^[3]。

1957~1964 年,我国荆江试验站对长江下荆江河段进行了较完整的弯道水流泥沙观测。对弯道水流动力轴线、水面纵横比降、横向环流、泥沙运动特性及弯道河床演变规律进行了研究^[4,5]。这些观测研究表明,在弯道内,水流动力轴线的变化具有“高水趋中,低水贴岸”和顶冲点“低水上移,高水下挫”的规律,使凹岸崩塌呈现出季节性的变化;由于主流线的弯曲,引起水面纵横比降的变化和流速场的重新调整,并在离心力和重力的作用下产生弯道环流和泥沙横向输移,由此导致含沙量特别是含沙量中的床沙质部分纵向、横向分布的特点。与

水流泥沙运动的特性相结合,弯道河床演变的基本规律是:凹岸不断崩塌,凸岸相应淤长,弯顶不断下移,弯曲半径减小。发展到一定阶段时,在特定的条件下,出现自然裁弯等。

1975年, Jackson 对瓦巴什河(Wabash River)做了野外观测。他所关心的是弯道水流的发展、上游床沙质的运动、最大流速轨迹、平均颗粒粒径沿程变化、平均沙垄高度和平均水深的变化路线。他得出弯道水流最大流速轨迹和平均沙垄高度、平均水深的沿程变化路线几乎是一致的,而且沿着近凹岸分布。最大平均颗粒粒径沿程变化路线起初是近凸岸,尔后则近凹岸^[7]。另外, Jackson 还对弯道中环流速度发展过程和床面形态特征的反应进行了系统的监测。Bridge 和 Jarvis 于 1976 年观测了苏格兰的南埃斯克河(River South Esk)一个弯段的水流和泥沙的演变。对水面线的实测结果表明,在各级水位下,最大比降出现的位置,是与由于横向环流的发生,使最大流速区由凸岸移向凹岸,从而产生的局部加速区有关^[8]。与 Bridge 和 Jarvis 的野外观测工作几乎同时的是 Hey 和 Thorne, 他们于 1975 年开始对英格兰的一些沙卵石河流的弯段进行观测,测得二维水流流速,由此推出纵向流速和横向流速的分布。上述观测还发现,在凹岸附近有一小的涡旋与主环流方向相反。这一小的涡旋当凹岸较陡时存在,较缓时消失^[9]。1978 年, Hickin 报导了加拿大斯夸米什(Squamish)河环流强度沿程变化的测验成果。说明横向环流的基本特点是在弯顶附近存在单一的环流,而在过渡段则存在两个大小不一的反向环流。受河弯平面外形的影响,一些断面产生较复杂的横向环流。河弯的曲率沿程减小,环流强度也沿程变弱^[10]。

Bathurst 于 1979 年对塞文(Seven)河和斯威尔(Swale)

河的边界剪切力进行了观测,说明弯道最大剪切力的位置和大小取决于横向环流与主流之间的相对强弱。在中等流量时,横向环流最强,最大剪切力区更靠近凹岸和弯顶,随着流量的增大,最大剪切力区向下游和河中央移动^[11]。Dietrich 于 1982 年搜集了穆迪溪(Muddy Creek)河弯的资料。在不同的流量下,观测了速度的大小和方向,推移质输沙率分布以及水面形状。说明推移质输沙率的分布主要受控于床面剪切力,最大输沙率与最大剪切力的位置基本上是一致的。另外,推移质最大粒径的位置也与最大剪切力的位置相一致^[12]。Leopold 于 1982 年根据在科罗拉多(Colorado)河等河道上所进行的环流结构的观测,指出推移质运动的主要区域在弯道位于凸岸边滩一侧^[13]。Rakoczi 在多瑙河支流拉巴(Raba)河的弯段对卵石推移质进行了测量,发现推移质在断面上的分布并不遍及整个河宽,而是往往集中成带,单宽推移质输沙率沿断面的分布很不均匀,靠近两岸几乎没有推移质,在中间部分有两个峰,较大的峰偏于凸岸^[14]。Thorne 和 Rais 于 1983 年对福尔(Fall)河的量测河段观测了环流结构、推移质输移和床面形态。说明床面形态,如沙纹、沙垄等受弯道螺旋流的影响沿程发生变化^[15]。

1.2 实验工作

相对于野外观测而言,国内外对弯道水沙运动特性的实验研究成果则是极其丰富的。

1936 年, Yamell 和 Woodward 对弯道水流做了大量的试验,研究了纵向流速分布和水面形状。他们揭示出弯道进口

条件对水流影响的重要性^[16]。1944年,Mockmore进行了连续弯道的试验研究,说明下一弯道水流受上一弯道剩余环流的影响^[17]。1951年,Werner通过河弯起因的实验研究,得出弯道中第一个弯段对第二个弯段及以后的弯段产生干扰作用。他肯定弯道中的环流明显的受到弯道进口处环流的作用^[19]。Einstein和Harder于1954年在矩形水槽中做了水流试验研究,以检验他们关于环流强度($\frac{r}{V_0} \frac{dV_0}{dr}$)数量级的分析研究。他们发现这一无量纲物理量在弯道水流中将大于4^[20]。与弯道水流有关的一个著名的名字是Rozovskii。他于1957年对弯道水流特性做了众多的实验研究,其中包括二维流速的量测,且对弯道水流做了卓越的理论分析工作^[3]。

Ippen和Drinker于1962年在光滑梯形水槽中做了一系列试验。他们一改以往的研究者用矩形水槽做弯道试验的状况。在存在次生流的条件下,他们确定了流量和弯道形态特征对剪切力的作用。他们的结果表明弯道边界剪切力随水流条件和弯道形态而变化。但是,剪切力的分布和相对大小主要是水流形态的函数。他们的研究中存在的不足之处是仅考虑一维的情况^[21]。Yen于1965年通过实验取得了重要的水流资料,研究了弯曲河道边界切力分布、水面超高、螺旋运动的生长与消失。他认为佛汝德数、宽深比对次生流有重要影响^[22]。Toebe和Sooky于1967年对两个弯段之间过渡段的问题进行了水槽试验。他们认为下一弯段的水流将受上一弯段剩余环流的影响^[23]。Hooke于1975年对弯道输沙率和剪切力分布进行了试验。他认为目前过分强调了环流对于泥沙横向转移的作用。他根据弯道试验中剪切力的分布情况与泥沙运动

情况,认为虽然横向环流对弯道剪切力的分布有一定影响,并使得冲刷能力较强的表层水流沿凹岸折向河底,但对于凸岸边滩的形成起决定作用的不是横向环流,而是泥沙运动的横向和纵向分布^[24]。

1978年,Zimmerman 和 Kennedy 出于建立弯道横向床面坡度表达式的目的,在弯道中心角近似为 2π 弧度的循环水槽中做了一系列的输沙试验。用石英砂(直径为 0.21mm 和 0.55mm)作模型沙,他们进行了六种不同弯曲半径和不同水流条件共 49 组试验。但他们的物理模型是变态的,垂向产生人为的高横坡,造成输沙率的增加^[25]。曾庆华于 1978 年对矩形断面泥沙输移及动床弯道泥沙运动进行了试验研究。该实验表明:凹岸冲刷的泥沙几乎全部淤在该岸下一河弯的凸岸部分,只有少量泥沙横跨河床淤在同一河弯的凸岸^[26]。张瑞瑾和谢葆玲于 1980 年在单个弯道水槽和由三个弯段、两个过渡段组成的定床模型试验中得出,推移质的横向输移有同岸输移和异岸输移两种方式,同岸输移的规模一般超过异岸输移的规模,而且后者随流量的增加而减少^[27]。De Vriend 在 1981 年用数学方法对浅水河弯做了大量的研究,并做了许多水槽试验来检验他的结论^[28]。Chiu 于 1985 年研究了矩形断面模型弯道中水流和切力的相互关系,说明床面切力对泥沙冲淤起着重要作用^[29]。

从 1985 年开始,蔡金德、王伟等人对弯道水流泥沙运动特性及漫滩水流结构进行了一系列的模型试验研究,尤其是对连续弯道环流非充分发展的情况。首次将定向普雷斯顿管引入弯道床面切力大小和方向的量测,说明床面切力总是背离凹岸,指向凸岸;对连续弯道环流结构的实验结果表明,纵