

北京清大水木科技研究所资助出版丛书

河流输沙力学

段红东 何华松 朱辰华 编著

黄河水利出版社

北京清大水木科技研究所资助出版丛书

河流输沙力学

段红东 何华松 朱辰华 编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书着重从理论、机理上阐述了河流输沙力学中的主要内容。全书除绪论外,共分八章,包括河流水力特性概况、泥沙的基本特性、泥沙的起动与扬动、悬移质泥沙运动、泥沙输送计算、悬移质泥沙与床沙级配的计算、异重流运动、黄土高原地区产流产沙及汇流计算模型等。书中不仅介绍了我国学者的研究成果,同时也介绍了国外学者的研究进展。

本书可供从事水利工程及相关专业科技工作者及高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

河流输沙力学/段红东,何华松,朱辰华编著—郑州:
黄河水利出版社,2001.12

ISBN 7-80621-541-7

I.河… II.①段…②何…③朱… III.河流输
沙-流体力学 IV.TV142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 003130 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮编:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真(0371)6022620

E-mail: yrep@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄委会设计院印刷厂

开 本: 787 毫米 × 1 092 毫米	1/16	印 张: 11.125
版 次: 2001 年 12 月	第 1 版	印 数: 1—2 000
印 次: 2001 年 12 月	郑州第 1 次印刷	字 数: 194 千字

书 号: ISBN 7-80621-541-7/TV·261

定 价: 28.00 元

前 言

河流是水流与河床在自然因素及人类活动影响下交互作用的产物,这种作用的过程,主要以泥沙输送来体现。河流输沙力学是以力学的方法研究河流输沙过程的学科,其中的核心内容为泥沙运动基本规律的研究。长期以来,许多学者着重于该学科有关问题的研究与探索,出版了许多相关内容的论述与专著,但由于泥沙输送环境错综复杂,影响因素不易控制,特别是泥沙运动导致河床边界变化,河床变动又反过来影响水流,形成一个反馈系统,因而使得研究更为困难,许多重要问题尚未得到满意的解答。我们根据工作需要,共同撰写的这本《河流输沙力学》,择要阐述了包括河流水力特性概况、泥沙的基本特性、泥沙的起动、悬移质泥沙运动、泥沙输送计算及悬移质泥沙与床沙级配的计算、异重流运动、黄土高原地区产流产沙及汇流输沙计算等。同时,书中不仅介绍了我国学者的研究成果,也介绍了国外学者的研究进展,目的是试图叙述河流输沙运动物理现象的机理与本质,描述不同运动形式所遵循的统一规律。

本书由段红东、何华松、朱辰华共同执笔撰写。其中,段红东执笔第一、二、四章;何华松执笔第三、五、六章;朱辰华执笔第七、八章及绪论,最后由段红东统稿。本书由清华大学王光谦教授及黄河水利委员会林斌文教授级高工主审,赵连军、杨明等工程师给予了无私帮助和支持,马怀宝还参加了校核工作,在此表示感谢。

本书初稿虽几经修改,但因水平所限,谬误之处在所难免,恳请读者不吝指正。

作 者

2000 年 8 月

目 录

前 言	
绪 论	(1)
第一章 河流水力特性概况	(5)
第一节 水流能量的转换过程	(5)
第二节 冲积河流阻力的组成	(5)
第三节 各种阻力的综合计算	(9)
第四节 动床阻力的计算方法	(11)
第五节 水流流速的垂线分布	(18)
第二章 泥沙基本特性	(37)
第一节 泥沙的粒径及级配	(37)
第二节 泥沙的容重和浑水特性	(40)
第三节 泥沙沉降特性	(42)
第四节 泥沙的水下休止角	(50)
第三章 泥沙的起动与扬动	(52)
第一节 概述	(52)
第二节 临界剪应力	(53)
第三节 临界起动流速	(62)
第四节 粘性土的侵蚀起动	(63)
第五节 泥沙扬动流速	(69)
第四章 悬移质泥沙运动	(71)
第一节 泥沙在悬移状态的运动	(71)
第二节 扩散理论	(72)
第三节 Rouse 公式的修正	(74)
第四节 含沙量分布最新研究成果	(78)
第五节 紊流中含沙量垂线分布的统一公式	(80)
第五章 泥沙输送计算	(86)
第一节 早期输沙研究成果概述	(86)
第二节 多沙河流的输沙率计算	(91)
第三节 多沙河流的水流挟沙力计算	(97)

第六章 悬移质泥沙和床沙级配及其交换规律	(111)
第一节 泥沙级配的计算	(112)
第二节 悬移质泥沙和床沙交换规律研究	(122)
第七章 水库异重流运动	(139)
第一节 异重流的阻力	(140)
第二节 异重流的形成	(142)
第三节 异重流的流速分布和含沙量分布	(146)
第四节 异重流的泥沙输移	(149)
第五节 非恒定异重流的运动方程	(151)
第八章 黄土高原地区产流产沙及汇流输沙计算	(155)
第一节 引言	(155)
第二节 模型的基本结构	(156)
第三节 产流模型	(157)
第四节 产沙模型	(160)
第五节 流域随机汇流模型	(165)
第六节 模型的应用及其检验	(170)

绪 论

人类从事河道治理,在河流上修建水利枢纽,引水发电和灌溉;为维持通航,相应地要修建船闸和引航道,同时还要护岸导流,疏浚航道。所有这些水利工程,都改变了天然河流中泥沙运行的规律,使泥沙在不同的部位发生淤积或冲刷,给工程带来麻烦和危害。因此,在河流上修建工程,把握泥沙输送规律,便成了工程规划、设计、运行和管理的重要任务,甚至是工程成败的关键所在。

实际上,泥沙问题也是环境问题,这是当代一个十分重大的课题。隶属环境的生态系统。是指生命系统和自然系统在特定空间的组合。所谓自然系统,是指水、热、气、光、土等各种环境因子的集合。地表层有三大耗散结构类型,即自然地理系统、自然生态系统和人工生态系统。农业生态系统中的农田、山林、牧场等,实际上已不再是单纯的自然生态系统,而是自然生态系统和社会经济系统相结合的人工生态系统。人类对资源开发利用的不当,会导致生态环境的失调、恶化与破坏,它主要可分为水土流失与环境污染两大类。水土流失或土壤侵蚀是影响基本生态过程的重大问题,而水土流失的发生、发展与控制,与维护生态系统的良性循环关系密切,从而需要对河流输沙规律及防治泥沙灾害的措施进行专门研究。美国《公元 2000 年全球情况调查报告》的主编巴尔尼(Barney, G.O.)指出:“在环境问题中,空气和水的污染固然十分重要,但第一位的问题却是土壤侵蚀,或称水土流失,解决这一问题对发展中国家更为迫切。”

河流是水流与河床交互作用的产物。水流作用于河床,使河床发生变化;河床反过来也作用于水流,影响水流结构。在水流和河床的交互作用中,泥沙的运动起纽带作用。通过泥沙的起动、推移、悬浮、沉积,河床发生冲淤变化。泥沙在水流作用下的输送规律是复杂的。专门研究河流泥沙运动基本规律,同时研究河道输沙的力学机理及其计算方法,并对河床变形作出预测,这门学科可称为河流输沙力学。

河流泥沙的来源主要是地表径流对土壤的侵蚀,特别在黄土沟壑地区,是我国北方一些河流(特别是黄河)的主要产沙区。陕北的窟野河、无定河、北洛河和泾河,最大含沙量都超过 $1\,000\text{kg}/\text{m}^3$,窟野河甚至达到 $1\,600\text{kg}/\text{m}^3$ 左右。黄河三门峡水文站多年平均输沙量 16.4 亿 t,平均含沙量 $37.6\text{kg}/\text{m}^3$,远超过世界其他任何一条河流。黄河的问题主要是泥沙问题,因而高含沙量水流运

动的研究成为我国泥沙研究的重要课题。20 余年,特别是近 10 年来,黄河泥沙研究出现了本学科最具代表性的标志成果。

长江泥沙相对较少,但年输沙量也达 4 亿多吨(占世界第五位),围绕葛洲坝及三峡水利枢纽的修建,我国几所大学和几个大的水利科研单位对存在的泥沙问题进行研究,已达数十年之久。西南地区河流特点是坡度大,水力资源丰富,河流推移质泥沙多,取水防沙一直受到极大的重视。一二十年前取水枢纽因泥沙淤积导致工程改建或报废的事例,在今天已少见,这正是泥沙理论水平提高和实践经验丰富的结果。

国外河流含沙量一般较小,但也有些河流的泥沙较多,例如,美国科罗拉多河多年平均含沙量也达 $20 \sim 30 \text{kg/m}^3$ 。

我国及国外一些河流挟沙情况,见表 1 及表 2。

表 1 我国主要河流的挟沙情况

河名	测站	年水量 (10^8m^3)	年沙量 (10^4t)	平均年含沙量 (kg/m^3)	最大含沙量 (kg/m^3)	侵蚀模数 [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]
松花江	松花江	170.3	198.0	0.127	2.76	38.4
辽河	卡力马	56.50	3 300.0	5.860	46.60	240.0
永定河	官厅	14.22	8 260.0	49.200	436.00	1 944.0
黄河	陕县	426.40	160 000.0	37.500	590.0	2 330.0
渭河	咸阳	60.12	20 060.0	33.000		4 000.0
黄甫川	黄甫	1.97	6 140.0	312.000	1 480.0	19 200.00
淮河	蚌埠	261.00	1 860	0.539	11.0	153.0
长江	大通	9 336.00	4 310.0	0.46	2.29	253.0
额尔齐斯河	布尔津	48.90	29.3	0.060	1.90	12.0
伊犁河	雅马渡	116.40	694.0	0.590	10.20	141.0
乌鲁木齐	英雄桥	2.79	7.5	0.270	9.88	81.0
阿克苏河	西大桥	34.10	1 200.0	3.520	205.00	
克孜河	卡拉贝利	19.80	1 230.0	6.210	347.00	898.0
塔里木河	阿拉尔	49.50	2 204.0	4.450	20.90	

表 2

国外若干河流多年平均水沙特征值统计

国名	河名	测站	流量 (m^3/s)	径流量 (10^8m^3)	含沙量 (kg/m^3)	输沙量 (10^8t)	输沙量模数 [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]
巴 西	亚马孙河	河口	181 000	57 200	0.07	4.0	69
美 国	密西西比河	河口	17 820	5 640	0.6	3.44	107
	密苏里河	赫尔曼	1 950	616	3.9	2.4	181
	科罗拉多河	大峡谷	155	49	30.4	1.49	234
孟加拉国	布拉马普特拉河	河口	12 190	3 850	2.1	8.0	1 200
	恒 河	河口	11 750	3 710	4.3	16.0	1 680
印 度	科西河	楚特拉	1 810	570	3.3	1.9	3 060
巴基斯坦	印度河	柯特里	5 500	1 740	2.8	4.8	495
緬 甸	伊洛瓦底江	普朗姆	13 550	4 290	0.8	3.3	768
埃 及	尼罗河	格弗拉	2 830	895	1.4	1.22	41.6

泥沙问题在世界特别在中国范围内,已受到广泛的重视,各大水利科学研究单位,如中国水利水电科学研究院、黄河水利科学研究院、长江科学院、南京水利科学研究院、淮委会水利科学研究院等,都设有主要研究河流泥沙治理的研究所(室);一些高等院校,如清华大学、武汉大学、天津大学、河海大学、四川联合大学,也各有实力雄厚的泥沙研究队伍;不少水利水电勘测设计院和工程局,也都有一定数量的泥沙科技人员。多年来,他们解决了很多泥沙方面的理论问题和工程问题,使我国的泥沙研究水平居于世界领先地位。同时也应指出,河流输沙研究尚需开展更深入的研究。其原因大致有以下几个方面:

首先是河流输沙运动现象的复杂性。泥沙运动一般属固液两相流范畴,泥沙在水流作用下发生运动,又反过来影响水流运动。如果说含沙量小时可以只考虑泥沙在水流作用下的运动规律,对高含沙量水流继续这样处理就会带来更大的误差。因为,细颗粒泥沙表面的物理化学作用已不容忽视,高含沙水流并不是在各种条件下都遵从牛顿定律,有时的体系往往属于流变学范围,改变了流体的性质和水流的结构有所改变。含沙水流的边界条件也不同于清水,边界形态的改变,沙波的出现和消失,对阻力和糙率都有很大影响。

其次是量测方法和仪器还不过关。在浑浊水流中用仪器不能直接观察一个细沙颗粒的运动,即使在实验室条件下判断床沙的起动条件,也难于有统一的判断标准。事实上,床沙和推移质或推移质和悬移质的区分都仅仅是相对

意义上的,因为它们都可能处于互相转化交换的过程之中。河流里的紊动旋涡产生于河底,能量的传递及消耗也是在河底附近最大。同样,泥沙的起动、悬浮也是从河底开始,推移质和悬移质交换也发生在这个只有几个粒径厚度的区域内,但现在还没有一种测流和取样仪器能深入这个区域,确切探明这里的水流结构和对泥沙的力的作用。由此看来,泥沙研究工作者在这方面要有所突破,还需要付出辛勤的劳动。目前,各种推移质采样器,都不能无扰动地取得沙样。

另一个原因可能是现有的体制往往造成理论与实际相互脱离的问题。我们知道,各个设计和生产部门所解决的大量工程泥沙课题,往往依据十几年再版而内容不更新的规范、手册或权威们的经验判断。与此同时,科研和高等院校又在一味追求学术创新,不少成果往往不是在解决工程实际问题中产生的,缺乏实用价值。

本书着重从理论上和机理上阐述了河流输沙力学的主要内容,包括河流水力特性、泥沙基本特性、泥沙的起动与扬动、悬移质泥沙运动、泥沙输送计算、悬移质泥沙与床沙级配计算、异重流运动、黄土高原地区产流产沙及汇流输沙计算模型等八章,比较系统和全面地介绍了国内外学者的有关研究成果与本学科最新研究进展,供从事水利工程及相关专业科技工作者和高等院校师生使用参考。

第一章 河流水力特性概况

研究河流泥沙输移规律,必须对河流水力特性有相当清晰的认识,因而本书在第一章首先对相关内容加以介绍。

第一节 水流能量的转换过程

明渠水流只有在具有一定纵坡时才能向前流动。对均匀流,水面坡度、渠底坡度和水力坡度保持相等。从能量观点看,这表示水流动能沿程不变,势能沿程减少,其减少值恰等于水头损失(水面下降)。均匀流中流速沿流程不变,水流的能量全部来自势能^[1]。水流内部各点的势能中,有一小部分通过水流的粘滞作用,化为热能就地散失。绝大部分则通过剪切力作用传递到水流边界,在那里转化为紊动的动能。我们知道,紊流旋涡产生于边界,旋涡脱离边界进入主流区并分解成尺寸更小的旋涡,如此一级一级地分解,能量也一级一级地减少,最小的旋涡因当地水流的粘滞作用,将能量转化为热能。所以,可将能量的传递和转化过程概括为:水体中的势能大部分传递到边界,在那里转变成紊动旋涡的动能。紊动旋涡的动能又逐级传递给水体,最后转化成热能耗散。每一级传递和转化过程,都伴随有机械能的消耗。

对冲积河流而言,水流阻力和能量转化过程更为复杂。因为冲积河流的边界是可变动的,而边界形态是产生紊动旋涡的主要条件。冲积河流中泥沙的起动、悬浮及运动状态,对能量的消耗和传递又必然带来一定影响。因此,研究冲积河流的阻力,是进一步研究水流输送泥沙规律的必要前提。

第二节 冲积河流阻力的组成

冲积河流的阻力,可根据其作用的不同而划分成不同的组成单元,其中包括沙粒阻力、沙波阻力、河岸及滩面阻力、河槽形态阻力及人工建筑物附加阻力等^[2]。

一、沙粒阻力

水流流经河床表面,受到床面泥沙颗粒的阻滞为沙粒阻力。天然河道水流大都处于阻力平方区,泥沙粒径就可作为壁面粗糙代表尺寸。水流绕过沙粒后形成旋涡,沙粒阻力主要由这些旋涡造成。由于紊流绕过沙粒时所产生的旋涡直接位于沙粒附近,因此沙粒阻力对推移质泥沙运动起决定性作用,对悬移质泥沙运动也起重要作用。

二、沙波阻力

随着水流条件的不同,冲积河流河床表面会形成不同的沙波(有关沙波发生发展的各个阶段,将在书中详细论述)。在沙纹及沙垄阶段,由于水流在沙波波峰的分离,使迎水坡面上的压力大于背水坡面上的压力,从而产生了形状阻力。在沙浪阶段,邻底流线虽基本平行于床面,没有分离现象,但当与沙浪相应的水面波发生破碎时,由于产生大量局部紊动,也会增加阻力损失。这种因沙波的存在而产生的额外阻力,称为沙波阻力。

沙粒阻力和沙波阻力合成为床面阻力。

三、河岸及滩面阻力

冲积河流的河岸及滩地的组成物质,一般较床沙为细。当河岸及滩面无植物丛生时,河岸阻力可视为组成岸面泥沙颗粒的沙粒阻力,滩面阻力既有沙粒阻力,也有沙波阻力。但在滩面正常洪水位以上,常草木丛生,糙率与草木种类及生长情况有关,也与水深及流速大小有关。水浅流缓时,草木直立,对水流阻力大;水深流急时,草木受力倒伏,水流阻力相应减小。当河岸有护岸铺砌时,糙率又有不同。对窄深河流,河岸阻力尤显得重要。

四、河槽形态阻力

河槽的断面及平面形态对阻力有很大影响,如江心多沙洲,水流分汊、流向蜿蜒曲折,河宽多变化时,水流阻力相应增大。这种由河槽形态引起的阻力,常是产生天然河道“大尺度紊动(旋涡)”的原因,从而增加了水流阻力。一般河道水流“小水走弯,大水趋中”,因此河槽阻力低水期比高水期大。

五、人工建筑物的附加阻力

如河段内有挑流、护岸建筑物以及桥渡等,就会增加局部阻力。其大小与

建筑物外形及尺寸有关。

在过去的水力学书中,阻力主要是由反映边界粗糙程度的糙率 n 值来反映的。但很多资料表明,糙率还与水流中的含沙量有关。当含沙量较小时,糙率较大,随着含沙量增加,糙率减小。从直观上解释,可以认为是水流在挟带大量悬移质泥沙时,在河床附近将形成含沙浓度较高的底层,而该底层起着“润滑、减阻”作用。我们在水槽试验中也曾观察到挟沙水流近底层的流速减缓,而其余流区的流速依然较大,并观察到水沙混合的局部流速梯度大于清水的局部流速梯度。很明显,大量的泥沙颗粒减弱了掺混作用。张瑞瑾教授将悬移质存在造成的阻力系数和能量损失的改变,归结为紊动强度减弱,并称之为“制紊作用”。为什么悬移质会对水流产生这种“制紊作用”呢?有必要对此进行探讨。首先指出,所谓“制紊”是对悬移质而言的,若对悬沙和底沙运动不加区别地泛谈挟沙水流的能耗问题,可能容易导致概念上的混乱。

众所周知,含有悬移质泥沙的流场,同时存在着一定的含沙浓度和含沙梯度。对于前者,第一,造成了悬移质挟沙水流中的涡体比清水中的容重大,即使尚存在着与相应的清水涡体相符的动量,其运转速度也要降低;第二,造成挟沙流体的粘性增大,涡体必然因受较大的粘性阻力而降低其运转速度(其中体现于表征水流紊动强弱的雷诺数减小)。至于后者,无论从内因还是外因上,都将影响涡体的运转速度。从内因上讲,涡体运动在紊动能转化为热能的过程中,起了媒介作用,因而从某种意义上,可以认为涡体运转的直接能源是紊动能。水流为维持含沙量梯度的存在,须付出一部分紊动能,那么,涡体的运转速度则因能量的减小而降低。从外因上讲,涡体时刻受含沙量梯度的制约。就任一涡体而言,向上脉动时挟带着比当地含量较多的泥沙,自然有下沉的趋势;而向上脉动时比当地的含沙量少,又必然趋于“上浮”。

综上所述,含有悬移质的流场,存在着遏制流体运动的作用。而水流紊动的强弱正是通过涡体的运动表现的,故悬移质的存在,产生制约紊动的作用,是显而易见的。处于悬浮与沉降这一矛盾的水流与泥沙是相互作用的,这种作用导致了水流内部结构的变化,进而影响有效能量的变化及分配过程。此外,还可从水流的剪切力这一角度来分析。紊流中的切力由粘性和紊动两部分组成,亦即

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (1-1)$$

固然悬沙水流因粘性系数 μ 的增大而使粘性切应力(即上式右端第一项)增加,但紊动切应力却因涡体的运转速度 u'_i 、 u'_j 的降低而减小。而广大

流区的粘性阻力远小于紊动造成的阻力,故综合影响的结果, τ_{ij} 应较清水时小。实际上还不仅如此,粘性的增大对水流的影响具有两重性,除以上已经谈到的以外,还会引起与 ν/u 呈正比的粘性底层厚度 δ 有所增加,而 δ 的增加往往可能减小水流的阻力损失。

天然河道的糙率除受上述因素影响外,还与其他很多因素有关。例如,河床沙粒径的大小和级配,沙波的形成或消失,河道弯曲程度,横断面形状的不规则性,深槽中的滩坑,滩地上的草木,河槽的冲淤以及河道整治工程等。这些复杂的因素不仅沿河道的长度变化,而且在同一河段上也随水位变化而不同。糙率 n 随水位的变化规律,取决于河道的具体情况,某些河段的糙率随水位升高而增大,某些河段的糙率随水位的升高而减小。例如,由黄河、淮河等河流的某些河段的实测资料分析结果可知,糙率因水位不同而变化的趋势基本是一致的,在低水位时,糙率一般都比较,随着水位升高,糙率减小,当糙率减小到某一最小值后,又随水位上升而增大。糙率随水位变化的上述规律,可解释如下:①低水位时,水深小,河槽中泥沙的相对粗糙度和沙波的相对影响都比较大,阻力大;低水位时河水蜿蜒曲折,增大了水流阻力;整治建筑物对水流流态的影响往往在低水位时更为突出,阻力较大。由于上述诸因素形成了较大的综合阻力,所以低水位时糙率较大。②水位升高后,泥沙的相对粗糙度和沙波的相对高度都随之减小,阻力也就减小。同时,河道的主流趋向中泓,河槽曲折对水流的阻力也减小。由于水深大,河工建筑物对水流的阻碍作用也相对减小。因此综合阻力减小,糙率也随之减小。③水位再升高至水流漫滩后,由于滩地上草木或农作物等增加了水流的阻力,因此糙率又有所增大。

由于影响河道糙率的因素比较复杂,所以工程中常常采用河道的实测资料来推求糙率。实测方法为:河段的长度为 Δl ,测得其首末断面水位为 z_1 和 z_2 ,相应的流量为 Q_1 和 Q_2 ,并在实测的断面图上量得首末过水断面面积 A_1 和 A_2 ,应用谢才公式及曼宁公式,并取各水力要素的平均值 $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}$ 、 $\bar{J}$ 得

$$n = \frac{1}{\bar{V}} \bar{R}^{2/3} \bar{J}^{1/2} \quad (1-2)$$

式中: $\bar{V} = \bar{Q}/\bar{A}$, $\bar{Q} = (Q_1 + Q_2)/2$, $\bar{A} = (A_1 + A_2)/2$; $\bar{R} = (R_1 + R_2)/2$; $\bar{J} = (z_1 + z_2)/\Delta l$ 。

应用式(1-2)即可求得该河段的糙率值。

附带指出,冲积河床与水流相互作用是以泥沙运动为纽带的。泥沙运动不断改变河床周界颗粒的粗细和排列等一系列状况,导致了河床的不断调整。

泥沙运动为随机事件,故河床调整过程应是一个随机过程,因而动床阻力自然也具有随机性。张红武通过对水流、河床与泥沙运动之间相互作用、相互影响的内在机理的分析,针对冲积河流中两类代表性较强的河段,建立了模拟动床糙率随机变化的概率模型,得到推移质以滚动为主要形式的粗沙河床(这种情形往往发生在冲积河流的上游阶段)的糙率分布密度公式(取张有龄糙率公式系数 $A = 19$)为

$$\varphi(n) = 2.386 \frac{A^3 \sqrt{gn^2}}{\sqrt{2\pi} u_*} \exp \left[-1.58 \left(\frac{0.447 A^3 \sqrt{gn^3}}{u_*} - 1 \right)^2 \right] \quad (1-3)$$

对于冲积河流下游段且床沙属非粘性的河床,其糙率分布密度公式为

$$\varphi(n) = 13.29 \frac{\sqrt{gA^3 n^2}}{\sqrt{2\pi} u_*} \exp \left(- \frac{2.455 A^6 g n^6}{u_*^2} \right) \quad (1-4)$$

上述二式对于了解动床阻力的随机变化性质及进一步开展随机水力学研究,具有较大的意义。

应当承认,动床水力摩阻特性远较清水复杂得多,尽管这一方面的研究成果较多,但能够直接用来解决实际问题的计算公式并不多见,故仍须进行深入细致的研究。

第三节 各种阻力的综合计算

在作阻力计算时,有两种情况需要区分:一种是作用在不同周界上的不同阻力单元,如床面阻力、河岸阻力、滩面阻力,他们通常可按河槽断面周界范围区分。另一种是作用在同一周界上的不同阻力单元,如沙粒阻力和沙波阻力,都作用在同一周界上。

一、河岸阻力与床面阻力的划分

河床阻力包括河底阻力和河岸阻力两部分:

$$\tau_0 P = \tau_b P_b + \tau_w P_w \quad (1-5)$$

式中: τ_0 、 τ_b 、 τ_w 分别为河床平均、河底及河岸切应力; P 、 P_b 、 P_w 分别为河床、河底及河岸湿周。

由水力学内容得知,河床周界上平均切应力的表达式为 $\tau_0 = \gamma R J$,至于 τ_b 和 τ_w 的表达式,则有不同方法。

H. A. Einstein 提出的所谓水力半径分割法,假定不论河底及河岸,单位重量的水体行经单位距离所损失的能量相等,即都是 J ,因此

$$\begin{aligned}\tau_b &= \gamma R_b J \\ \tau_w &= \gamma R_w J\end{aligned}\quad (1-6)$$

式中: R_b 、 R_w 分别为河底阻力和河岸阻力的水力半径, 定义为

$$\begin{aligned}R_b &= \frac{A}{P_b} \\ R_w &= \frac{A_w}{P_w}\end{aligned}\quad (1-7)$$

式中: A_b 、 A_w 为 R_b 、 R_w 相应的过水面积, $A_b + A_w = A$ 。

将 τ_0 、 τ_b 、 τ_w 的表达式代入式(1-5), 可得水力半径为

$$R = \frac{1}{\rho} (R_b P_b + R_w P_w) \quad (1-8)$$

爱因斯坦假定断面各部分流速相等, 并等于断面 A 中的平均流速 V , 即 $V_b = V_w = V$, 按曼宁公式, 各部分流速可写成:

$$V_b = \frac{1}{n_b} R_b^{2/3} J^{1/2} \quad (1-9)$$

$$V_w = \frac{1}{n_w} R_w^{2/3} J^{1/2} \quad (1-10)$$

代入式(1-8), 最后可得, 河床的综合糙率 n

$$n = \left(n_b^{3/2} \frac{P_b}{P} + n_w^{3/2} \frac{P_w}{P} \right)^{2/3} \quad (1-11)$$

式中: n_b 、 n_w 分别为河床和河岸糙率。

Н. Н. Лабоуевский、姜国干、E. Meyer - Peter 等提出的另一种计算综合糙率的方法, 称为能坡分割法, 即令

$$\tau_b = \gamma R J_b \quad (1-12)$$

$$\tau_w = \gamma R J_w \quad (1-13)$$

式中: J_b 、 J_w 分别为区底及河岸比降。

与前不同, 不是取相等的水力坡度 J , 而是取相同的水力半径 R , 代入式(1-5), 得

$$JP = J_b P_b + J_w P_w \quad (1-14)$$

在此情况下, 曼宁公式的形式为

$$V_b = \frac{1}{n_b} R^{2/3} J_b^{1/2} \quad (1-15)$$

$$V_w = \frac{1}{n_w} R^{2/3} J_w^{1/2} \quad (1-16)$$

也假定断面各部分流速相等,即 $V_b = V_w = V$, 则得

$$n = \left(n_b^2 \frac{P_b}{P} + n_w^2 \frac{P_w}{P} \right)^{1/2} \quad (1-17)$$

与式(1-11)相比,糙率系数的方次略有不同

除了以上介绍的两种计算方法外,还有一些基于其他假定的计算方法,例如,张红武早期的流速分工法。但是不论哪种方法,都存在着一个假设合理性问题。相比较而言,水力半径分割法较为常用。因为划分水力半径,只是把水体的体积加以分割,而划分水力坡度,意味着任何位置的一个单位水体,要向各个不同的阻力单元分别输送能量,而不是主要向离它最近的周界输送能量,所以是难免有缺陷的。从矢量可叠加和分解的原理讲,流速分工法的理论基础更牢靠一些。

二、沙粒阻力和沙波阻力的划分

床面阻力是由沙粒阻力和沙波阻力二部分组成,它们作用于同一边界面上,由于它们对泥沙运动的作用不同,因此有必要把二者区分开。爱因斯坦的处理方法是把水力半径 R_b 划分成两部分,并按水力半径分割法计算各部分阻力,即

$$R_b = R'_b + R''_b \quad (1-18)$$

$$\tau'_b = \gamma R'_b J \quad (1-19)$$

$$\tau''_b = \gamma R''_b J \quad (1-20)$$

$$\tau_b = \gamma R_b J \quad (1-21)$$

式中: R'_b 、 R''_b 、 R_b 分别相应于沙粒阻力、沙波阻力和综合阻力的水力半径。

梅叶-彼得认为,在一定的流速和水深条件下,如果没有沙波,只存在沙粒阻力,所需水力坡度可以小一些;如果同时存在沙波阻力,则需要更大的水力坡度,才能在同样条件下通过此流量。因此把水力坡度分成二部分,即

$$J = J' + J'' \quad (1-22)$$

$$\tau'_b = \gamma R J' \quad (1-23)$$

$$\tau''_b = \gamma R J'' \quad (1-24)$$

$$\tau_b = \gamma R J \quad (1-25)$$

第四节 动床阻力的计算方法

上一小节我们已经阐明了河底阻力中沙粒阻力和沙波阻力的划分问题,在本节中我们进一步讨论这一问题的实质及具体计算方法。