



海岸河口工程研究论丛



粉沙质海岸泥沙运动及 航道淤积机理

严 冰 著

SEDIMENT TRANSPORT AND
CHANNEL SILTATION ON SILTY COAST



人民交通出版社
China Communications Press



海岸河口工程研究论丛

粉沙质海岸泥沙运动及 航道淤积机理

严 冰 著

SEDIMENT TRANSPORT AND
CHANNEL SILTATION ON SILTY COAST



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书是《海岸河口工程研究论丛》之一。主要对粉沙质海岸泥沙悬浮机理进行了深入分析,重点探讨了近底高浓度泥沙现象的物理特征,构建了悬沙垂线分布的理论模型,并通过三维数学模型手段,揭示出粉沙质海岸航道淤积机理。本书还改进了挟沙力模型,考虑了波浪破碎因素,通过概化的理想海岸,阐明了不同动力因素在粉沙质海岸泥沙运动中的作用。

本书可供海岸河口工程研究人员使用,也可供相关院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉沙质海岸泥沙运动及航道淤积机理 / 严冰著. —
北京:人民交通出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-114-10834-1

I. ①粉… II. ①严… III. ①沙质海岸—泥沙运动—
研究②沙质海岸—航道—淤积—研究 IV. ①TV148

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 187816 号

海岸河口工程研究论丛

书 名: 粉沙质海岸泥沙运动及航道淤积机理

著 作 者: 严 冰

责任编辑: 韩亚楠 崔 建

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 9

字 数: 164 千

版 次: 2013 年 11 月 第 1 版

印 次: 2013 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10834-1

定 价: 35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

海岸、河口是陆海相互作用的集中地带,自然资源丰富,是经济发达、人口集居之地。以我国为例,我国大陆海岸线北起辽宁省的鸭绿江口,南至广西壮族自治区的北仑河口,全长 18000km;我国海岸带有大大小小的入海河流 1500 余条,入海河流径流量占全国河川径流总量的 69.8%,其中流域面积广、径流大的河流主要有长江、黄河、珠江、钱塘江、瓯江等。海岸河口地区居住着全国 40% 左右的人口,创造了全国 60% 左右的国民经济产值,长三角、珠三角、环渤海等海岸河口地区是我国经济最为发达的地区,是我国的经济引擎。

人类在海岸河口地区从事经济开发的生产活动涉及很多的海岸河口工程,如建设港口、开挖航道、修建防波堤、围海造陆、保护滩涂、治理河口、建设人工岛、修建跨(河)海大桥、建造滨海火电厂和核电厂等等,为了使其经济、合理、可行,必须要对环境水动力泥沙条件有一详细的了解、研究和论证。人类与海岸河口工程打交道是永恒的主题和使命。

交通运输部天津水运工程科学研究院海岸河口工程研究中心的前身是天津港回淤研究站,是专门从事海岸河口工程水动力泥沙研究的专业研究机构,致力于为港口航道(水运工程)建设和其他海岸河口工程等提供优质的技术咨询服务。多年来,海岸河口工程研究中心科研人员的足迹遍布我国大江南北及亚洲的印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、缅甸、越南、柬埔寨、伊朗和非洲的几内亚等国家,研究范围基本覆盖了我国海岸线上大中型港口及各种海岸河口工程及亚洲、非洲一些国家的海岸河口工程,承担了许多国家重大科技攻关项目和 863 项目,多项成果达到

国际先进水平和国际领先水平并获国家及省部级科技进步奖。海岸河口工程研究中心对淤泥质海岸泥沙运动规律、粉沙质海岸泥沙运动规律和沙质海岸泥沙运动规律有深刻的认识,尤其在淤泥质海岸适航水深应用技术、水动力泥沙模拟技术、悬沙及浅滩出露面积卫星遥感分析技术等方面,无论在理论上还是在实践经验上均有很高的水平和独到的见解。中心的一代代专家们专注于为大型的复杂的项目上提供精确的技术论证和指导,使经优化论证的工程方案得以实施,如珠江口伶仃洋航道选线研究、上海洋山港选址及方案论证研究、河北黄骅港的治理研究、江苏如东辐射沙洲西太阳沙人工岛可行性及建设方案论证、瓯江口温州浅滩围涂工程可行性研究、港珠澳大桥对珠江口港口航道影响研究论证、天津港各阶段建设回淤研究、田湾核电站取排水工程研究等等,事实证明这些工程是成功的。在积累的成熟技术基础上,主编了《淤泥质海港适航水深应用技术规范》《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》《海港水文规范》泥沙章节、参编《海港总体设计规范》和《核电厂海工构筑物设计规范》等。

本论丛是交通运输部天津水运工程科学研究所海岸河口工程研究中心老一辈少一辈专家学者多年来的水动力泥沙理论研究成果、实用技术和实践经验的总结,内容丰富、水平先进、科学性强、技术实用、经验珍贵,涵盖了水动力泥沙理论研究,物理数学模型试验模拟技术研究,水沙研究新技术、水运工程建设、河口治理、人工岛开发建设实例介绍等海岸河口工程研究的方方面面,对从事本行业的技术人员学习和拓展思路具有很好的参考价值,是海岸河口工程研究领域的宝贵财富。

本人在交通运输部天津水运工程科学研究院工作 20 年(1990 ~ 2009 年),曾经是海岸河口工程研究中心的一员,我深得老一代专家的指导,同辈人的鼓励和青年人的支持,我深得严谨治学、求真务实氛围的熏陶,留恋之情与日俱增。今天,非常乐见同事们把他们丰富的研究成果、

实践经验、成功的工程范例著书发表,分享给广大读者。相信本论丛的出版将会进一步丰富海岸河口水动力泥沙学科内容,对提高水动力泥沙研究水平,促使海岸河口工程研究再上新台阶有推动作用。希望海岸河口工程研究中心的专家们有更多的成果出版发行,使本论丛的内容越来越丰富,也使广大读者能大受裨益。

交通运输部科技司司长



2012 年 11 月

前 言

近年来,随着粉沙质海岸港口建设的发展,粉沙质海岸泥沙问题,特别是航道淤积问题越来越突出。为此,本书主要针对粉沙质海岸泥沙特点,对泥沙悬浮机理进行研究,着重剖析近底高浓度悬沙现象,基于有限掺混长度理论建立了波流共同作用下悬沙分布模型,利用该模型改进了三维泥沙数学模型,并对粉沙质海岸航道淤积现象进行了模拟研究。此外,本书还对概化粉沙质海岸悬沙横向分布和航道淤积规律进行了分析。本书的主要研究内容和结论如下:

1. 基于有限掺混长度理论对水流作用下的悬沙浓度分布进行了研究。模型建立过程中,分析了紊动漩涡与掺混长度之间的关系、浓度和粒径对掺混长度的影响,推导出同时满足紊流相似假说和掺混长度理论的泥沙掺混长度分布公式。

2. 对波浪作用下泥沙悬浮机理进行了分析,建立了全水深悬沙垂线分布模型。依据 Lamb 等高浓度含沙水体实验结果,着重对波浪作用下高浓度水体的紊动强度分布、掺混长度进行了分析。在以上工作基础上,采用紊动制约函数直接修正扩散系数的方法,建立了在波流共同作用下考虑高浓度现象的悬沙浓度垂线分布模型,与多家实验结果的比较表明了该模型的合理性。

3. 利用本书建立的波流共同作用下考虑高浓度现象的悬沙浓度垂线分布模型,对 Wai 和 Jiang 开发的三维泥沙输运数学模型进行了改进,并通过实验数据验证了该模型在航道淤积模拟研究中的能力。

4. 以概化粉沙质海岸大风过程航道淤积为例,针对悬移质特别是高

浓度含沙水体在航道淤积中的作用进行了模拟和分析。结果表明,强浪是形成底部高浓度含沙水体的根本原因,8级向岸大风作用下,浅滩上含沙量大于 20kg/m^3 的水体厚度可达 $0.8\sim 1.25\text{m}$ 。泥沙运动轨迹模拟结果表明,航道淤积主要是底部高浓度水体在航道内不平衡输沙所造成,上部泥沙几乎不起作用。另外,推移质输沙也不是主要因素。

5. 根据破波带内外波能演化规律,对波浪挟沙能力公式进行改进,考虑了波浪破碎产生的紊动对挟沙能力增大的影响,所建立的公式反映了长周期波挟沙能力大的特性,并通过收集的资料确定了公式中的系数。

6. 利用书中建立的挟沙能力模型对概化粉沙质海岸上波浪因素对泥沙运动的影响进行分析。研究表明,对于岸滩平缓的粉沙质海岸,除了紧靠岸边的区域外,波浪底部剪切力是泥沙悬浮的主要因素,而波浪破碎的作用较为有限。

7. 在高浓度水体悬沙分布模型的基础上建立了粉沙质海岸航道淤积简化计算公式,便于快速估计粉沙质海岸航道淤积强度。

本书在编写过程中,天津大学的张庆河教授、加州理工学院的 Michael P. Lamb 博士给予了大量帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,加之泥沙问题的复杂性,认识的循序渐进性,本书中内容不免有错误和不足之处,恳请读者批评指正,不吝赐教。

Contents 目录

第1章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 悬移质含沙量垂线分布的研究综述	2
1.3 波流共同作用下挟沙能力的研究综述	10
1.4 海岸河口泥沙数学模型研究进展	11
1.5 粉沙质海岸泥沙运动及航道淤积研究进展	11
1.6 主要研究工作	12
第2章 有限掺混长度理论	14
2.1 有限掺混长度理论	14
2.2 有限掺混长度理论应用——单向水流作用下的悬沙分布	18
2.3 本章小结	25
第3章 波浪及波流共同作用下悬移质含沙量的分布	26
3.1 波浪作用下悬移质含沙量的分布	26
3.2 底部高浓度含沙水体研究	35
3.3 波流共同作用下悬移质含沙量的分布	46
3.4 本章小结	51
第4章 考虑底部高含沙影响的三维泥沙数学模型	53
4.1 三维泥沙数学模型的建立	53
4.2 三维泥沙数学模型的验证	58
4.3 本章小结	65
第5章 粉沙质海岸航道淤积机理的模拟研究	67

5.1	航道淤积机理	67
5.2	模拟方案的确定	68
5.3	航道淤积模拟结果分析	71
5.4	本章小结	83
第6章	粉沙质海岸泥沙运动的挟沙能力模型	84
6.1	潮流挟沙能力	84
6.2	波浪挟沙能力	88
6.3	波流共同作用下的挟沙能力	92
6.4	挟沙能力参数的确定与初步验证	93
6.5	本章小结	96
第7章	粉沙质海岸泥沙运动与航道淤积强度的研究	98
7.1	概化粉沙质海岸及其泥沙运动的数值模拟	98
7.2	潮流和波浪的模拟	102
7.3	含沙量横向分布	105
7.4	航道淤积强度的估计	115
7.5	本章小结	118
第8章	结论与展望	119
8.1	主要结论	119
8.2	研究展望	121
参考文献		122

第1章 绪 论

1.1 研究目的与意义

海岸泥沙运动是海岸地区最为常见的现象,对人类活动有着重要影响。海岸地形地貌的变化、港口航道与港池的淤积以及建筑物周围的冲淤变化等都与海岸泥沙运动有很大关系,海岸泥沙运动在海岸动力过程研究中占有重要地位。

由不同颗粒物质组成的海岸,其泥沙运动规律也有所不同。一般情况下,淤泥质海岸以黏性细颗粒泥沙为主,岸线平直、岸滩平缓,泥沙运动以悬移运动形式为主。沙质海岸滩面以松散的沙质泥沙为主,岸滩坡度较陡。在相当多的海洋环境条件下,波浪和潮流作用一般只会引起海岸泥沙的少量推移运动,不会使泥沙发生大量输移,但是风暴来临时,大波浪作用使大量泥沙进入悬浮状态,此时悬移质和推移质的比例也会随着波流强度的增大而增大,泥沙输运总量绝大部分由悬移质来确定^[1,2]。粉沙质海岸情况复杂,其性质介于淤泥质和沙质海岸之间。通常,将泥沙中值粒径在 0.03 ~ 0.12mm 范围附近的颗粒构成的海岸定义为粉沙质海岸^[3]。粉沙质海岸泥沙具有起动流速小、沉降速度大、密实较快,在海水中不发生絮凝的特点。粉沙质海岸泥沙运动活跃,其形式大多数情况下也以悬移为主,而且底部易形成高浓度含沙水体^[4,5]。

近年来,随着我国经济建设的发展,港口建设已经从原来的选择优良港址建设,转变成按照经济发展需要建设,在粉沙质海岸上建设的港口也越来越多。粉沙质海岸所建或拟建港口面临的一个重要问题就是航道淤积,为了解决航道淤积问题,必须对粉沙质海岸的泥沙运动机理有深入的了解。近年来,虽然众多研究工作结合我国黄骅港、京唐港等港口的建设,从现场观测、物理模型实验、理论分析、数值模拟等方面对粉沙质海岸泥沙运动规律进行了研究,取得了丰富的成果,甚至已经在粉沙质海岸较为成功地实施了航道淤积防治措施(如黄骅港防沙堤已于 2005 年建成并发挥了航道减淤效益^[6,7]),但对于粉沙质海岸泥沙运动机理,特别是对于粉沙质海岸底部高浓度层的形成、不同动力对于粉沙质海岸泥沙运动的作用以及航道淤积机理等仍缺乏足够深入的认识。

粉沙质海岸的强烈泥沙输送往往是在波流共同作用下造成的,波浪起着重要作用。因此,本书在对波流共同作用下悬移质泥沙运动机理做进一步研究的基础上,力图将其用于解释粉沙质海岸航道淤积现象,这对掌握海岸变化规律,提高海岸泥沙冲淤预测精度,改善港口运营环境有着重要的理论和实际意义。

1.2 悬移质含沙量垂线分布的研究综述

本书重点将从悬沙分布变化的角度研究粉沙质海岸泥沙运动机理及航道淤积过程,因此,这里的文献综述也将重点围绕非黏性泥沙的悬移质垂线分布展开。

1.2.1 相关理论

关于悬移质浓度分布的研究非常多。在众多的理论和模型中,应用较广泛的有扩散理论、混合理论、能量理论、相似理论、随机理论以及两相流理论等^[8,9]。

(1) 扩散理论

扩散理论认为泥沙之所以能够悬浮是由于水流紊动扩散和泥沙重力共同作用的结果。扩散方程实质上是悬移质泥沙在水流中处于平衡状态时所应满足的连续方程。扩散理论是目前应用最为广泛的理论。漩涡运动和泥沙扩散是水流挟沙过程的两个方面,前者为后者提供动力条件,两者必然存在联系,也存在差异。因此,扩散理论通常用施密特数 S_c (Schmidt number, $S_c = \nu_T/\varepsilon$) 或修正系数 β ($\beta = 1/S_c$) 修正紊动涡粘系数 ν_T 的方法得到扩散系数 ε 。然而,从已知的悬移质浓度垂线分布数据,利用传统的扩散方程反推扩散系数或 β ,结果常常相互矛盾或没有规律性^[10,11]。除去实验本身误差外,泥沙扩散悬浮机理本身的不完善是造成相互矛盾结果的根本原因。刘大有基于一般两相流的双流体模型分析了传统扩散方程的不足,认为扩散理论的缺陷,主要是因为引入菲克定律引起的,其次是扩散模型本身的近似^[12,13]。傅旭东和王光谦以两相流模型为基础,定量分析了传统泥沙扩散方程的内在误差^[14]。因此,利用扩散理论描述泥沙运动,不能仅仅局限于对扩散系数的简单修正,必须从泥沙运动机理本身入手对扩散理论进行改进才能弥补其缺陷。最近,Nielsen 和 Teakle^[15]在该方面进行了研究,提出的有限掺混长度理论为悬移质含沙量分布研究提供了新的思路和方法。

(2) 混合理论

混合理论假设将流体和分散的悬浮固体颗粒分别看作连续介质,分别用于连续方程。混合理论试图通过动力学机理给出更为普遍的理论,能够把扩散理论作为一种特殊情况包含进去,但是往往只能列出其表达式,还要通过简化、假设求解,

最后又回到了扩散方程的形式。所以从使用的角度来看,直接应用扩散理论更为方便。混合理论的简化结果与扩散方程比较没什么差别,由此可见,混合理论实质上是扩散方程的动力学解释。这有助于深入地理解泥沙悬浮机理。McTigue^[16]曾采用 Drew 的方法,得到了一个分层模式的混合理论模型。

(3) 能量理论

能量理论要求对流体和悬浮泥沙的平均流能和涡能作出精确的表示,而这正是固液两相流研究中最困难的。其中,前苏联的维利卡诺夫的重力理论较有影响^[10]。从含沙水流中用于支持颗粒悬浮的能量不是直接来自有效势能,而是从紊动能中获得的观点出发,蔡树棠根据周培源提出的涡量相似理论假设流体和颗粒紊动具有某种相似性,得到了与 Rouse 公式相似的泥沙垂线分布公式^[17,18]。然而,目前关于挟沙水流的各部分能量分配机理方面的认识还很有限,而且公式结构复杂,在实际应用上受到很大限制。

(4) 相似理论

相似理论的基本思想是,在假设紊流脉动速度和含沙浓度涨落速度相似的条件下建立悬沙分布公式。由于该理论中很多参数无法从理论本身求出,所以也不便于应用^[8]。

(5) 随机理论

随机理论的建立基于紊动流体和泥沙运动都具有随机特性的认识。虽然各家的处理方法有别,但基本出发点大致相同,即认为,可把水流中的悬沙运动看作是在水面和床面的这两个“反射壁”之间做“随机徘徊”(或随机游动),泥沙颗粒在沿水深的垂线上任意高程处的向上、向下和停留的概率是可以确定的。应用随机理论的困难在于确定泥沙颗粒从一个高度跳到另外一个高度的空间和时间步长。Matalas^[19]和 Bayazit^[20]都曾对随机理论进行过论述。迄今,随机理论的应用仍仅限于均匀紊流。虽然随机理论未像扩散理论那么成熟,但扩散方程实际上是随机徘徊模型中 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限时所得到的极限分布式。

(6) 两相流理论

两相流理论强调流体和泥沙颗粒间的相互作用。固液两相分别用一系列守恒方程进行描述,并以耦合项联系两相。方程的闭合依靠关于各相的本构关系模型、热力学状态方程或紊流附加方程和各相的描述。国内很多学者,如倪晋仁^[21]、傅旭东和王光谦^[14]、刘大有^[12,13]、李勇和余锡平^[22]等都用了两相流理论对泥沙运动进行了研究。然而,由于数学运算上的困难,很难获得方程的显式解。而且,在目前的测量水平下各相间的差别和相互作用很难精确测量。

上述理论从不同角度对紊流中泥沙悬浮进行了解释。每种理论都有利有弊。

尽管各种理论的出发点各异,但是最后都能得到或接近按扩散方程得出的结构形式,且可以相互补充和转化。它们最主要的差别是扩散系数有所不同。考虑到扩散理论已经得到了广泛应用,而且相对于其他理论在实际中的应用特别是工程应用中的优势,本书仍然在扩散理论的框架内对波流共同作用下泥沙垂线分布进行研究。后面的相关综述也仅围绕扩散理论展开。

1.2.2 单向水流作用下含沙量垂线分布研究的进展

泥沙运动力学的发展是从河流泥沙运动研究开始的。发展至今,关于单向水流作用下含沙量垂线分布的文献不胜枚举,经验公式和成果非常多。扩散理论最根本的问题是如何确定泥沙扩散系数。最简单的情况为假定扩散系数 ε 为常数。莱恩及卡林斯基根据天然河道的资料指出,就实用观点来说,扩散系数为常数已经足够可靠,并建议 ε 取为^[10]

$$\varepsilon = \frac{\kappa u_{*c} h}{6} \quad (1-1)$$

式中, u_{*c} 为水流摩阻流速; h 为水深; κ 为卡门常数。实际上,泥沙扩散系数不是一个常数,而是空间位置的函数。著名的 Rouse 公式的导出实际上就是认为扩散系数为抛物线形式^[10],即

$$\varepsilon = \kappa u_{*c} z \frac{h-z}{h} \quad (1-2)$$

自从推导出 Rouse 公式后,其他研究者做了大量工作以验证这一理论公式的结构是否正确以及公式中悬浮指标 $z = \omega_s / (\kappa u_{*c})$ 是否与实测值符合^[23]。大量的野外实测资料表明, Rouse 公式的结构是正确的。在实验室内的研究方面, Vanoni、Ismail 及 Einstein 和钱宁等做了大量工作,也都证实了 Rouse 公式结构的正确性。另外,实测的悬浮指标与理论值之间仍然有一定的差别。一般来说,实测值都小于理论值,即实测的悬移质垂线分布要比理论计算结果更均匀。Einstein 和钱宁还建立了悬浮指标实测值与理论值之间的关系,称为扩散理论的第二近似解^[10]。

Rouse 公式的基本结构是正确的,但其计算的水面含沙量为零,床面处的浓度为无穷大,这与天然河流中所观察到的结果不符。为了克服 Rouse 公式的不足, van Rijn^[24] 认为半水深以下扩散系数为抛物线形式,半水深以上为常数。

$$\varepsilon = \begin{cases} \kappa u_{*c} z \frac{h-z}{h} & z \leq 0.5h \\ 0.25 \kappa u_{*c} h & z > 0.5h \end{cases} \quad (1-3)$$

文献[10]认为,Rouse 公式存在缺陷的主要原因是采用的动量交换系数是从对数流速分布推导而得的,于是用反双曲正切形式的流速分布代替对数流速分布,得到形式更为复杂的扩散系数表达式

$$\varepsilon = \frac{\kappa}{3} u_* c h \sqrt{\frac{h-z}{h}} \left[1 - \left(\frac{h-z}{h} \right)^3 \right] \quad (1-4)$$

张瑞瑾采用王志德流速分布公式,也导出一个含沙量垂线分布公式^[10,25],在水面处含沙量也不为零,其公式结构更为复杂,这里不再赘述。王兴奎和钱宁^[26]考虑了颗粒间离散力对浓度分布的影响,得出了扩散系数与粒径直径、密度之间的关系,即泥沙扩散系数将随泥沙粒径和密度的加大而增大,还随泥沙浓度的增大而加大。张小峰和陈志轩^[27]从扩散方程出发,根据黏性流体的非滑移条件,考虑了泥沙颗粒周围有部分流体随泥沙一起运动的特点,假定垂直方向的时均流速为零,得到了一个新的悬沙浓度方程。倪晋仁和王光谦^[28]根据掺混长度理论,假定垂向脉动流速 v' 为正态分布,结合泥沙颗粒垂线运动方向运动的特征长度 L_1 ,确定扩散系数为

$$\varepsilon = \frac{1}{2} L_1 |v'| \quad (1-5)$$

并得出了悬沙分布公式(详见文献[28])。当该公式中系数 n 取 1 时,简化为 Rouse 公式。

最近,Nielsen 和 Teakle^[15]分析了传统扩散理论的不足,并利用泰勒级数展开方法分析浓度分布本身对扩散通量的影响,提出了有限掺混长度理论,为从根本上弥补扩散理论的不足提供了新的思路和方法。

1.2.3 波浪作用下含沙量垂线分布研究的进展

这里所指的波浪作用不包括破碎波。一般情况下,悬沙浓度从海床底部开始向上逐渐减小,大部分悬浮泥沙集中在海床附近一个较小的范围内。波浪作用和单向水流作用相比有其特殊的地方,主要表现在两个方面:一是单向水流可以是恒定的,而波浪水流一定是非恒定的;二是单向水流中边界层能够得到充分发展,全部水深都可以存在紊流剪切应力,而波浪水流流速在较短的时间内正负交变,边界层得不到充分发展,只有在床面附近很薄的一层受到床面影响而存在剪切应力,形成近底边界层。因此,恒定的单向水流中,泥沙可以达到平衡状态。波浪水流中,随着波浪相位的改变,水流特性周期性变化,泥沙浓度分布也具有周期性,而泥沙浓度分布的周期平均才可以看做是平衡状态。因此,波浪作用下的泥沙研究可以划分为两种:一种是时间相关的,主要研究泥沙浓度的周期性变化;另外一种是时

间不相关的,主要研究相对平衡状态下时间平均的浓度分布。以往研究绝大多数都是针对时间平均的泥沙浓度分布进行的,而对泥沙浓度周期性变化的研究则相对较少,其中 Wikramanayake 的研究^[29]具有代表性。Wikramanayake 采用时间不变的扩散系数,利用多重尺度法,对悬沙浓度周期性变化进行了分析。然而,从以往的研究成果和实际应用来看,合理确定时间平均浓度和速度分布对描述海岸泥沙运动更为重要^[30]。因此,本书将主要对波浪作用下时间平均的泥沙浓度分布进行研究,下面的阐述也仅涉及这方面内容。

由于现场测量容易受到不确定因素的影响以及测量技术的限制,在波浪边界层以内的现场测量一直受到限制。早期的研究用振荡流实验来模拟波浪近底水体的运动,对边界层附近的泥沙浓度进行测量,得到了很多成果。随着技术的发展,大尺度波浪水槽实验兴起,激光、声呐、雷达等先进测量技术开始应用^[31],波浪作用下泥沙悬移的研究有了新的进展,使在全水深范围内研究纯波浪作用下的悬沙浓度分布成为可能。在波浪边界层和波浪悬沙研究方面,Jonsson^[32]、Kamphuis^[33]、Jonsson 和 Carlsen^[34]、Hino^[35]、Sleath^[36]、Jensen^[37]、Thorne^[38]、Dang Huu^[39]等人的实验和 Smith^[40]、Grant 和 Madsen^[41]、Myrhaug^[42]、Kennedy^[43]、Kos'yan^[44]、Nielsen^[45]、Thorne^[38]、Dang Huu^[39]等人的理论分析都是当今研究的基础。

Nielsen 认为泥沙扩散有扩散和对流两种形式,并按照扩散形式的不同,提出了扩散、对流和扩散—对流混合三种模式,并指出全面考虑扩散和对流过程才能更合理地解释泥沙悬浮^[45]。大多数研究者在对扩散方程的简化过程中忽略了对流项,不考虑对流过程,结果属于扩散模型。从 Thorne^[38]的分析中可知,三种模式的结果没有多大的差别,而且已有包含对流项的模型基本都可以转化为扩散模型的形式。这样,在根据实验结果调整扩散模型中参数时,可以认为已经隐含了对流的影响。

在以往的工作中,波浪边界层内扩散系数的研究常常借鉴单向水流中的研究成果,其形式往往与单向水流中相似。值得特别说明的是,最近 Teakle 和 Nielsen^[15]以及 Absi^[46]对波浪边界层内泥沙浓度的研究很有新意,值得借鉴。Nielsen 和 Teakle 分析了传统扩散理论的不足,并利用泰勒级数展开方法分析浓度分布本身对扩散通量的影响,提出了有限掺混长度理论,为从根本上弥补扩散理论的不足提供了新的思路和方法^[15]。Absi 利用该理论对泥沙颗粒对掺混长度的影响进行了分析^[46]。本书对悬移质泥沙浓度分布的研究也将在有限掺混长度理论的基础上展开。

在现有悬沙模型中,边界层以上部分,尤其是接近水面部分的悬沙浓度预测很不理想,其主要原因在于:一方面此处的泥沙浓度已经很低,不易测量;另一方面,

对波浪边界层以外区域泥沙悬浮机理的认识还不成熟。最近,我们在 Kennedy^[43]和 Kos'yan^[44]研究的基础上,对波浪作用下上部水体的泥沙悬浮机理进行了分析,认为泥沙悬浮的主要因素从近床面的紊动扩散逐渐过渡到自由表面的波动水质点周期运动,提出了全水深悬沙扩散系数的表达式,建立了时均浓度分布的显式解析模型^[48]。但该模型中某些参数的确定还需要更多的研究。本书部分内容将针对该问题进行探讨。

1.2.4 波流共同作用下含沙量垂线分布研究的进展

潮流和波浪共存情况下,流和波的相互作用与两者的相对强弱、夹角等因素密切相关,即使只考虑水流自身问题,情况已很复杂。一般认为,波浪和水流相互作用下水流和波浪的内部结构都要发生变化。有些研究者发现波浪叠加逆流时比叠加顺流时波高衰减快,并认为是由于不同方向的水流对波浪边界层结构影响不同造成的^[49,50]。而 Nielsen 的研究表明这种解释是不合理的,实际上流的叠加对波浪边界层的影响是微弱的,对波浪能量耗散的影响也是微弱的,流对波的影响主要发生在外层,反映在波群速度上,进而影响波高的变化^[45]。练继建和赵子丹在研究波流共存场中全水深水流流速分布时也指出,低剪切率和紊流度的水流运动对高剪切率和紊流度的波浪边界层的影响要比波浪对水流的影响小得多^[51]。波浪对水流的影响主要反映在流速分布上。一般认为^[52]波浪传播方向和流的流动方向相反时,摩阻流速会较没有流而只有波时的摩阻流速小,在方向夹角垂直时,减小的程度达到最大。同理,方向相同时,摩阻流速会增大。而且这种增大和减小的比例随着波流强度趋于相当的程度而增大^[53]。复杂的水流条件,必然导致更为复杂的泥沙浓度变化,因此波流共同作用下泥沙浓度的研究需要采取适当的简化措施,忽略一些次要因素。

在波流共存流场中,沿水深可分为波流边界层、对数层和外层^[51]。泥沙运动主要发生在波流边界层和对数层。波浪因素的存在使波、流共存时的水体运动为非恒定流,速度随时间变化,泥沙浓度分布也随时间变化。正如前面纯波浪作用时所述,目前波流共同作用下也以时间平均的悬沙浓度分布研究为主。

You^[54]在对波流共同作用下流速的研究中指出,在边界层以内涡粘系数主要由波浪条件控制,而边界层以外涡粘系数主要由流的条件控制。因为传统上认为扩散系数和涡粘系数相等或成固定的比例关系,所以有学者认为在边界层以内,扩散系数主要由波浪条件控制,而边界层以外扩散系数主要由流的条件控制。Grant 和 Madsen^[41]的双层涡粘系数(扩散系数)模型正是这种结论的体现。Glenn 和 Grant 在 Grant 和 Madsen 模型的基础上,将双层涡粘系数(扩散系数)改进为三层