

## 近海与河口粘性泥沙输移过程

## ——第六届INTERCOH 2000综述

时钟, 李世森, 李艳红

(上海交通大学 港口与海岸工程系, 上海 200030)

**摘要:** 第六届近海与河口粘性泥沙输移过程国际学术会议主要包括以下内容: 1) 粘性泥沙与湍流的相互作用; 2) 淤泥动力特性的现场观测; 3) 粘性泥沙输移过程的数值模拟; 4) 絮凝作用和絮凝团沉降速率; 5) 淤泥底床侵蚀、固结过程。主要进展表现在: 1) 分形理论被应用于粘性泥沙运动; 2) 水声学技术、PIV技术的应用; 3) 原位剪应力测量装置(ISIS)被应用于测量淤泥表面、床体上的侵蚀剪应力分布; 4) 生物对粘性泥沙运动影响的研究, 即利用环形水槽实验等, 探讨异养细菌、超细胞聚合物对粘性泥沙稳定作用的影响; 5) 一种健壮、有效的适应有限元数学模型, 考虑絮凝、非牛顿流及高浓度下的湍流耗散, 被用来解决粘性泥沙的输移问题。

**关键词:** 粘性泥沙; 近海与河口

**中图分类号:** TV148    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0468-155X(2002)03-0074-07

近海(海岸、大陆架)与河口(港湾)水体中含有大量粘性细颗粒泥沙, 即粒径小于 $4\mu\text{m}$ 的粘土和一定比例的粉砂(粒径在 $4\sim 62\mu\text{m}$ 之间)。粘性细颗粒悬沙一般不以单颗粒的形式存在, 而是同附近其它大量的悬沙颗粒结合在一起, 并形成一定的结构, 这种相邻颗粒在一定条件下结合成集合体的作用被称为“絮凝作用”, 通过絮凝作用结合而成的这种结构体称为“絮凝体”。近海与河口粘性泥沙输移过程是海洋学家、港口航道与海岸工程师和环境流体力学家共同感兴趣的研究课题。

由美国Florida大学海岸及海洋工程系A. J. Mehta教授发起的INTERCOH会议(Mehta, 1986)提供了一个国际性的讲台, 使年轻的、有经验的和世界领先的科学家和工程师相聚并讨论粘性泥沙的性质及该领域的最新进展。第六届近海与河口粘性泥沙输移过程国际学术会议(简称INTERCOH 2000)于2000年9月4日~8日在荷兰WL/Delft Hydraulics和Delft理工大学召开, 它的内容: 粘性泥沙的输移——尤其是近底床过程的现场和室内测量及数值模拟。本文目的: 1) 对本次会议进行简单综述; 2) 指出主要研究进展及重点研究的方向, 作为此领域我国科学工作者今后的工作参考。

## 1 粘性泥沙与湍流的相互作用

悬浮颗粒的浮力效应要消耗一定湍流能量, 从而消耗了水体的湍动扩散能力, 这对于由水流引起的粘性泥沙输移存在重要影响。比利时Leuven Katholieke大学土木工程系的E. A. Toorman, 荷兰Delft理工大学土木工程系与地球科学学院A. W. Bruens等采用Prandtl混合长度和 $K-\epsilon$ 湍流模型, 结合Delft理工大学的直水槽实验, 研究了在密度梯度(由局部淤泥块引起)导致集中悬浮时湍流的衰减, 并将数值模拟结果与实验结果做了比较。此外, E. A. Toorman还开发了一种悬沙湍流模型, 该模型的边界处理方法以更精确的Prandtl混合长度理论为基础。加拿大Institut de Science de la Mer de Rimousk的D. Cloutie等研究了循环水槽中高浓度悬沙对湍流结构的影响。

美国Stanford大学土木与环境工程系的M. L. Brennan与S. G. Monismith和地质调查局的D. H. Schoellhamer与J. R. Burau研究了旧金山港某地潮汐不对称引起的侵蚀现象。他们在一个局部分层河口的大潮、低潮阶段测量了近底床水流速度、悬沙浓度和湍动泥沙通量。此外, 他们还采用悬沙浓度的垂向分布计算潮汐时段底床与水体之间粘性泥沙的通量, 研究了旧金山港某地淤泥底床和水体之间粘性泥沙的交换。

基金项目: 国家自然科学基金(49806005)和国家教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金(教技函[1999]2号)。

作者简介: 时钟(1965-), 男, 江苏泗阳人, 上海交通大学教授。

收稿日期: 2001-03-12

## 2 淤泥动力学的现场观测

瑞典Goteborg大学地球科学系的R. L. Steven研究了两个无潮港口的泥沙源与通量问题。他们对Goteborg港进行了极其细致的研究(50~200个取样位置),以描述低潮环境的变化。采用方法包括:1)采用声学方法对泥沙进行监测和取样以获取沉积的厚度和特性;2)解释物理过程;3)分析地球化学倾向;4)使用联合数据库对过程和结果进行定量分析;5)在GIS范围内获得一个概化模型。

荷兰的E. J. Houwing和WL/Delft Hydraulics的I. C. Tanczos与M. B. de Vries采用现场与实验室方法,在多种水流、波浪、水深和植被情况下测量了流速的垂向分布、湍流和漩涡的扩散情况。现场测量揭示:1)水流、波浪、悬沙浓度和水生植物之间的关系;2)波浪运动与悬沙浓度之间存在直接联系。对这些数据分析后证实,悬沙浓度的增大是由当地床体的侵蚀引起的(不包括水平输移)。实验数据已经用于验证1DV(垂向一维)水动力—沉积模型。根据现场测量和实验室试验可以得出这样的结论:1)观察到的浑浊带水平梯度的巨变主要是由于当地波浪运动的减弱引起的床体泥沙再悬浮的减弱;2)由于水生植物的糙率影响,会导致水面升高和产生与波浪传播方向相反的水流,会进一步增大浑浊带梯度。

印度Calcutta大学海洋科学系的A. Bhattacharrya建立了印度东部的热带中—大潮海岸红树林区的淤泥输移与淤积模型。荷兰Utrecht大学海洋与大气研究学院B. M. Janssen Stelder 与P. G. E. F. Augustinus研究了越南红河三角洲海岸红树林区的泥沙沉积率。该项目是为了研究红河三角洲环境下红树林促淤沉降的方式,研究结果将会提供相关的数据用于预报这个地区红树林的发展前景。

美国Connecticut大学海洋科学系的W. F. Bohlen进行了河口浮泥运动的时间系列观测,时间范围为数星期到数月,随风暴频率而变化,观测结果表明Olsen's 湾内的沉积是以空间和时间的高次方为自由度的多变量系统。美国的B. W. Nelson研究了河口异常最大浑浊带现象。对纵剖面 and 退潮进行的一系列站点观测表明:在平均或较高流量的淡水流中,典型的最大浑浊带发生在盐水入侵的最高点。巴西的C. A. F. Schettini定量确定了巴西南部Itajaí-Au河口在两个高流量情况下近底粘性泥沙输移量。结果表明:1)在Itajaí-Au河口,与发生单向海流时一样,偶发的临界高流量现象对粘性泥沙的运动起着非常重要的作用;2)此时也会伴有比潮流时更大的临界底部剪应力。

丹麦Copenhagen大学地理学院的T. J. Andersen与M. Pejrup和荷兰内陆水管理与废水处理研究院的E. J. Houwing研究了注入淡水系统中的细颗粒泥沙的侵蚀。对测量所得到的数据与样品进行了以下物理及生物学参数的比较:干、湿容重、粒径、碳元素及叶绿素的含量。与潮汐中的区域得到的结果相比,本项研究结果说明:侵蚀受到大型动物群落和水底藻类的影响并不显著,正确结论是它很可能受淤积率的影响,而略微受到泥沙的生物学属性的作用。

高含沙层(HCMS)被定义为有牛顿行为的粘性悬沙,它与湍流区存在着明显的相互作用。典型的HCMS浓度范围为几百mg/l到几千mg/l。荷兰WL/Delft Hydraulics的J. C. Winterwerp研究了底部高含沙层的动态特性,讨论了这些类型的淤泥悬浮和相关的物理过程与时间尺度,详细描述了底部高含沙层的形成、行为和混合及垂向一维(1DV)数学模型。试验采用一个Prandtl混合长度及 $K-\epsilon$ 湍流封闭模型的垂向一维模型进行模拟的。由两个模型得到的数学结果都很令人满意,说明他们适合于模拟水底集中悬浮的混合与发展过程的特征。法国Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels的N. Gratiot等研究了在分散湍流栅栏振荡试验中的底部高含沙层。他们使用了振荡栅栏试验中饱和浓度的概念。当流质淤泥进入由振荡栅栏水箱产生的分散湍流中时,可以观察到稳定的底部高含沙层。底部高含沙层分界面以下的流动Richardson数随泥沙浓度的时间平均值表现出大幅度的变化。

这种变化主要是由于沉降速度的改变引起的,因为沉降速度随粘性泥沙浓度做大幅度变化。巴西Rio de Janeiro联邦大学Afonso de Moraes Paiva与S. B. Vinzon进行了Amazon大陆架地区的细颗粒悬沙和水动力相耦合的研究。他们采用一个二维水动力模型对水动力的影响(包括密度变化和流体粘度变化)进行了研究和参数化,并且调整到适应Amazon大陆架地区水流的垂直及海岸方向的主要特征。

荷兰Rijkswaterstaat, Limburg Directorate的W. van Leussen研究了Ems河口的浮泥层。测量结果表明:1)浮泥层包括流动和固结部分;2)研究包括底部浮泥层在内的垂直悬沙浓度分布的关键问题是沉降和湍流耗散混合的过程。加拿大ASL环境科学公司的J. H. Jiang 和美国Florida土木与环境工程系的A. J. Mehta研究了中国的椒江河口的泥跃层不稳定性, 探测到低频和高频内波, 其波高与角频率都随着Richardson数的增大而减小。

### 3 粘性泥沙运动的数值模拟

法国EDF-LNHE的V. M. Markofsky与O. Petersen等对河口粘性泥沙输移进行了数值模拟, 并对几个数学模型进行了相互比较。一个是垂向一维(1DV)模型, 用于模拟有关量的垂向运动过程, 尤其是悬沙引起的湍流耗散。为了研究粘性泥沙的固化过程, 他们开发了基于絮凝体结构的分形表达式的Gibson方程的替换形式, 并在数学模型中进行了检验。另一个是垂向二维(2DV)模型, 并对一个概化河口进行了模拟。

韩国海洋研究与开发学院海岸与港口工程研究中心的D. Y. Lee与S. L. Hyun, 美国William与Mary大学Virginia海洋科学学院的J. P. Y. Maa共同进行了黄海海岸水体不同环境下粘性泥沙输移三维模型的模拟检验, 从而能够对粘性泥沙输移进行更真实的模拟。丹麦水力学研究所的O. Petersen与H. J. Vested, 英国Plymouth大学海洋研究所的A. Manni ng等对Tamar河口的淤泥输移的数学模型进行了研究, 开发了粘性泥沙动床三维模型。为了能够对所测量直河段提供较高分度的解析, 他们采用一个垂向二维(2DV)的水动力模型描述河口中的水流, 此模型覆盖了河口的整个上层部分。模型以Reynolds方程和垂向的Sigma网格为基础。这个水动力方程耦合了盐度和悬沙方程。采用的K- $\epsilon$ 湍流模型, 包含了由浮力引起的盐度和悬沙梯度之间的相互作用。

法国IFREMER的P. Le Hir与F. Cayocca研究了连续模型的概念在开敞海域淤泥滑坡研究中的应用。在上届INTERCOH会议(McAnally与Mehta, 2000)中已经对这个概念作了介绍, 它把泥沙与水体作为一个整体综合考虑, 而不是考虑两者之间的经验性交换。他们把这个概念应用到开敞海域斜床体的浑浊流试验中, 并试图模拟1979年Nice机场扩建中发生的一次灾难性滑坡。从2DV模拟所得结论是典型浊流模式, 即泥沙的快速滑坡, 水的再循环及上部悬沙的扩散有规律地发展。

上海交通大学港口与海岸工程系钟通过采用现场观测资料(大潮和小潮的流速、盐度和含沙量资料)、平面二维(2HD)水动力、悬沙运动数学模型, 对长江口北槽最大浑浊带的动力学进行了研究。在北槽口外, 最大浑浊带形成的主要动力过程则是河口底部泥沙的周期性再悬浮。在北槽口内、口外最大浑浊带中, 细颗粒泥沙的再悬浮过程也存在着一定的周期性。此外, 由盐度、悬沙浓度层化引起的“层化抑制湍流”也是北槽口内、口外最大浑浊带的形成机制之一。采用的基本控制方程是通过潮汐作用下的水流动量方程及悬沙对流扩散方程沿水深方向积分而获得的。为保证模型的稳定性, 对方程的离散采用了ADI格式, 并对动量方程中的对流项和粘性项进行了两次迭代求解。模拟结果与长江口同步实测水位、流速资料的对比验证, 拟合情况良好。

英国Heriot-Watt大学土木与海岸工程系的F. G. Marvan等共同研究了富含有机质泥沙的周期性输移, 即Floria现象。富含有机质泥沙对粉沙的输移特征比如沉降、固结和侵蚀有着不同的影响。由于存在这些影响, 在进行河口泥沙输移的建模时就很有必要考虑它们。应用泥沙与放射核输移的三维(3D)细颗粒解析模型, 乌克兰数学机器与系统问题研究学院的M. N. Yu等研究了Chernobyl冷却水池及Dniper-Boog河口的淤泥输移。模型结果是通过作为粘性泥沙示踪物的 $^{137}\text{Cs}$ (铯)和 $^{90}\text{Sr}$ (锶)得到的数据进行分析的。

日本Fukuoka大学土木工程系的R. Watanabe与Kyushu大学城市规划与环境工程系的T. Kusuda等对Rokkaku河的河床淤泥形成过程进行了现场观测及数值模拟。他们所建立的模型除了河床淤泥层的边缘部分以外精确地再现了这种过程, 模拟结果都很好地解释了观测结果。如果考虑到由淤泥破坏导致的曲面破坏和冲洗过程, 那么就会得到更加吻合的结果。

法国EDF-Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement的D. Violeau与C. Cheviet对Loire河口的粘

性泥沙输移进行了三维数值模拟。该数学模型能够再现风力和科氏力效果,且不存在潮汐漫滩时产生的边界问题。现在他们已经验证了潮汐水动力和河流流量的几种组合情况。水位和盐度的模型结果能够很好地与现场数据吻合,泥沙的模型结果正与测量结果相比较。

丹麦水力学研究所的O. Petersen与H. J. Vested对淤泥输移数学模型中垂向交换过程进行了运算描述。论文阐述了高浓度含沙层的挟运作用,以及它在2HD淤泥输移模型中的实现及应用。他们还对潮汐环境下底部含沙层的挟运作用采用垂向一维 $K-\epsilon$ 湍流模型(适用于理想潮汐河口环境)进行了量化分析。分析结果用于建立水平淤泥输移模型中的挟运关系并将这个模型用于研究一个实际河口,并将其结果与观测结果作了对照。

英国Edinburgh大学土木与环境工程学院的D. Mayne等提出了一种粘性泥沙输移的适应有限元解法。这个健壮、有效的有限元模型,考虑絮凝、非牛顿流及高浓度下的湍流耗散,用来解决粘性泥沙的输移问题。美国Horn Point实验室的L. P. Sanford等对Baltimore港中受污染泥沙的输移进行了数值模拟。此模型能够定量预报该港口各分区内和分区间污染物的运动、转化及最终结果。目前,这种由泥沙运动和污染运动结合的模型仍然处于研究之中。

#### 4 粘性泥沙絮凝作用和絮凝体沉降速率

英国Plymouth大学海洋研究所的K. R. Dyer等对粘性泥沙絮凝作用和絮凝体沉降速度进行了观测与数值模拟。目的是通过现场测量,研究絮凝体、絮凝体沉降速度、有效密度与各种控制湍流模型之间的关系。1998年9月在Tamar河口的最大浑浊带范围内进行了现场测量,测量完全限制在陆地方向的淡水区内。当盐水随着退潮离去之时或者随着涨潮而来以前,就会发生淤泥底床泥沙的侵蚀。他们建立了一个三维粘性泥沙絮凝模型,解释了湍流引起的团块与间歇过程之间的相互作用。这个模型被用于模拟Ems河口的最大浑浊带的形成过程,并与一系列的测量值作了比较。模拟结果表明,他们所观测到的憩流期泥沙悬浮迅速减少的情况只有在同时考虑絮凝作用和泥沙引起的成层作用时才能得到。

英国CCMS Plymouth海洋实验室的A. J. Bale等采用激光反射粒径分析装置,在一个环形水槽内对粘性泥沙层化的形成和中断进行了直接观测。结果表明:层化的层次和沉积作用都会随盐度和悬沙浓度的增大而上升。其中,悬沙浓度所起的影响远大于其他因素。数学模型表明:悬沙颗粒的中值粒径和沉降率与水流速度和悬沙浓度之间成隐式非线性关系。

韩国海洋研究与开发学院海岸与港口工程研究中心的K. S. Park就湍流对粘性泥沙的絮凝作用和沉积作用的影响进行了实验研究。实验的目的是解释湍流环境下的絮凝过程和沉降过程,从而研究湍流对絮凝体的产生、增长和沉降的影响。结果表明:在临界的湍流强度之下,湍流会增加颗粒碰撞和絮凝体的发展与增加。他们检验和讨论了现有的絮凝作用和沉降速度模型及此次试验结果,也对在转动平板产生的真实湍流环境下絮凝作用的进一步试验作了介绍。

美国USAE水道实验站的W. H. McAnally和Florida大学的A. J. Metha采用水槽实验,研究了粘性泥沙的层化和沉积率。在水槽实验中,采用一个多级层化和沉积过程的一维装置,可以合理而精确的描绘泥沙层化作用和沉积。它适合作为三维泥沙输移数值模型计算的一个组成部分,为了避免增加计算负担,它可以有效地用作分析工具来开发层化过程的增强参数模型,也可以作为实验室和现场研究的插值工具。他们所检测的天然淤泥的行为比单独的高岭土矿的行为更容易预报。这种现象的一种可能的解释就是天然泥沙颗粒表面的金属和氧产生了额外的均匀粘度。

美国Florida Atlantic大学海洋工程系的P. D. Scarlatos与H. S. Kim进行了粘性沉降颗粒的分形学研究。他们采用一个修正的Smoluchowski的颗粒碰撞理论成功地建立了粘性泥沙颗粒的聚集与絮凝作用过程的模型。模型适用于运动的与静止的悬浮层。他们对模拟颗粒的几何特性通过分形学进行了分析,结果与在其他文献中报导的数据相符合。

英国HR Wallingford的W. Robert对絮凝体的大小和沉降速度进行了测量和模型参数化。论文说明了絮

凝体大小及沉降速度的测量,以及如何定量地研究絮凝体的特性,以便数学模型应用,为实际工程研究服务。在工程应用中经常采用水流和泥沙输移的深度平均模型,本文讨论了悬沙沉降速度和浓度垂向分布的表示。

荷兰内陆水管理和废水处理研究院(RIZA)的M. van Wijngaarden与海洋与海岸管理学院(RIKZ)的J. R. Roberti研究了细颗粒泥沙沉降速度和粒径分布的原位测量。LISST装置提供了更方便的途径获取有关悬沙的沉降速度和粒径分布的重要信息,甚至提供了一个得到质量浓度的新方法。

## 5 淤泥底床侵蚀过程

英国Oxford大学的D. G. Linter与G. C. Sills和HR Wallingford的B. Robert与N. Feates研究了室内沉降筒中淤泥床体沉积物的侵蚀特性。原位剪应力测量装置(ISIS)已经由H R Wal lingford开发并应用于测量淤泥表面、床体上的侵蚀剪应力剖面。这种装置结合静态泥沙系统与Oxford大学的X射线可以检验各种类型的床体侵蚀属性。对照应用剪应力划分浓度可以得到在有剪力增加情况下不同床体的侵蚀率。结论表明:1) 侵蚀率对不同床体类型来说是不同的; 2) 床体上部应力会随时间发展; 3) 直接观察表明上部床体会在侵蚀中液化——采用X射线密度剖面确认。

德国Stuttgart大学水力学研究所的B. Westrich与O. Witt研究了非扰动粘性泥沙核的临界侵蚀剪应力分布。泥沙侵蚀检验必须在实际水流环境下进行,从而为粘性泥沙的数值输移模型的正确建立提供可靠的参数。现已建立了两个不同尺寸、不同设计的试验装置用于非扰动泥沙的测量。这项技术使我们能够估计原位泥沙侵蚀度,也使得试验研究能够应用于粘性泥沙输移的数学模型。

德国Aachen理工大学水利工程与水资源管理学院的C. Schweim等对粘性泥沙的源项和沉降项进行了数值验证。试验、水流和泥沙输移的耦合模型可以把试验研究结果直接转化为数学描述形式。将来,还要把生物作用对侵蚀和沉积的影响考虑进去。目前正在环形水槽中进行关于这个项目的试验。他们还在环形水槽中利用异养细菌对生物生泥沙的稳定作用做了模拟。

加拿大国家水资源研究所的B. G. Krishnappan研究了粘性泥沙的疏松沉积“绒毛”层的侵蚀行为。论文描述了这种绒毛层的实验室研究。目前的试验表明沉积历史会影响绒毛软质高岭土床体的侵蚀。

法国CNRS IFREMER的G. P. Sauriau与Le Hir研究了Hydrobia ulvae生物悬浮影响的建模。他们将试验水槽研究与垂向水动力数学模型(1DV)相结合。由于在1DV数学模型中选取了决定性生物方程,现在已有可能检验在变化环境(指不同的浸水和生物扰动时间、Hydrobi a ulvae充分程度和干密度剖面)下水底生物效应和物理作用的单独影响以及它们二者相互之间的作用(以粘性泥沙再悬浮方式)。

英国St. Andrews大学的Gatty海洋实验室的T. J. Tolhurst等研究了超细胞聚合物(EPS)对粘性泥沙稳定性的影响。他们在实验室采用了两个侵蚀装置研究了EPS对清洁粘性泥沙的侵蚀特性(临界值和速率)的影响。其结果与天然泥沙的原位测量作了比较。对现场处于高生物量水底微生物(真菌)中(即有高EPS浓度)的泥沙的侵蚀响应类似于实验室处理的高浓度EPS泥沙的侵蚀响应;对现场低水底微生物量(即有低EPS浓度)地区的测量类似于实验室处理的有低EPS浓度或零EPS浓度的测量。

## 6 淤泥底床固结过程

英国HR Wallingford的W. Robert等就粘性泥沙沉降特性进行了观测与数值模拟。1998年9月他们在Tamar河口的Calstock进行了现场测量。同时,室内沉降在荷兰Delft理工大学和Oxford大学展开。沉降筒实验集中研究床体密度和强度与沉积形成方式之间的关系。

比利时Leuven Katholieke大学土木工程系的E. A. Toorman与K. C. Leurer建立了一个用于研究粘性泥沙床体的水动力行为的模型。模型是通过对各种普通自然环境的模拟进行验证和建立的,例如由于波浪引起的自重固结作用及流化作用(它们有可以采用的实验数据)。一个实际问题就是必须知道泥沙床体的完整初始状态(它表明了微孔水压力分布)。这个状态只有两种可能:均衡状态的“老”床或者不存在床体。一个新床的形成只有考虑沉积泥沙的流动和相应床体的表面变化时才可以描述。这需要对表面密度值进行假设。基于已知

淤泥骨架的形成需要颗粒间的接触,他们假定絮凝颗粒是根据某一个最大叠加来决定的,它等同于同样是球体的最大叠加(例如64%)。这样床体模型同样需要一个絮凝模型以计算组成床体表面的絮凝体的密度。

荷兰Delft理工大学土木工程与地球科学学院的L. M. Merckelbach等对淤泥床体的强度进行了数值模拟,目的是通过实验和理论研究加深理解软质固结淤泥层的强度变化过程。通过测量与叶片测试模型比较结果显示两次作用起的效果是一样的。首先,既然有效应力作为固化作用的结果随时间增加,那么强度也随着有效应力和时间增加。其次,真实粘度在大时间尺度内缓慢增加。后者的作用似乎独立于固化过程。

荷兰WL/Delft Hydraulics实验室的W. van Kesteren与T. van Kessel研究了粘性泥沙中气泡的集结与增长。此项研究的目的是在试验和理论分析的基础上,探讨粘性泥沙中气泡的集结与增长的过程,为估计它们对泥沙属性的影响提供途径。气泡的集结和增长并不被集结位置的数量所限制。气泡在下列情况下会脱离颗粒填质:1)上升力超过了填质强度;2)气泡向水面方向产生了爆破,为气体输移制造了途径。前一个过程需要填质的低强度,后者则需要高强度。在中等强度下,气体碎片的原位值可以超过0.10甚至0.20。

## 7 其它

利用分形学理论,德国Stuttgart大学水力学研究所的T. Dreher与B. Westrich研究了细颗粒悬沙的沉降。在建立沉降模型时,粘性细颗粒泥沙的沉降速率不再是一个重要的参数,因为它主要取决于湍流运动及床部的附着力。试验采用非常细的泥沙(直径处于 $2\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 之间的石英)来研究湍流环境下的沉积。沉积的开始和泥沙输移能力不只是取决于中小范围的床体形式如何产生底部剪力。泥沙建模不但与底部剪力的平均值有关,而且与底部剪力的较高力矩和湍流能量的扩散谱分布有关。

荷兰Delft理工大学的M. van Ledden研究了基于过程的泥—沙混合物新模型。他建立并分析了这种模型,并且将分析结果与现场测量结果作了比较。结果表明:1)在一个底部剪应力相对较低的区域,采用局部水动力学参数预报某特定地点的淤泥成分是不太有用的;2)除了局部水动力学性质,局部淤泥浓度、局部沉降速度、床体的混合属性、取样深度等都是决定局部床体成分参数。

美国Virginia海洋学院的J. P. Y. Maa与J. I. Kwon以及韩国海洋研究与开发学院的D. Y. Lee采用了超声波(大约1Mhz)以确定海洋泥沙的技术特性(例如泥沙密度、渗透率),并将其与泥沙的侵蚀率相联系,这是一项很有发展前景的技术。实验室物理试验的结果也证实了他们的估计。英国Edinburgh大学土木及环境工程学院的M. Crapper与T. Bruce采用超声波成像结合PIV技术测量淤泥的输移过程,第一次定量研究了泥跃层上界面波的动力学。

## 8 几点结论与建议

就作者的粗浅认识,第六届近海与河口粘性泥沙输移过程国际学术会议主要进展表现在:1)分形学在粘性泥沙运动中的应用,(a)基于絮凝体结构分形表达式的Gibson方程的应用;(b)修正的Smoluchowski的颗粒碰撞理论被用于成功地建立粘性泥沙颗粒的成层与絮凝作用过程的模型;2)声学技术、PIV技术的应用;3)原位剪应力测量装置(ISIS)已经应用于测量表面侵蚀剪应力和淤泥床体上的侵蚀剪应力剖面;4)利用环形水槽等实验探讨异养细菌、超细胞聚合体对泥沙的稳定作用;5)将适应有限元解法应用于粘性泥沙输移。一种健壮、有效的有限元模型结合絮凝模型、非牛顿流及高浓度下的湍流耗散模型,应用于解决粘性泥沙输移的问题。以上几个方面的进展可以作为我国同行科学家今后工作的参考。

**致谢:**感谢上海交通大学蒙民伟海外发展教育基金会、国家教育部博士生导师出国合作项目的支持,两位评审专家提出了建设性意见。

---

**参考文献**

- [1] McAnally, W.H. & Mehta, A.J. 2001 Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes. Proceedings of the 5th International Conference on Cohesive Sediment Transport. Proceedings in Marine Science 3. Elsevier, Amsterdam: 1-540.
- [2] INTERCOH 2000 Abstract. WL/Delft Hydraulics, The Netherlands: 1-111.
- [3] Mehta, A.J. 1986 Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Science 1. Elsevier, Amsterdam: 1-111.