

河口海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程*

ESTUARINE AND COASTAL BOTTOM BOUNDARY LAYER AND FINE SEDIMENT PROCESSES

时 钟

(上海交通大学港口与海岸工程系 200030)

水动力、细颗粒泥沙过程是淤泥质河口海岸变化的重要物理过程;并具有这样的特征:强密度梯度、高度不稳定和非均匀流、高浓度泥沙、底床与流相互作用、难确定的底床/水界面。淤泥质河口海岸水动力、细颗粒泥沙过程的研究主要起因于:1) 海洋科学的基础理论研究;2) 港口航道的建设、维持(整治、疏浚)、海岸防护工程实践等需要。

就淤泥质河口海岸水动力、细颗粒泥沙过程而言,水流最重要的部分是底部边界层。为计算河口海岸水流中的底床切应力,必需考虑边界层。在淤泥质

* 国家自然科学基金资助 49806005 号和国家教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助教技函[1999]2 号。

收稿日期:2000-05-21;修回日期:2000-07-15

河口海岸底部边界层内,强劲的潮流、波致流可以引起淤泥底床沉积物的侵蚀或再悬浮,产生悬沙浓度的垂直分层现象,反过来这又影响潮流、波致流。

海岸底部边界层和非黏性泥沙运动研究得相对深入,如:日本东京大学土木工程系 Horikawa^[12]、澳大利亚 Queensland 大学土木工程系 Nelson^[13]曾对此进行了较为详细的总结。南京水利科学研究院刘家驹 1992 年也对波浪作用下泥沙(非黏性)运动进行了评述。英国剑桥大学工程系 Sleath 1995 年曾就海岸底部边界层和非黏性泥沙运动的研究作了详细的综述。河口海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程是海洋学家、港口航道与海岸工程师和环境流体力学共同感兴趣的研究课题。粗略地讲,海洋学家主要是以现场实验研究为主,港口航道与海岸工程师主要是进行物理模型实验和数模研究,环境流体力学家以数学模拟为主。本文就近年来国内外河口海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程研究的进展作一简要评述。

1 国内进展情况

1.1 河口底部边界层和细颗粒泥沙过程

1.1.1 现场实验 主要是河口海岸学者在几个大河河口进行。例如,沈焕庭等 1992 年、时伟荣 1993 年、贺松林、孙介民^[1]、Li 和 Zhang^[14]、时钟、陈伟民^[2]对长江口水动力、细颗粒泥沙过程进行了研究。近年来,利用声学方法,Shi 等^[15-17]对长江口北槽底部边界层细颗粒泥沙过程进行了研究。标定的声学图像揭示了:(1)高度层化的悬浮液;(2)黏性淤泥底床的再悬浮;(3)近底高含沙层的再携带;(4)近底高含沙层内的高、低频率再悬浮过程。

与中国科学家一道,美国 William & Mary 学院 Virginia 海洋研究所 Wright 等 1988 年, Wright 等 1990 年利用声学等方法研究了黄河口的近底高浓度泥沙异重流的结构和动力机制,发现了大尺度内波。Li 等 1993 年、Dong 等^[18]利用光学测沙系统研究了浙江椒江口细颗粒泥沙输移过程,结果表明:(1)大潮时,潮流不对称性产生了最大浑浊带;(2)憩流时形成的过渡泥沙层在临界流速为 $0.3 \sim 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时被冲蚀。

1.1.2 数学模拟 徐建益等 1995 年考虑沿垂线方向的泥沙运动以及不同水流条件下床沙质之间的交换,根据实测资料得出的流速与底部含沙量的关系,通过求解垂向扩散方程给出长江口南支垂线上各分层的含沙量和悬沙级配。周济福等^[3]对长江口泥

沙运动进行了垂向二维数学模拟,认为径流和潮流对输沙率的作用是耦合在一起的,非恒定情况下泥沙底部边界条件应考虑沉降效应。利用一个垂向二维模型, Guan 等^[19]对椒江口细颗粒泥沙输移过程进行了数学模拟。Chen 等^[20]对珠江口细颗粒泥沙运动进行了三维数学模拟。但是,他们并没有对底部边界层进行数学模拟。基于 Navier-Stokes 方程,考虑波流相互作用,刘应中、时钟^[4]提出了河口海岸三维水动力数学模型。

1.2 海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程

1.2.1 现场实验 尽管陈卫跃 1992 年,徐元等 1994 年,时钟等^[5]在这方面做了尝试,但由于野外作业的实际困难、观测仪器的精度,国内在淤泥质海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程的现场实验方面还是缺乏的^[21]。Shi 等 1995 年,时钟^[6]、时钟、刘应中^[7]对淤泥质海岸盐沼边界层和细颗粒泥沙过程进行了较成功的实验研究,研究结果表明:(1)大米草冠层上、下水流的复杂性;(2)在冠层内出现流速反转梯度,导致一个流速最大值;(3)大米草冠层上的水流流速切变流速大于冠层内的切变流速。

1.2.2 室内实验 赵子丹等 1993 年进行了不规则波在浮泥床面上传播的实验研究,但未涉及波浪边界层。练继建、洪柔嘉 1995 年对淤泥质床面上减阻流动的紊动特征进行了实验研究,认为淤泥质床面具有减阻、增速、抑制紊流猝发产生和减小紊动耗散率的作用。顾家龙等 1990 年根据固体颗粒的薄膜水理论,探讨了颗粒间接触面积的计算模式,并在此基础上推导了黏性细颗粒泥沙在波浪作用下的起动公式。

1.2.3 数学模拟 练继建、赵子丹 1994 年从 Navier-Stokes 方程出发,引入相应的紊流模式,从而封闭波流共存场的流动方程和波动方程,求得全水深的流速分布。练继建、赵子丹 1995 年就波浪与淤泥质底床相互作用进行了数学模拟,结果发现:(1)波浪顺流传播波高衰减率减小而泥层输移速度增大,波浪逆流传播波高衰减率增大而泥层衰减率减小;(2)波高衰减率和泥层的输移速度都具有明显的非线性特征;(3)由波高衰减产生的辐射应力对波流共存场中的水流流速分布影响明显。练继建等 1995 年从水流与淤泥质底床相互作用的动态角度来探讨黏性泥沙悬扬机理,即将水流层视为黏性体、泥层为黏弹性体,耦合求解水流和淤泥质底床的运动方程,得出界面失稳的临界水流流速、界面波波速和波长。樊社军等^[8,9]对淤泥质海岸侵蚀堆积动力机制及剖面模式

进行了数学模拟。借鉴前人的工作,采用多尺度摄动方法,樊社军等^[10]从理论上推导了波浪边界层中黏性细颗粒泥沙的再悬浮和扩散输移的规律,并用几个算例细致地分析了波浪对黏性细颗粒泥沙再悬浮和扩散输移的作用。需指出的是,在他们的研究中并未完全体现出黏性细颗粒泥沙。利用 $k\varepsilon$ 方程,吴永胜等^[11]求解了粗糙床面上波浪-水流联合作用下紊流边界层结构,结果表明:(1)在边界层内,波浪和水流的耦合运动是非线性迭加;(2)波浪的存在在很大程度上影响了水流的流速分布,而水流对波浪的影响则较小。

2 国外进展情况

2.1 河口底部边界层和细颗粒泥沙运动研究

2.1.1 现场实验 国外海洋科学家对河口近底边界层泥沙运动做了大量现场实验研究,澳大利亚海洋研究所 Wolanski 等 1988 年,美国 Florida 海岸与海洋工程系 Mehta 1989 年, Ross 和 Mehta 1989 年, Scarlato 和 Mehta 1990 年详细地研究了河口底部边界层中泥跃层和近底高含沙层的动力特性。美国 Washington 大学海洋学院 Sternberg 等 1988 年用一改装的 GEOPROBE 三角架研究 San Francisco 湾河口底部边界层的悬沙输移,泥沙浓度采用光学后散射法(OBS)观测。利用光学测沙法和一维悬沙数学模型, Wolanski 等 1988 年研究了 South Alligator 河口底部边界层细颗粒泥沙过程。Wolanski 等 1995 年又利用光学测沙法研究了 Fly 河口近底高含沙层对最大浑浊带形成的影响,结果表明:(1)最大浑浊带仅存在于大潮;(2)风在波浪所致底床液化中起十分重要作用;(3)淤泥侵蚀速率与水流速的六次方成比例;(4)悬沙沉降速率与悬沙浓度呈非线性关系。

近年来,国外海洋科学家利用声学法观测海洋环境(河口、海岸和陆架)悬沙浓度,例如,美国 Bedford 等 1988 年, Libicki 等 1989 年利用一个 3-MHz 的声学装置观测研究了 Long Island Sound 中部水下边界层沉积动力,他们观测了水下边界层底部 1 m 范围内的悬沙浓度垂线分布。利用一个环形水槽,美国 William 和 Mary 学院 Virginia 海洋研究所 Ma 等 1993 年在 Chesapeake Bay 现场观测了泥沙悬扬的临界剪切应力,这为河口底部泥沙运动研究提供了新途径。结果显示:当环速为 12 r/min 时,水槽的最大底床剪切应力大约为 0.8 Nm^{-2} 。Ma 和 Lee^[22]测得 Chesapeake Bay 底床泥沙再悬浮的切应力夏季为 0.14 Pa、秋季为

0.10 Pa。此外,他们还发现测得的再悬浮系数随底床应力的增加而增加。利用广波段声学多谱勒流速剖面仪,美国地质调查局水资源部 Cheng 等^[23-25]对加州南 San Francisco 湾底部边界层的紊流平均速度分布进行了详细观测,结果发现,在不同平均流速情形下,底部粗糙长度与参考速度有不同的关系。

2.1.2 数学模拟 对河口边界层和泥沙输移,美国陆军工程兵航道实验站 McAnally 和 Hayter 1990 年进行了详细的论述。美国 Florida 大学海岸与海洋工程系 Sheng 和 Villaret 1989 年用一个简单的二阶封闭模式模拟由泥沙导致的分层对河口底部边界层沉积动力学,尤其是侵蚀过程的影响。利用一个垂向二维宽度积分水沙、耦合数学模型, Li 等 1994 年对法国 Gironde 河口的最大浑浊带的形成和动力进行了模拟研究,模拟结果显示:(1)计算的水动力参数与观测的值呈较好的对应的关系;(2)潮流振荡导致最大浑浊带在一个潮周期内移动 15 km,最大浑浊带受紊动能场控制;(3)潮幅增加到 4.1 m 时,致使最大浑浊带的大小和强度增加。

2.2 海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程

2.2.1 现场实验 利用一水下环形水槽,加拿大地质调查局 Amos 等 1992 年对 Fundy 湾淤泥质潮滩细颗粒沉积物的可侵蚀度进行了详细的原地测量,归纳出 3 种侵蚀类型:(1)侵蚀速率随时间而递减;(2)侵蚀速率随时间而递减,但产生撕裂开的碎屑并加积达 7 mm 直径;(3)侵蚀速率随时间变化恒定。英国 Southampton 大学海洋学院 Collins 等^[26]研究了潮滩上简单潮流结构,但并没有获得潮流边界层结构。

利用一现场侵蚀水槽,荷兰 Houwing^[27]观测了荷兰 Wadden 海淤泥质潮滩的底床剪切强度。观测结果发现,临界侵蚀值介于 0.11 和 0.18 (Pa),侵蚀速率介于 5×10^{-5} 和 $3 \times 10^{-3} (\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ 之间。

2.2.2 室内实验 通过室内实验, Ma 和 Mehta 1987 年较早系统地研究了波浪作用下淤泥的侵蚀。近年来,荷兰 Delft 理工大学土木工程系 De Wit 和 Kranenburg^[28-29]对波浪作用下浮泥的产生机制进行了理论和实验研究,结果发现:当浮泥层出现时,水体层中的紊流强度减小。De Wit 和 Kranenburg^[29]的水槽实验还进一步表明:(1)当波高超过一临界值时波浪作用产生浮泥;(2)这一临界值随着固结周期而增加;(3)液化开始时测得的波浪平均毛细管水压力减小,这是由于聚积结构的破碎和有效应力的补偿。通过采

用循环水槽实验,荷兰 Delft 水力学实验室和 Delft 理工大学土木工程系 Winterwerp 和 Kranenburg^[30]研究了浮泥层的侵蚀,检验了 Kranenburg 和 Winterwerp^[31]建立的浮泥悬扬(携运)模式。他们得出这样的结论:浮泥初始悬扬(携运)过程与两层流体类似,即浮泥层上部可视为粘性流体。在这一初始阶段,悬扬(携运)率可能受边界层发展的时间尺度影响。在晚期,悬扬(携运)过程受到使泥沙悬浮的功和底床剪切强度的阻碍,可将淤泥视为 Bingham 塑性体。

荷兰 Delft 理工大学土木工程系 Van Kessel 和 Kranenburg^[32,33]就波致淤泥液化和输移进行了室内实验研究,实验结果显示:(1)液化开始时,淤泥底床内的波致应力大于底床的剪切强度;(2)液化后,斜坡底床上的淤泥在波浪和重力的综合作用下开始流动,速度为几个 cm/s;(3)重力提供了一个净坡向力,波浪力减小了浮泥的有效黏滞力。这一机制可能解释风暴后航道中淤泥快速淤积。荷兰 Utrecht 大学海洋和大气研究所 Houwing 和 Van Rijn^[34]介绍了用于确定高岭淤泥底床的底切应力和侵蚀的水槽。他们认为此水槽观测值代表了淤泥侵蚀开始时的最小剪切应力,这一应力将导致淤泥底床的顶层最大剪切强度。

2.2.3 数学模拟 利用一个线性化多层模式,美国 William 和 Mary 学院 Virginia 海洋研究所和 Florida 海岸与海洋工程系 Ma 和 Mehta 1990 年对波浪、淤泥相互作用的动力学进行了数学模拟。他们采用一个黏弹性模式 - Voigt 模式模拟在小变形下淤泥流变和能量耗损特性,结果显示:预测的波浪衰减系数一般与室内测试结果相一致,表明底床固结和泥沙组成对消浪的影响。预测出的水体和淤泥中的速度也与有限的实验资料一致。计算出的水泥交界面底床切应力比假设淤泥为坚硬的计算出的要大,这是由于水泥界面之间的超相位运动。Ma 和 Mehta 1990 年认为,在缺乏水泥界面应力的直接观测情况下,以上模式为计算波浪作用下黏性泥沙的侵蚀速率提供了一个有用的方法。

荷兰 Delft 理工大学土木工程系和 Delft 水力学实验室 Kranenburg 和 Winterwerp^[31]建立了浮泥悬扬(携运)模式。此模式是通过积分横穿混合层的紊动能量方程而得到的,并假设水体层是流动的、淤泥层是静止的。水体层是紊动混合层、冲刷静止的淤泥层。此外,模型中还考虑了淤泥的剪切强度以及黏性

拖曳力。敏感分析表明沉降、底床强度和黏滞力都减少悬扬(携运)率。

3 进展分析

很显然,对于河口海岸底部边界层泥沙过程,国内外海洋学家、海岸工程师已经进行了大量研究。(1)一个最明显的进展是海洋水声学方法用于河口底部边界层泥沙(粗颗粒、细颗粒)过程的实验研究,它能提供连续的、高时空分辨率的泥沙动态变化过程以及悬沙浓度垂线分布。但是,研究的主要是泥沙边界层而非波流底部边界层;换句话说,仅研究了河口近底部的泥沙过程。(2)此外,在水沙数学模型中,国外研究者考虑了河口近底高含沙层对水流的影响。(3)从国外研究情况来看,环形水槽模拟是研究河口海岸底部边界层和细颗粒泥沙过程的现场实验研究的重要途径。(4)就数学模拟而言,国内外河口海岸底部边界层的研究尚缺乏。严格地讲,过去的数学模拟工作还不是模拟边界层的泥沙过程,因为他们采用的是二阶封闭模式。(5)河口海岸底部边界层细颗粒泥沙沉降速度如何确定?(6)淤泥质河口海岸底床高频率再悬浮过程与湍流猝发的关系如何?(7)由于野外现场、室内详细观测的困难,侵蚀速率和底床切应力一般经验性、非直接地从流速和悬沙浓度计算得出。

参考文献

- 1 贺松林、孙介民. 海洋与湖沼, 1996, 27: 60 ~ 65
- 2 时 钟、陈伟民. 泥沙研究, 2000, 1: 28 ~ 39
- 3 周济福等. 水动力学研究与进展, 1999, 14: 90 ~ 100
- 4 刘应中、时 钟. 见:周哲玮(主编): 湍流理论新进展及其应用, 上海: 上海大学出版社, 2000. 209 ~ 215
- 5 时 钟等. 泥沙研究, 1998, 4: 28 ~ 35
- 6 时 钟. 泥沙研究, 1997, 3: 82 ~ 88
- 7 时 钟、刘应中. 见:周哲玮(主编): 湍流理论新进展及其应用, 上海: 上海大学出版社, 2000. 202 ~ 208
- 8 樊社军等. 海洋学报, 1997a, 19(3): 66 ~ 76
- 9 樊社军等. 海洋学报, 1997b, 19(3): 77 ~ 85
- 10 樊社军等. 泥沙研究, 1999, 2: 20 ~ 27
- 11 吴永胜等. 水利学报, 1999, 9: 68 ~ 74
- 12 Honkawa K.. *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1988. 1 ~ 521
- 13 Nelsen P.. *Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1992. 1 ~ 323
- 14 Li J.F. & Zhang C.. *Marine Geology*, 1998, 148:

- 117 ~ 124
- 15 Shi Z. *et al.*. *Marine Geology*, 1996, 130: 29 ~ 37
- 16 Shi Z. *et al.*. *Geo Marine Letters*, 1997, 17: 162 ~ 168
- 17 Shi Z. *et al.*. *Estuaries*, 1999, 23(3A): 648 ~ 656
- 18 Dong L. X. *et al.*. *Journal of Coastal Research*, 1997, 13(4): 995 ~ 1003
- 19 Guan W. B. *et al.*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46(6): 861 ~ 871
- 20 Chen Y. *et al.*. *International Journal of Sediment Research*, 1999, 14(2): 107 ~ 115
- 21 Shi Z. & Chen J. Y.. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(15): 1909 ~ 1926
- 22 Mia J. P. Y. & Lee C. H.. *Journal of Coastal Research*, 1997, SI25: 63 ~ 74
- 23 Cheng R. T. *et al.*. *Journal of Coastal Research*, SI25, 1997, 49 ~ 62
- 24 Cheng R. T. *et al.*. In: J. Dronkers and M. B. A. M. Scheffers (Eds.), *Physics of Estuaries and Coastal Seas*, Rotterdam, Netherlands: Balke ma, 1998: 3 ~ 12
- 25 Cheng R. T. *et al.*. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C4): 7715 ~ 7728
- 26 Collins M. B. *et al.*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46: 233 ~ 250
- 27 Houwing E. J.. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 1999, 49: 545 ~ 555
- 28 De Wit P. J. & C. Kranenburg. *Journal of Hydromulic Research*, 1996, 34: 3 ~ 18
- 29 De Wit P. J. & C. Kranenburg.. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45: 261 ~ 271
- 30 Winterwerp J. C. & Kranenburg C.. *Journal of Hydromulic Engineering*, 1997, 123: 512 ~ 519
- 31 Kranenburg C. & Winterwerp J. C.. *Journal of Hydromulic Engineering*, 1997, 123: 504 ~ 511
- 32 Van Kessel T. & Kranenburg C.. *Journal of Hydromulic Engineering*, 1996, 122: 710 ~ 717
- 33 Van Kessel T. & Kranenburg C.. *Coastal Engineering*, 1998, 34: 109 ~ 127
- 34 Houwing E. J. & Van Rijn L. C.. *Journal of Sea Research*, 1998, 39: 243 ~ 253

(本文编辑:李本川)