

长江口全沙物模研究基础及展望

张俊勇¹, 陈 立², 吴华林¹, 许文盛²

(1. 上海河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对长江口治理实践对全沙物模的迫切需要, 从模型理论、模拟技术发展以及长江口泥沙运动规律认识三个方面对现有研究成果进行分析和评述. 分析并讨论了全沙模型在长江口运用中待解决的关键问题, 如冲淤时间比尺的选择、模型变率的影响和模型沙的选择等, 并对现阶段建立长江口全沙模型的可能性进行了分析和探讨, 认为除模拟技术外, 建立长江口全沙模型的关键是不同区域水流泥沙运动规律的正确认识与模拟. 区域泥沙运动规律的认识和描述正确与否, 将直接影响到全沙模型的模拟精度.

关 键 词: 全沙模型; 长江口; 推移质; 悬移质

中图分类号: TV148

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)02-0026-07

河工模型(物理模型)已成为解决泥沙工程问题的有效工具, 在国内外诸多涉水工程中发挥了巨大的作用^[1]. 长江口是举世罕见的巨型多沙河口, 随着长江口治理开发的逐渐深入, 泥沙问题越来越成为制约长江口治理开发的瓶颈, 对泥沙研究也提出了更高的要求. 全沙物模作为一项有效的研究工具近年来已得到广泛应用, 本文拟从长江口涉水工程实际出发, 从全沙模型理论及模拟技术、长江口泥沙运动规律研究以及长江口全沙模型建立的若干关键技术问题三个层次, 对长江口全沙物模的可行性进行初步分析探讨.

1 长江口泥沙运动与全沙物模问题

与内河相比, 长江口地区泥沙运动的复杂性主要体现在三个方面: (1) 河口地区复杂的水流动力条件, 长江口 25 h 内流速经历 2 次从 0 到涨急、从涨急到 0、从 0 到落急、从落急到 0 的变化; 水流的变化使得参与运动的泥沙类型和运动形式不断改变, 而往复流和旋转流的存在使得泥沙的输移方向变化不定; (2) 细颗粒泥沙的存在使得除内河泥沙研究中所必须考虑的起动、沉降规律外, 絮凝也是一个不可忽略的因素; (3) 在水流动力变化情况下, 悬沙和底沙两者界限并不显著, 甚至相互转化.

目前, 长江口常用的物理模型主要包括模拟冲刷环境为主的底沙模型和模拟淤积为主的悬沙模型. 但在某些整治工程中, 工程实施后, 不同区域水流动力变化的趋势不尽相同, 甚至出现相反的变化, 同一个模型上既有冲刷环境, 又有淤积环境, 而且互为边界条件、互相影响, 仅仅模拟冲刷或淤积不仅不能全面了解工程效果, 而且当相应边界环境的变化未能同步反映时甚至会造成冲刷或淤积模拟出现较大偏差. 如: 深水航道治理工程整治建筑物实施后主航槽流速增加是冲刷环境, 坝田流速减低是淤积环境; 圈围促淤工程实施后, 圈围区是淤积环境, 围区外侧河槽是冲刷环境等. 在这些工程研究中, 需要在同一模型中既模拟底沙又模拟悬沙运动, 才能得到可靠的结果.

收稿日期: 2008-08-05

基金项目: 交通部西部交通科技项目(200632800075), 交通部科技项目(航道规划关键技术研究)

作者简介: 张俊勇(1977-), 男, 江西安福人, 博士, 主要从事河口海岸泥沙研究. E-mail: zjy0796@sina.com

2 全沙模型理论与技术进展

近30年来,全沙模型取得了较大发展. 窦国仁^[2]最早提出了全沙模型试验理论并用全沙物理模型研究了长江葛洲坝枢纽工程的泥沙问题,但所采用的推移质输沙量比尺关系式的形式在泥沙界有争议. 在后来的长江三峡工程、黄河小浪底工程等的研究中,窦国仁等进一步改进了全沙物理模型试验技术^[3]. 张红武等^[4,5]经过长期研究,在建立和完善黄河泥沙模型相似率的基础上,建立和发展了黄河游荡河流的全沙模型,在几何变态问题、泥沙起动相似问题、推移质阻力相似以及河型变化河段的动床模型设计等方面做了大量的工作. 此后,全沙模型在内河得到了广泛应用,曹文洪等^[6-10]分别采用全沙模型对航道整治、河势变化以及水库运行等泥沙问题进行了试验研究,并取得了良好的效果.

潮汐河口全沙模型的研究也有了长足的进展. 熊绍隆^[11]总结和研究了潮汐河口泥沙物理模型的设计方法,完善了潮汐河口泥沙物理模型的设计,并分析了潮汐河口全沙模型建立须解决的问题. 窦国仁^[12]完善了河口海岸全沙模型相似理论,在波浪相似、悬沙相似、底沙相似、泥沙起动与沉降相似等方面为潮汐河口全沙模型的建立奠定了理论基础. 窦希萍等^[13]根据窦国仁波浪潮流共同作用下的全沙模型相似理论,设计了长江口深水航道北槽概化物理模型,进行了清水潮流和潮流波浪、浑水潮流波浪作用下的4条丁坝坝头冲刷试验,该概化物模试验可为实体全沙物模的实施提供有益参考.

总体而言,潮汐河口全沙模拟的研究较少,在相似律选择、泥沙运动模拟、方案设计等关键问题还有待于研究和完善,特别是在长江口,全沙模型实验尚没有成功的范例;内河全沙模型的成功实践,潮汐河口全沙模型理论以及长江口悬沙、底沙模型实践的逐步完善,为长江口全沙模型的建立提供了较好基础.

3 长江口全沙模型的关键技术及其解决思路

3.1 水流运动的模拟

模拟河口水流运动主要考虑佛汝德相似率,同时满足重力和阻力相似. 目前塑造径流、潮流两相流的技术已较成熟,采用往复流泵等塑造的潮型、潮位都能与原型吻合良好. 由于河口模型往往采用轻质沙,水流运动时间比尺(λ_{t1})将远小于河床变形比尺(λ_{t2} (悬沙模型)或 λ_{t3} (底沙模型)),对于这两个时间比尺不统一的问题,主要有两种解决思路:(1)按水流运动时间比尺施放潮波流量,按河床变形时间比尺施放流量并计算河床冲淤变形历时^[1];(2)单个潮汐过程由水流运动时间比尺控制,而总的潮汐个数(试验时间)由河床变形时间比尺决定^[11]. 由于按前者实施将导致潮型变得极其尖瘦,流速过程会出现极大扭曲,因此,在潮汐河口实践中,往往采用第二种解决思路并取得了良好的效果. 即单个潮波由 λ_{t1} 控制以保证水流运动相似,总的潮汐个数为实际的 $\lambda_{t1}/\lambda_{t2}$ (或 $\lambda_{t1}/\lambda_{t3}$).

3.2 泥沙运动的模拟

河口水流具有显著的非恒定性,泥沙运动状态变化剧烈;且河口区泥沙普遍较细,除起动、输移外,絮凝、盐度、有机物甚至离子含量的影响均不可忽略. 因此,河口泥沙运动的模拟更加复杂.

3.2.1 泥沙起动 我国学者窦国仁、沙玉清、张瑞瑾、唐存本等从上世纪60年代起就对泥沙起动进行了大量的研究工作,他们在考虑细颗粒粘性力的基础上,得出了适用于粗细泥沙颗粒的统一起动规律. 杨美卿^[14]在建立了统一(包括粗、细颗粒在内)的泥沙起动公式的同时,将各家起动流速计算结果进行了比较,发现虽然大体趋势一致,但所得结果仍有较大差别.

近年来,我国在河口泥沙起动方面取得了一定的成果. 蒋昌波等^[15]通过试验对海河口粘性淤泥的起动规律进行了研究;史斌等^[16]通过动床模型试验对感潮河口闸下软基的起动流速进行了模拟和研究;胡刚^[17]利用实际调查资料和窦国仁、张瑞瑾、唐存本的泥沙起动公式,对长江口北槽的泥沙起动流速进行了计算比较,得出深水航道所在的北槽底部泥沙的流速远大于该地泥沙的起动流速,河槽将进一步加深,向更有利的

方向发展.程和琴等^[18]根据实测资料,对长江口南槽非均匀细颗粒泥沙起动流速的近似估算进行了推导,这是基于原型资料的有益尝试,研究成果也证实了长江口区域的非均匀颗粒泥沙起动流速与理论推导值有较大差异,但当前原位观测的局限性制约了成果的推广应用.近期长江口航道管理局开展了大量原型观测工作,可直接监测近底层水流、泥沙特征值以及底层河床的冲淤变化,测验成果有望为长江口泥沙起动研究提供坚实基础^[19].

对于河口泥沙起动的相似条件,还有两点值得重视:(1)浮泥悬起起动是河口泥沙运动的一个重要形式.如我国的天津港、黄河口、长江口、连云港及其他淤泥质海岸河口地区,法国的纪龙德河口、卢瓦尔河口,英国的泰晤士河口,美国的密西西比河口、泰国的渭南河口以及维塞河口等淤泥质河口均发现浮泥.近年来,曹祖德^[20]根据天津新港浮泥试验资料提出了浮泥起动的经验公式,沈焕庭等结合最大浑浊带现象,研究了长江口浮泥的再悬浮问题;李九发等^[21]对长江口浮泥形成机理及变化过程进行了研究.(2)除起动相似外,扬动流速在动床模型中具有重要意义,结合泥沙运动实际正确描述泥沙的扬动流速规律对于泥沙运动的合理模拟具有重要意义.窦国仁^[12]提出的全沙动床模型相似律中也把扬动相似作为模拟泥沙运动的重要相似条件之一.以上两点进一步增大了长江口泥沙起动模拟的难度.

3.2.2 沉降和絮凝 密尼奥根据多年河口海岸野外观测资料的分析成果,指出粒径小于 0.03 mm 的泥沙具有明显的絮凝现象^[22].蒋国俊^[23]等通过不同粒径泥沙颗粒表面电荷性质的研究,认为长江口细颗粒泥沙最佳絮凝粒径为 0.008 mm,絮凝临界粒径为 0.032 mm.关许为^[24]通过对不同粒径范围泥沙沉降规律的分析获得了类似的结论.因此,可以认为长江口泥沙絮凝的临界粒径为 0.03 mm,而絮凝最佳粒径约为 0.016 mm 或更小.

河口泥沙总是处于不断运动的水体环境中,因此仅研究静水中泥沙的沉降特性是不够的,还有必要对流动水体中的泥沙沉降规律进行探讨.Owen M. W^[22]直接采用 Thames 河口中的未扰动水样进行试验,得出流速随含沙量、大小潮而变化;阮文杰^[25]对长江口天然水流中细颗粒泥沙的絮凝作用进行研究,认为水流切应力是继颗粒表面电荷、电介质性质之后影响絮凝的又一重要因素;赵龙保^[26]通过试验得出静止盐水沉速>流动盐水沉速>静止淡水沉速>流动淡水沉速.

可见,河口细颗粒泥沙的絮凝沉降机理很复杂,它不仅依赖于泥沙粒径、含沙量、盐度等,还与水流切应力等动力因素有关.由于试验条件和试验方法的不同,各家的研究成果差异较大.同时,沉降相似是全沙模型设计尤其是悬沙部分设计的重要依据,对絮凝沉降规律认识的不足,就会制约全沙模型的精度和可行性.2003 年以来,程江等^[27]利用现场激光粒度仪 LISST-100B,在不扰动絮凝体的情况下,取得长江口细颗粒泥沙絮凝体的现场粒径分布和絮凝体体积浓度资料;结合其它仪器同步获得的悬浮泥沙浓度资料,可计算出絮凝体的有效密度和沉速.此后,兰志刚^[28]、原野^[29]进行了 LISST-100B 和 ADCP 联合测验粒径的尝试.尽管该方法存在测验范围小、受环境限制较大等缺点,但对于具体河段(如长江口北槽),结合天然水、沙进行室内絮凝试验研究,可获得较符合原型实际的结果.

3.2.3 泥沙输移 目前在河口地区常用的是窦国仁推移质输沙率公式.该公式结构相对简单,但对于具体河段,还有待于进一步的参数分析与率定研究,长江口原型实测资料的缺乏使得参数分析与率定难度加大.恽才兴^[30]依托地形图数字化技术,在 GIS 和遥感图象处理软件支持下,通过栅格水深图、数字化冲淤图等一系列图形产品,尝试从宏观和整体上揭示长江口底沙输移规律,为长江口泥沙输移的模拟提供了较为有效的方法.

总体看来,河口泥沙运动模拟的困难,往往不在于模拟技术或泥沙运动的基本理论,而在于对原型中泥沙运动规律的认识不足.解决的途径之一是针对重点区域,充分利用现有的新仪器和新手段,采用现场观测和室内试验等手段,验证和率定起动、沉降、絮凝、输沙率等泥沙运动规律,确定适合特定河段的泥沙参数、计算式及有关系数,从而为全沙模型提供技术基础.

3.3 全沙模型建立的关键问题

在全沙模型的建立过程中,还有一些关键问题需处理,如冲淤时间比尺、模型变率及模型沙的选择等.

3.3.1 冲淤时间比尺 通常情况下,悬沙模型与底沙模型的河床变形时间比尺并不一致,统一为全沙模型时,就会出现时间比尺的调和问题。当底、悬沙粒径差异不大时,可考虑悬沙按悬移与扬动相似、底沙按起动相似设计,悬沙与底沙冲淤时间比尺差异将很小。底、悬沙粒径差别较大时,解决冲淤时间比尺不一致的途径有两条:(1)采用窦国仁推移质输沙率公式,使导出的底沙和悬沙冲淤时间比尺完全一致;(2)底沙和悬沙分别采用各自的时间比尺,适时进行。这种简化后的全沙模型理论上虽不完善,实践中却取得了良好的成果。如王光谦等^[31]在重庆主城区河道模型、陈立^[8]在长江芦家河模型等均采用了这种办法。必须指出,这两种方法均存在一定的理论缺陷。如采用窦国仁公式导出的底沙冲淤时间比尺和悬沙完全一致,这是基于窦国仁推移质输沙率公式的结构形式与悬沙输沙率公式一致,仅系数有所不同。由于事实上悬沙运动和底沙运动具有不同的力学机理(前者决定于紊动扩散作用与沉降作用的对比;后者决定于绕流产生的推移力和上推力作用与重力作用的对比),这个推移质输沙率公式的形式引起了很大的争议^[1]。对于长江口,尤其是北槽中下段,悬沙与底沙的粒径差别相对较小(实测资料表明北槽底沙悬沙中值粒径之比为1~5),底沙在运动形式上也与悬沙中的床沙更为相似,运用窦国仁公式有一定的合理性,但实际运用时仍必须通过谨慎的验证、综合比较。

3.3.2 模型变率 模型变率的影响也是影响河工模型精度的一个重要条件。张红武^[32]认为对模型的变率不能简单限制为某一数值,应根据原型的宽深比和河床糙率来决定:宽深比越大,糙率越小,变率可适当大一些。窦希萍^[13]参照长江口的具体条件,设计了5个不同变率的概化模型,研究潮流波浪作用下模型变率对泥沙冲淤的影响。通过分析潮流和潮流波浪共同作用下的丁坝坝头清水冲刷和浑水冲刷试验资料,得出了模型变率的影响、允许范围以及正态模型与变态模型冲刷坑稳定冲刷深度之间的关系。

目前,长江口的实体模型规模已相当庞大,南科院的模型变率为1:13,而上海河口海岸科学研究中心的变率已达1:8。鉴于河口地区巨大的宽深比、变化较缓的水下地形以及长期以来多个模型试验的研究实践,除冲刷坑等局部问题外,模型变率的影响并不是全沙模型不可逾越的障碍。

3.3.3 模型沙的选择 模型沙的选择也是模型成败的关键因素。全沙模型的关键是对悬沙和底沙的同时合理模拟,因此,对模拟沙的要求也相应提高。近半个世纪以来,我国广泛采用了包括电木粉、煤粉、粉煤灰等在内的多种模型沙,并对其干重度、起动流速、糙率、流速、水下休止角等特性进行了试验研究^[33-36]。当前河口模型中广泛使用塑料沙(水解聚丙烯酸甲酯)和木粉沙(尿醛树脂木粉),这两种沙制备简单,颗粒级配范围宽广,曾成功运用于长江口悬沙模型和底沙模型试验,但也出现了沙波较大、水流时间比尺与河床变形比尺相差较大等问题。

4 结 语

近年来,潮汐河口全沙模型技术在理论上、模型技术上以及泥沙运动规律等方面的进展,为长江口全沙模型的建立提供了技术基础。虽然存在模型沙选择、时间比尺的统一以及变率等问题,但经过技术处理,都有望解决。除模拟技术外,建立长江口全沙模型的关键是不同区域水流泥沙运动规律的认识与模拟。区域泥沙运动规律的认识和描述合理与否,将直接影响到全沙模型的模拟精度和模型的成功应用。此外,模型沙的选择也是全沙物理模型的关键因素。

参 考 文 献:

- [1] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (XIE Jian-heng. On River Simulation[M]. Beijing: Hydraulic and Electronic Engineering Press, 1990. (in Chinese))
- [2] 窦国仁. 全沙河工模型试验的研究[J]. 科学通报, 1979, 24(14): 233-238. (DOU Guo-ren. Research of complete sediment model experiments[J]. Chinese Science Bulletin, 1979, 24(14): 233-238. (in Chinese))

- [3] 窦国仁, 王国斌. 黄河小浪底工程泥沙问题的研究[J]. 水利水运科学研究, 1995, (3): 8-15. (DOU Guo-ren, WANG Guo-bin. Study on sedimentation problems of Xiaolangdi water project on the Yellow River[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995, (3): 8-15. (in Chinese))
- [4] 张红武, 刘海凌. 小浪底水库下游游荡河段模型试验研究[J]. 人民黄河, 2000, (9): 12-13. (ZHANG Hong-wu, LIU Hai-ling. Model study on river downstream Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River, 2000, (9): 12-13. (in Chinese))
- [5] 张俊华, 张红武. 黄河河工模型研究回顾与进展[J]. 人民黄河, 2000, (9): 4-6. (ZHANG Jun-hua, ZHANG Hong-wu. Review and progress of physical model research in the Yellow River[J]. Yellow River, 2000, (9): 4-6. (in Chinese))
- [6] 曹文洪, 姜乃森, 傅玲燕, 等. 白石水库泥沙问题的试验研究[J]. 水利水电技术, 1997, 28(9): 20-23. (CAO Wen-hong, JIANG Nai-sen, FU Ling-yan, *et al.* Model study on sedimentation problems in the Baishi Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, 28(9): 20-23. (in Chinese))
- [7] 马振海. 昌马水库泄空冲刷试验研究[J]. 西北水资源与水工程, 2000, 11(1): 22-27. (MA Zhen-hai. Experimental study on the emptying scour of the Changma Reservoir[J]. Water Resources and Water Engineering, 2000, 11(1): 22-27. (in Chinese))
- [8] 陈立, 崔承章, 谢葆玲. 长江芦家河浅滩段石泓大开挖方案的研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 341-344. (CHEN Li, CUI Chen-zhang, XIE Bao-ling. Study on the chamfering of the Shihong section in Lujiahe shallow reach of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 341-344. (in Chinese))
- [9] 王义安, 普晓刚, 章日红. 大顶子山航电枢纽一期施工河床变形对通航影响[J]. 水道港口, 2005, 26(3): 159-162. (WANG Yi-an, PU Xiao-gang, ZHANG Ri-hong. Effect of river bed deformation on navigation due to the 1st stage project of Dadingzishan hydroelectric scheme[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2005, 26(3): 159-162. (in Chinese))
- [10] 陆长石, 蔡守允, 余明富, 等. 三峡工程初期蓄水回水变动区涪陵河段泥沙模型试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1999, (1): 23-31. (LU Chang-shi, CAI Shou-yun, SHE Ming-fu, *et al.* Sediment model test study on Fuling reach of the varying backwater region during initial impoundment of the Three Gorges Project[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1999, (1): 23-31. (in Chinese))
- [11] 熊绍隆. 潮汐河口泥沙物理模型设计方法[J]. 水动力学研究与进展, 1998, (8): 388-404. (XIONG Shao-long. Design of physical sedimentation model for tidal estuaries[J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, (8): 388-404. (in Chinese))
- [12] 窦国仁. 河口海岸全沙模型相似理论[J]. 水利水运工程学报, 2001, (3): 1-12. (DOU Guo-ren. Similarity theory of total sediment transport modeling for estuarine and coastal regions[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001, (3): 1-12. (in Chinese))
- [13] 窦希萍. 模型变率对潮流波浪作用下局部冲刷深度的影响[J]. 海洋工程, 2004, (11): 26-36. (DOU Xi-ping. The effect of distorted scale ratio on local scour of groins under tidal currents and waves[J]. The Ocean Engineering, 2004, (11): 26-36. (in Chinese))
- [14] 杨美卿. 粘性细泥沙的临界起动公式[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, (1): 17-23. (YANG Mei-qing. The incipient motion formulas for cohesive fine sediments[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, (1): 17-23. (in Chinese))
- [15] 蒋昌波, 白玉川, 姜乃申, 等. 海河口粘性淤泥起动规律研究[J]. 水利学报, 2001, (6): 51-56. (JIANG Chang-bo, BAI Yu-chuan, JIANG Nai-shen, *et al.* Incipient motion of cohesive silt in the Haihe River estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (6): 51-56. (in Chinese))
- [16] 史斌, 卢芳春, 包中进. 感潮河口闸下软基冲刷模拟与实践[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(4): 19-21. (SHI Bin, LU Fang-chun, BAO Zhong-jin. Simulation & practice on erosion of soft foundation at sluice downstream in tidal estuary[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(4): 19-21. (in Chinese))
- [17] 胡刚. 长江河口北槽非均匀泥沙起动分析[J]. 云南地理环境研究, 2004, 16(4): 18-21. (HU Gang. The analysis of threshold motion for non-uniform sediment in the north passage of the Yangtze River estuary[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2004, 16(4): 18-21. (in Chinese))
- [18] 程和琴. 长江口南槽非均匀细颗粒泥沙起动流速的近似估算[J]. 泥沙研究, 2003, (5): 37-40. (CHENG He-qin. Approximate estimations of threshold velocities for non-uniform fine sediments at the south passage of the Yangtze River estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2003, (5): 37-40. (in Chinese))

- [19] 上海河口海岸科学研究中心. 2008年1月长江口深水航道北槽近底水沙观测分析报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2008. (Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center. Observations and analysis report of water and sediment in layer near the bottom in the north passage[R]. Shanghai: Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, 2008. (in Chinese))
- [20] 曹祖德. 浮泥特性研究进展[J]. 天津大学学报, 2002, (3): 12-18. (CAO Zu-de. Review of research of properties of fluid mud[J]. Journal of Tianjin University, 2002, (3): 12-18. (in Chinese))
- [21] 李九发, 何青, 徐海根. 长江河口浮泥形成机理及变化过程[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 302-310. (LI Jiu-fa, HE Qing, XU Hai-gen. The fluid mud transportaion prosesses in the Yangtze River estuary[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 302-310. (in Chinese))
- [22] 黄胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995. (HUANG Sheng, LU Qi-miao. On Estuarine Dynamics[M]. Beijing: Hydraulic and Electronic Engineering Press, 1995. (in Chinese))
- [23] 蒋国俊, 张志忠. 长江口阳离子浓度与细颗粒泥沙絮凝沉积[J]. 海洋学报, 1995, (1): 76-82. (JIANG Guo-jun, ZHANG Zhi-zhong. Cation concentration and flocculation of fine sediment deposition of the Yangtze River estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, (1): 76-82. (in Chinese))
- [24] 关许为, 陈英祖, 杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究[J]. 水利学报, 1996, (6): 70-80. (GUAN Xu-wei, CHEN Yin-zu, DU Xin-hui. Experimental study on mechanism of flocculation in the Yangtze River estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (6): 70-80. (in Chinese))
- [25] 阮文杰. 细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析[J]. 海洋科学, 1991, (5): 46-49. (RUAN Wen-jie. Mechanistic analysis on hydrodynamic flocculation on fine sediments[J]. Marine Sciences, 1991, (5): 46-49. (in Chinese))
- [26] 赵龙保. 粘性泥沙在流动盐水中的沉降试验研究[J]. 海洋通报, 1995, 14(3): 27-32. (ZHAO Long-bao. Experimental study of cohesive sediment in flowing salt water[J]. Marine Science Bulletin, 1995, 14(3): 27-32. (in Chinese))
- [27] 程江, 何青, 王元叶. 利用Lisst观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布[J]. 泥沙研究, 2005, (1): 33-39. (CHEN Jiang, HE Qing, WANG Yuan-ye. Using Lisst-100 for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity[J]. Journal of Sediment Research, 2005, (1): 33-39. (in Chinese))
- [28] 兰志刚, 龚德俊, 于新生, 等. 现场粒径分析仪与ADCP同步测量悬浮沉积物浓度的粒径修正方法[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(5): 385-392. (LAN Zhi-gang, GONG De-jun, YU Xin-sheng, et al. Particle size correction of suspended sediment concentration measured by ADCP with IN-SITU particle size analyzer[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2004, 35(5): 385-392. (in Chinese))
- [29] 原野, 赵亮, 魏皓, 等. 利用ADCP和LISST-100仪观测悬浮物浓度的研究[J]. 海洋学报, 2008, (3): 48-55. (YUAN Ye, ZHAO Liang, WEI Hao, et al. Research on observing suspended sediment concentration using ADCP and LISST-100 instruments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, (3): 48-55. (in Chinese))
- [30] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京: 海洋出版社, 2004. (YUN Cai-xing. Basic Law of Recent Evolution in the Yangtze River Estuary[M]. Beijing: Ocean Press, 2004. (in Chinese))
- [31] 王光谦, 胡春宏. 泥沙研究进展[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2004. (WANG Guan-qian, HU Chun-hong. Progress and Prospect on Sediment Study[M]. Beijing: Hydraulic and Electronic Engineering Press, 2004. (in Chinese))
- [32] 张红武. 河工动床模型存在的问题及其解决途径[J]. 水科学进展, 2001, (12): 418-423. (ZHANG Hong-wu. Problems and their solutions in physical modeling of river process in alluvial streams[J]. Advances in Water Science, 2001, (12): 418-423. (in Chinese))
- [33] 王延贵, 王兆印. 模型沙容重和流变及沉降特性的试验研究[J]. 水利水电技术, 1995, (11): 50-55. (WANG Yan-gui, WANG Zhao-yin. Experimental study on density, viscosity fluidity and falling velocity of the model material[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995, (11): 50-55. (in Chinese))
- [34] 韩玉芳, 陈志昌. 模型沙干重度的变化规律及其在泥沙模型试验中的作用[J]. 海岸工程, 2003, 22(1): 1-7. (HAN Yu-fang, CHEN Zhi-chang. Variability of model sediment dry unit weight and its role in the sediment model test[J]. Coastal Engineering, 2003, 22(1): 1-7. (in Chinese))
- [35] 陈俊杰, 江恩惠. 对黄河大型实体模型沙选择的初步认识[J]. 人民黄河, 2006, 28(4): 28-29. (CHEN Jun-jie,

- JIANG En-hui. To choose the initial recognition of model sand in large-scale model of the Yellow River[J]. Yellow River, 2006, 28(4): 28-29. (in Chinese))
- [36] 孙贵洲, 魏国远, 汪明娜. 亲水性树脂基复合模型沙力学特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 4-8. (SUN Gui-zhou, WEI Guo-yuan, WANG Ming-na. Experimental research on physical characteristics of compound model sands made of hydrophilic resin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(1): 4-8. (in Chinese))

Foundation and prospect of complete sediment model for the Yangtze estuary

ZHANG Jun-yong¹, CHEN Li², WU Hua-lin¹, XU Wen-sheng²

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Centre, Shanghai 201201, China; 2. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the need of a complete sediment model for the regulation of the Yangtze-River estuary, three aspects of the model are analyzed in this paper, including model theory, model technology and law of sediment movement. Key problems in performing the complete sediment model of the Yangtze-River estuary are put forward, including time scale, distortion rate and selection of model sand. Finally, the possibility of the model is demonstrated. Besides the model technology, the key problem in the model is the proper understanding and modeling of field sediment movement, which decides the precision and success of the model.

Key words: complete sediment model; Yangtze estuary; bed-load; suspend load