

黏性泥沙数学模拟中几个关键问题的研究进展

黄永健^{1,2}, 谈广鸣¹, 吕平³, 曾慧俊³

(1. 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;
2. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635; 3. 安徽省长江河道管理局, 安徽 芜湖 241000)

摘要 综合评述了黏性泥沙数学模拟中的关键问题, 包括泥沙絮凝沉速、水流挟沙力、恢复饱和系数等参数的选取, 以及黏性泥沙固结模型的研究。对黏性泥沙数学模拟需进一步研究的问题提出了若干建议。

关键词 黏性泥沙; 数学模拟; 絮凝沉速; 水流挟沙力; 恢复饱和系数; 综述

中图分类号: TV142 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2009)03-0090-05

Research advances of several key problems in the numerical simulation of cohesive sediment // HUANG Yong-jian^{1,2}, TAN Guang-ming², LV Ping³, ZENG Hui-jun³ (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Guangdong Provincial Investigation, Design and Research Institute of Water Conservancy and Electric Power, Guangzhou 510635, China; 3. Anhui Bureau of Yangtze River Mangement, Wuhu 241000, China)

Abstract : The key problems in the numerical simulation of cohesive sediment are comprehensively reviewed, including the parameter selection of flocculating settling velocity, sediment carrying capacity and coefficient of saturation recovery, and the study of the consolidation model of cohesive sediment. Some suggestions for the numerical simulation of cohesive sediment are put forward.

Key words : cohesive sediment; numerical simulation; flocculating settling velocity; sediment carrying capacity; coefficient of saturation recovery; review

20 世纪 70 年代以来, 数学模型在河流泥沙工程领域内逐步发展, 因其应用时具有省时省力和灵活方便等优势, 在研究水沙运动规律和河床变形等方面起着越来越重要的作用。黏性泥沙一般大量存在于水库、河口港湾、淤泥质海岸中, 在多沙河流中黏性细泥沙也占有一定比例。一段时期以来, 在对沉速、水流挟沙力、恢复饱和系数等数学模型有关参数进行研究时, 大多并没有以黏性细泥沙为研究对象, 而主要是以非均匀非黏性沙为研究对象。在考虑颗粒间黏结力、电化学性质、颗粒级配等多因素影响下, 黏性泥沙的数学模拟有别于非黏性泥沙(特别在有关参数的选取上), 笔者将对黏性泥沙数学模拟现有的研究成果作一简要分析总结。

1 絮凝沉速的研究

对于球形颗粒, 经典的 Stokes 公式可以很好地计算沉速, 但对于絮团, 由于受絮团自身的物理性质如有效密度、絮团结构及形态的影响, 其沉速的合理

确定就很困难了。对细颗粒泥沙沉速的测量, 最初是在沉降管中进行, 但是这种测量方法会破坏絮团的原始形态, 从而导致测量结果的偏差^[1]。

周华君等^[2]用劳斯垂向浓度分布的解析解拟合实测含沙浓度剖面的方法, 研究了黏性泥沙絮团的沉速。认为黏性颗粒原始颗粒粒径越小, 凝聚作用越强, 凝聚团的沉速当量粒径只与原始粒径的 0.03 ~ 0.05 次幂有关。利用劳斯方程 $\frac{c}{c_0} =$

$\left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a}\right)^{z^*}$, 式中 $\frac{c}{c_0}$ 为相对泥沙质量浓度, h 为水深, z 为垂向坐标, a 为某已知泥沙质量浓度的点坐标, z^* 为悬浮指标, 依照实测的 $\frac{c}{c_0}$, h 等参数反求

出 z^* , 然后利用 z^* 的定义 $z^* = \frac{\omega_d}{\kappa u_*}$ 推求 ω_d (ω_d 为沉速, κ 为卡门常数, u_* 为摩阻流速)。因为劳斯方程本身已经引入泥沙扩散系数与动量交换系数相当

这一假设,故这种方法的适用性受到限制。

王谅等^[3]、金鹰等^[4]研究了长江口黏性泥沙的絮凝,用长江口黏性泥沙在不同盐度的人工海水中做了大量的试验。研究表明,影响絮凝的主要因素为盐度、颗粒大小、泥沙质量浓度、泥沙矿物成分、有机质含量等,这些因素和絮团形成的大小有密切关系。试验证实正离子是使黏性泥沙产生絮团的主要因素。海水中含大量钙、镁、钠高价离子,所以黏性细颗粒泥沙在海水中大量絮凝沉降,长江口黏性泥沙的最佳絮凝盐度为 1.2% 左右。泥沙质量浓度大小对絮凝作用和絮团沉速的影响也非常明显,在同一盐度的人工海水中,絮团量随泥沙质量浓度增大而逐渐增大,但当泥沙质量浓度超过 10 kg/m³ 时絮团沉速会减小,这是因为泥沙质量浓度增加,碰撞机会增加,絮团量增大、增多,絮团沉速加大;当泥沙质量浓度达到一定程度,浑水相对密度增大,形成的蜂窝状絮团成为粗颗粒后沉降受阻,因而沉速减小。紊动和流速大小对絮团沉速有 2 种相反作用:紊动和流速增加,颗粒碰撞机会也增加;另一方面紊动和流速过大又可能使絮团破坏。因此,在一定紊动和流速条件下,颗粒碰撞机会大,而又不破坏絮团,此时絮凝沉速最大。

李九发^[5]、吴荣荣等^[6]研究了钱塘江河口的泥沙絮凝沉降,通过静水沉降和动水沉降试验找出了最佳絮凝盐度和泥沙不淤流速。认为泥沙颗粒越细,相对表面积越大, ζ 电位也越大,颗粒表面的物理化学作用即表面活性越强,遇阳离子中和其表面负电荷后,电位下降,碰撞增多,更容易形成絮团,沉降量也就增加。试验中若干组泥沙絮团在盐度为 1.4% ~ 1.6% 时絮团中值粒径 D_{50} 最大,认为钱塘江口黏性泥沙的最佳絮凝盐度为 1.5% 左右。试验结果表明,流速 60 cm/s 是钱塘江口泥沙的不淤流速(动水试验水温为 15 ℃,初始泥沙质量浓度为 4.65 g/L,盐度为 1.5%)。当流速为 50 cm/s 时,淤积量与初始泥沙质量浓度的比为 21.8%;当流速为 40 cm/s 时,淤积量与初始泥沙质量浓度的比为 28.0%;当流速为 20 cm/s 时,淤积量与初始泥沙质量浓度的比为 39.5%;当流速为 10 cm/s 时,淤积量与初始泥沙质量浓度的比为 57.0%。

唐建华^[7]利用 2003 ~ 2006 年在长江口及其邻近海域水体实测的悬浮物现场粒度资料,结合同步测量的水动力、悬浮物浓度、盐度、水温及室内颗粒等资料,辅以室内试验,比较系统地分析了悬浮物浓度、水动力条件、盐度以及水温等对黏性细颗粒泥沙絮凝的影响,给出了基于实测资料的絮凝沉速的计算方法:

$$\Delta\rho = \left(\frac{d_F}{d_0}\right)^{n_F-3} (\rho_s - \rho_w) \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{(13.95 \frac{\nu}{d})^2 + 1.09 \frac{\Delta\rho}{\rho_w} g d - 13.95 \frac{\nu}{d}} \quad (2)$$

式中: $\Delta\rho$ 为絮凝体的有效密度; ρ_w 为水的密度; ρ_s 为泥沙的密度, $\rho_s = 2\,650 \text{ kg/m}^3$; ω 为絮凝体沉速; d_F 为絮凝体的平均粒径,根据 LISST-100C 现场实测资料计算得出; d_0 为分散颗粒的平均粒径,取室内分散颗粒分析结果; n_F 为河口絮凝体的分形维数, $n_F = 2.0$; ν 为水的运动黏滞系数,按观测时的水温查表得出; d 为沙粒平均粒径; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

经长江口和杭州湾的资料验证,用该公式计算絮凝沉速的结果较为可靠^[7]。

关于絮凝沉速,现有的研究方法不少,也有一些经验公式,但是对众影响因子依然没有定量的描述,亟待进一步的研究阐明^[8-11]。

2 黏性泥沙水流挟沙力的研究

水流挟沙力是指在一定的水沙和河床形态综合条件下^[12],水流能够携带的悬移质中床沙质的临界质量浓度,是人为界定河床冲淤的一个标准。

在黏性泥沙自身表现为冲泻质的时候^[13],黏性泥沙的输沙率不受黏性泥沙水流挟沙力的限制,呈现出多来多排的性状,这时黏性泥沙的输沙率必须用水文测验的方法测定或用水文统计的方法计算;但在另外一些情况下,比如水库的深水区或河道的滩区流速较小,这时黏性泥沙则充分表现为床沙质的性状,输沙率受到黏性泥沙水流挟沙力大小的限制,若黏性泥沙来量大,输沙浓度大于黏性泥沙的水流挟沙力,则黏性泥沙发生淤积。

刘峰^[13-14]通过分析水流挟运黏性细颗粒泥沙的力学机理及相关因素,综合黏性细颗粒泥沙试验成果,运用“制紊功”的概念和制紊假说推导出黏性泥沙水流挟沙力 S_* 的计算公式:

$$S_* = k \left[\frac{Re}{Re_m} \frac{(U - U_H)^3}{\rho \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho} g R \omega_m} \right]^{0.7} \quad (3)$$

式中: k 为挟沙力系数; Re 、 Re_m 分别为清水、浑水的有效雷诺数; U 为河道断面平均流速; U_H 为黏性泥沙的起动流速; ω_m 为黏性泥沙絮团颗粒平均沉速; ρ 、 ρ_m 、 ρ_s 分别为清水、浑水和泥沙的密度; R 为水力半径。此公式主要是在张瑞瑾公式的基础上,考虑泥沙黏性影响对公式中 k 进行修正。它较为全面地考虑了黏性泥沙起动流速的影响,也考虑了有效雷诺数的影响。

杨国录根据制紊假说概念,从能量平衡原理出发,考虑了对水流挟沙力有影响的诸多因素(水力因子、泥沙的非均匀性、相对黏滞性系数、上游来沙和床沙补给等),建立了非均匀沙半理论半经验的分组水流挟沙力公式(式(4))^[15]。余明辉等^[16]通过整理大量天然河道(长江、黄河、汉江、渭河及无定河)冲淤平衡状态下的实测水沙资料,使用分组多元线性回归方法对杨国录分组水流挟沙力公式及公式中的有关经验参数进行修正,见式(5)。

$$S_{*k} = k_0 \mu_r^{k_1} \left[\frac{\omega_k}{\omega_0} (P_k + P_{bk}) \right]^{k_2} \left(\frac{U^3}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g R \omega_k} \right) \tag{4}$$

$$S_{*k} = k_0 \mu_r^{k_1} \left[\frac{\omega_k}{\omega_0} (P_k + P_{bk}) \right]^{k_2} \left(\frac{U^3}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g R \omega_k} \right)^m \tag{5}$$

式中: μ_r 为相对黏滞性系数; ω_k, ω_0 分别为各径组沉速和非均匀沙混合沉速; P_k, P_{bk} 分别为各粒径组悬沙和床沙级配; k_0, k_1, k_2, m 均为挟沙力经验参数。

从公式(5)及公式(4)看出,两公式的差别仅在于公式(5)最后1项增加了幂指数 m 。对于不同的黏性颗粒粒径组,各经验参数率定值见表1。

表1 余明辉修正公式经验参数

粒径组/mm	k_0	k_1	k_2	m
<0.01	0.1358	0.9463	6.5135	0.9552
0.01~0.025	0.1198	0.9364	6.4179	0.9458
0.025~0.05	0.1097	0.9163	6.4342	0.9446
0.05~0.11	0.0524	0.3830	6.5755	0.9667

许芝国^[17]认为,由于细颗粒的存在,流体的密度和黏性增大,粗颗粒的有效密度和沉速降低,导致水流挟沙能力提高,因此不能将细颗粒的作用排除在水流挟沙能力之外。他提出了考虑细颗粒黏性力的水流挟沙力公式(式(6)),并用长江中下游的实测资料(泥沙粒径0.007~2mm)进行验证。

$$S_* = \left(\frac{1}{\kappa} - \frac{\rho}{\rho_m} \frac{\mu_r^{0.1}}{\kappa_0} \right) \left(\ln \frac{h}{e D_{65}} \right) \left(\frac{f}{8} \right)^{3/2} \frac{\rho_s \rho_m}{\rho_s - \rho_m} \frac{U^3}{g h \omega_s} \tag{6}$$

式中: κ, κ_0 均为卡门常数; h 为水深; D_{65} 为床沙65%粒径; f 为河床阻力系数; ω_s 为泥沙沉速。各有关系数的取值和计算参考文献^[17]。该公式考虑了细颗粒泥沙的黏性、床沙相对糙度、河床阻力系数和悬沙的相对密度,还给出了各有关参数的计算式,可作为率定长江中下游水流挟沙力的参考^[18-21]。

3 黏性泥沙恢复饱和系数的研究

在天然河道的数值模拟计算中,恢复饱和系数 α 取值的大小,直接影响着河床冲淤计算量的大小,是悬移质输移计算中一个关键的参数。但如何确定其具体数值目前尚无定论,在不同河型不同河床边界条件下如何合理地取值更是缺乏足够的理论依据。相当长一段时期内,许多泥沙数学模型都采纳20世纪70年代韩其为的研究成果^[22-23],采用了相同的 α 值计算不同边界条件下不同粒径组泥沙的冲淤量,即冲刷时 α 取1.0,淤积时 α 取0.2,这种方法显然是忽略了很多 α 的影响因素而得到的近似结果。

韩其为^[22-25]用泥沙运动统计理论积分求解定常不均匀流立面二维扩散方程,输沙量沿 x 方向的梯度为河底边界条件,从理论上较为严格地解决了底部边界条件,求出方程的各个参数。他认为,目前在一维和二维泥沙模型中被广泛采用的 α 称为综合恢复饱和系数, $\alpha(S_l - S_l^*) = \widetilde{\alpha}_l S_l - \alpha_l^* S_l^*$,淤积时 $\widetilde{\alpha}_l < \alpha_l^*$,冲刷时 $\widetilde{\alpha}_l > \alpha_l^*$ (α_l 为某一河段的综合恢复饱和系数, α_l^* 为挟沙能力恢复饱和系数, $\widetilde{\alpha}_l$ 为泥沙质量浓度恢复饱和系数, S_l 为水流泥沙质量浓度, S_l^* 为水流挟沙力)。在不平衡条件下,对于冲刷,其泥沙质量浓度分布要相对集中于水流下层,而对于淤积,则向水流上层有所集中, $\widetilde{\alpha}_l$ 与 α_l^* 成正比。在实际计算时,强平衡条件下 α 取0.5一般已够精确。

赵志贡等^[26-27]把准静水沉降法与一维超饱和输沙法有机地联系在一起,推导出 $\alpha = 1/K$ (K 为准静水沉降法修正系数),从而可以用确定 K 值的经验和资料来确定 α ,最后得到水利工程沉沙池设计中 α 的数学模型:

$$\alpha_i = 10^{-2} \left(\frac{\omega_i}{U^*} \right)^{-0.708} J^{-0.4} \left(\frac{1}{S_{oi}} \right)^{-0.2} \tag{7}$$

式中: α_i 为池段分组恢复饱和系数; ω_i 为分组泥沙沉速; U^* 为池段摩阻流速; J 为池段水面比降; S_{oi} 为池段分组泥沙质量浓度。

经分析计算不同粒径泥沙沉速:0.00620m/s, 0.00139m/s, 0.000678m/s, 0.000289m/s, 0.0000596m/s时的沉降率相对误差值分别为6%, 4.2%, 1.8%, 3.5%和4.1%。

另外一些与黏性泥沙相关的研究是通过物理模型试验及实测资料率定。我国长江水利委员会分析了沉沙条渠资料^[12],认为 α 可取0.5,在引黄济青沉

沙池设计中,认为 α 值与泥沙粒径有关^[28-29],当 $d > 0.03 \text{ mm}$ 时 $\alpha = 0.072$,当 $d < 0.03 \text{ mm}$ 时 $\alpha = 0.17$ 。张应龙^[30]根据长江严家台 1966 ~ 1972 年和丢丢垸 1966 ~ 1968 年淤积试验的实测资料(泥沙粒径 0.006 ~ 0.10 mm)分析得到 α 在 0.06 ~ 2.0 之间,并且认为 α 值与水流紊动程度和泥沙重力条件有关,得到了 α 与 U^*/ω_i 的关系曲线。笔者根据关系曲线中的点据关系得到

$$\alpha_i = 0.0523 \left(\frac{\omega_i}{U^*} \right)^{-0.608} \quad (8)$$

陆永军等^[31]在河口泥沙数值模拟计算中指出,若各粒径组 α 取不同的值,验证计算工作量较大,数值试验表明,不饱和输沙公式中 α 可以不随粒径变化。一般情况下,悬移质中各粒径组泥沙均发生淤积时 $\alpha = 0.25$;悬移质中粗颗粒不落淤、床沙中可冲颗粒部分均发生冲刷时 $\alpha = 1.0$;悬移质中粗颗粒落淤而床沙中细颗粒部分被冲刷时 $\alpha = 0.5$ 。

关于 α 的选取,目前常用的方法都是根据工程区域实测资料率定^[32-37],至于更一般化的方法还需进一步的研究。

4 黏性泥沙固结模型的研究

一般来说,黏性泥沙的数值模拟需要考虑泥沙的输运、冲淤、固结、沉降等过程。其中,泥沙固结在黏性泥沙的长期模拟中占有十分重要的地位,因为黏性泥沙落淤后需要较长的时间固结。固结结束后的河床性质与刚落淤时的性质迥异,干密度大约是刚落淤时的 1.5 倍,临界切应力是开始时的 2 ~ 7 倍^[38]。黏性泥沙和非黏性泥沙的起动规律有着本质的区别:黏性泥沙的起动临界切应力主要取决于沙与沙之间的相互作用力,主要表现为黏结力,而非黏性泥沙的起动临界切应力是沙粒大小的函数。固结过程反映了黏性泥沙落淤后沙间作用力变化的过程。这个过程的数值模拟对黏性泥沙的数值模拟有重要的意义。

国外从 20 世纪 80 年代开始有一些试验和理论研究^[39-41],而数学模拟的研究是从 90 年代开始的,代表性的研究者有 Toorman^[42]。现在比较通用的数学模型 ECOMSED 也考虑了泥沙的固结过程,它将河床简单地分成 7 层,认为黏性泥沙淤积 1 d 后转为下一层,该假定是建立在 Tsai 等^[43]和 Macintyre 等^[44]的试验结论(影响黏性泥沙再起动的最长沉积时间为 7 d)的基础上。在著名的 MIKE3 中,河床简单分层,每层的干密度和临界切应力不同,但是没有考虑黏性泥沙落淤后的固结作用。

国内固结模拟的研究依然很少,周杰^[1]建立了

分层概念式的河床模型,考虑了固结的过程,运用了土力学中一维固结模型的成果,对黏性泥沙的数学模型进行了一些改进。但是关于模型的适用性还需要更多资料的验证和有待进一步的研究。王军等进行了黏性泥沙淤积固结的室内试验和理论研究,提出了淤积历时和黏性颗粒含量对淤积物固结程度和起动冲刷的影响^[45-46],为黏性泥沙数学模拟指出了新的方向。

5 展望

a. 关于絮凝沉速的计算,各影响因子(如盐度、颗粒形态、泥沙质量浓度、温度、矿物成分等)的定量关系还没有定论。笔者建议先从理论分析入手,搞清楚絮凝现象的内在机理,再利用试验的方法确定各影响因子与絮凝沉速的定量关系。

b. 关于水流挟沙力计算公式在黏性泥沙方向的延拓,各家的方法不同,但大致都是引入了新的参数进行修正,而这些参数在不同的边界条件下需要重新率定。应进一步研究出更有普遍意义的通用公式。

c. 关于 α 的机理性分析仍不够透彻,没有比较统一的计算方法,大部分情况仍依赖于实测资料重新率定。应进一步研究其机理,并提出实用性较强的计算方法。

d. 关于黏性泥沙固结模型的研究仍处于起步阶段,研究成果还不多。在已有的数学模型中,大部分没有考虑黏性泥沙固结的影响,应加强黏性泥沙固结特性的模拟。笔者考虑到新淤的黏性泥沙絮团固结的性状与土力学中的黏性土在自重应力下的固结有相似之处,建议借鉴土力学中已有的固结模型进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 周杰. 河口黏性泥沙输运数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [2] 周华君, 任汝述. 长江口黏性细颗粒泥沙沉降规律[J]. 重庆交通学院学报, 1994, 13(3): 10-15.
- [3] 王谅, 金鹰, 李宇. 黏性泥沙动水沉降特性研究[J]. 水道港口, 1994, 15(4): 1-5.
- [4] 金鹰, 王义刚, 李宇. 长江口黏性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(3): 61-63.
- [5] 李九发. 长江河口浮泥形成机理及变化过程[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 302-309.
- [6] 吴荣荣, 李九发. 钱塘江河口细颗粒泥沙絮凝沉降特性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007, 29(3): 29-33.
- [7] 唐建华. 长江口及其邻近海域黏性细颗粒泥沙絮凝特性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.

- [8] 李富根 杨铁笙.黏性泥沙悬浮体系絮凝特性的初步研究[D].北京:清华大学,2005.
- [9] 张庆河,王殿志,吴永胜,等.黏性泥沙絮凝现象研究述评(1):絮凝机理与絮团特性[J].海洋通报,2001,20(6):80-89.
- [10] 李宇,金鹰.黏性泥沙环形水槽实验研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2005,26(1):79-81.
- [11] 刘林,陈立,王家生,等.不同离子浓度下泥沙浓度对絮凝沉降的影响[J].武汉大学学报:工学版,2007,40(1):29-32.
- [12] 武汉水利电力学院.河流泥沙工程学(下册)[M].北京:水利电力出版社,1983.
- [13] 刘峰,许德德.黏性细颗粒泥沙水流挟沙力计算公式[J].港工技术,1998,4(4):9-18.
- [14] 刘峰.黏性细颗粒泥沙挟沙规律试验研究[J].长江科学院院报,1996,13(4):20-23.
- [15] 韩巧兰,王艳平,杨国录.水流挟沙力公式验证及看法[J].吉林水利,2007,27(7):4-6.
- [16] 余明辉,杨国录,刘高峰,等.非均匀沙水流挟沙力公式的初步研究[J].泥沙研究,2001(3):25-28.
- [17] 许芝国.长江中下游水流挟沙能力的研究[D].南京:河海大学,2006.
- [18] 工国兵.水流挟沙能力的探讨[D].南京:南京水利科学研究院,1997.
- [19] 韩其为.非均匀沙不平衡输沙的理论研究[J].水利水电技术,2007,38(1):14-23.
- [20] 张书农,华国祥.河流动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1986.
- [21] 武汉水利电力学院.河流泥沙动力学[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1998.
- [22] 韩其为.水库不平衡输沙的初步研究[C]//黄河泥沙协调小组.水库泥沙报告汇编.武汉:长江科学院,1973:145-168.
- [23] 韩其为.非均匀悬移质不平衡输沙的研究[J].科学通报,1979(17):804-808.
- [24] 韩其为.恢复饱和系数初步研究[J].泥沙研究,1997(3):32-39.
- [25] 韩其为.扩散方程边界条件及恢复饱和系数[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2006,3(3):7-19.
- [26] 赵志贡,孙秋萍.恢复饱和系数 α 数学模型的建立[J].黄河水利职业技术学院学报,2000(4):27-29.
- [27] 赵志贡,荣晓明.泥沙池设计中恢复饱和系数 α 计算模型研究[J].灌溉排水学报,2005,24(5):60-62.
- [28] 山东省水利勘测设计院.引黄济青工程渠首及泥沙处理研究报告[R].济南:山东省水利勘测设计院,1991.
- [29] 电力部成都勘测设计研究院.水电站泥沙池悬移质泥沙分组沉降计算[R].成都:电力部成都勘测设计研究院,1993.
- [30] 张应龙.荆江放淤实验工程实测资料分析[J].泥沙研究,1981(3):82-90.
- [31] 陆永军,陈国祥.航道工程泥沙数学模型的研究(I):模型的建立[J].河海大学学报:自然科学版,1997,25(6):8-14.
- [32] 刘金梅.冲积河流长距离冲刷不平衡输沙机理及规律研究[D].北京:清华大学,2002.
- [33] 王新宏,曹如轩,沈晋.非均匀悬移质恢复饱和系数的探讨[J].水利学报,2003,34(3):120-124.
- [34] 杨晋营.泥沙池超饱和输沙法恢复饱和系数研究[J].泥沙研究,2005(3):42-47.
- [35] 刘金梅,王光谦,王士强.沙质河道冲刷不平衡输沙机理及规律研究[J].水科学进展,2003,14(5):563-568.
- [36] 史传文,罗全胜.一维超饱和输沙法恢复饱和系数 α 的计算模型研究[J].泥沙研究,2003(1):59-63.
- [37] 巨江,林劲松.非恒定悬移质不平衡输沙的研究[J].水利学报,1995,26(3):77-82.
- [38] ALIR S. Critical shear stress and erosion of cohesive soil[D]. New York: State University of New York, 2003.
- [39] BEEN K. Stress-strain behavior of cohesive soil deposited under water[D]. Oxford: Oxford University, 1980.
- [40] BEEN K, SILLS G C. Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study[J]. Geotechnique, 1981, 31(4):32-37.
- [41] SILLS G C. Time dependent processes in soil consolidation [C]//YOSHIKUNI H. Proceedings of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayed Soils. Hiroshima, Japan [s. n.], 1995.
- [42] TOORMAN E. Modelling of fluid mud flow and consolidation [D]. Belgium: K. U. Leuven, 1992.
- [43] TSAI C H, LICK W. Resuspension of sediments from Long Island Sound[J]. Wat Sci Tech, 1987, 21(6/7):155-184.
- [44] MACINTYRE S, LICK W, TSAI C H. Variability of entrainment of cohesive sediments in freshwater [J]. Biogeochemistry, 1990, 9:187-209.
- [45] 王军.淤积固结条件下黏性泥沙起动与冲刷问题初步研究[D].武汉:武汉大学,2006.
- [46] WANG Jun, TAN Guang-ming, SHU Cai-wen, et al. Effects of consolidation time and particle size on scour rates of cohesive sediment[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2008, 19(2):160-164.

(收稿日期 2008-09-09 编辑 骆超)

