

葛洲坝水利枢纽下游近坝段二维水沙数值模拟

徐成伟^{1,2}

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要 针对长江中游葛洲坝水利枢纽下游近坝段卵石夹沙河床级配分布宽等特点,应用非均匀悬沙、底沙二维数学模型,考虑底沙的不平衡输移及冲淤过程中床沙的级配调整问题,对计算中的关键环节如卵石夹沙河床水流的有效挟沙能力、非均匀沙起动概率及非均匀沙推移质输沙率的计算提出了处理方法,利用水文、泥沙及河床变形资料对该方法进行了葛洲坝水利枢纽运行后、1998年洪水前后及三峡工程运行后水面线、流速分布及冲淤过程的验证.结果表明,该方法可以应用于三峡工程运行初期河床演变预测研究.

关键词 卵石夹沙河床 悬沙 底沙 宽级配 长江中游 数值模拟

中图分类号 TV145 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)02-0213-06

近20年来,国内外许多研究者致力于水库下游河道冲刷的研究^[1-2].为了建立水库下游河道冲刷数学模型,首先应对某些问题进行概化,通过水槽试验,认识清水冲刷非均匀床沙粗化机理,建立以推移质为主的清水冲刷河床粗化数学模型,利用试验资料率定模型中的一些参数.其次为了能够反映天然河流修建水库后坝下游河道冲刷及由此引起的水位降落,建立包括悬移质、推移质及床沙分选的全沙模型,并经过水库下游冲刷资料的验证.本文以葛洲坝水利枢纽下游近坝段为例,进行二维水沙数值验证,为水库下游河道冲刷数学模型应用于三峡工程运行初期河床演变预测研究奠定基础.

1 河段概况

葛洲坝水利枢纽下游近坝段指从葛洲坝枢纽坝轴线至虎牙滩约26 km河段(图1).该河段位于长江中游,属于葛洲坝枢纽坝区反“S”形弯道的下半部,顶点在李家河一带,与胭脂坝边滩河段相接.枯水期坝轴线处河宽约1400 m,坝轴线以下河段逐渐收缩至镇川门一带宽为660 m,进入胭脂坝河段头部,水面宽为

900~1000 m.洪水期水面宽在胭脂坝段增加约1倍,可达1500 m,胭脂坝以下河段水面宽为1000~1200 m.

葛洲坝水利枢纽建成后,主流出二江,靠近左岸,经西坝凸咀挑流偏向右岸,沿右侧凹岸而下.经宜昌断面至胭脂坝头部,主流又过渡到左岸,在胭脂坝尾经临江溪边滩附近又逐渐过渡到右岸而下.再经磨盘溪、虎牙滩至虎牙峡水道.

该河段河床组成有如下特点^[1]:床沙最小粒径为0.1 mm,最大粒径超过100 mm,属宽级配卵石夹沙河床.河床在镇川门弯道左岸由沙质组成,中部由卵石夹沙组成,右部由岩石或卵石组成.胭脂坝以下河段较顺

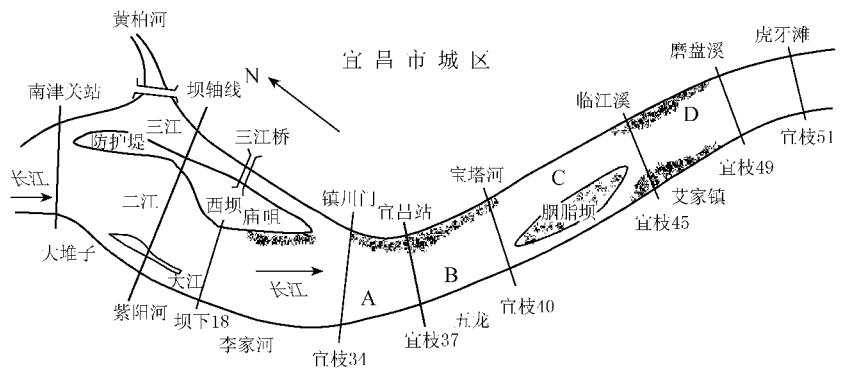


图1 葛洲坝枢纽下游近坝河段河势

Fig.1 River regime of reaches downstream of Gezhouba Project

收稿日期 2007-04-05

基金项目:“十五”三峡工程泥沙问题研究项目(105-4-01);国家自然科学基金(50379027);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2003CB415206);西部交通建设科技项目(2005-328-746-26)

作者简介 徐成伟(1964—),女,江苏南通人,高级工程师,主要从事环境科学研究.

直,横向分布较均匀,均由沙、卵石组成。

葛洲坝枢纽至虎牙滩河段,1957~1972年(天然时期)河床冲淤变化甚微,15a淤积量为50.0万 m^3 ,平均淤厚0.04m,说明在天然时期多年冲淤基本平衡。1972~1980年为葛洲坝工程施工期,近坝段普遍发生冲刷,8a冲刷量达846.7万 m^3 ,河槽平均冲深0.58m。1981~1993年为水库蓄水运行期,该河段13a总的冲刷量为800.5万 m^3 。其中一期运行7a(1981~1987年)的冲刷量明显比施工期增大,累计冲刷量为1418.2万 m^3 ,河槽平均冲深达1.27m。二期工程投入运行后(1988~1993年),6a时间内,年际变化有冲有淤,冲淤交替,其累计淤积量为617.1万 m^3 [1]。葛洲坝水利枢纽建设及运行20a来(1973~1993年),因下游河床冲刷下切,近坝段沙石料开采及荆江裁弯取直造成宜昌站枯水位比葛洲坝水利枢纽设计水位降低了1.10m[1]。三峡水库蓄水运行3a以来,该河段横断面形态基本稳定,冲刷部位主要为河床主槽和边滩的中低水部分,深泓线纵断面普遍冲深下切。

2 二维水沙数值模型中几个关键环节的处理

长江中游河道水流大都沿河长及河宽方向变化,具有明显的二维特征,不像上游川江水流在深潭处的泡漩水呈强烈的三维性。对于葛洲坝水利枢纽至虎牙滩河段水流、泥沙的模拟,关键是如何布置网格,使之贴合曲折边界,并反映随着水位变化的边界地形,同时解决计算域长宽比悬殊的难题。本文通过引入近年发展起来的边界贴体坐标,采用贴体正交曲线网格系统来克服边界复杂及计算域尺度悬殊所引起的困难。该河段河床变形模拟的另一个关键是如何模拟悬沙与底沙的不平衡输移,以及河床变形过程中床沙级配的分选。有关二维水沙数值模型的控制方程、边界条件、动边界技术及数值解法见文献[2-3],本文仅给出几个关键环节的处理方法。

2.1 卵石夹沙河床水流的有效挟沙能力

根据何明民等[4]的研究,卵石夹沙河床悬沙中不参与与床沙交换的冲泻质与参与床沙交换的床沙质的分界粒径介于0.22~0.4mm之间,而宜昌站悬移质级配及距陈家湾下游185km新厂站悬沙级配中小于或等于0.22mm的粒径占97%以上,小于或等于0.4mm的悬移质占99.5%以上。这意味着葛洲坝水利枢纽下游近坝段悬移质与床沙的交换是单向的,仅为从床沙中冲起细颗粒泥沙,而悬沙中的粗颗粒泥沙几乎不落淤。此时挟沙能力由两部分组成,一部分是悬移质来沙全部计入挟沙能力,另一部分是床沙中可冲颗粒部分地掀起后计入挟沙能力,即

$$S_L^* = P_{SL}S + \left[1 - \frac{S}{S^*(\omega)}\right] P_1 P_{SL1}^* S^*(\omega_{11}^*) \quad (1)$$

其中

$$S^*(\omega) = 1 / \sum_{L=1}^n \frac{P_{SL}}{S^*(L)} = K_0 \left[\frac{(u^2 + v^2)^{3/2}}{gh} \right]^m / \sum_{L=1}^n P_{SL} \omega_L^m$$

$$S^*(\omega_{11}) = \sum_{L=1}^n \frac{P_{mL}}{P_1} S^*(L) = K_0 \left[\frac{(u^2 + v^2)^{3/2}}{gh} \right]^m \sum_{L=1}^n \frac{P_{mL}}{P_1 \omega_L^m}$$

式中: S ——悬移质含沙量; P_{SL} ——悬移质级配; $S^*(\omega)$ ——全部悬移质挟沙能力; ω_L ——第 L 组悬移质沉速; $S^*(\omega_{11})$ ——床沙中能够悬浮部分的挟沙能力; P_1 ——床沙中可悬颗粒所占百分数; P_{mL} ——床沙级配; P_{SL1}^* ——相应的挟沙能力级配; u ——速度在贴体正交曲线坐标系中的 ξ 分量; v ——速度在贴体正交曲线坐标系中的 η 分量; h ——水深。

式(1)是 $S_L \leq S_L^*$,即含沙量小于挟沙能力的情况。当 $S_L > S_L^*$ 时, $S_L^* = P_{SL} S^*(\omega)$ 。

2.2 非均匀沙起动概率及非均匀沙推移质输沙率

2.2.1 非均匀沙起动概率

非均匀床沙交换过程中,大小粒径在床面的暴露程度不同,使得大小颗粒之间的相互影响十分复杂。颗粒处于床面上不同位置,则颗粒所受水流的作用力也不同。暴露于平均床面之上的粗颗粒所受水流作用力相对要大些;位于平均床面以下的细颗粒,处于大颗粒的尾流区,受到了大颗粒的荫蔽作用。本文采用参数 ξ 来反映颗粒的暴露和荫蔽作用,并用床沙几何平均粒径 D_m 作为床沙的代表粒径,经文献[5-7]的资料回归得到荫蔽系数表达式[8]

$$\xi_L = \begin{cases} 10^{0.55 \lg^2(D_L/D_m) - 0.204(D_L/D_m) - 0.112} & (D_L \leq 0.5 D_m) \\ 0.895(D_L/D_m)^{-0.16} & (D_L > 0.5 D_m) \end{cases} \quad (2)$$

粒径为 D_L 组泥沙的临界 Shields 数

$$\theta_{crL} = 0.031 \xi_L$$

(3)

将式(2),(3)代入 Gessler 泥沙停留在床面不动的概率公式得到第 L 组泥沙的起动概率：

$$p_L = 1 - q_L = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi_L \frac{0.031(\rho_s g - \rho g) D_L}{\tau}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt$$

(4)

2.2.2 非均匀沙推移质输沙率

采用从水流功率理论出发导出的非均匀沙推移质输沙率公式^[9]

$$g_{bL} = K_b \frac{\rho_s g}{\rho_s g - \rho g} \tau_0 u_* P_{mL} \left(1 - 0.7 \sqrt{\frac{\theta_{crL}}{\theta_L}}\right) (1 - q_L)$$

(5)

其中 $\tau_0 = \rho g R J$ $C = h^{1/6}/n$ $u_* = \sqrt{\tau_0}/\rho$ $\theta_L = \tau_0/[(\rho_s g - \rho g) D_L]$

$$K_b = \begin{cases} 11.6 & (\theta > 0.25) \\ 10^{0.2256 - 2.5348 \lg \theta - 1.896 \lg^2 \theta} & (0.06 < \theta < 0.25) \\ 10^{12.8719 \theta^{10.1319}} & (\theta \leq 0.06) \end{cases}$$

式中： g_{bL} ——第 L 组推移质输沙率； ρ_s ——泥沙密度； ρ ——水体密度； R ——水力半径； J ——水力坡度； n ——糙率； τ_0 ——水流拖曳力； C ——谢才系数； q_L ——第 L 组泥沙停留在床面的概率，可由修正后的 Gessler 式(4)计算。 θ_{crL} 由式(3)计算。

当床沙为均匀沙时，式(5)转变成

$$g_b = K_b \frac{\rho_s g}{\rho_s g - \rho_s g} \tau_0 u_* \left(1 - 0.7 \sqrt{\frac{\theta_c}{\theta}}\right) (1 - q)$$

(6)

式(6)与文献[10]沙质推移质输沙资料的比较表明，计算值与实测值吻合较好^[9]。

2.3 挟沙能力系数 K_0 及指数 m

挟沙能力系数 K_0 及指数 m 根据含沙量饱和河段含沙量 S 与 $(Q^3 B/(A^4 w))^m$ 之间的关系确定。宜昌至枝城河段冲淤验证计算表明， $K_0 = 0.015 \sim 0.017$ 。指数 m 采用文献[11]得到的值： $m = 0.92$ 。

2.4 恢复饱和系数 α 的选取

数值试验表明，悬移质中各粒径组泥沙均发生冲淤时， $\alpha = 0.25$ ；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被冲刷时， $\alpha = 0.5$ 。

2.5 混合层厚度

混合层厚度与床沙特性有关。计算表明，对于卵石夹沙河床，冲刷初期混合层厚度取为 $1.0 \sim 2.0\text{ m}$ ，冲刷后期取为 $0.5 \sim 1.0\text{ m}$ 。

3 水沙及河床冲淤的数值验证

3.1 计算条件

3.1.1 计算域及正交曲线网格生成

计算域进口位于葛洲坝水利枢纽坝轴线，出口为虎牙滩。在域内共布置 211×41 个网格，经正交计算，形成正交曲线网格。网格沿河长方向间距为 $90 \sim 120\text{ m}$ ，平均 112 m ；沿河宽方向间距为 $16 \sim 40\text{ m}$ 。

3.1.2 水沙过程概化

动床验证计算时段从 1980 年 6 月至 1986 年 6 月，再从 1986 年 6 月至 1995 年 12 月。枯水期平均 $5 \sim 10\text{ d}$ 划分一个流量级，洪水期平均 $1 \sim 3\text{ d}$ 划分一个流量级，每年划分 $80 \sim 100$ 个时段。出口水位过程由宜昌至武汉河段一维全沙模型^[12]计算得到。悬移质计算包括 6 个粒径组的分组含沙量计算，推移质计算包括 8 个粒径组的分组输沙率计算。

3.1.3 进口悬移质级配

进口悬移质级配采用葛洲坝水利枢纽蓄水后宜昌站多年平均值(表 1)，悬移质计算包括 6 个粒径组的分组含沙量计算，各粒径组级配与沉速见表 1。

表 1 葛洲坝水利枢纽蓄水后宜昌站多年平均悬移质级配及沉速

Table 1 Mean gradation and settling velocity of suspended load at Yichang Station after the beginning of Gezhouba Project

D/mm	$P_s/\%$	$\omega_L/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
0.0050	36.8	0.00158
0.0169	20.0	0.018
0.0368	16.7	0.0855
0.0736	15.4	0.339
0.1690	8.9	1.641
0.3680	2.2	5.11

3.1.4 近坝段河床组成

由于坝下河段河床冲刷下切使床沙粗化,表现为河床组成中小于 1 mm 的沙质由蓄水前的 50.7% 减少到蓄水后的 36.0%; 1 ~ 10 mm 的砾石由蓄水前的 14.8% 减小到蓄水后的 10.0%; 10 ~ 100 mm 的卵石由蓄水前的 34.5% 增加到蓄水后的 52.0%.

3.1.5 糙率的确定

糙率采用一维模型推求的综合糙率,验证计算表明,用一维综合糙率乘以系数 0.90 ~ 0.95,可基本代表二维模型的糙率.宜昌站至宜都河段糙率变化在 0.02 ~ 0.03,宜都至枝城河段糙率变化在 0.018 ~ 0.025,且枯水糙率大,洪水糙率小.

3.2 水面线及流速分布验证

长江航道规划设计研究院分别于 1997 年 3 月 28 ~ 30 日、5 月 28 ~ 30 日、7 月 20 ~ 22 日进行了宜昌至沙市河段瞬时水面线的同步观测,相应宜昌流量分别为 5 380 m³/s,12 200 m³/s,49 000 m³/s.本文选择葛洲坝水利枢纽至虎牙滩河段的水面线进行验证计算,该河段左、右岸水面线与实测值比较吻合^[12],偏差一般不超过 0.1 m.

图 2 为流量分别为 3 870 m³/s 和 17 900 m³/s 时计算的宜昌水文断面流速沿河宽分布与实测值的比较,以及计算采用的 1995 年 12 月及实测流速分布时的河道断面形态.由图 2 可见,计算值与实测值很接近,偏差小于 10%,个别点相差较大,与计算地形和测流时地形略有差异有关.

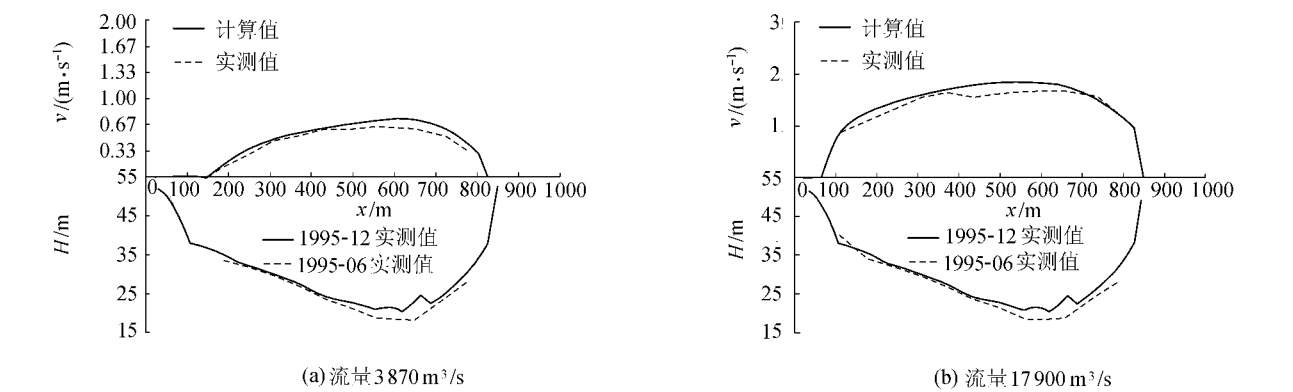


图 2 不同流量宜昌断面流速沿河宽分布计算值与实测值的比较

Fig.2 Verification of velocity distribution at Yichang cross section ($Q = 3870 m^3/s, 17900 m^3/s$)

葛洲坝水利枢纽至虎牙滩各河段流场计算结果表明,计算值较好地反映了随着流量的增大,水流逐步淹没胭脂坝、临江溪边滩及大江冲沙闸、三江口门处回流的现象.当流量小于 6 500 m³/s 时,胭脂坝与右岸连成一体;当流量介于 6 500 ~ 25 000 m³/s 时,胭脂坝右岸的串沟过流分成两汉;当流量超过 25 000 m³/s 时,胭脂坝被水流淹没,但水流动力轴线仍位于枯水深槽.图 3 为葛洲坝水利枢纽至镇川门河段流场图.由图 3 可见,当流量为 40 200 m³/s 时,大江与三江交汇处的庙嘴即三江口门区,回流流速达 0.50 m/s,这与 1983 年 8 月 7 日流量约 41 308 m³/s 时实测值 0.46 ~ 0.54 m/s 很接近^[12].

3.3 河床变形验证

3.3.1 葛洲坝水利枢纽运行后(1980 ~ 1995 年)河床冲淤验证

葛洲坝水利枢纽为径流式电站,不调节流量,即来水情况与天然基本相同,而输沙过程发生了变化,表现在枯水期 11 月至次年 4 月下泄水流的含沙量大幅度减少,洪水期 5 ~ 10 月与天然情况接近,但下泄卵石、沙质推移质大为减小.蓄水前宜昌站实测沙砾石(0.1 ~ 10 mm)推移量多年平均为 878 万 t,卵石推移量为 75.8 万 t.蓄水后 1981 ~ 1993 年宜昌站年平均沙砾推移量为 149.4 万 t,比蓄水前减少 83%,卵石推移量年平均为 39.6 万 t,比蓄水前减小 47.8%^[1].这样,坝下游河床必然引起冲刷.

以 1980 年 6 月实测宜昌至云池河段地形作为起始地形,计算至 1986 年 6 月,与 1986 年 6 月实测地形相比较.计算的 1980 年 6 月至 1986 年 6 月宜昌至云池河段冲刷厚度 1 m 等值线与实测值接近^[12].宜昌至云池河段冲刷区域位于宜昌站至万寿桥的右半部、胭脂坝左汉主槽、胭脂坝尾至艾家河、虎牙滩右岸至白鹤滩及古老背至城闭溪主槽.据统计^[1],在该时间段,宜昌至虎牙滩河段建筑用骨料开挖量达 1426.1 万 m³,相应河

床冲刷量为 1 418.2 万 m³. 由于骨料开挖带有一定的随机性, 因此该时段仅验证河床冲淤总的趋势, 重点为 1986 年 6 月至 1995 年 12 月的冲淤验证.

1987 年以后葛洲坝二期工程投入运行, 宜昌至虎牙滩河段骨料开挖停止, 河床年际间有冲有淤, 冲淤交替. 以 1986 年 6 月实测宜昌至虎牙滩河段地形作为起始地形计算至 1993 年 11 月, 得到该河段微淤 556 万 m³. 1993 年 11 月恰逢落水冲刷, 556 万 m³ 淤积量大部分是洪水期淤积的泥沙. 再计算至 1995 年 12 月, 与实测地形相比较. 计算的冲淤部位与实测地形接近^[12], 冲刷区域位于万寿桥至胭脂坝的枯水深槽、胭脂坝尾至虎牙滩间的主槽. 计算的 1986 年 6 月至 1995 年 12 月沿程各河段冲淤量计算值与实测值的比较见表 2. 沿程各河段冲刷量计算值与实测值吻合较好. 需要说明的是, 临江溪至虎牙滩河段冲刷强度大于临江溪以上河段的主要原因在于, 葛洲坝枢纽运行初期(1980~1986 年), 冲刷强度较大河段为靠近枢纽的坝轴线至临江溪河段, 1986 年后冲刷强度相对较大的河段下移至临江溪至虎牙滩河段.

3.3.2 1998 年洪水河床冲淤验证

1998 年长江大洪水, 使葛洲坝水利枢纽至三峡工程坝址两坝间的淤积物大量冲刷出库, 导致葛洲坝下游近坝段在汛期呈普遍性淤积. 自 1997 年 12 月至 1998 年 9 月, 两坝间 38 km 河段平均冲深 2.54 m. 宜昌河段从坝下到虎牙滩全长约 21.6 km, 自 1997 年 8 月至 1998 年 9 月共计淤积 3 240 万 m³, 河段平均淤厚为 1.85 m^[13]. 验证计算以 1995 年 12 月底地形为起始地形, 从 1996 年 1 月至 1998 年 10 月, 每天划分 1 个流量级. 表 3 为 1996 年 1 月至 1998 年 10 月庙咀至虎牙滩河段河床冲淤计算值与实测值的比较. 可见, 庙咀至虎牙滩约 20.1 km 河段计算的淤积量为 3 563.1 万 m³, 实测值为 4 217.2 万 m³, 二者比较接近, 淤积部位也吻合较好^[13].

3.3.3 三峡工程运行后(2002~2004 年)冲刷验证

2003 年 6 月, 三峡工程坝前水位蓄至 135.0 m(吴淞基面), 同年 11 月库水位又抬升至 139.0 m(吴淞基面). 三峡坝址年径流量基本与多年持平, 而来沙量仅为蓄水前的 15%~20%. 葛洲坝下游河道水流挟沙能力远大于含沙量, 因此水流要从河床中补充泥沙冲刷河床.

验证计算时段从 2002 年 10 月至 2004 年 10 月, 每天划分 1 个流量级. 表 4 为 2002 年 10 月分别至 2003 年 10 月、2004 年 10 月近坝段河床冲刷计算值与实测值的比较. 由表 4 可见, 庙咀至虎牙滩约 20.1 km 河段计算的冲刷量为 847.6 万 m³, 实测值为 956.7 万 m³, 二者比较接近, 冲刷部位也吻合较好^[13].

4 结 语

针对长江中游葛洲坝水利枢纽下游近坝段卵石夹沙河床级配分布宽等特点, 应用非均匀悬沙、底沙二维数学模型, 考虑底沙的不平衡输移及冲淤过程中床沙的级配调整问题, 研究葛洲坝水利枢纽及三峡工程运行

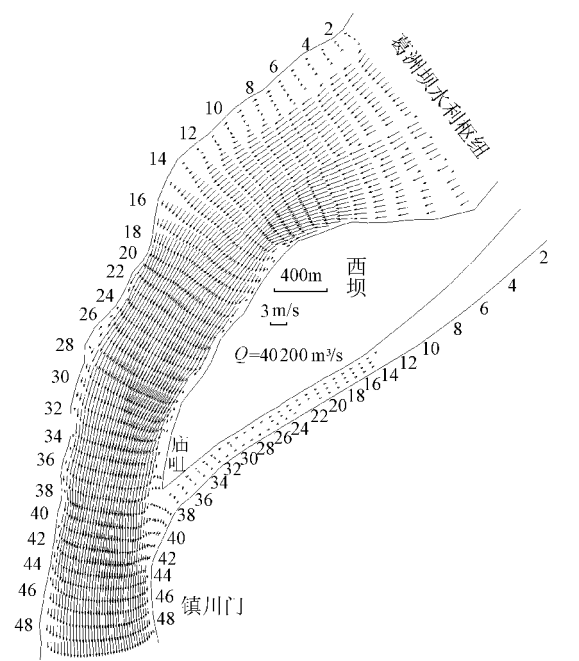


图 3 流量为 40 200 m³/s 时葛洲坝水利枢纽至镇川门河段流场

Fig.3 Flow field in the reach from Gezhouba Project to Zhenchuanmen ($Q = 40\,200\text{ m}^3/\text{s}$)

表 2 1986~1995 年宜昌至虎牙滩河段河床冲淤量计算值与实测值的比较

Table 2 Verification of deposition and erosion in Yichang-Huyatan reach from 1986 to 1995

河段名称	计算冲淤量/万 m ³	实测冲淤量/万 m ³	偏差/%
宜昌—宝塔河	-112.3	-103.9	8.1
宝塔河—临江溪	-184.5	-185.4	-0.4
临江溪—虎牙滩	-1 095.4	-1 032.5	6.1
宜昌—虎牙滩	-1 392.2	-1 321.8	5.3

表 3 1996~1998 年宜昌至虎牙滩河段河床冲淤量计算值与实测值的比较

Table 3 Verification of deposition and erosion in Yichang-Huyatan reach from 1996 to 1998

河段名称	间距/km	计算冲淤量/万 m ³	实测冲淤量/万 m ³	偏差/%
庙咀—宝塔河	6.1	694.6	640.4	8.5
宝塔河—艾家镇	6.1	1 336.3	1 689.7	-20.9
艾家镇—虎牙滩	7.9	1 532.2	1 887.1	-18.8
庙咀—虎牙滩	20.1	3 563.1	4 217.2	-15.5

表4 2002年10月至2004年10月近坝段河床冲淤量计算值与实测值的比较

Table 4 Verification of deposition and erosion in the reaches near the Gezhouba Project from Oct, 2002 to Oct, 2004

河 段	编 号	间距/ km	2002 年 10 月至 2003 年 10 月			2002 年 10 月至 2004 年 10 月		
			计算冲淤量/ 万 m ³	实测冲淤量/ 万 m ³	偏差/%	计算冲淤量/ 万 m ³	实测冲淤量/ 万 m ³	偏差/%
庙咀—宝塔河	39~97	6.1	-331.5	-299.1	10.8	-357.9	-350.2	2.2
宝塔河—艾家镇	97~150	6.1	-365.4	-418.9	-12.8	-452.3	-549.1	-17.6
艾家镇—虎牙滩	150~210	7.9	93.8	122.7	-23.6	-37.4	-57.4	-34.8
庙咀—虎牙滩	39~210	20.1	-603.1	-595.3	1.3	-847.6	-956.7	-11.4

后该河段的冲淤变形,对模型中的几个关键问题(如卵石夹沙河床水流的有效挟沙能力、非均匀沙起动及输移规律、挟沙能力系数、床面混合层厚度、推移质与悬移质的划分等)提出了处理方法.

数值模型的验证表明,计算的水面线、流速分布及河床冲淤分布与实测值吻合良好.尤其是进行了葛洲坝水利枢纽运行后、1998 年洪水前后及三峡工程运行后的河床变形验证,说明该模型的建模方法是正确的,关键问题的处理是有效的,可以预测三峡工程引起水沙条件改变后的河床冲淤.

参考文献：

[1] 陆永军,陈稚聪,赵连白,等.葛洲坝枢纽下游水位变化及对船闸与航道影响研究[J].中国工程科学,2002,4(10):67-72.
[2] 陆永军,徐成伟.丹江口水库下游河道二维全沙数学模型[J].水利学报,1995(增):135-141.
[3] LU Yong-jun,LI Hao-lin,DONG Zhuang,et al.Two-Dimensional tidal current and sediment mathematical model for Oujiang Estuary and Wenzhou Bay[J].China Ocean Engineering,2002,16(1):107-122.
[4] 何明民,韩其为.挟沙力级配及有效床沙级配的确定[J].水利学报,1990(3):1-12.
[5] LITTLE W C,MAYER P G.Stability of channel beds by armoring[J].J Hydraulics Division,ASCE,1976,102(11):1647-1662.
[6] 刘兴年.非均匀推移质输沙率及粗化稳定结构[D].成都:成都科技大学,1986.
[7] 陆永军.航道工程泥沙数学模型的研究与应用[D].南京:河海大学,1998.
[8] LU Yong-jun,ZHANG Hua-qing.Study on nonequilibrium transportation of nonuniform bedload by steady flow[J].Journal of Hydrodynamics,1992,4(2):111-118.
[9] 陆永军,张华庆.非均匀沙推移质输沙率及其级配计算[J].水动力学研究与进展 Ser A,1991,6(4):96-10.
[10] SAMAGA B R,RAJU K G R,GRADE J J.Bed load transport of sediment mixtures[J].J Hydraulic Engineering,ASCE,1986,112(11):1003-1018.
[11] 陆永军.三峡工程下游浅滩整治一维及二维数值模拟研究[C]//长江三峡工程泥沙问题研究:1996~2000,第六卷.北京:知识产权出版社,2002:530-549.
[12] 韩其为,何明民.水库淤积与河床演变的(一维)数学模型[J].泥沙研究,1987(3):14-29.
[13] 陆永军,徐成伟.葛洲坝枢纽下游近坝段河道冲刷及对策研究[R].南京:南京水利科学研究院,2006.

2D numerical model for water and sediment near the Gezhouba Project

XU Cheng-wei^{1, 2}

- (1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : According to the characteristics of the middle reaches of the Yangtze River, a wide-size distribution with a gravel and sand bed near the Gezhouba Project, a 2D mathematical model for nonuniform suspended load and bed load was used for numerical simulation, which takes into account the nonequilibrium transport of bed sediment and the gradation changes during the deposition and erosion process. Models for key factors, such as the effective carrying capacity of gravel and sand bed flow, the nonuniform sediment incipient probability and the uniform bed load transport rate, were also developed. The parameters of the models were calibrated using hydrologic data, sediment and riverbed deformation data and the water surface profile. The distribution of flow velocity and the deposition and erosion processes were verified against field data from different periods, such as the impoundment of the Gezhouba, the flood in 1998 and the initial impoundment of the Three Gorges Project (TGP). Results indicate that the model is applicable to the prediction of the fluvial process during the initial impoundment of TGP.

Key words : gravel and sand bed ; suspended load ; bed load ; wide-size distribution ; middle reaches of the Yangtze River ; numerical simulation