

弯曲河道横向摆动过程数值模拟研究进展

假冬冬,邵学军,周 刚

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要 对弯曲河道横向摆动的模拟方法,包括经验解析模型、二维数值模拟以及三维数值模拟的最新研究进展进行了综述,并分析了其各自的优缺点及局限性,提出了一些尚待进一步研究的问题。

关键词 弯曲型河道 横向摆动 数值模拟 河湾 冲积河流

中图分类号 :TV147 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)04-0090-06

Advances in numerical simulation of lateral migration of meandering channels//JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, ZHOU Gang (State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract :The latest development of the simulation methods, including the semi-empirical analytical model, the 2-D flow and sediment transport model and the 3-D model, were reviewed, and their limitations and characteristics were also analyzed. Some problems needed for further research were put forward.

Key words :meandering channel ; lateral migration ; numerical simulation ; river bend ; alluvial river

弯曲型河道是冲积河流当中最为常见的一种河型,在世界上分布很广^[1],如我国的南运河、渭河、辽河、汉江以及素有“九曲回肠”之称的长江下荆江河段等,都是典型的弯曲型河道。弯曲型河道在自然的演变发展过程中“凹岸冲刷、凸岸淤积”,随着河湾的横向摆动,凹岸不断发生崩塌,河漫滩上大量的农田土地将会丢失,许多建筑物的基础将会受到水流的直接冲击而导致险工的出现,甚至汛期堤防决口。对弯曲型河道水流及泥沙的运动规律进行分析研究,认识弯曲河道的形成和摆动规律,一直是河流演变规律研究其中的一个热点。在冲积河流演变规律的研究中,数值模拟已成为一种重要手段。弯曲型河道横向摆动的数值模拟方法主要包括经验解析模型、二维数值模拟以及三维数值模拟。近年来这几种方法都取得了一定的进展。本文拟对此进行综述,并提出一些有待进一步研究的问题。

1 经验解析模型

经验解析模型常基于实测资料和一定的理论分析基础而建立。将水流、泥沙以及河岸物质组成等影响因素参数化,建立各种参数之间的经验关系式,从而确定弯曲型河道(弯道)随时间的变化情况,达到预测弯道横向摆动的目的。其代表性成果有:

Odgaard 模型^[2-3]将弯道横向摆动速度定义为河道中轴线法向的淤进或者是后退速度,假设河岸的冲刷速率与河岸附近的水深成正比,从质量守恒(水、沙)、动量守恒以及床面上泥沙颗粒的稳定标准出发,通过线性化处理,得到了弯道演变的模型。该模型不仅能模拟出弯道的摆动速度和方向,而且还能计算出弯道水流的速度和水深分布。然而由于模型是基于线性化假设建立的,因此对于曲率较大的河湾是不适用的,另外模型仅适用于恒定流、均匀沙的情况。

Richardson 模型^[4]以一维水动力模型(如 HEC-RAS, MIKE-11 等)的计算结果为基础,将这些计算结果转化为弯道凹岸处的水动力条件(如流速、剪切应力等),通过这些水动力条件来计算凹岸的后退速度,从而实现对弯道横向摆动过程的模拟。在模型中,一维水动力模型的计算结果转化到弯道凹岸处的水动力条件时,假设了一个转化系数(即一维计算的断面平均结果与凹岸处值之比),而此系数只与弯道处的曲率半径 R 和河宽 B 有关,并没有考虑床面几何形态的影响,而事实上,弯道处水动力条件的分布情况与床面的几何形态是密切相关的。

Chen 等模型^[5]认为,弯道岸滩的后退速度由泥沙沿流向输运的变化梯度及二次流的强度所决定。以此为基础建立了一个模拟正弦派生弯道演变过程

模型。在模型中,弯道的中轴线仅由少量的实验来确定,缺乏通用性。该模型突出的优点是避免了采用传统的河岸抗冲系数,而这一系数往往是很难确定的。

在类似的研究中,Lancaster 等^[6]将其建立的模型与不同类型的天然弯曲型河流的演变过程进行了比较;Liao 等^[7-8]基于 Johannesson 等^[9]的弯道线性理论建立了一个能够考虑水流、地形以及非均匀泥沙分选作用等因素的模拟弯道变迁的模型,但对这些因素的考虑还是过于理想化;Abad 等^[10]从河流生态修复需求的角度出发,建立了模拟弯道演变的模型;Eaton 等^[11]建立了推移质占优的河流蜿蜒过程模型;Coulthard 等^[12]建立了模拟弯道演变的元胞模型。

经验解析模型的优点是不需直接求解水沙输运方程,应用简单,并且能够模拟弯道长历时的平面摆动情况。缺点是:①具有较大的局限性,只能在资料来源的范围内适用,并且包含了过多过于简单的假设;②不能考虑河岸几何形态对弯道摆动的影响;③这些方法中水流冲刷以及河岸崩塌之间的内在力学机理不明确,缺乏对水沙运动的详细描述。但是基于这类模型的优点,在地学界以及在研究长历时的河流摆动和生态修复的初步设计中,仍是一种可取的模拟方法。

2 二维数值模拟

在模拟弯道的横向摆动过程时,将水沙模型与河岸变形模型相结合,充分考虑它们之间的相互作用,即先用水沙模型计算水流泥沙的运动和河床变形的情况,再结合河岸变形模型来模拟河岸的变形情况,从而实现对弯道横向摆动过程的预测。这类模型中首先出现的是二维模型。

在二维弯道横向摆动数值模拟方面,密西西比大学 NCCHE 中心做了很多研究^[13-16]。其开发的沿水深平均的平面二维水动力和泥沙输运模型 CCHE2D 采用的是有限元方法,利用沿水深平均的 $k-\epsilon$ 模型来计算紊动涡黏系数。由于通常的沿水深平均的二维水沙模型无法反映弯道处二次流的作用,因此在模型中还加入了经验公式来对此加以考虑。这些研究的思路是先由 CCHE2D 模型计算水流和泥沙模块,然后由输沙平衡法(图 1)来确定弯道的横向摆动速度。根据图 1 可得近岸的输沙平衡方程为^[14]

$$\left(q_l + \frac{\partial q_l}{\partial l} dl\right) \frac{dr}{2} - q_l \frac{dr}{2} + q_r dl - q_{br} dl = -\omega h_b dl \quad (1)$$

式中: q_l 为纵向输沙率; q_r 为横向输沙率; dl 为近岸控制体积的长度; dr 为近岸控制体积的宽度; h_b 为

近岸水深; q_{bl} 为近岸纵向输沙率; q_{br} 为近岸横向输沙率; ω 为河岸冲刷速率, $\omega > 0$, $\omega < 0$, $\omega = 0$ 分别表示河岸淤长、河岸冲刷以及河岸不变。

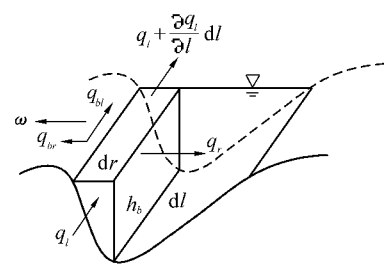


图 1 输沙平衡法示意图^[14]

由式(1)化简可得河岸的冲刷速度为: $\omega = -\left(\frac{\partial q_l}{\partial l} \frac{dr}{2} + q_r - q_{br}\right) / h_b$,由此可实现对弯道横向摆动过程的模拟,如图 2 所示。然而这些工作也存在一些不足,如采用均匀沙^[14],弯道宽度在横向摆动过程中始终保持一致^[16],而这样的假设与实际存在一定的差异。

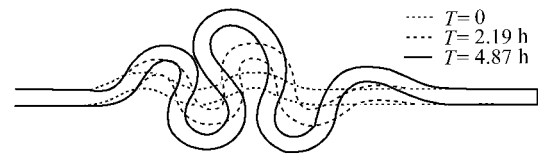


图 2 弯道横向摆动过程^[16]

夏军强等^[17]将正交曲线坐标系下的平面二维水沙模型与 Osman 等^[18]提出的黏性河岸冲刷模型相结合,采用 MADI 方法、非交错网格,模拟计算了弯道内的水流运动、悬移质泥沙的输移、河床的纵向及横向变形。模型中采用的 Osman 河岸冲刷模型的原理是先依据水动力模型计算河岸横向冲刷距离 ΔB ,然后再用土力学方法分析和判断河岸的稳定性,进而达到模拟河岸横向变形过程的目的。在 Δt 时间内,黏性河岸被水流横向冲刷的距离为

$$\Delta B = C_l \Delta t \frac{\tau_f - \tau_c}{\rho_s g} e^{-1.3 \tau_c} \quad (2)$$

式中: ΔB 为黏性河岸的横向冲刷距离,m; C_l 为横向侵蚀系数,其大小取决于河岸介质特性; Δt 为冲刷时间,s; τ_f 为水流对河岸的切应力,Pa; τ_c 为河岸黏性泥沙临界切应力,Pa; ρ_s 为河岸黏性泥沙的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

应用建立的水沙数学模型以及河岸冲刷模型,夏军强等^[17]模拟了一概化弯道在持续清水冲刷下的主流线位置、断面形态、主槽比降的变化过程,模拟结果与观测到的弯道演变规律是定性一致的。但是由于该模型采用的是沿垂向平均的平面二维模型,因此对二次流,尤其是弯道处二次流对泥沙输运以及河岸变形的冲刷作用没有给予足够的考虑。

国内外许多学者^[19-24]也采用二维的水沙数学模型以及相应的河岸变形模块对弯道的横向摆动问题进行了研究,但是由于通常的沿水深平均的二维水沙模型无法反映弯道处二次流的作用,因此在他们的模型当中基本上都引进了一定的经验公式来反映二次流以及泥沙的横向输移对弯道演变所起的作用。这些研究者成功地模拟了河岸的后退和淤进过程,模拟结果与实测数据或者弯道通常的演变规律相比较,定性一致。在这些模型中虽采用了经验公式来反映弯道处二次流对泥沙输运以及河岸冲刷的影响,但这些经验公式资料验证毕竟有限,只能在资料来源的范围内适用,存在着较大的局限性。这些模型的一些假定也存在不足,如在 Nagata 等^[21]的模型当中,河床和河岸均为非常均匀的泥沙所组成,在 Chang-Lae 等^[23-24]的模型当中,河岸的变形是通过岸滩边坡角度的大小来考虑的,当坡角大于泥沙的水下休止角时,就会发生河岸崩塌,反之则不会,这一假设显然在河岸组成为非黏性泥沙时才是合理的。

在天然弯道的应用方面, Mosselman^[25]在 Struiksmā^[26]的平面二维模型的基础上,加入了河岸冲刷变形的模块,模拟了某天然河流一弯曲型河段的平面变形过程,但模拟结果与实际情况相差较大。采用 Osman 等^[18]的河岸冲刷模型, Darby 等^[27]同样模拟了天然弯道的横向摆动过程,与实测值相比,凹岸冲刷坑的深度以及岸滩的后退速度的模拟值均偏小,可能与其仅考虑河岸为黏性颗粒组成有关。

相对于经验解析模型来说,二维模型的简化和假设已经大为减少,但仍存在一些有待改进的问题,主要是:①由于其沿垂向的平均,使得无法直接模拟二次流;②模型中考虑二次流对弯道横向摆动影响的经验公式存在较大的局限性;③对河岸变形过程的简化假定也不能普遍成立。尽管如此,二维模型在弯道横向摆动的研究中仍发挥了巨大的作用,并已广泛应用于实际生产当中。

3 三维数值模拟

二维模型与经验解析模型相比虽有了很大的进步,但由于弯道处的变量是三维的,因此最符合实际情况的描述模型也应该是三维的。Mosselman^[25]在其研究当中也指出,采取三维模型来模拟河流的横向变形,将会得到比较满意的结果。在研究弯道横向摆动的三维数值模拟方面,挪威科学技术大学 NTNU 中心的 Olsen 教授及其研究小组做了大量的工作,其开发的三维数学模型 SSIIM,用有限体积法离散水沙方程, κ - ϵ 模式描述水流的紊动,用 SIMPLE 系列方法来计算压强,是一个通用性较强的模型。

由于最初的 SSIIM 模型并没有考虑弯道处泥沙输运的特殊性,因此在模拟弯道的横向摆动时,应对此进行重点研究。Ruether 等^[28]用 SSIIM 模型,在考虑了弯道近底处泥沙运动方向与近底流速方向之间的夹角的条件下,计算了 90° 转弯河道处的速度、河床变形随时间的变化情况,模拟结果与实测数据较为一致。Wildhagen 等^[29]用 SSIIM 模型,结合 Dey^[30]的横向倾角与纵向倾角同时存在的底坡上泥沙起动剪切应力公式,模拟了急弯处的泥沙运动以及河床变形情况,虽然弯道处的冲刷情况未能很准确地模拟出来,但模拟结果与实验数据相比,还是比较一致的。从这点来看,在模拟弯道的河床变形时,应该对弯道处泥沙输运的特点加以充分的考虑。

应用 SSIIM 模型, Olsen^[31]模拟了从顺直河道(入口处有一初始的弯曲段,如图 3(a)所示)到弯道的自由演变过程,与实验相比,能够很好地模拟出弯道演变过程中的许多特性。

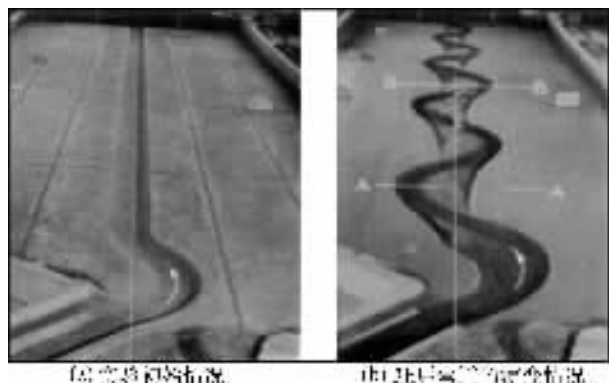


图3 Friedkin 研究弯曲河道演变的实验^[32]

Ruether 等^[33]进一步模拟了完全顺直河道到弯道的演变过程,但与 Friedkin^[32]的实验结果相比还存在着一定的差异。他们对此差异的解释是,模拟过程中在进口处进行了加沙处理,而根据 Friedkin 的实验研究,进口处进行加沙处理对弯道的形成和发展影响较大。之后, Ruether 等^[34]在 2005 年发表的从初始顺直河道到弯道演变过程的模拟结果显示,在模拟初始为完全顺直的河道,且模拟时在进口处未进行加沙处理的条件下,很好地模拟了河道的横向摆动过程,但与实验数据相比同样还存在着一定的差异,主要体现在每个蜿蜒段的蜿蜒波长低估了约 30%。同时,从模拟的情况来看,河道开始发生弯曲的位置、弯曲弧度的大小与水位下降值的大小以及在水槽末端弯道的位置是否固定等因素有关,这也就意味着模拟弯道的自由形成和发展还需要进一步的研究。

Olsen 及其研究小组在关于弯道形成及其发展的三维数值模拟这一领域当中,做了开创性的工作。但是在 SSIIM 模型中,河道的横向摆动过程是“自

动'获得的,即通过计算水流对侧岸的直接冲刷以及泥沙的淤积来确定河岸的横向变形,并未加入河岸失稳的力学模型,而这点对于河流的横向摆动却是起着控制性作用的;此外模型中自由水面的计算采用了刚盖假定,这对水流精细结构的模拟来说是不够的,还有待改进。

文献[35]用商业软件 FLOW-3D 模拟了理想弯道在演变过程不同时刻的水流情况,并比较了演变过程中不同时刻的速度(主流、二次流以及床面剪切速度)以及紊动结构分布情况的异同。但弯道横向摆动演变过程中的几何形态,包括蜿蜒角度、床面高程、横比降等参数并不是通过河床变形(包括横向变形与纵向变形)模型计算得到的,而是通过 Beck^[36]的弯道几何形态的经验公式计算得到的,如图 4 所示(图中 x, y 为平面方向, z 为地面高程, Δt 为演变历时),这就使得弯道横向摆动过程中不同时刻的几何形态都过于理想化,与实际天然弯曲河流的复杂形态存在较大的差异。尽管如此,对理想弯道在演变过程不同时刻的水流情况进行模拟,对掌握弯道演变过程中泥沙输运以及岸滩受水流的冲刷情况仍有较大帮助。该研究中采用三维水流模型与弯道形

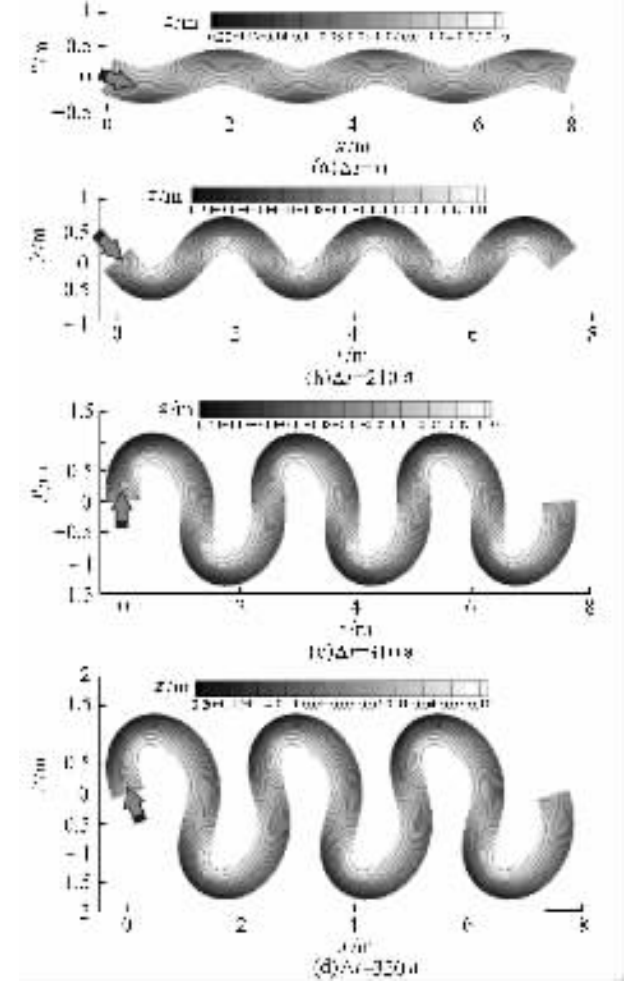


图 4 弯道演变过程不同时刻的弯道形态^[35]

态(包括断面形态与平面形态)经验公式相结合的方法,使得计算效率大大提高,可以模拟出较长历时的弯道变形过程当中的水流情况。

黄国鲜^[37]采用双网格技术开发的三维水沙数学模型,通过大量的实验结果验证,能够较好地模拟实验室内弯道的水沙输运及演变过程。该模型较 SSIIM 模型已经有了较大的进步,不仅在 Osman 等^[18]河岸冲刷模型的基础上考虑了河岸的失稳机理,还考虑了非均匀沙的不平衡输运作用。模型在模拟弯道演变时需要实时生成正交网格,存在一定的困难。此外,模型当中虽然考虑了边岸失稳的模块,但是简化程度较大,并未考虑不同河岸物质组合(如二元结构)条件下弯道的横向摆动。

以上这些弯道横向摆动三维数值模拟方面的研究,基本上是针对实验室内水槽进行的,与实际河流演变的预测还有一定的距离。要将河床演变(包括横向变形和纵向变形)的三维数值模拟应用到实际生产当中,还有大量的工作要做。

4 需要进一步研究的问题

正是由于弯道处的变量基本上都是三维的,因此最符合实际情况的描述模型也应该是三维的,这也是弯道横向摆动数值模拟的主要进展。随着计算技术的发展,三维模型的使用已经成为了可能,这也是数学模型发展的一种趋势。现有的三维数学模型已能模拟出弯道的演变过程,但是由于问题的复杂性,还有许多问题需要进一步研究,这主要包括:

- a. 泥沙输运本身固有的问题,特别是处于弯道处泥沙的运动规律,还需要进一步研究,不同泥沙输运形式对弯道演变的作用还需要进一步分析。
- b. 更符合天然情况弯道演变的数值模拟,如具有复式断面的弯道,在考虑水位变化时槽滩之间的相互作用下,水流结构及相应的河床变形(包括纵向变形与横向变形)的研究。
- c. 考虑不同河岸物质组合(如二元结构)条件下,以及存在天然或人工抗冲节点时,弯道横向摆动的力学机理及模拟还需要进一步研究。
- d. 目前对岸滩变形的研究主要是针对岸滩的崩塌机理进行的,但对岸滩的淤长过程却很少给予重视,而岸滩淤长之后,上面植物的生长对整个河岸的变形又有很大的影响,不能简单地假设河岸的后退速度和对岸相应的淤进速度一致。
- e. 在人为的影响以及考虑生态环境等方面的因素时,如流域来水来沙条件发生大幅变化后,弯道演变过程势必受到影响,在这种情况下河型变化趋势将如何,也有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.
- [2] ODGAARD A. River meander model, I: development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989,115(11):1433-1450.
- [3] ODGAARD A. River meander model, II: application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989,115(11):1451-1464.
- [4] RICHARDSON W R. Simplified model for assessing meander bend migration rate [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,128(12):1094-1097.
- [5] CHEN D, DUAN J G. Simulation of meandering channel evolution with an analytical model[C]//GERALD S, DONALD F H, DAVID K S. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management: Proceeding of World Water Congress. Salt Lake City, Utah, 2004.
- [6] LANCASTER S T, BRAS R L. A simple model of river meandering and its comparison to natural channels [J]. Hydrological Processes, 2002,16(1):1-26.
- [7] TAO S, MEAKIN P, JOSSANG T. A computer model for meandering rivers with multiple bed load sediment sizes, I: theory [J]. Water Resources Research, 2001,37(8):2227-2241.
- [8] TAO S, MEAKIN P, JOSSANG T. A computer model for meandering rivers with multiple bed load sediment sizes, II: computer simulations [J]. Water Resources Research, 2001,37(8):2243-2258.
- [9] JOHANNESSON H, PAKER G. Linear theory of river meanders, river meandering [J]. Water Resource Monograph, 1989, 12:181-213.
- [10] ABAD J D, GARCIA M H. Conceptual and mathematical model for evolution of meandering rivers in naturalization processes[C]//GERALD S, DONALD F H, DAVID K S. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management: Proceeding of World Water Congress. Salt Lake City, Utah, 2004.
- [11] EATON B C, CHURCH M, DAVIES T R H. A conceptual model for meander initiation in bedload-dominated streams [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(7):875-891.
- [12] COULTHARD T J, VANDEWIEL M J. A cellular model of river meandering [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006,31(1):123-132.
- [13] WANG SAM S Y, JIA Y. CCHE2D: A two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flow over loose bed [R]. Mississippi: The Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, 1997.
- [14] DUAN G. Simulation of alluvial channel migration processes with a two-dimensional numerical model [D]. Mississippi: University of Mississippi, 1998.
- [15] DUAN G, JIA Y, WANG SAM S Y. Simulation of meandering channel migration processes with the enhanced CCHE2D [C]//GRAF W H. Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millenium: Proceedings of the 28th IAHR Congress. Graz, Austria, 1999:376-385.
- [16] DUAN G, WANG SAM S Y, JIA Y. The applications of the enhanced CCHE2D model to study the alluvial channel migration process [J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(5):1-12.
- [17] 夏军强,王光谦.考虑河岸冲刷的弯曲河道水流及河床变形的数值模拟 [J]. 水利学报, 2002(6):60-66.
- [18] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis, I: theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2):134-150.
- [19] DUAN G, FRENCH R. Simulation of meandering channel migration processes with an enhanced two-dimensional numerical model [C]//DON P, GERALD S. Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges: Proceeding of World Water Congress. Orlando, Florida, 2001.
- [20] DUAN G, JULIEN P Y. Numerical simulation of the inception of channel meandering [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005,30(9):1093-1110.
- [21] NAGATA N, HOSODA T, MURAMOTO Y. Numerical analysis of river channel processes with bank erosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000,126(4):243-252.
- [22] 钟德钰,张红武.考虑环流横向输沙及河岸变形的平面二维扩展数学模型 [J]. 水利学报, 2004(7):14-20.
- [23] CHANG-LAE J, SHIMIZU Y. Numerical simulation of relatively wide, shallow channels with erodible banks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,131(7):565-575.
- [24] CHANG-LAE J, SHIMIZU Y. Numerical simulation of the behavior of alternate bars with different bank strengths [J]. Journal of Hydraulic Research, 2005, 43(6):596-612.
- [25] MOSSELMAN E. Morphological modelling of rivers with erodible banks [J]. Hydrological Processes, 1998, 12(8):1357-1370.
- [26] STRUIKSMA N. Prediction of 2-D bed topography in rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111:1169-1182.
- [27] DARBY S E, ALABYAN A M, WIEL V M J. Numerical simulation of bank erosion and channel migration in meandering rivers [J]. Water Resources Research, 2002,38(9):1-21.
- [28] RUETHER N, OLSEN N R B. Three-Dimensional modeling of sediment transport in a narrow 90° channel bend [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,131(10):917-920.
- [29] WILDHAGEN J, RUETHER N, OLSEN N R B, et al. Three dimensional modeling of sediment transport in a sharply curved menadering channel [C]//BYONG H J, SANG L, WON S, et al. Water engineering for the future: choices and challenges: Proceeding of 31st IAHR Congress. Seoul, Korea, 2005:1659-1664.

[30] DEY S. Experimental study on incipient motion of sediment particles on generalized sloping fluvial beds[J]. International Journal of Sediment Research, 2001,16(3) 391-398.

[31] OLSEN N R B. 3D CFD modeling of a self-forming meandering channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,129(5) 366-372.

[32] FRIEDKIN J F. A laboratory study of the meandering of alluvial rivers [R]. Mississippi: US Army Engineer Waterways Experiment Station,1945.

[33] RUETHER N, OLSEN N R B. CFD modeling of meandering river evolution[C]//GANOULIS J,PRINOS P. Proceeding of 30st IAHR Congress. Thessaloniki, Greece,2003.

[34] RUETHER N, OLSEN N R B. Advances in 3D modeling of free-forming meander formation from initially straight alluvial

channels[C]//BYONG H J, SANG L, WON S,et al. Water engineering for the future : choices and challenges Proceeding of 31st IAHR Congress. Seoul,Korea,2005 1465-1472.

[35] ABAD J D, GARCIA M H. Hydrodynamics in Kinoshita-generated meandering bends : importance for river-planform evolution[C]//River, Coastal and Estuarine Morphodynamics : RCEM 2005. London : Taylor & Francis Group, 2006 761-771.

[36] BECK S M. Computer-simulated deformation of meandering river patterns [D]. Minnesota : University of Minnesota, 1988.

[37] 黄国鲜. 弯曲和分叉河道水沙输运及其演变的三维数值模拟研究[D]. 北京 清华大学,2006.

(收稿日期 2006-09-02 编辑 马敏峰)

(上接第 73 页)

曹娥江大坝的 C_0 值。取样地点在标高 5.0 m(黄海标高,浪溅区)处,所测得的水溶性氯离子质量分数为 0.34%,所以取 $C_0=0.34\%$ 。钢筋腐蚀开始时临界氯离子质量分数可取为砂浆质量的 0.18%。 x 为保护层厚度,分别取 40 mm 和 60 mm 时,基于室内氯离子有效扩散系数的工程预测寿命见表 5。

由表 5 可知,当保护层厚度为 40 mm 和 60 mm 时,I 号配合比的普通混凝土预测寿命最短,分别只有 17 a 和 49 a,是难以保证工程百年耐久性的。IV 号配合比的高性能混凝土预测寿命最长,分别达到 384 a 和 1 223 a。基于室内氯离子有效扩散系数的工程预测寿命表明,高性能混凝土能显著延长工程寿命。

表 5 基于室内氯离子有效扩散系数的工程预测寿命

配合比编号	工程预测寿命/a	
	保护层厚度 40 mm	保护层厚度 60 mm
I	17	49
II	233	743
III	128	409
IV	384	1223
V	156	497

5 结 论

高性能混凝土的氯离子有效扩散系数在 $0.91\times 10^{-12}\sim 1.96\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 之间,小于普通混凝土,具有比普通混凝土更好的抗氯离子侵蚀性能。高性能混凝土有助于提高混凝土耐久性能,延缓钢筋锈蚀,显著延长曹娥江大坝的工程寿命。

参考文献：

[1] 浙江省曹娥江大坝枢纽工程可行性研究报告[R]. 杭州：浙江省水利水电勘测设计院,2003.

[2] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].

[3] GB 175—1999,硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥[S].

[4] GB 1718736—2002,高强高性能混凝土用矿物外加剂[S].

[5] JTJ 270—98,水运工程混凝土规程[S].

[6] MANGAT P S, MOLLOY B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete [J]. Materials and Structures, 1994, 27 338-346.

[7] DL/T 5150—2001,水工混凝土试验规程[S].

[8] 胡红梅,马保国. 矿物功能材料对混凝土氯离子渗透性的影响[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(3) 19-22.

[9] 胡彦军. 掺合料混凝土氯离子渗透快速试验校正及渗透性能规律研究[D]. 南京 南京水利科学研究院,2003.

(收稿日期 2006-02-21 编辑 熊水斌)

(上接第 66 页)

4.3.2 质量分析

通过对防渗墙进行墙体钻孔检查和墙体注水试验,钻孔取芯的芯样获得率可达 91.4%;注水试验测得最大渗透系数为 $1.16\times 10^{-6}\text{cm}$,满足设计值 $K_{20}\leq 1\times 10^{-5}\text{cm}$ 的要求。

三期土石围堰防渗工程完工后,经抽水检验,围堰的最大渗漏量为 350 L/h,满足设计要求,证明墙体质量优良。

综上所述,三峡三期土石围堰防渗墙施工所选择的成墙工艺实用有效,施工方案正确合理;4 种成墙工艺在施工中各显神通,成墙质量好,施工速度快,为三峡工程三期基坑提前闭气抽水及 RCC 围堰的尽早施工创造了良好的条件。

参考文献：

[1] 水利水电工程施工手册编委会. 水利水电工程施工手册 第 1 卷:地基与基础工程[M]. 北京:中国电力出版社, 2004 371-372.

[2] 中国葛洲坝集团公司. 三峡工程施工技术:二期工程卷 [G]. 北京:水利电力出版社,2003 672-676.

(收稿日期 2006-04-05 编辑 熊水斌)