

分层岸滩侧蚀坍塌过程及其水动力响应模拟

假冬冬¹, 黑鹏飞², 邵学军³, 张幸农¹

(1. 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;

2. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 3. 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: 非均质岸滩广泛分布于冲积河流中, 其侧蚀过程沿垂向具有分层特点。基于全三维水沙模型及河岸侧蚀坍塌力学模式, 提出动态网格跟踪技术, 构建了非均质岸滩侧蚀沿垂向差异的三维动力学模拟方法。以连续弯道概化水槽为例, 模拟分析了非均质河岸侧蚀过程中三维水流结构的响应特征。研究表明: 坡脚冲刷后, 底部主流向凹岸偏移, 在已有弯道环流的基础上, 于坡脚处出现一反向次生流; 上部粘性土层坍塌后, 坍塌土体堆积于坡脚处, 上部主流明显左偏, 下部次生流消失; 随着坡脚堆积体的冲刷搬运, 下部主流进一步向凹岸偏移; 如此循环, 主流不断向凹岸偏移, 致使岸坡持续崩退、河道摆动。

关键词: 非均质岸滩; 侧蚀坍塌; 水流结构; 三维数值模拟

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2014)01-0083-07

岸滩侧蚀坍塌是冲积河流平面演变的重要体现形式, 因作用于河岸水流冲刷力沿垂向的不同, 以及河岸土质沿垂向具有分层特征, 非均质河岸侧蚀在垂向上往往存在较大差异, 从而影响近岸水流结构分布, 并进一步影响河岸的冲刷形态。

河岸侧蚀坍塌机理及其模拟技术的研究是当前河流模拟的难点和热点问题。近年来, 国内外学者对考虑河岸崩塌的二维数值模拟方法进行了相关研究, 并对室内水槽、天然河流的演变过程进行了模拟分析^[1-5]。应当指出, 采用平面二维数值模型, 可较好地模拟河道平面上的河势演变过程, 但其显然无法直接模拟出非均质河岸侧蚀沿垂向的差异, 如二元结构河岸的“台阶式侵蚀”。可采用三维模型对岸滩侧蚀沿垂向差异特征进行研究, 但目前还未见相关的方法对此进行模拟分析, 如何实现岸滩侧蚀沿垂向差异的准确拟合与跟踪, 是其中一大难点, 直接影响水流结构及河岸冲刷形态的模拟结果。为此, 本文基于全三维水沙模型及河岸侧蚀坍塌力学模式研究成果^[6-12], 提出动态网格跟踪技术, 构建非均质岸滩侧蚀沿垂向差异的三维动力学模拟方法, 在此基础上, 进一步探讨河岸侧蚀过程中三维水流结构的响应特征。

1 非均质岸滩侧蚀坍塌数值模拟技术

1.1 非均质岸滩侧蚀坍塌机理及模式

均质河岸的坍塌机理十分复杂^[13-14], 天然冲积河流中, 岸滩沿垂向往往又具有分层特征, 其中二元结构河岸是最为常见的形式之一, 其下部为非粘性砂组成、上部为粘性土, 下荆江河岸即为典型的二元结构。当河床下部非粘性土被水冲走后, 而上部粘土层能够保持原状时, 则出现悬挂的土块, 如底部淘刷而使得土块的宽度增大、强度降低, 将使悬挂土块不能支持而坍塌。其侧蚀坍塌机理可分为两个相互作用的过程^[9], 一个是水流直接淘刷下部非粘性沙层的侧蚀过程, 另一个就是上部粘性土层在重力作用下的失稳过程。二元结构河岸上部粘性土层由悬移质(包括冲泻质)中的细颗粒泥沙沉积而成, 并经历了长时间的密实和粘结过程, 具有较强的抗冲性。坍塌后的上部粘性土体将堆积于近岸坡脚处, 对覆盖的近岸河床起着掩护作用^[10],

收稿日期: 2013-05-03; 网络出版时间: 2013-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20131130.1543.003.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB04B03); 国家自然科学基金资助项目(51109140)

作者简介: 假冬冬(1982—), 男, 广西桂林人, 博士, 主要从事河流海岸动力学研究。E-mail: ddjia@nhri.cn

但随着水流的冲刷搬运, 岸滩将进一步侧蚀坍塌。

下部非粘性沙层的侧蚀可由 Osman 公式计算^[11], 亦可由笔者提出的岸滩侧蚀速率公式计算^[12]:

$$\omega_b = \lambda \sqrt{\frac{\gamma(u^2 - u_c^2)}{\gamma_b}} \quad (1)$$

式中 ω_b 为岸滩侧蚀速率; λ 为侧蚀系数; γ 为水体容重; γ_b 为河岸容重; u 为近岸处水流流速; u_c 为泥沙起动流速。

考虑相邻土体影响时, 二元结构上部挂空粘性土层的临界悬空长度可由下式计算^[6]:

$$\Delta W_c = \sqrt{\frac{T_b H_u}{3\left\{\gamma_b - \frac{c[p(i-1) + p(i+1)]}{B}\right\}}} \quad (2)$$

式中 ΔW_c 为粘性土层临界悬空长度; T_b 、 c 分别为粘性土层的抗拉强度、凝聚力; B 、 H_u 分别为粘性土层的纵向宽度及高度; $p(i-1)$ 、 $p(i+1)$ 分别为上、下游侧面所受凝聚力系数。

对于具有明显分层特征的二元结构岸滩, 上、下层抗冲性差异较大, 当坍塌的上层粘性土体堆积在坡脚处河床时, 其抗冲性增强, 对覆盖的近岸河床起着掩护作用。本文假定二元结构河岸上部粘性土层坍塌后, 按一定比例(掩护系数) p_b 均匀分布在近岸处形成掩护层, 另一部分 $(1-p_b)$ 则以源项形式转化为悬沙。掩护系数 p_b 由水流条件确定^[6,8], 当流量大, 水体紊动强时, 该值较小, 亦即坍塌体转化为悬沙的比例较大, 反之 p_b 则较大。由于坍塌的粘性土层并未及时与原床沙进行交换, 此时河床级配可由上层粘性土层级配来确定, 同时记录原河床级配及掩护层厚度 H_f 。其中掩护层厚度 H_f 由上部粘性土层的坍塌厚度 H_u 、长度 ΔW_c 以及岸坡长度 l_b 来确定, 即^[6,8]

$$H_f = \frac{H_u \Delta W_c}{l_b} p_b \quad (3)$$

式中 H_f 为掩护层厚度; l_b 为岸坡长度; p_b 为掩护系数(取值一般为 0.3~0.9)。

1.2 动态网格跟踪技术

河岸边界的准确跟踪是河道横向变形模拟的关键基础^[15]。非均质岸滩侧蚀模拟过程中, 如何实现侧蚀沿垂向差异的拟合与跟踪, 是其中一大难点。在应用模型对岸滩侧蚀进行模拟时, 岸滩在垂向各点的侧蚀宽度不一致, 且往往与该处计算网格宽度也不一致, 这就使网格对岸滩侧蚀的准确跟踪变得困难。因此一般的固定网格系统无法准确地处理这种动态的变化过程, 不能实时反映岸滩侧蚀变形对水沙输运的影响。针对目前存在的不足, 本文在笔者以往研究的基础上^[6-8], 基于非正交网格提出动态网格跟踪技术对岸滩侧蚀过程进行跟踪, 其基本思想为: 在整个大计算域内生成网格, 在模拟过程中, 仅对岸滩侧蚀附近的垂向网格进行移动, 使其能够准确地跟踪岸滩垂向各点的位置, 同时其余网格位置不变。这样既能较为准确地拟合岸滩侧蚀后的岸坡形态, 以实时反映岸滩侧蚀对水沙输运计算的影响, 又无需重新生成整个计算域内的网格, 弥补了传统固定网格以及动网格在这方面的一些不足。

现结合二元结构河岸的侧蚀过程示意说明。岸滩侧蚀前形态如图 1 中 ABE 折线所示, BE 由初始网格 $(i+1)$ 描述。模拟过程中, 由三维水沙动力学模型计算岸滩侧蚀分布, 受岸滩组成沿垂向差异的影响, 下部冲蚀多、上部冲刷少, 岸滩侧蚀后形态为悬臂式, 如图 1 中 $AB'C'D'E'$ 折线所示。此时, 侧蚀后的岸滩形态则通过动态网格跟踪技术对其进行描述: 通过移动初始网格 $(i+1)$ 中相应垂向网格 $(k_1 \sim k_2)$ 的水平位置, 使其与 $B'C'$ 位置保持重合; 通过移动初始网格 (i) 中相应垂向网格 $(1 \sim k_1)$ 的水平位置, 使

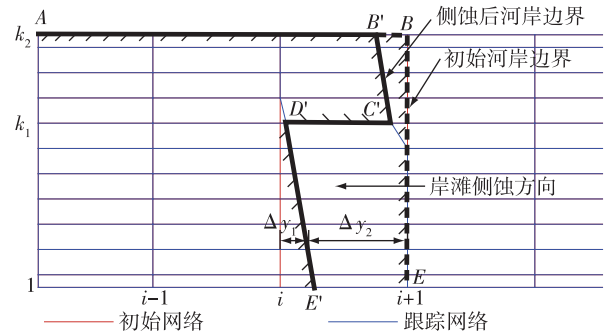


图 1 垂向网格跟踪示意

Fig. 1 Sketch of the vertical adaptive grids system

其与 $D'E'$ 位置保持一致。当相邻网格尺度差异大时, 易出现计算发散, 为此在网格跟踪过程中, 采用数组记忆岸滩垂向各点位置与水平相邻网格节点的距离 (图 1 中 Δy_1 、 Δy_2), 经水流冲刷、岸滩侧蚀后, 依据 Δy_1 与 Δy_2 的相互关系来识别确定跟踪网格, 以避免相邻网格尺度差异巨大的奇异网格产生; 当 $\Delta y_1 < \Delta y_2$ 时, 岸坡位置由网格 (i) 跟踪, 网格 ($i+1$) 保持在原初始网格位置不变; 当 $\Delta y_1 > \Delta y_2$ 时, 岸坡位置由网格 ($i+1$) 跟踪, 网格 (i) 同样保持在原初始网格位置不变。由此, 即可实现基于非正交网格的动态网格跟踪技术对岸滩侧蚀过程的识别与描述。

1.3 岸滩侧蚀数值模拟流程

岸滩侧蚀三维数值模拟过程中, 首先给定各变量初值, 采用三维水沙模型^[6-8]计算该时刻流场、水位等水流信息; 然后依据水流场结果, 计算各粒径组悬沙含沙量及推移质输沙率; 在此基础上, 计算河床垂向变形, 更新地形; 根据岸滩侧蚀坍塌力学模式, 计算坡脚侧蚀距离, 同时依据动态网格跟踪技术来识别岸滩位置, 依次循环判断相邻岸滩状态, 若失稳, 则修改岸滩及近岸地形。

2 连续弯道水流验证

采用连续弯道水槽试验对三维模型进行了验证。试验水槽平面布置如图 2 所示, 采用厚度为 0.6 cm 的透明有机玻璃制成, 总长为 15 m, 断面为矩形。两个 90° 弯道反向连接形成 180° 弯段, 整个水槽由 6 个等尺度 180° 弯段构成, 弯段间无直线过渡段。试验中为保证水槽进、出口的水流平顺, 分别于入口段前和出口段尾增加两直线段, 入口直线段长为 2.0 m, 其中前 1.0 m 部分用于放置消能设施, 下游出口直线段长为 1.0 m。弯道底坡为 0.000 3^[16]。

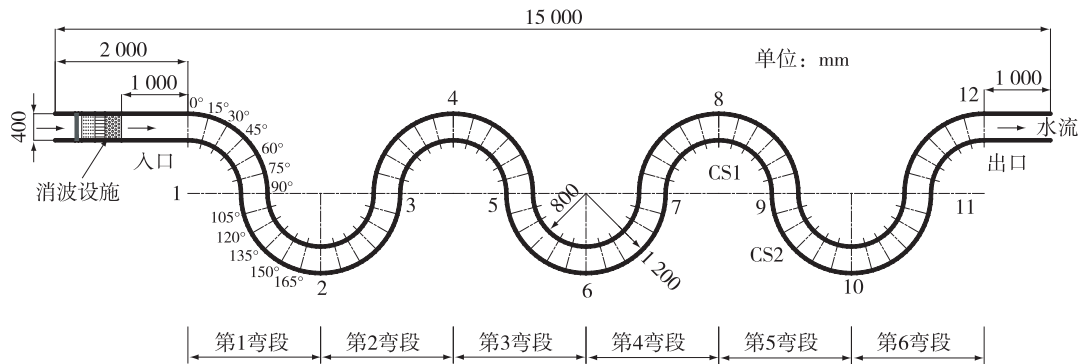


图 2 连续弯道水槽平面布置^[16]

Fig. 2 Layout of the experimental meandering channel

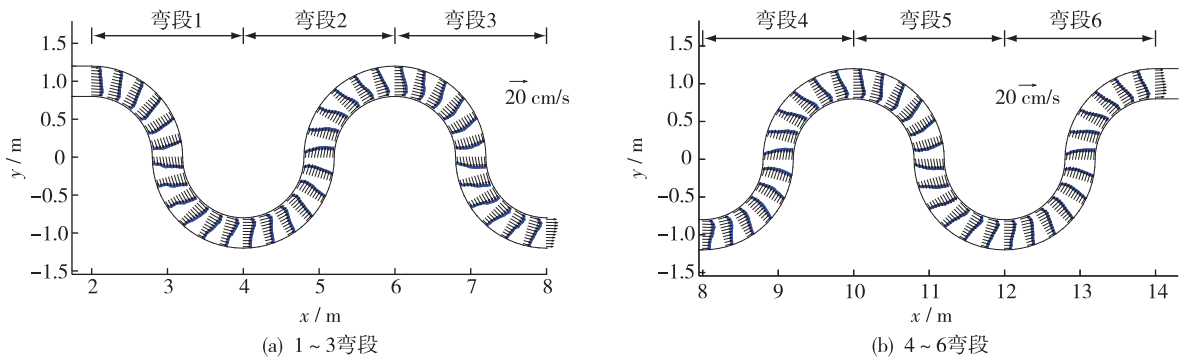


图 3 沿水深平均流速分布验证 (计算值以箭头表示, 实测值以粗实线表示)

Fig. 3 Comparison of depth-averaged velocity between simulated and measured results

图 3 给出了流量 $0.004\ 17\ \text{m}^3/\text{s}$ 、平均水深 $10.20\ \text{cm}$ 条件下,连续弯道沿水深平均流速实测值与模拟值的沿程分布对比情况。由图 3 可见,模拟值与实测值较为吻合。第 1 弯段处由于水流还未得到充分发展,因此其流速沿横向的分布与之后弯段还存在一定差异;从第 2 弯段往后各弯段内水流发展较为充分,其流速分布趋于一致。弯道水流充分发展后的第 5 弯段中的 CS1、CS2 断面(位置见图 2)流速沿水深分布验证结果见图 4(z 为测点距弯道底部距离, d 为水深, x 为测点距凸岸距离, B 为弯道宽度)。由图 4 可见,除个别数据点差别略大外,模拟结果与实测值较为一致。在断面中心区域最大流速位于水面附近;而靠近岸壁处最大流速则位于水面以下,甚至靠近水底;模型能较好地模拟出流速沿水深的分布情况。

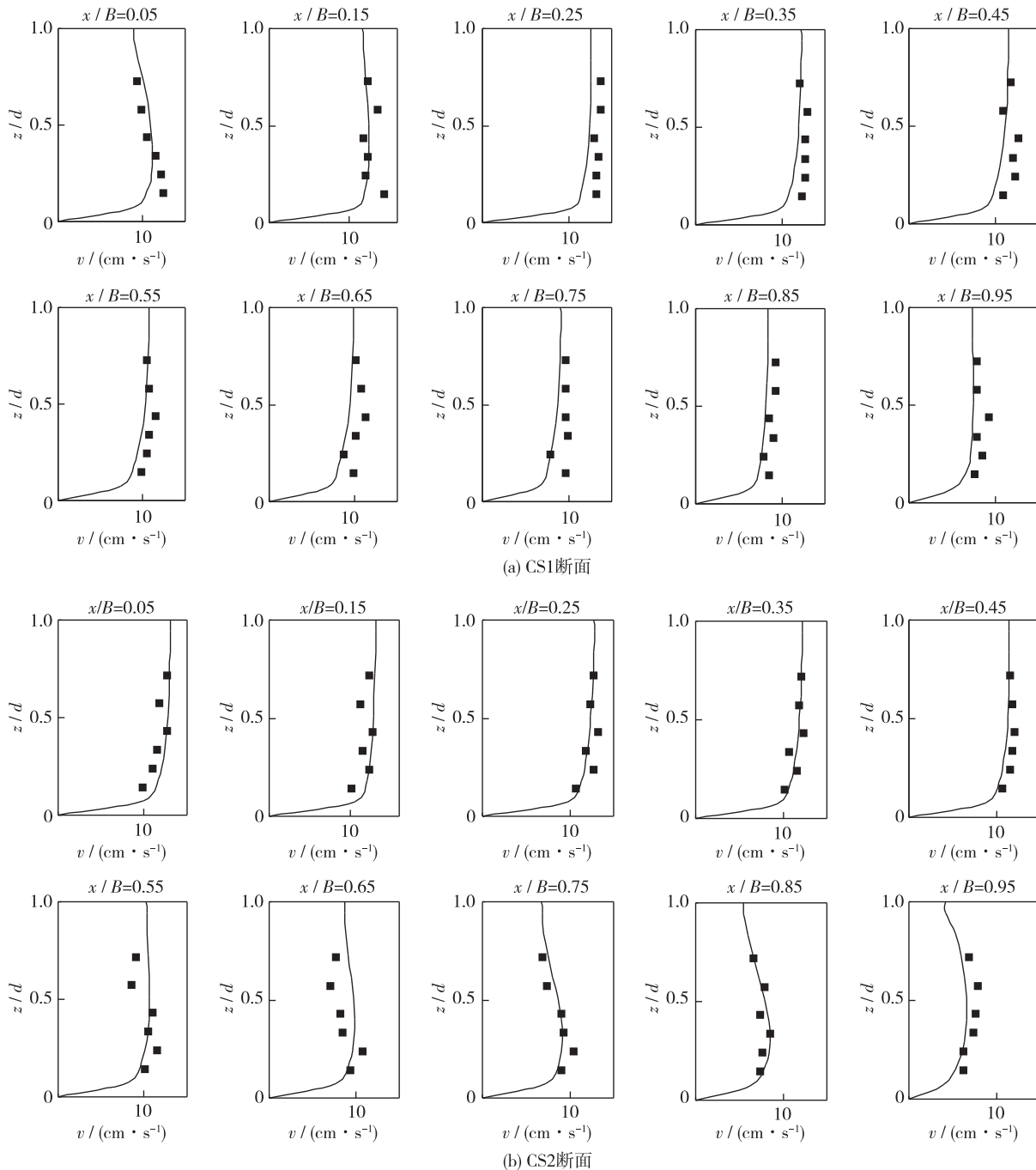


图 4 典型断面流速沿水深分布验证(计算值以实线表示,实测值以点表示)

Fig. 4 Simulated and measured vertical velocity distribution at typical cross-sections

3 岸滩侧蚀过程及其水动力响应特征

天然冲积河道中, 蜿蜒河流崩岸特征最为显著, 其演变过程凸岸淤积、凹岸冲刷, 河道横向摆动。采用前述平面形态的连续弯道对岸滩侧蚀沿垂向的差异特征及其水动力响应进行概化模拟分析。连续弯道宽为 4 m, 弯顶处 8#断面初始断面形态如图 5(a) 所示(断面位置见图 2), 可冲蚀岸坡设置在左侧凹岸, 岸坡上部为粘土(厚 0.3 m, 粒径 0.02 mm)、下部为非粘性沙(粒径 0.20 mm)。概化模拟过程为强清水冲刷, 流量恒定为 $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均流速约为 1.2 m/s; 为分析岸滩侧蚀沿垂向的差异特征及其水动力响应, 假定弯道底部不可冲, 抗冲层沿图 5(a) 所示的 1:5.5 斜坡分布; 河岸可冲的部位为弯道水流发展充分的 7#至 9#断面间, 其余河岸均假定不可冲。模拟过程中水流泥沙时间步长均为 0.5 s。

图 5 给出了弯顶处 8#断面岸滩侧蚀过程及其水动力变化特征。由图 5 可见, 坡脚沿着抗冲层发生冲刷, 底部主流向左侧凹岸偏移(图 5(b) 所示); 随着下部非粘性土层的冲刷发展, 底部主流进一步偏向凹岸, 同时在已有逆时针弯道环流的基础上, 于坡脚处出现一(反向)顺时针方向次生流, 如图 5(c) 所示; 上部粘性土层坍塌后, 崩塌土体堆积于坡脚处, 上部主流明显左偏, 下部的次生流消失, 如图 5(d) 所示; 随着坡脚堆积体的冲刷搬运, 下部主流进一步向凹岸偏移(图 5(e) 所示)。如此循环, 主流不断向左侧凹岸偏移, 致使岸坡持续崩退、河道摆动。

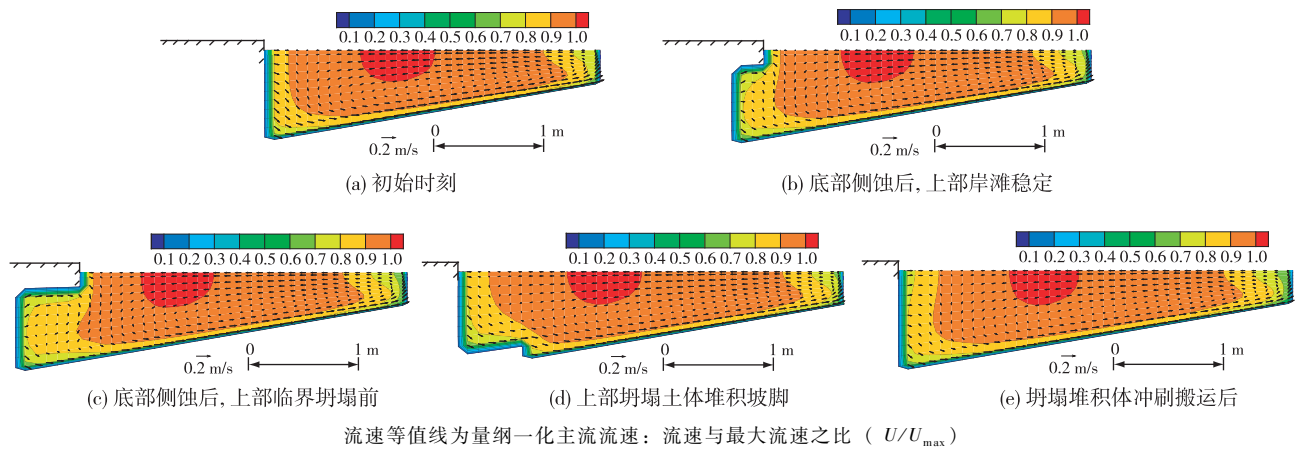


图 5 岸滩侧蚀过程及其水动力响应特征

Fig. 5 Bank erosion processes and its flow structure variations

由此可见, 采用动态网格跟踪技术, 可较好地识别和跟踪河岸侧蚀沿垂向的差异; 数值模型可较好地模拟河岸侧蚀过程中三维水流结构的变化特征。应当指出, 本文仅对非均质岸滩侧蚀坍塌过程及其水动力响应进行了概化模拟分析, 天然实际岸滩侧蚀机理及形态均十分复杂, 还有待进一步深入研究。

4 结 论

天然冲积河流中, 岸滩沿垂向具有分层特征, 此外, 作用于河岸水流冲刷力沿垂向亦不同, 河岸侧蚀在垂向上往往存在较大差异, 从而影响近岸水流结构分布, 并进一步影响河岸的冲刷形态。以二元结构河岸为例, 对河岸侧蚀沿垂向差异特征的三维水沙动力学模拟方法进行了研究, 基于非正交曲线网格的动态网格跟踪技术, 可较好地识别和跟踪河岸侧蚀沿垂向的差异。

河岸侧蚀过程中, 近岸水流结构发生明显变化, 数值模型可较好地模拟河岸侧蚀过程中三维水流结构的变化特征。连续弯道水槽概化模拟结果表明: 坡脚冲刷后, 底部主流向凹岸偏移; 随着下部非粘性层的冲刷发展, 底部主流进一步偏向凹岸, 同时在已有逆时针弯道环流的基础上, 于坡脚处出现一顺时针方向次生

流;上部粘性土层坍塌后,崩塌土体堆积于坡脚处,上部主流明显左偏,下部次生流消失;随着坡脚堆积体的冲刷搬运,下部主流进一步向凹岸偏移。如此循环,主流不断向左侧凹岸偏移,致使岸坡持续崩退、河道摆动。研究结果有助于进一步深入理解河弯凹岸冲蚀机理。

参考文献:

- [1] MOTTA D, ABAD J D, LANGENDOEN E J, et al. A simplified 2-D model for meander migration with physically-based bank evolution [J]. *Geomorphology*, 2012, 163:10-25.
- [2] WANG Hong, ZHOU Gang, SHAO Xuejun. Numerical simulation of channel pattern changes: Part I: Mathematical model [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2010(4): 366-378.
- [3] WANG Guangqian, XIA Junqiang, WU Baosheng. Numerical simulation of longitudinal and lateral channel deformations in the braided reach of the lower Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 2008, 134(8): 1064-1078.
- [4] DONG Chen, DUAN J G. Case study: Two-dimensional model simulation of channel migration processes in west Jordan River, Utah [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 2008, 134(3): 315-327.
- [5] 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, 35(7): 14-20. (ZHONG Deyu, ZHANG Hongwu. Extended 2-D numerical model for alluvial river considering transverse transport of sediment and bank erosion due to secondary flow in river bends [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(7): 14-20. (in Chinese))
- [6] JIA Dongdong, SHAO Xuejun, WANG Hong, et al. Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(3): 348-360.
- [7] 假冬冬, 邵学军, 王虹, 等. 考虑河岸变形的三维水沙数值模拟研究 [J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 311-317. (JIA Dongdong, SHAO Xuejun, WANG Hong, et al. Three dimensional mathematical modeling for fluvial processes considering bank erosion [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 311-317. (in Chinese))
- [8] 假冬冬. 非均质河岸河道摆动的三维数值模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2010. (JIA Dongdong. Three-dimensional numerical simulation of lateral migration of alluvial channels with composite banks [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [9] FUKUOKA Shoji. 自然堤岸冲蚀过程的机理 [J]. *水利水电快报*, 1996(2): 29-33. (FUKUOKA Shoji. Mechanisms of the erosion processes of natural dike banks [J]. *Express Water Resources and Hydropower Information*, 1996(2): 29-33. (in Chinese))
- [10] 余文畴, 卢金友. 长江河道崩岸与护岸 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (YU Wenchou, LU Jinyou. Bank failure and protection in the Yangtze River [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2008. (in Chinese))
- [11] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis: I: Theory [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1988, 114(2): 134-150.
- [12] 假冬冬, 张幸农, 应强, 等. 流滑型崩岸河岸侧蚀模式初探 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 813-817. (JIA Dongdong, ZHANG Xingnong, YING Qiang, et al. Preliminary study on the analytical model for slide collapse of riverbanks [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 813-817. (in Chinese))
- [13] 黄本胜, 白玉川, 万艳春. 河岸崩塌机理的理论模式及其计算 [J]. *水利学报*, 2002, 33(9): 49-54. (HUANG Bensheng, BAI Yuchuan, WAN Yanchun. Model for dilapidation mechanism of riverbank [J]. *Journal of Chinese Hydraulic Engineering*, 2002, 33(9): 49-54. (in Chinese))
- [14] 王延贵, 匡尚富. 河岸临界崩塌高度的研究 [J]. *水利学报*, 2007, 38(10): 1158-1165. (WANG Yangui, KUANG Shangfu. Critical height of bank collapse [J]. *Journal of Chinese Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1158-1165. (in Chinese))
- [15] 胡德超, 钟德钰, 张红武, 等. 三维悬沙模型及河岸边界追踪方法: II: 河岸边界追踪 [J]. *水力发电学报*, 2010, 29(6): 106-113. (HU Dechao, ZHONG Deyu, ZHANG Hongwu, et al. 3-D suspended-load model and moveable river bank tracking: Part 2: Tracking of moveable river bank [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(6): 106-113. (in Chinese))
- [16] WANG Bo, JIA Dongdong, ZHOU Gang, et al. An experimental investigation on flow structure in channel with consecutive bends [C]//16th IAHR-APD Congress and 3rd IAHR-ISHS. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.

Numerical simulation of bank erosion processes with composite materials and variations in flow structure *

JIA Dongdong¹, HEI Pengfei², SHAO Xuejun³, ZHANG Xingnong¹

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Riverbanks with composite materials are commonly found on alluvial rivers. Lateral erosion processes of such banks are very different along the vertical direction. On the basis of three-dimensional (3-D) flow and sediment transport model and mechanisms of riverbank erosion, a 3-D numerical method was developed for simulating bank erosion processes with composite materials using the adaptive grid scheme. The 3-D numerical method is applied to a conceptual meandering channel, and to simulate the variation of 3-D flow structure as erosion of the bank progresses. Results show that the main flow migrates towards the concave bank after the erosion of bank toes, and then, a new secondary flow structure with reverse direction compared to the initial secondary flow structure is formed on the bank toe. The main flow migrates further towards the concave bank after the collapse of upper layers, and the new secondary flow structure on the bank toe disappears. Again, the main flow migrates towards the concave bank after the erosion of bank toes. Thus, the main flow migrates towards the concave bank step by step, resulting in a continue bank erosion and channel migration.

Key words: riverbanks with composite materials; bank erosion processes; flow structures; 3-D numerical simulation

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 12th Five-year Plan Period (No. 2012BAB04B03) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51109140).