

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20110911. 1135. 014

# 流滑型崩岸河岸侧蚀模式初探

假冬冬, 张幸农, 应强, 陈长英, 张思和

(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:** 流滑型崩岸是冲积河流河岸常见的一种崩塌形式, 其发展速度快、破坏力强; 该类崩岸主要取决于水流的直接冲刷, 河岸崩退过程中水面与岸顶高差较小。依据此类崩岸的特征, 基于水流冲刷分析, 在基础层面上初步探讨并建立了流滑型崩岸的河岸侧蚀模式。结合水槽试验与土工离心模拟试验, 对该模式进行了分析研究, 初步率定了模式中的河岸侧蚀系数, 计算值与实测值吻合较好。该模式参数少、应用方便, 可为流滑型崩岸中河岸侧蚀的估算及河道横向变形数值模拟提供参考依据。

**关键词:** 流滑型崩岸; 河岸侧蚀; 计算模式; 冲积河流; 试验研究

**中图分类号:** TV147      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2011)06-0813-05

冲积河流自然演变过程包括河床沿垂向的冲淤变化以及河道的横向变形。河岸崩塌是河道横向变形的重要表现形式, 不同类型的崩岸具有不同机理及模式, 其中坍塌型崩岸和流滑型崩岸是长江中下游河岸常见的两种崩塌形式。冲积作用下的河岸崩塌主要由水流冲刷以及上部土体失稳两过程所构成。坍塌型崩岸是水流冲刷坡脚形成高大陡坡后出现的土体失稳倒塌, 其水面距岸顶具有一定高度。流滑型崩岸则是冲刷过程中出现的土体崩落, 而崩落土体又被水流迅速带走, 在长江下游受水流直接顶冲的部位时有发生, 如南京龙潭河段仁本圩和江都河段嘶马河口窝崩, 以及1996年1月3日镇江河段人民滩发生的崩岸, 都属此类崩岸<sup>[1]</sup>, 其崩塌过程水面与岸顶的高差相对较小, 河岸崩退主要取决于水流的直接冲刷, 且发展速度快, 破坏力强。目前对坍塌型崩岸机理已开展一定研究, 建立了不同岸体失稳的判别模式<sup>[2-6]</sup>, 并应用于河道摆动数值模型计算中<sup>[6-10]</sup>, 但对于受水流直接冲刷而产生的流滑型崩岸模式的研究则甚少。为此, 本文采用水槽试验、土工离心模拟试验及理论分析相结合对流滑型崩岸进行研究, 在基础层面上初步探讨并建立河岸侧蚀冲刷的模式, 可为河岸崩退的模拟及预测提供参考依据。

## 1 流滑型崩岸侧蚀模式分析

流滑型崩岸主要出现在中水期、洪水期近岸流速较大的岸段, 以长江下游水深流急的岸段居多, 崩塌过程中水面与岸顶的高差较小, 河岸的崩退过程与水流的直接冲刷密切相关。因此, 可认为流滑型崩岸为河岸受水流直接冲刷而造成的后退过程。本节将基于水流冲刷分析, 在基础层面上初步探讨其侧蚀模式。

河岸空隙率为 $\varepsilon$ 的单位面积上(单层)泥沙颗粒总重为

$$m = n \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s = \eta \frac{1 - \varepsilon}{\frac{\pi}{4} d^2} \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s = \frac{2}{3} \eta d \rho_b \quad (1)$$

式中  $n$  为单位面积上(单层)泥沙颗粒总数;  $d$  为泥沙粒径;  $\rho_s$  为泥沙密度;  $\varepsilon$  为孔隙率;  $\rho_b$  为河岸密度;

收稿日期: 2010-12-24; 网络出版时间: 2011-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110911.1135.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779038; 51109140)

作者简介: 假冬冬(1982-), 男, 博士, 广西桂林人, 主要从事河流海岸动力学研究。

E-mail: [jiadongdong@tsinghua.org.cn](mailto:jiadongdong@tsinghua.org.cn)

泥沙颗粒为非正规球体, 公式中引入泥沙颗粒形状系数  $\eta$ 。

结合泥沙受力分析, 一方面为引发泥沙起动的水流作用力, 另一方面则是阻止泥沙起动的综合阻力, 可由起动流速表示。两者相结合, 并以单位面积的泥沙颗粒为考虑对象, 则综合作用力表示为

$$F = \tau_f - \tau_c = \zeta \rho (u^2 - u_c^2) \quad (2)$$

式中  $\tau_f$  为单位面积上水流作用力;  $\tau_c$  为单位面积上泥沙颗粒起动所需的作用力;  $\rho$  为水流密度;  $u$  为近岸处水流流速;  $u_c$  为泥沙起动流速;  $\zeta$  为作用力系数。

假定泥沙起动时刻为匀加速运动, 水流作用下单位面积(单层)泥沙颗粒运动  $k$  倍粒径 ( $kd$ ) 所需时间为  $\Delta t$ , 则有:

$$\frac{1}{2} a \Delta t^2 = \frac{1}{2} \frac{F}{m} \Delta t^2 = \frac{1}{2} \frac{\tau_b - \tau_c}{\frac{2}{3} \eta d \rho_b} \Delta t^2 = \frac{3}{4} \frac{\zeta \rho (u^2 - u_c^2)}{\eta d \rho_b} \Delta t^2 = kd \quad (3)$$

即

$$\Delta t = \sqrt{\frac{4k\eta\rho_b d^2}{3\zeta\rho(u^2 - u_c^2)}} \circ$$

冲刷厚度为单层泥沙厚度  $d$ , 则受水流冲刷产生的垂直于河岸(图1所示)的后退速率为

$$\omega_f = \frac{\Delta B_f}{\Delta t} = \frac{d}{\Delta t} = \sqrt{\frac{3\zeta\rho(u^2 - u_c^2)}{4k\eta\rho_b}} = \lambda \sqrt{\frac{\gamma(u^2 - u_c^2)}{\gamma_b}} \quad (4)$$

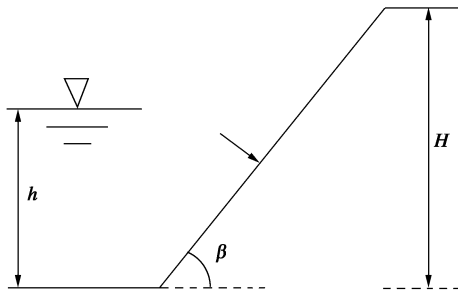


图1 河岸断面示意图

Fig. 1 Sketch of a riverbank profile

式中  $\Delta B_f$  为水流作用下垂直于河岸的冲刷距离;  $\lambda$  河岸侧蚀系数, 与岸体性质有关, 由实测值确定;  $\gamma_b$  为河岸泥沙组合的容重, 与岸体的密实度有关。

当上游来沙时, 需考虑泥沙落淤沉降过程, 依据泥沙的落淤通量则垂直于岸体的落淤强度表示为

$$\omega_D = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{\omega_s s_b \Delta t}{\Delta t \rho_b} \cos \beta = \frac{\omega_s s_b}{\rho_b} \cos \beta \quad (5)$$

式中  $\Delta z$  为泥沙落淤量;  $\omega_s$  为泥沙沉降速度;  $s_b$  为岸坡附近泥沙浓度;  $\beta$  为冲刷形成岸坡的坡度(图1)。

考虑水、沙共同影响时, 垂直于岸体的河岸侵蚀后

退速率为

$$\omega_f - \omega_D = \lambda \sqrt{\frac{\gamma(u^2 - u_c^2)}{\gamma_b}} - \frac{\omega_s s_b}{\rho_b} \cos \beta \quad (6)$$

根据几何关系, 岸体在水平方向上的实际侵蚀后退速率表示为

$$\omega_b = \left( \lambda \sqrt{\frac{\gamma(u^2 - u_c^2)}{\gamma_b}} - \frac{\omega_s s_b}{\rho_b} \cos \beta \right) \sin \beta \quad (7)$$

对于流滑型崩岸来说, 水面与岸顶高差较小, 假定水面以上土体崩塌后堆积于坡脚处, 仍按上述过程产生侧蚀, 则水深为  $h$ 、河岸高度为  $H$  的岸坡(图1)侵蚀后退速率为

$$\omega_b = \frac{h}{H} \left( \lambda \sqrt{\frac{\gamma(u^2 - u_c^2)}{\gamma_b}} - \frac{\omega_s s_b}{\rho_b} \cos \beta \right) \sin \beta \quad (8)$$

式(8)即为河岸侧蚀冲刷的初步计算模式, 冲刷后退时取值为正、淤进时为负。可见, 河岸的侧蚀速率主要与河岸的密度  $\rho_b$ 、河岸侧蚀系数  $\lambda$  (与岸体性质有关)、临界起动流速  $u_c$ 、水流流速  $u$ 、来沙量  $s_b$ 、岸坡相对尺寸  $h/H$  等参数有关。

上游无来沙、清水冲刷时,  $s_b = 0$ , 则式(8)可简化为

$$\omega_b = \frac{h}{H} \lambda \sqrt{\frac{\gamma(u^2 - u_c^2)}{\gamma_b}} \sin \beta \quad (9)$$

## 2 试验研究

流滑型崩岸的发展速度通常很快,天然河流中其发展过程的资料极其缺乏。为此,本文采用水槽试验和土工离心模拟试验的方法对流滑型崩岸的发展过程进行模拟,采用试验数据对河岸侧蚀模式进行定量分析。离心模拟试验中,将依据土力学相似理论,通过离心加速达到放大河岸尺寸的目的,使之与天然河岸的尺寸接近。

从长江下游南京河段三江口崩岸处采集天然土体作为试验沙。采样分两类:一部分是河岸下部的粉细沙,中值粒径约为0.20 mm,均匀系数1.20,其抗冲性较弱;另一部分为河岸上部的粘土,中值粒径约为0.01 mm,均匀系数1.28,其抗冲性较粉细沙强。

### 2.1 水槽试验

本项试验是一种概化的模拟试验<sup>[11]</sup>,采用了长江崩岸段原体沙,制作过程中将其密实,模型进口施放水,模拟坡前水流冲刷。模型布置成弯曲明渠水道,长度10 m、高1.2 m、坡比1:2。在弯道水流顶冲处的上、下段进行护岸处理,使水流冲刷未进行保护的河岸。试验过程中对近岸处水流流速及河岸的侧蚀后退距离进行了量测。

### 2.2 土工离心模拟试验

河岸侧蚀崩塌的土工离心模拟试验在南京水利科学研究所的400倍重力加速度大型离心试验机中进行。依据土力学相似理论,通过离心加速达到放大河岸尺寸的目的,使之与天然河岸高度接近。离心机的试验箱长120 cm、宽40 cm、高100 cm,并配备了加水系统以及高清摄像系统,试验中模拟了水流冲刷以及岸坡的崩退过程。

试验步骤如下:

(1) 在离心机试验箱内制作边坡为1:2、河岸最大高度为15 cm、长度为80 cm的河岸;制作过程进行密实处理。

(2) 将试验箱放置到离心机内,通过离心机的旋转,施加50倍重力加速度的离心加速度,达到放大岸坡尺寸50倍的目的,然后打开水阀,清水冲刷坡脚,从而产生侧蚀崩岸。

(3) 试验中通过高清摄像设备记录河岸的侧蚀后退过程,之后通过图像处理提取相关数据,包括:坡脚处水流要素、河岸坡脚处的侧蚀速率等。

## 3 结果与讨论

将水槽试验及土工离心试验的结果进行处理,并对式(9)中的河岸侧蚀系数 $\lambda$ 进行了初步率定。试验结果见表1,为方便起见,起动流速以坡脚处泥沙起动流速表示,采用张瑞瑾公式计算,两种沙样组合时,则按比例进行综合;河岸高度为发生河岸侧蚀部分的实际河岸平均高度,若将离心试验中河岸高度按加速比尺(50倍)换算可达1.5 m,与天然河岸尺寸较接近。试验观测表明,崩落的土体被水流迅速带走,冲刷形成的岸坡几乎为直立的,计算时取 $\beta = 90^\circ$ 。

从表中河岸侧蚀速率来看,随着水流冲刷力的增强、河岸抗冲性的减弱(粘土含量减少),河岸的侵蚀速率增大,式(9)能较好地反映出这一变化规律。应当指出,本文所建立的流滑型崩岸模式(式(8)或式(9))可较好地反映河岸侧蚀规律,计算值与实测值吻合较好;但相对来说试验中岸体组成较单一,且制作过程中也很难保持与天然岸体性质一致,而河岸侧蚀系数与岸体的性质(密实度、颗粒大小、植被等)密切相关,因此其取值还有待进一步分析和研究。

表 1 试验结果

Table 1 Results of centrifugal tests and flume experiments

试验组次	岸体组成	水流流速 $/(m \cdot s^{-1})$	起动流速 $/(m \cdot s^{-1})$	岸坡密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	水深 $/m$	河岸高度 $/m$	河岸侧蚀系数 $\lambda/10^{-3}$	式(9)计算侧蚀速率 $/(mm \cdot s^{-1})$	实测侧蚀速率 $/(mm \cdot s^{-1})$
离心试验	1 粉细沙	0.40	0.18	1500	0.03	0.03	1.20	0.35	0.52
	2 粘土占 20%	0.28	0.25	1450	0.03	0.03	1.20	0.13	0.13
	3 粘土占 20%	0.50	0.25	1450	0.03	0.03	1.20	0.43	0.40
水槽试验	1 粉细沙	0.33	0.23	1500	0.15	0.17	1.20	0.20	0.17
	2 粘土占 20%	0.33	0.30	1450	0.15	0.17	1.20	0.12	0.11
	3 粘土占 15%	0.33	0.29	1450	0.15	0.17	1.20	0.14	0.13
	4 粘土占 10%	0.33	0.27	1450	0.15	0.17	1.20	0.17	0.14
	5 粘土占 5%	0.33	0.25	1450	0.15	0.17	1.20	0.19	0.15

以长江下游南京河段三江口崩岸为例,采用式(9)估算河岸侧蚀后退的距离。崩岸处位于南京龙潭港二期工程下游,三江河口上游侧,该处河岸抗冲能力相对较弱,按粘土占 20% 进行考虑。计算中水流流速为 1.0 m/s,按式(9)估算河岸一天侧蚀后退的距离约为 75 m;三江口崩岸中 340 m 长的岸线在一天时间内崩退距离为 10 ~ 230 m。可见,本文流滑型崩岸模式可较合理地估算崩岸段岸线的崩退速率。

此外,该模式也可应用于河道横向变形的数值模拟中。如二元结构河岸坍塌模拟时,计算下层非粘性土层的侧蚀距离,此时冲刷形成的岸坡坡度通常接近于其水下休止角;当上部粘性土体坍塌后便对非粘性河床起到掩护作用,此时下部河岸的抗冲性显著加强<sup>[6]</sup>,河岸侧蚀速率减小。

## 4 结 论

依据流滑型崩岸特征,基于水流冲刷分析,结合水槽试验与土工离心模拟试验,在基础层面上对流滑型崩岸中河岸侧蚀模式进行了初步探讨。河岸侧蚀后退速率主要取决于水流冲刷力、岸体性质(密度、泥沙粒径、植被等)以及上游来沙量等。本文所建模式(式(9)或式(8))可较好地反映河岸侧蚀后退的规律,同时具有形式简单、参数少、易于应用的特点,可为流滑型崩岸中河岸崩退的估算以及河道横向变形的数值模拟提供参考依据。由于问题复杂、影响因素多,且涉及水、土等多方面的理论,流滑型崩岸的模式还需进一步分析与研究,包括河岸侧蚀系数的取值问题、岸坡上剪切力和起动流速的变化及取值问题、天然流滑型崩岸过程的观测等。

**致谢:** 感谢南京水利科学研究院岩土工程研究所的徐光明教授、顾行文工程师在离心模拟试验中给予的大力帮助!

### 参考文献:

- [1] 张幸农,蒋传丰,陈长英,等. 江河崩岸的类型与特征[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 66-70. (ZHANG Xing-nong, JIANG Chuan-feng, CHEN Chang-ying, et al. Types and features of riverbank collapse [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 66-70. (in Chinese))
- [2] LANGENDOEN E J, SIMON A. Modeling the evolution of incised streams: II: Streambank erosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2008, 134(7): 905-915.
- [3] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis: I: Theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(2): 134-150.
- [4] 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 Yan-gui, KUANG Shang-fu. Critical height of bank collapse[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1158-1165. (in Chinese))
- [5] FUKUOKA S. 自然堤岸冲蚀过程的机理[J]. 水利水电快报, 1996(2): 29-33. (FUKUOKA S. Mechanisms of the erosion processes of natural dike banks[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 1996(2): 29-33. (in Chinese))
- [6] JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, 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. 三峡工程运用初期石首河弯河势演变三维数值模拟[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 43-49. (JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, WANG Hong, et al. 3-D Numerical simulation of fluvial processes in the Shishou bend during the early filling of the Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in water science*, 2010, 21(1): 43-49. (in Chinese))
- [8] 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 Dong-dong, SHAO Xue-jun, 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))
- [9] CHEN D, 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.
- [10] 夏军强, 王光谦, 吴保生. 黄河下游河床纵向与横向变形的数值模拟: I: 二维混合模型的建立[J]. *水科学进展*, 2003, 14(4): 389-395. (XIA Jun-qiang, WANG Guang-qian, WU Bao-sheng. Numerical simulation for the longitudinal and lateral deformation of riverbed in the lower Yellow River: I: Establishment of a 2D composite model [J]. *Advances in water science*, 2003, 14(4): 389-395. (in Chinese))
- [11] 张幸农, 应强, 陈长英, 等. 崩岸概化模型试验及其机理研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. (ZHANG Xing-nong, YING Qiang, CHEN Chang-ying, et al. Study on the mechanism and experiments of bank failure [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))

## Preliminary study on the analytical model for slide collapse of riverbanks\*

JIA Dong-dong, ZHANG Xing-nong, YING Qiang, CHEN Chang-ying, ZHANG Si-he

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute,*

*Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** The slide collapse of riverbanks with fast-developing, large rates of bank erosion, and strong destructive powers is a common type of riverbank collapses in alluvial rivers. This type of failure is mainly caused by the direct impact of flow water, as well as resulting from the fact that water level is too close to the top of riverbanks in the course of collapse. An analytical model for the slide collapse of riverbanks is presented based on the analysis of scouring effects on the riverbanks. The model structures and parameters are evaluated using the flume experiments and centrifugal tests. The erosion coefficient of river bank is calibrated using the experimental data. The model result is in good agreement with the experiments. The analytical model contains only a few parameters and is easy to apply. The model result can be used as a reference for the prediction of riverbank erosion and channel migration.

**Key words:** slide collapse of riverbank; riverbank erosion; analytical model; alluvial rivers; experiment study

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50779038; No. 51109140).