

冲积河流岸滩崩退模式与崩退速率

王延贵¹, 陈 吟^{1,2}, 陈 康^{1,2}

(1. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100044; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:为研究冲积河流的侧向演变过程并开展模拟预测,采用河道冲刷及河岸稳定性等理论探讨岸滩的崩退模式和崩退速率。根据河岸崩塌机理及崩体塌落到水中后冲刷形式的不同,提出 3 种岸滩崩退模式,分别为挫崩滑塌冲刷崩退模式、挫崩倒塌冲刷崩退模式和落崩冲刷崩退模式。结合河岸的侧向淘刷、河床的纵向冲刷以及河岸崩塌的临界状态,推导了 3 种岸滩崩退模式的崩退速率计算公式,并利用长江和黄河的水文、河岸资料进行检验。结果表明:长江和黄河的河岸岸滩崩退速率估算值与实际崩退速率基本相符,所建立的岸滩崩退模式和崩退速率计算公式是合理的。

关键词:崩退模式;崩退速率;挫崩滑塌;挫崩倒塌;落崩冲刷

中图分类号:TV143⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2018)04-0014-07

Study on collapse-retreat patterns and bank erosion rates of alluvial riverbanks//WANG Yangui¹, CHEN Yin^{1,2}, CHEN Kang^{1,2} (1. *International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100044, China*; 2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: To intensively study and predict the lateral evolution of alluvial rivers, the theories of riverbank erosion and stability are used to discuss the patterns and the rates of riverbank collapse-retreat in this paper. Based on the mechanism of the riverbank collapse-retreat, three types of analysis models are proposed, which are the sinking-slipping failure, the sinking-toppling failure and the falling failure. Combined with the lateral erosion of river banks, the longitudinal scour of river bed and the critical condition of bank failure, the formula of bank erosion rates is derived. The hydrological data and soil properties of the Yellow River and the Yangtze River were used to validate the proposed formula. The results show that the estimated retreat distance and erosion rates are in consistent with the actual erosion rates of the Yellow River and the Yangtze River, indicating that the proposed collapse-retreat patterns and the formula of bank erosion rates are reasonable.

Key words: collapse-retreat patterns; lateral erosion rate; sinking-slipping failure; sinking-toppling failure; falling failure

河岸崩塌是河道演变的一种形式,是一种危害性较大的自然灾害,普遍存于在冲积河流中。长江中下游崩岸现象非常严重,崩岸长度约占干堤总长的 42%^[1]。自三峡水库 2003 年蓄水运用以来,2003—2016 年宜昌水文控制站的年均输沙量减小到 0.381 亿 t,仅为多年平均值的 90%,长江中下游来沙量的大幅度减少导致崩岸险情屡屡发生,严重威胁了堤防安全和航道稳定。仅 2016 年长江干流、主要支流及尾闾共发生河道崩岸险情 181 处,崩岸长度 69 708 m^[2]。国内外很多学者就崩岸的机理、预测和评价展开分析,取得了大量的研究成果^[3-15]。Osman 等^[7]建立了黏性土河岸稳定性分析模型;王延贵等^[8-9]提出了不同类型崩岸发生的临界条件;夏军强等^[10-12]建立二维或三维数值模型对河岸的稳定性和横向展宽过程进行模拟;此外, Midgley

等^[13-14]利用 BSTEM 模型对坡脚的冲刷量以及河岸的稳定性进行了研究。由于河岸崩退的复杂性,目前的研究还不能完全解释其内在机理,特别是对于岸滩侧向崩退过程的定量分析。为了对岸滩崩塌过程进行模拟预测,本文在前人的研究基础上,把河岸的崩塌后退(简称崩退)过程分为河岸冲刷和河岸崩塌两部分,采用河道冲刷以及河岸稳定等理论,就岸滩的崩退模式和后退速率进行研究,研究成果对分析河道侧向演变过程具有参考价值。

1 岸滩冲刷崩退分析模式

冲积河流中岸滩崩塌主要包括滑崩、挫崩和落崩 3 种形式^[15],不同崩塌形式对应的崩退机理和过程也有一定的差异。鉴于滑崩分析较为复杂,本文仅就挫崩和落崩的崩退过程进行分析。岸滩发生崩

塌后,崩塌体以坐滑或倒塌的形式进入河流并受到水流的冲刷。根据崩体进入水中的形式不同,岸滩冲刷崩退分析模式可概括为以下3种:落崩冲刷崩退、挫崩滑塌冲刷崩退和挫崩倒塌冲刷崩退。

1.1 落崩冲刷崩退

河岸淘刷后,上部土体处于悬空状态,在重力作用下,河岸会发生落崩。根据其发生机理,落崩主要包括剪切落崩和旋转落崩(图1)。鉴于落崩的宽度一般较小,无论是发生剪切落崩还是旋转落崩,崩体崩落到水中基本上处于淹没状态,进而遭受水流的冲刷,直至崩体冲掉并形成新的崩塌,使得岸滩不断崩退展宽。这一崩退展宽的过程可概括为:河岸初始状态→河岸下部侧向淘刷→岸滩落崩进入水中→崩体冲刷消失→进入下一个冲刷崩塌过程,如图1所示。

1.2 挫崩滑塌冲刷崩退

挫落崩塌体进入河道的形式一般为滑塌,由于岸滩高度较河道水深大得多,崩塌体滑塌后上部裸露水上,如图2(c)所示,下部崩体浸泡在水体中受到水流冲刷,致使崩体继续向水中滑塌,直至崩体全

部冲掉,并形成新的崩塌,造成岸滩不断崩退展宽。若崩块体积比较小,崩塌后将全部浸泡在水中并受到水流的冲刷,其冲刷特点类似于落崩冲刷崩退模式。河道这一崩退展宽的过程可概括为:河岸初始状态→河床冲刷→岸滩挫崩滑塌进入水中→崩体冲刷逐渐下滑→崩体冲刷消失→进入下一个冲刷崩塌过程,如图2所示。

1.3 挫崩倒塌冲刷崩退

当岸滩发生挫落崩塌时,崩塌体除了以滑塌的形式进入河道外,还可能以倒塌的形式进入。鉴于挫落崩塌的宽度较小,崩塌体以倒塌的形式进入河流后,崩塌体一般将淹没在水中,并持续遭受水流的冲刷,直至形成新的崩塌,造成岸滩不断崩退展宽。这一崩退展宽的过程可概括为:河岸初始状态→河床冲刷→岸滩挫崩倒塌进入水中→崩体冲刷消失→进入下一个冲刷崩塌过程,如图3所示。

2 落崩冲刷崩退速率

落崩冲刷崩退过程包括岸滩崩塌阶段和崩体冲刷阶段,前者实质上是指河道发生侧向淘刷后形成

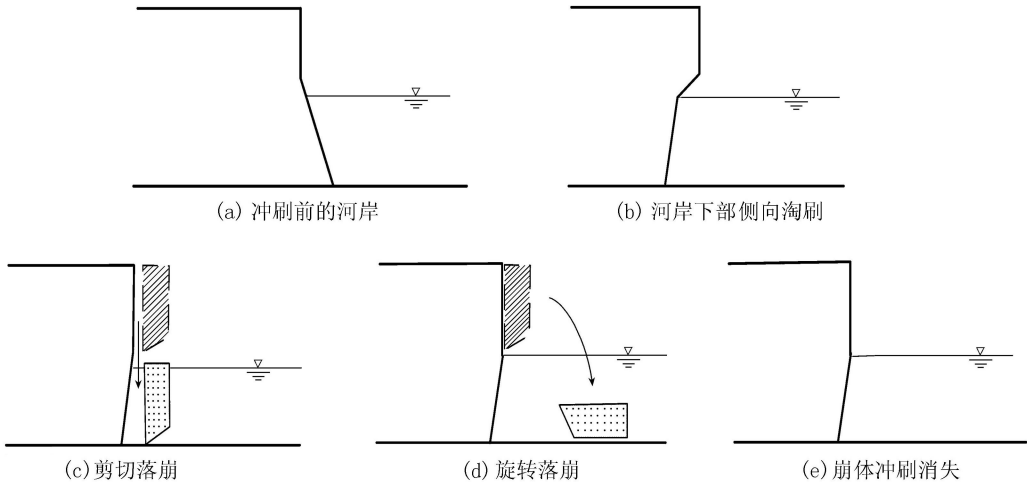


图1 落崩冲刷崩退示意图

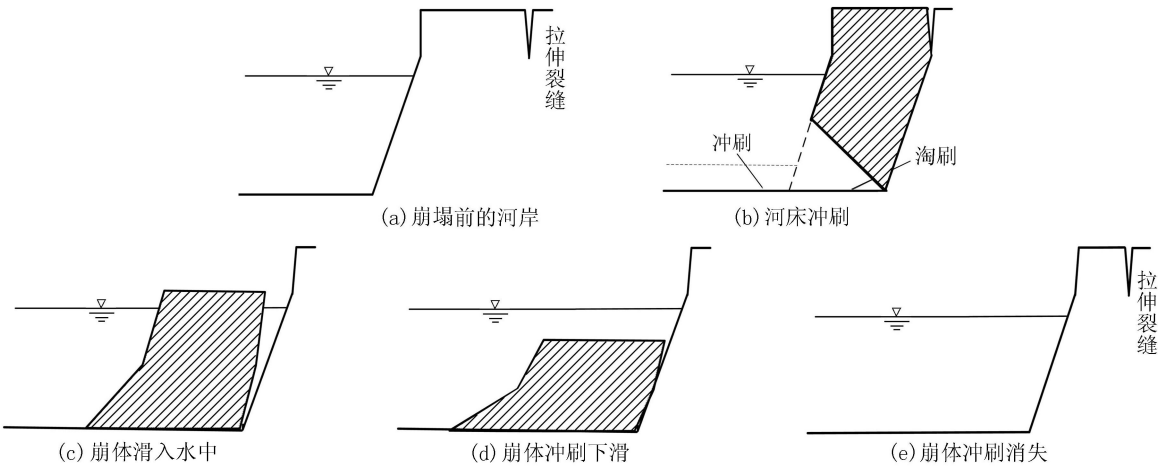


图2 挫落滑塌崩退示意图

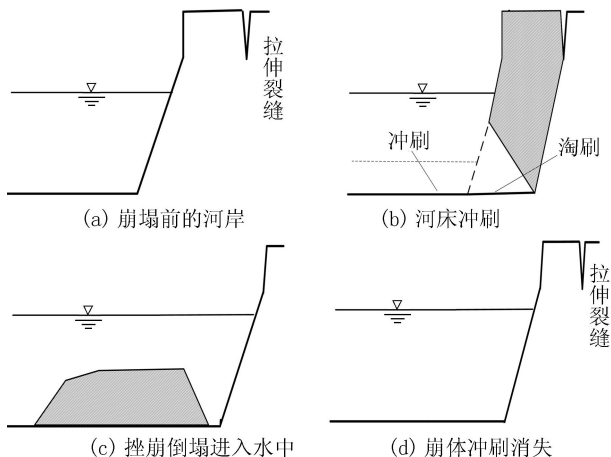


图3 挫落倒塌崩退示意图

落崩的过程;后者是指落崩发生后,崩塌块体进入水中被水流冲刷的过程。因此,岸滩崩退速率的计算需要用到岸脚淘刷时间、淘刷宽度,以及崩塌宽度和崩块逐渐被水流冲刷带走的时间等参数。

2.1 纵向和侧向冲刷速率

河道冲刷包括河床纵向冲刷与河岸侧向冲刷,很多学者就纵向和侧向冲刷速率开展了深入研究。王兆印等^[16]通过对不同泥沙颗粒的试验研究发现,河床冲刷率正比于水流的冲刷功率,并依赖于泥沙的粒径和密度,对应的冲刷速率公式为

$$v_s = 0.218 \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{\rho_s'} \frac{nv}{h^{0.67} d^{0.25}} \cdot \left[\frac{\rho n^2 v^3}{h^{0.33}} - 0.1 \frac{\rho}{g} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \right)^{1.5} \right] \quad (1)$$

式中: v_s 为河床冲刷率,m/s; n 为河床的粗糙度; v 为水流流速,m/s; h 为水深,m; d 为泥沙的粒径,m; g 为重力加速度,m/s²; ρ 为水的密度,kg/m³; ρ_s 为泥沙的密度,kg/m³; ρ_s' 为床沙的干密度,kg/m³。

河岸的侧向冲刷特别是岸脚淘刷促使河岸崩塌。侧向冲刷取决于水流强度(用水流剪切力来衡量)与河岸抗冲能力(用土体的临界起动剪切力来衡量)的相对关系,当水流强度较大时,河岸侧向冲刷率较大。岸滩的侧向冲刷率可用下式表达^[17]:

$$v_{le} = \left(\frac{dB}{dt} \right)_{le} = C_1 (\tau - \tau_c) e^{-k_2 \tau_c} \quad (2)$$

式中: τ 为河岸水流的剪切力,N/m²; τ_c 为河岸土体的起动切应力,N/m²; C_1 为横向冲刷系数,其值为 3.64×10^{-4} , K_2 为常数,取1.30。

2.2 岸脚冲刷时间与淘刷宽度

河岸发生冲刷过程中,在岸脚发生淘刷之前,河道岸滩冲刷的宽度为 ΔB_{xle} (如图4所示),其对应的冲刷时间为

$$T_{xle} = \frac{\Delta B_{xle}}{v_{le}} \quad (3)$$

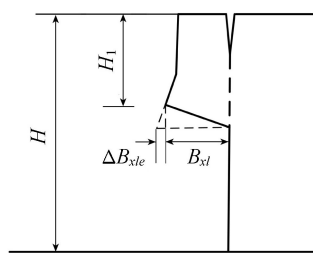


图4 落崩示意图

式中 T_{xle} 为岸脚淘刷前河岸的冲刷时间,s。

当岸脚淘刷宽度达到临界淘刷宽度时,岸滩将会发生落崩。岸脚的淘刷时间可表示为临界淘刷宽度 B_{xl} (如图4所示,由文献[9]计算确定)与侧向冲刷速率 v_{le} 的比值为

$$T_{le} = \frac{B_{xl}}{v_{le}} \quad (4)$$

式中 T_{le} 为河岸淘刷达到临界状态所需的时间,s。

2.3 落崩崩块被水流冲走的时间

一般对于落崩而言,河岸崩塌通常属于条形崩塌,其体积较小,落崩发生后进入河道的崩体基本上全部被水流淹没。然而,旋转落崩和剪切落崩的崩体落入水中后,被冲刷深度有一定的差异。旋转落崩发生后,需要被冲刷带走的土体厚度为临界淘刷宽度 B_{xl} ;剪切落崩发生后,需要被冲刷带走的土体厚度为崩体的高度 H_s 。河岸发生落崩后,进入河道的崩体以河床泥沙冲刷的形式被逐渐冲走,该过程所需的时间可以用塌入水中的土体厚度与河床纵向冲刷速率的比值来计算。对于旋转落崩而言,崩块被水流冲刷带走的时间

$$T_{xv} = \frac{B_{xl}}{v_s} \quad (5)$$

对于剪切落崩而言,崩块被水流冲刷带走的时间

$$T_{bv} = \frac{H_s}{v_s} \quad (6)$$

2.4 岸滩落崩崩退速率计算公式

河岸发生崩塌的时间一般很短,可忽略不计,因此落崩崩退过程所用的总时间为岸脚冲刷时间和崩块被水流冲刷带走的时间之和。在一个崩退循环过程中,河岸后退的距离等于岸滩淘刷前的岸脚冲刷宽度和临界淘刷宽度之和,如图4所示。因此落崩崩退速率的计算公式为

$$V_{xf} = \frac{\Delta B_{xle} + B_{xl}}{T_{xle} + T_{le} + T_{xv}} \quad (7)$$

$$V_{bf} = \frac{\Delta B_{xle} + B_{xl}}{T_{xle} + T_{le} + T_{bv}} \quad (8)$$

式中 V_{xf} 、 V_{bf} 分别为旋转落崩和剪切落崩的崩退速率,m/s。

3 挫崩滑塌冲刷崩退速率

挫崩滑塌崩退过程包括岸滩挫落滑塌阶段和崩体冲刷阶段,岸滩崩退速率仍然是由河岸冲刷速率和岸滩崩塌速率两部分组成,其计算需要用到岸脚冲刷时间、淘刷宽度,以及崩塌宽度和崩块逐渐滑落到水中被水流冲刷带走的时间等参数。

3.1 岸滩冲刷时间和淘刷宽度

河床冲刷包括河床纵向冲刷以及河岸侧向淘刷,当河床纵向冲刷到一定程度后,河流岸滩高度大于临界崩塌高度,岸滩将发生挫落崩塌^[8],见图 5。河道纵向冲刷时间由下式计算:

$$T_{ve} = \frac{H_{cr} - H}{v_s} \tag{9}$$

式中: T_{ve} 为河道纵向冲刷时间,s; H_{cr} 为挫崩滑塌岸滩临界崩塌高度,m; H 为河岸初始高度,m。

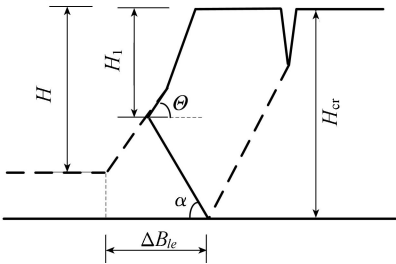


图 5 挫崩示意图

在岸滩崩塌发生之前,侧向冲刷与纵向冲刷是同时进行的,因此侧向冲刷时间可用河道纵向冲刷时间来代替,故岸滩侧向淘刷宽度为

$$\Delta B_{le} = T_{le} v_{le} \tag{10}$$

式中: ΔB_{le} 为挫崩滑塌岸的河岸侧向淘刷宽度,m; T_{le} 为挫崩滑塌的河岸侧向冲刷时间,s。

3.2 崩体滑塌冲刷时间

河岸发生崩塌后,崩体以坐滑的形式进入河流中,坐滑后崩体高度降低的程度取决于河岸岸脚侧向淘刷泥沙的体积,河岸崩体的剩余高度等于河岸的原始高度减去崩体降低的高度。崩体降低的高度 H_m 由同河岸宽、同淘刷土量的矩形体换算获得, H_m 等于岸脚淘刷土体的体积除以河岸崩塌宽度。具体求解过程如下:

河岸淘刷引起的崩体体积减少量 S 为

$$S = \frac{B_{HL}^2 \sin \Theta \sin \alpha}{2 \sin(\Theta + \alpha)} - \frac{(H_{cr} - H)^2}{2 \tan \Theta} \tag{11}$$

其中 $B_{HL} = (H_{cr} - H_1) \left(\frac{1}{\tan \Theta} + \frac{1}{\tan \alpha} \right)$

式中: B_{HL} 为河岸的崩塌宽度,m; α 为岸脚淘刷角; Θ 为河岸倾斜角; H_1 为岸脚淘刷后折点处河岸的高度(图 5)。

将岸脚淘刷的土量转化为与河岸同崩塌宽度的土层,该土层的厚度 H_m 及第 1 次崩塌后河岸的剩余高度 H_{sy} 分别为

$$H_m = \frac{S}{B_{HL}} \tag{12}$$

$$H_{sy} = H - H_m \tag{13}$$

将岸滩崩塌后崩体剩余高度与水深比较,崩体存在全部淹没水中和部分淹没水中两种情况。

a. 若 $H_{sy} \leq h$,崩塌后崩体全部淹没在水下。此时,崩塌体作为河床部分逐渐被水流冲刷带走,该过程所需要的时间等于崩塌后河岸的剩余高度与纵向冲刷速率的比值:

$$T_{fc} = \frac{H_{sy}}{v_s} \tag{14}$$

式中 T_{fc} 为崩块被水流冲刷带走的时间,s。

b. 若 $H_{sy} > h$,崩塌后部分崩体暴露在水面以上。此时,崩体下部将继续进行侧向冲刷,岸脚侧向冲刷到一定程度后,崩体将继续滑塌,使得剩余崩体继续滑入水中。崩体第 1 次滑塌崩塌体被冲刷的时间 T_{fc0} 可由下式表示:

$$T_{fc0} = \frac{B_{HL}}{v_{le}} \tag{15}$$

第 1 次滑塌后崩体冲刷泥沙体积 S_1 、崩体冲刷泥沙的厚度 H_{m1} 、剩余崩塌体滑塌后崩体的高度 H_{sy1} 的表达式分别为

$$S_1 = \frac{B_{HL}^2 \sin \Theta \sin \alpha}{2 \sin(\Theta + \alpha)} - \frac{(H_{cr} - H - H_m)^2}{2 \tan \Theta} \tag{16}$$

$$H_{m1} = \frac{S_1}{B_{HL}} \tag{17}$$

$$H_{sy1} = H - H_m - H_{m1} \tag{18}$$

若 $H_{sy1} \leq h$,崩体滑塌后全部淹没水中,此时将按照式(14)计算 T_{fc1} 。若 $H_{sy1} > h$,崩体第 2 次滑塌后仍然处于部分淹没状态,崩体将继续进行侧向冲刷,需按照上述方法进行循环计算,直至崩体剩余高度小于水深。此时崩塌体被冲走所需的时间 T_{fc} 为

$$T_{fc} = T_{fc0} + T_{fc1} + T_{fc2} + \dots + T_{fcN} \tag{19}$$

3.3 挫崩滑塌冲刷崩退速率计算公式

在一个挫崩滑落崩退循环过程中,岸滩崩退的距离近似等于岸滩崩塌前的侧向淘刷宽度与岸滩崩体淘刷的宽度之和,崩退过程所用的总时间为岸滩崩塌前的侧向冲刷时间与崩塌体被水流冲刷时间之和。第 1 次崩塌后崩体全部淹没水下时的冲刷崩退速率 V_{s0} 为

$$V_{s0} = \frac{\Delta B_{le}}{T_{le} + T_{fc}} = \frac{(H_{cr} - H) v_{le}}{H_{cr} - H_m} \tag{20}$$

第 1 次崩塌后崩体未全部被淹没时的冲刷崩退速率

V_{sf} 为

$$V_{sf} = \frac{\Delta B_{le}}{T_{le} + T_{fc}} = \frac{(H_{cr} - H)v_{le}}{H_{cr} - H + \frac{B_{HL}}{v_{le}}v_s + \sum_{i=1}^N H_{syi}} \quad (21)$$

式(20)(21)表明挫崩滑塌冲刷崩退速率为岸滩崩塌前侧向冲刷速率和崩塌后退速率的加权平均值。前者取决于近岸流与岸滩的相互作用,其影响因素包括水流剪切力和岸滩土壤抗剪切力;后者表现为岸滩崩体的下滑力和其阻滑力的对比关系,同时还取决于水流对崩滑体的冲刷速率,主要影响因素包括流速、水深、河岸高度、裂隙深度、土体黏度和内摩擦角等。

4 挫崩倒塌冲刷崩退速率

在挫崩倒塌冲刷崩退过程中,河岸发生挫崩倒塌之前,侧向冲刷时间和宽度与挫崩滑塌冲刷崩退的计算过程是一致的,可用第3节中的计算方法和公式。但挫崩倒塌冲刷崩退与挫崩滑塌冲刷崩退有差异,主要表现为岸滩崩塌后崩体进入河流的形式不再是滑塌,而是倒塌的形式。鉴于岸滩挫崩宽度不是很大,崩体倒塌后进入河流后将被水流全部淹没,崩体将以河床冲刷的形式直接被水流冲刷。挫崩倒塌进入河道中土体的厚度应为原崩体的宽度,因此崩体逐渐被冲走的时间 T_{we} 为

$$T_{we} = \frac{B_{HL}}{v_s} \quad (22)$$

在挫崩倒塌冲刷崩退过程中,岸滩后退的距离仍近似等于挫崩发生前岸滩侧向淘刷宽度与岸滩崩塌体宽度之和;崩退过程所用的总时间为挫崩发生前岸滩侧向冲刷时间与崩体倒入水中被水流冲刷的时间之和,因此,挫崩倒塌冲刷崩退速率 V_{wf} 的计算公式为

$$V_{wf} = \frac{\Delta B_{le}}{T_{le} + T_{we}} = \frac{(H_{cr} - H)v_{le}}{H_{cr} - H + B_{HL}} \quad (23)$$

5 崩退速率公式的检验

冲积河流岸滩崩塌机理和崩塌过程十分复杂,在河岸崩塌预测方面还没有成熟的研究成果和计算方法。本文提出的河岸崩退模式和河岸崩退速率计算也只是一种计算河岸崩退速率的概化模式和估算

方法,还处于初步研究阶段。河岸崩退速率计算公式(包括式(7)(8)(20)(21)和(23))所涉及参数较多,既包括岸滩土体的性质,如土体抗剪强度,又包括河岸的几何形态,如河岸高度,还需知道河道水流条件和河床条件,如水流流速和泥沙粒径等。目前,搜集和实测上述参数资料仍有一定的难度,特别是崩岸瞬时资料的获得难度更大,因此很难精确验证公式的适用性,仅能利用河流崩岸的平均情况,对河岸崩退速率公式进行检验,以说明公式的合理性。

5.1 长江中下游河岸

长江中下游河岸多为二元结构^[18],崩岸以落崩为主。根据资料搜集情况,选择长江江都嘶马河段的地质水文资料进行验证^[19]:河岸土体组成为二元结构,上层为粉质黏土,下层为砂层。上层黏土厚度 $H = 2.3\text{ m}$,黏聚力 $c = 3.8\text{ kN/m}^2$,内摩擦角 $\theta = 19.4^\circ$,中值粒径 $d = 0.06\text{ mm}$;平均水深 $h = 16\text{ m}$,河床粗糙度 $n = 0.022$,比降 $J = 0.00008$ 。在实际河岸崩退速率计算过程中不考虑河岸边坡形态的影响,且仅考虑淘刷部分,根据上述计算过程,计算得到的崩退速率和崩退距离如表1所示。

在实际的河岸崩退过程中,剪切崩退和旋转崩退可能是交错发生的,并且一般情况下,旋转崩塌发生的可能性比较大,这与计算结果相符。将两种崩塌计算的崩退距离取平均值为 19.4 m ,与长江江都嘶马河段年均崩退距离 15 m 基本一致,说明采用本文河岸崩退速率计算公式对长江中下游河岸后退的估计基本符合实际情况。

5.2 黄河下游河岸

黄河下游河道岸滩主要是由泥沙淤积形成,属于均质岸滩,当河槽发生冲刷或是岸滩遭受冲刷时将发生崩岸,以挫崩和落崩为主。考虑到黄河河岸的土壤特性,采用黄河下游多年平均地质水文资料进行验证^[20-21]:河岸坡脚 $\Theta = 60^\circ$,淘刷角度 $\alpha = 30^\circ$,河岸高度 $H = 6\text{ m}$,淘刷后河岸的剩余高度 $H_1 = 5.5\text{ m}$;河床粗糙度 $n = 0.02$,泥沙粒径 $d = 0.05\text{ mm}$,泥沙干密度 $\rho'_s = 1590\text{ kg/m}^3$,平均水深 $h = 5\text{ m}$,河床比降 $J = 0.0002$,水流流速 $v = 1\text{ m/s}$ 。根据黄河地质水文资料,按照上述相应的河岸崩退速率公式计算河岸倒塌崩退和滑落崩退速率,结果见表1。

表1 长江中下游以及黄河下游的河岸崩退速率与崩退距离计算值

长江中下游 河岸	剪切 B_{cr}/m	旋转 B_{cr}/m	$V_{\text{bf}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{sf}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	剪切崩退距离/ $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$	旋转崩退距离/ $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$	年均崩退 距离/m
	0.2	1.37	3.6×10^{-7}	8.9×10^{-7}	11.3	27.6	19.4
黄河下游 河岸	H_{cr}/m		$V_{\text{sf}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{wf}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	滑塌崩退距离/ $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$	倒塌崩退距离/ $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$	年均崩退 距离/m
	10		7.6×10^{-6}	4×10^{-6}	239	125.8	182.4

在黄河下游河岸的实际崩退过程中,挫崩滑塌和挫崩倒塌也可能是交错发生的,两种崩塌的年崩退距离的平均值为182.4 m,而黄河下游河段河岸每年崩塌后退的距离范围为178~470 m,计算值介于黄河下游年实际崩退距离的范围之内,表明本文岸滩滑塌和倒塌崩退速率的计算公式是合理的。

6 结 论

- a. 根据河岸崩塌的机理、分类以及崩体塌落到水中的形式,提出岸滩崩退的3种分析模式,分别为挫崩滑塌冲刷崩退、挫崩倒塌冲刷崩退和落崩冲刷崩退。
- b. 结合河岸的侧向淘刷、河床的纵向冲刷以及河岸崩塌的临界条件,深入探讨了河流岸滩3种崩退模式崩退速率的计算过程和计算方法,推导出各种模式的岸滩崩退速率计算公式,指出影响岸滩崩退的主要因素是水流强度及河岸土体性质。
- c. 利用长江中下游和黄河下游的河岸及水文资料,估算了长江和黄河的河岸岸滩崩退速率,与实际崩退速率基本符合,说明本文建立的岸滩崩退模式和崩退速率计算公式是合理的。

参考文献:

[1] 黎礼刚. 长江中下游干流河道崩岸统计及存在的问题[J]. 水利水电快报, 2008, 28 (2): 11-12. (LI Ligang. Statistics of bank collapse and existing problems in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2008, 28 (2): 11-12. (in Chinese))

[2] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2016 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2017.

[3] THORNE C R, TOVEY N K. Stability of composite river banks[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 6(5):469-484.

[4] 邓珊珊,夏军强,李洁,等. 河道内水位变化对上荆江河段岸坡稳定性影响分析[J]. 水利学报, 2015, 46 (7): 844-852. (DENG Shanshan, XIA Junqiang, LI Jie, et al. Influence of the variation of in-channel water levels on the riverbank stability in the upper Jingjiang reach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (7): 844-852. (in Chinese))

[5] 王延贵,齐梅兰,金亚昆. 河道岸滩稳定性综合评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (5): 55-59 (WANG Yangui, QI Meilan, JIN Yakun. Comprehensive evaluation method for river bank stability[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (5): 55-59. (in Chinese))

[6] 王延贵. 河流岸滩挫落崩塌机理及其分析模式[J]. 水

利水电科技进展, 2013, 33 (5): 21-25. (WANG Yangui. Mechanism and analysis mode of sinking failures of river banks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (5): 21-25. (in Chinese))

[7] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis: theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2):134-150.

[8] 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 Hydraulic Engineering, 2007, 38 (10): 1158-1165. (in Chinese))

[9] 王延贵,匡尚富. 冲积河流典型结构岸滩落崩临界淘刷宽度的研究[J]. 水利学报, 2014, 45 (7): 767-775. (WANG Yangui, KUANG Shangfu. Study on collapse mechanism and critical caving erosion width of falling failures in typical structure bank[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (7): 767-775. (in Chinese))

[10] 夏军强,袁欣,王光谦. 冲积河道冲刷过程中横向展宽的初步模拟[J]. 泥沙研究, 2000 (6): 16-24. (XIA Junqiang, YUAN Xin, WANG Guangqian. Preliminary simulation of channel lateral widening in degradation of alluvial rivers[J]. Journal of Sediment Research, 2000 (6): 16-24. (in Chinese))

[11] 钟德钰,杨明,丁赞. 黄河下游河岸横向变形数值模拟研究[J]. 人民黄河, 2008, 30 (11): 107-109. (ZHONG Deyu, YANG Ming, DING Yun. Numerical simulation of lateral evolution of the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2008, 30 (11): 107-109. (in Chinese))

[12] JIA D, SHAO X, WANG H, 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.

[13] MIDGLEY T L, FOX G A, HEEREN D M. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite stream banks[J]. Geomorphology, 2012, 145/146: 107-114.

[14] 宗全利,夏军强,邓春艳,等. 基于 BSTEM 模型的二元结构河岸崩塌过程模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45 (3): 69-78. (ZONG Quanli, XIA Junqiang, DENG Chunyan, et al. Modeling of the composite bank failure process using BSTEM[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(3): 69-78. (in Chinese))

[15] 王延贵,匡尚富. 河岸崩塌类型与崩塌模式的研究[J]. 泥沙研究, 2014 (1): 13-20. (WANG Yangui, KUANG Shangfu. Study of types and collapse modes of bank failures[J]. Journal of Sediment Research, 2014(1):13-20. (in Chinese))

[16] 王兆印,黄金池,苏德惠. 河道冲刷和清水水流河床冲

- 刷率[J]. 泥沙研究, 1998(1):1-11. (WANG Zhaoyin, HUANG Jinchi, SU Dehui. River channel scour and scour rate of clear water flow [J]. Journal of Sediment Research, 1998(1):1-11. (in Chinese))
- [17] HOOKE J M. An analysis of the processes of river bank erosion[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42(1/2):39-62.
- [18] 徐锡荣,钟凯,白金霞. 长江小黄河洲演变对下游汉道分流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014,42(3):211-216. (XU Xirong, ZHONG Kai, BAI Jinxia. Influence of evolution of Xiaohuangzhou bifurcated reach on flow-dividing characteristics of downstream bifurcated reaches of Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014,42(3):211-216. (in Chinese))
- [19] 胡秀艳,姚炳魁,朱常坤. 长江江都嘶马段岸崩灾害的形成机理与防治对策[J]. 地质学刊,2016,40(2):357-362. (HU Xiuyan, YAO Bingkui, ZHU Changkun. Formation mechanism and prevention strategies of bank collapsing at Sima Bend of Jiangdu in the Yangtze River [J]. Journal of Geology, 2016, 40(2):357-362. (in Chinese))
- [20] 彭丽云,李涛,刘建坤. 黄河冲积粉土的吸力和强度特性关系[J]. 北京交通大学学报,2009,33(4):129-133. (PENG Liyun, LI Tao, LIU Jiankun. Relationship between matric suction and strength characteristic of Yellow River alluvial silts[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(4):129-133. (in Chinese))
- [21] 王四巍,刘海宁,刘汉东. 黄河下游堤防边坡多因素敏感性分析[J]. 人民黄河,2009,31(7):18-19. (WANG Siwei, LIU Haining, LIU Handong. Analysis on sensibility of multi-factor of embankment slope of the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2009, 31(7):18-19. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-13 编辑:骆超)

(上接第6页)

- [6] 岑国平,詹道江,洪嘉年. 城市雨水管道计算模型[J]. 中国给水排水,1993(1):37-40. (CEN Guoping, ZHAN Daojiang, HONG Jianian. Calculation model of urban storm water pipeline [J]. China Water and Wastewater, 1993(1):37-40. (in Chinese))
- [7] 周玉文,赵洪宾. 城市雨水径流模型研究[J]. 中国给水排水,1997(4):4-6. (ZHOU Yuwen, ZHAO Hongbin. A study on urban storm runoff model [J]. China Water and Wastewater, 1997(4):4-6. (in Chinese))
- [8] 唐莉华,彭光来. 分布式水文模型在小流域综合治理规划中的应用[J]. 中国水土保持,2009(3):34-36. (TANG Lihua, PENG Guanglai. Application of distributed hydrological model in comprehensive management plan of small watershed [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(3):34-36. (in Chinese))
- [9] BRADBROOK K F, LANE S N, WALLER S G, et al. Two dimensional diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation [J]. International Journal of River Basin Management, 2004, 2(3):211-223.
- [10] VILLANUEVA I, WRIGHT N G. Linking Riemann and storage cell models for flood prediction [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, 2006, 159(1):27-33.
- [11] 解以扬,李大鸣,李培彦,等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展,2005,16(3):384-390. (XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3):384-390. (in Chinese))
- [12] 周浩澜,陈洋波. 城市地面洪水演进模拟方法的数值实验对比研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2011,43(4):1-6. (ZHOU Haolan, CHEN Yangbo. Numerical experiment comparative research on simulation methods for flood propagation in urbanization ground [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(4):1-6. (in Chinese))
- [13] CEA L, GARRIDO M, PUERTAS J. Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall-runoff from precipitation data in urban areas[J]. Journal of Hydrology, 2010, 382(1):88-102.
- [14] JOCHEN ES, BRETT FS. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency [J]. Advances in Water Resources, 2012, 41(2):49-64.
- [15] LIANG D, ÖZGEN I, HINKELMANN R, et al. Shallow water simulation of overland flows in idealised catchments [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(11):7307-7318.
- [16] FEWTRELL T J, BATES P D, HORRITT M, et al. Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(26):5107-5118.
- [17] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省城市规划管理技术规定(2011)[M]. 南京:江苏人民出版社,2011. (收稿日期:2017-12-18 编辑:骆超)