

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.005

李志威, 郭楠, 胡旭跃, 等. 若尔盖高原泥炭型弯曲河道崩岸过程模拟[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 29-36. (LI Zhiwei, GUO Nan, HU Xuyue, et al. Conceptually modeling of cantilever bank failure processes of peat-type meandering channel in the Zoige Plateau[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(6): 29-36. (in Chinese))

若尔盖高原泥炭型弯曲河道崩岸过程模拟

李志威^{1,2}, 郭楠^{1,2}, 胡旭跃^{1,2}, 王晓娟³, 李艳富⁴

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 南京市滁河河道管理处, 江苏 南京 210048; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 崩岸在河床演变和河型转化中发挥重要作用, 促使河岸横向移动和河道蜿蜒。2011—2016 年黄河源若尔盖高原的弯曲河流野外调查表明, 泥炭型弯曲河流的崩岸是河岸上部泥炭层在自重作用下发生的悬臂式崩岸。针对泥炭型河岸的悬臂式崩岸, 采用 BSTEM 模型分析其岸坡稳定性, 并模拟河岸侵蚀和崩塌过程。泥炭层的含水率是河岸稳定的关键因子, 泥炭层含水率的增加, 既增强河岸崩塌的驱动力, 也减弱抵抗河岸崩塌的抗剪力, 对河岸稳定不利。河岸二元物质组成的厚度对河岸稳定性有较大影响, 其泥炭层厚度的增加, 可提高河岸稳定性, 但是河岸下部粉沙层厚度的增加, 则会降低河岸的稳定性。

关键词: 泥炭型弯曲河流; 崩岸; 河岸稳定性; BSTEM 模型; 若尔盖高原

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2017)06-0029-08

若尔盖高原位于青藏高原东北部, 河网水系发达, 水资源量充沛, 是黄河上游的重要水源地。若尔盖高原分布着一种独特的弯曲河流, 其河岸上部为泥炭层, 下部为非黏性的粉沙或松散沉积物, 可称为泥炭型弯曲河流。泥炭型弯曲河流为典型的二元河岸结构, 上部泥炭层较厚, 具有较强抗冲刷和抗剪切能力, 干密度小, 下部粉沙层抗冲性弱。泥炭型河岸组成物质的抗冲性不同, 水流主要冲刷河道凹岸的下部, 使得河岸下部掏空, 上部悬空, 最终在泥炭层自身重力的作用下发生崩塌。泥炭型弯曲河流的凹岸不断发生崩塌, 伴随凸岸边滩发生淤积, 弯道的弯曲度越来越大, 最后发生颈口裁弯。2011—2016 年若尔盖高原的河流地貌野外调查表明, 泥炭型弯曲河流的弯道凹岸崩塌发生频繁, 河道蜿蜒曲折, 裁弯形成的牛轭湖随处可见。由于缺少崩岸的长期定位观测, 难以定量地分析泥炭型河岸崩塌问题。本研究拟采用河岸稳定性模型分析岸坡崩塌, 以揭示泥炭型崩岸过程与机制。

国内外对于河岸稳定性的研究已有较多报道, 但主要集中于均质河岸^[1-3], 如 Osman 和 Thorne^[1] 从河床冲深与河岸冲刷两个方面, 探究了河岸稳定性的力学机制。实际上, 大多数河岸的物质组成并不是单一的, 许多河岸都是二元结构, 甚至多元结构, 远比均质河岸复杂。近 10 年来, 国内学者开始关注弯曲河道的二元河岸, 如朱海丽等^[4] 分析黄河源草甸型弯曲河流的悬臂式崩岸模式; 宗全利等^[5] 模拟了天然弯道的二元结构河岸崩塌过程。泥炭型弯曲河流作为黄河源地区一种独特河流, 与其他河流的崩岸既存在共性, 也有较多的差异。

本研究采用的 BSTEM 模型(Bank Stability and Toe Erosion Model)是美国国家泥沙实验室开发的计算软件, 可用于模拟河岸崩塌的过程。该模型已被广泛用于模拟河岸稳定性和横向迁移, 估算河流泥沙运输^[6],

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91547112); 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016369/KY); 湖南省教育厅优秀青年项目(16B010)

作者简介: 李志威(1984—), 男, 湖北云梦人, 副研究员, 博士, 主要从事高原河流动力学研究。

E-mail: lzhiwei2009@163.com 通信作者: 胡旭跃(E-mail: huxuyue62@163.com)

河道生态修复^[7],以及河岸侵蚀和破坏机制^[8-9]。前人曾运用该模型分析 Osage River^[10],Lost Creek^[11]和 Barry Fork Creek^[12]等河流的河岸稳定性问题。BETEM 模型在我国也有所应用,如模拟长江中游二元结构的河岸崩岸过程^[13-14]。模型描述了土体受剪切作用引起的崩塌,以及水流冲刷引起河岸坡脚物质外移的侵蚀过程,包括河岸稳定性分析模块和河岸坡脚侵蚀模块。模型通过对河岸几何形态及轮廓的定义,利用极限平衡方法,分析土体抗剪强度,计算河岸安全系数 F_s ,并根据土体侵蚀性和临界剪切力计算坡脚侵蚀速率和侵蚀总量。

本文以黄河源若尔盖高原的泥炭型弯曲河流河岸为对象,采用 BSTEM 模型对该河岸的坡脚侵蚀量、侵蚀速率的变化,以及河岸安全系数进行计算,模拟河岸侵蚀和崩塌过程,以便深入认识弯曲河道崩岸与横向迁移过程。

1 模拟工况设计

1.1 河岸形态

泥炭型弯曲河流的河岸为典型的二元结构,上层为未分解或半分解的植物及其根系形成的泥炭层,下层为粉沙层,最下层为卵砾石沉积层,与卵石河床相连(图 1)。根据近 6 年对若尔盖高原的野外考察,得到 BSTEM 模拟河岸崩塌的相关参数为:岸高 2.0 m,岸坡 75°,坡脚长 0.8 m,坡脚角度 25°,比降 0.000 7 m/m。

1.2 河岸物质分层情况

本研究利用 BSTEM 模型将河岸分为 5 层,上面 1, 2, 3 层为泥炭层,下面 2 层为粉沙层。此次模拟的弯曲河流为若尔盖黑河的一条小支流(格曲),此支流的河岸高度约为 2.0 m,沿程测量了河岸泥炭层的厚度,最厚泥炭层约为 1.8 m,最薄约为 1.2 m。因此,此次模拟采用的泥炭层厚度,设置为 1.2,1.5 和 1.8 m,对应的粉沙层厚度为 0.8,0.5 和 0.2 m。泥炭是一种高含水量、低重度、低强度的有机根系体,除了抗剪强度略高外,其他性能均较差。若尔盖高原的泥炭为草本泥炭,干密度一般为 0.2~0.4 g/cm³,最大为 0.5 g/cm³;泥炭的含水量偏高,平均为 200% 左右,最高达到 391%^[15]。将现场的泥炭带回实验室测量,测得泥炭含水量多在 100%~200%,故本次应用 BSTEM 模型,泥炭的干密度采用 0.4 g/cm³,泥炭的含水量分别设置为 100%,150%,200% 和 250%。泥炭的力学性质参考云南滇池的泥炭力学性质,并取若尔盖高原泥炭通过试验加以验证,得出泥炭含水量越高,内摩擦角越大,黏聚力越小,具体参数见表 1。

表 1 河岸土体的性质

Tab. 1 Soil characteristics of river bank

土层	含水量/%	重度/(kN·m ⁻³)	φ^b /°	摩擦角 φ /°	黏聚力 c /(kN·m ⁻²)
泥炭层	100	7.55	15	26.6	11.2
	150	9.84	15	27.9	10.4
	200	11.97	15	28.4	9.7
	250	14.72	15	29.2	8.2
粉沙层	20	18.50	15	28.3	0.4

1.3 流量变化情况

泥炭型弯曲河流主要分布在若尔盖高原。由于黑河的支流未设水文站,所以流量和水位的取值根据实测河道断面水深和平均流速进行概化。结合实测数据,将模拟流量设置为 2 m³/s,流量和水位变化情况见图 2。本次模拟中考虑了地下水水位的影响,模拟河道的水位较低,变化幅度较小,因此忽略了降雨后的地下水水位



图 1 泥炭型弯曲河道的凹岸和崩塌体

Fig. 1 Outer bank and slump blocks of peat-type meandering channel

滞后情况,认为地下水位的变化与河道水位是同步的。

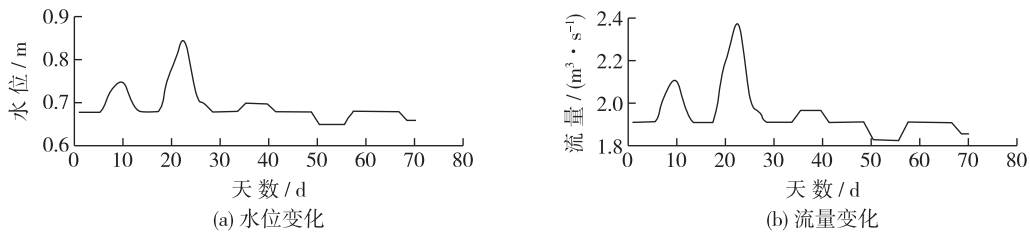


图2 流量和水位随时间变化

Fig. 2 Change of discharge and water stage over time

1.4 模拟工况设计

基于泥炭层厚度和泥炭层含水量的不同组合,此次共计模拟计算了12种工况,如表2。此次模拟计算的时间步长为24 h,每次时间步长记录的数据包括安全系数 F_s 、边界剪切力、河岸侵蚀量以及河岸轮廓变化。当 $F_s \geq 1.3$ 时,河岸处于稳定状态;当 $1.0 < F_s < 1.3$ 时,河岸处于亚稳定状态;当 $F_s \leq 1.0$ 时,河岸处于不稳定状态。亚稳定状态下河岸是条件稳定,但仅有较小的安全容限。在模拟过程中,若河岸的安全系数 F_s 保持不变,但河岸仍处于稳定状态,70 d以后停止计算,视此种工况下河岸处于稳定。

表2 模拟工况设计

Tab. 2 Design of simulation conditions

工况	泥炭层厚度/m	含水量/%	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	工况	泥炭层厚度/m	含水量/%	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	1.2	100	7.55	7	1.5	200	11.97
2		150	9.84	8		250	14.72
3		200	11.97	9		100	7.55
4		250	14.72	10		150	9.84
5	1.5	100	7.55	11	2.0	200	11.97
6		150	9.84	12		250	14.72

不同泥炭层和粉沙层的模拟工况设计见表3,泥炭层与粉沙层的物理力学性质均与前面的工况相同。由于泥炭具有很强抗冲刷能力,本次模拟中最大临界切应力采用50 Pa。在BSTEM模型中,对于非黏性粉沙,可根据其中值粒径求得临界切应力,此次模拟粉沙中值粒径取为0.18 mm,临界切应力0.13 Pa。Hanson和Simon^[16]利用一种潜喷射流测试仪器,得出了临界剪切力和土壤可蚀性系数的关系式: $k = 1 \times 10^{-7} \tau_c^{-0.5}$,经计算得:泥炭冲刷系数为 $0.014 \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$;粉沙冲刷系数为 $0.277 \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$ 。

表3 不同泥炭层和粉沙厚度的工况设计

Tab. 3 Design of different thicknesses in peat and silt layers

工况	泥炭层厚度/m	粉沙层厚度/m	工况	粉沙层厚度/m	泥炭层厚度/m
13	2.0	0.2	18	0.5	1.5
14		0.3	19		2.0
15		0.4	20		2.5
16		0.5	21		3.0
17		0.6			

2 模拟结果与讨论

2.1 安全系数 F_s 值变化

图3为不同含水量时,泥炭型河岸的 F_s 值随时间变化的情况。12种工况的起始时间都是从模拟的第1

天算起,而结束时间为河岸不稳定时或者是 F_s 不再变化时。

图 3 表明各种工况的 F_s 值先是快速下降,进入亚稳定阶段后,变化速率放缓,这一规律与草甸型河岸的 F_s 值变化相似。从图 3 亦得出,泥炭的含水量越低,河岸的安全系数 F_s 值越大,河岸越稳定。对比图 3(a)与 3(b),在泥炭含水量相同的情况下,泥炭层越厚,曲线的长度越长,河岸越稳定。泥炭层厚度为 1.8 m 时, F_s 值均大于 1(图 3(c)),河岸未处于不稳定状态。因此,泥炭型河岸的泥炭层厚度是维持河岸稳定的一个重要因素,泥炭层的厚度增加,可使河岸由不稳定状态变为稳定状态。

驱动力与抵抗力共同作用决定河岸是否稳定。泥炭型河岸虽为二元河岸,但是当下部的粉沙层被水流淘刷,河岸悬空后,泥炭型河岸可简化为一元悬臂式河岸。此时,河岸的驱动力是泥炭层自身的重力,抵抗力是泥炭层的抗剪力。受降雨影响,泥炭层的含水量波动很大,含水量的变化对两种力的影响都十分明显。当泥炭的含水量变大时,泥炭层的重力增大,即河岸驱动力增加。同时,泥炭层含水量的增加,使得泥炭的摩擦角增大,黏聚力减小,相应地泥炭的抗剪强度降低,即抵抗力降低。因此,泥炭层的含水量增加,使得泥炭型河岸驱动力增加,抵抗力降低,河岸变得不稳定。与粉沙物理论力学性质相比,泥炭更轻,抗剪性能更强,抵抗水流冲刷的能力更强,即当泥炭层厚度增加时,河岸抵抗水流冲刷的能力增强。而且,泥炭层厚度的增加,河岸安全系数 F_s 值相应增加。

泥炭层的厚度和含水量是影响泥炭型河岸的两个关键因素,泥炭层越厚、含水量越低,河岸越稳定。

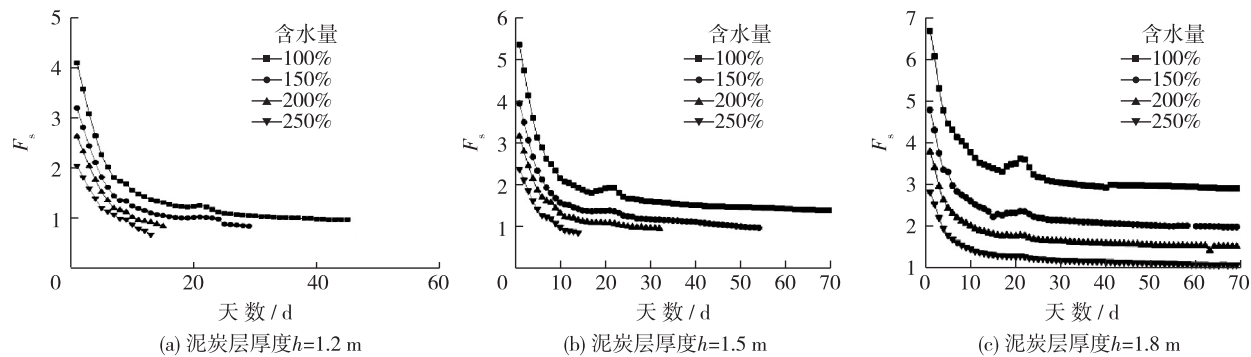


图 3 在不同含水量下 F_s 随时间变化

Fig. 3 Changes of F_s over time under different rates of water content

2.2 边界剪切力和河岸轮廓变化

模拟结果表明,12 种工况的边界剪切力变化、河岸轮廓变化的趋势大体一致,可选一种工况作为代表分析剪切力轮廓变化。图 4 为泥炭层厚度 1.2 m、泥炭含水量 150%的工况(即工况 2)的模拟结果,在工况 2 下泥炭型河岸 11 d 后处于亚稳定状态,29 d 河岸处于不稳定状态。边界剪切力在开始阶段先增加后减少,其原因是河岸坡脚受到水流冲刷,使得该段河流水力半径先增大再减小。图 4 表明在河岸进入亚稳定状态之前边界剪切力下降很快,河岸坡脚的淘刷主要发生在此阶段,表 4 为发生崩岸工况的亚稳定状态淘刷量与总淘刷量的对比。前期河岸坡脚的快速淘刷,使得河段的水力半径快速减小,从而导致水流边界剪切力快速下降。当河岸进入亚稳定状态后,坡脚的淘刷速率减缓,水力半径也因此缓慢减小,水流剪切力下降的速率也趋缓。

表 4 不同状态下单位长度淘刷量的对比

Tab. 4 Comparison of scour amounts per meter in different design conditions (m³/m)

工况	亚稳定状态时淘刷量	总淘刷量	工况	亚稳定状态时淘刷量	总淘刷量
1	0. 638	0. 744	6	0. 592	0. 649
2	0. 532	0. 719	7	0. 502	0. 602
3	0. 429	0. 623	8	0. 348	0. 545
4	0. 335	0. 638			

河岸处于亚稳定状态时,边界剪切力随水位升高而升高,导致这一现象的原因是边界剪切力是由河道的水力半径与比降决定。由于河道水位波动小,可将比降视为定值,当边界剪切力减小至某一临界值时,比降对于边界剪切力的作用变得更加重要,不能将其忽略。20 d后,水位急剧上升,河段水面比降增大,此时比降与水力半径共同影响边界剪切力,使其随着水位的变化而变化(图4)。

泥炭型河岸在崩塌过程中,并不是只发生1次崩塌,工况1共发生3次土层滑落,其他工况土层滑落2~5次。从模拟的过程来看,泥炭层顶部的土层滑落,并不会使河岸变得不稳定,反而当河岸发生土层滑落后,河岸安全系数 F_s 有所增大。顶层土层的滑落对于河岸稳定的主要原因在于:①减少了泥炭层自身重力,即驱动力减小;②河岸向更稳定的形状变化,是河岸的“自我保护”机制;③崩塌块贴覆河岸,减小近岸流速,在一定程度上抑制冲刷和保护河岸。

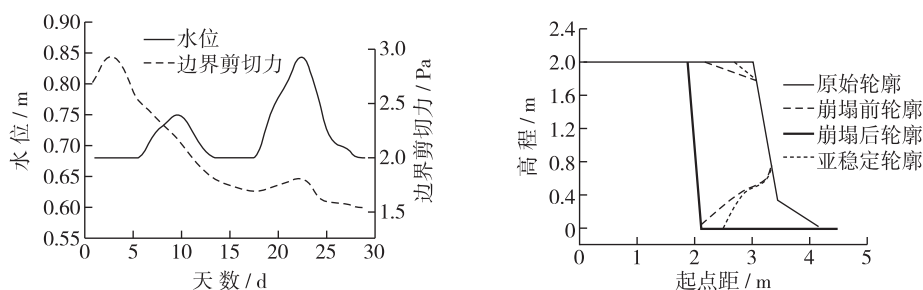


图4 边界剪切力和河岸轮廓变化

Fig. 4 Changes of boundary shear stress and bank profile

2.3 崩塌宽度变化情况

图5为12种工况的河岸崩塌宽度,工况1~4的泥炭层厚度为1.2 m,工况5~8的泥炭层厚度为1.5 m;工况9~12的泥炭层厚度为1.8 m。工况5,9,10,11的安全系数一直大于1.3,故河岸并未发生崩塌。工况12的安全系数为1.0~1.3,处于亚稳定状态,可认为河岸发生崩塌。

河岸的崩塌宽度可间接地反映河岸的稳定性,未发生崩塌的河岸比发生崩塌的河岸更稳定。崩塌宽度越长,则泥炭层的悬臂长度越长,能够维持更长悬臂的河岸,说明河岸更稳定。对于岸高相同、泥炭层厚度相同的河岸而言,含水量越高,河岸越易发生崩塌。泥炭含水率相同时,泥炭层越厚,河岸越稳定,但是随着泥炭层厚度的增加,河岸可能由不稳定变为稳定。对于若尔盖的泥炭型弯曲河流,其河岸物质组成的成分与厚度在短时间尺度内是不可变因素,而泥炭层的含水量可变,直接影响河岸崩塌频率。

现场实测崩塌块的宽度集中在0.5~1.0 m,最大宽度为1.2 m,图5表明模拟的崩塌宽度比实测的宽度偏大,但仍在可接受范围内。实际河岸的稳定性受诸多因素的影响,模拟的河岸对实际河岸形态做了优化处理,未考虑河道曲率的影响,故结果偏大。

2.4 崩塌时间变化情况

图6为12种工况河岸的不稳定时间和崩塌时间,工况5,

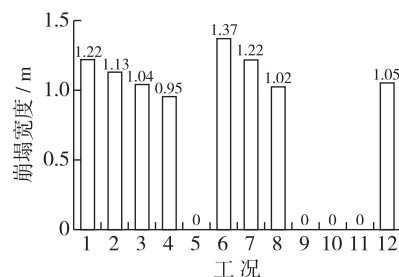


图5 12种工况下模拟所得崩塌宽度

Fig. 5 Width of bank failure obtained by numerical simulation under 12 design conditions

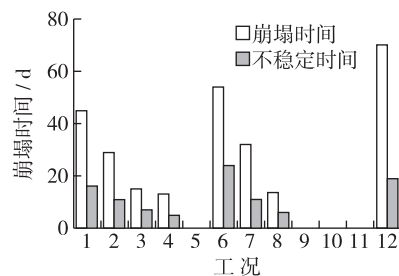


图6 崩塌时间和不稳定时间对比

Fig. 6 Comparison between bank collapsing time and unstable state time

9, 10, 11 并未发生崩塌, 将其崩塌时间视为 0。图 6 表明不稳定的时间点与稳定的时间点之间存在着一个明显的差值, 处在亚稳定状态的河岸也可能发生崩塌, 只是发生崩岸的概率小, 而河岸的不稳定状态, 发生崩岸的概率则非常高, 故通过 BSTEM 模型的过程模拟, 可预测河岸崩塌的时间。

泥炭层的含水量越高, 河岸崩塌越快; 含水量相同的河岸, 泥炭层越厚, 发生河岸崩塌所需的时间就越长; 随着泥炭含水量的增加, 河岸处于亚稳定状态的时间越来越短(图 6)。从各种工况的崩塌时间来看, 越高的泥炭含水量, 河岸越快发生崩塌, 对于河岸稳定是不利的。而且, 在高含水量情况下, 河岸处于亚稳定状态下的时间更短, 增加了河岸发生崩塌时间的预测难度。

2.5 侵蚀量及侵蚀速率变化

图 7 为水流对河岸的侵蚀量和侵蚀速率, 侵蚀速率通过侵蚀总量除以侵蚀时间求得, 是平均侵蚀速率。图 7(a) 表明当发生河岸崩塌时, 粉沙层厚度相同情况下, 侵蚀量随着泥炭含水率的增加而减少; 当泥炭层含水率相同时, 下部粉沙层越厚, 侵蚀量越大; 当粉沙层的厚度为 0.2 m 时, 河岸均达到不稳定状态, 河岸侵蚀量基本相同。图 7(b) 表明, 粉沙层厚度相同时, 侵蚀速率随着泥炭含水率的增加而增加; 当泥炭层含水率相同时, 下部粉沙层越厚, 侵蚀速率越大; 当粉沙层厚度为 0.2 m 时, 河岸侵蚀速率基本相同。

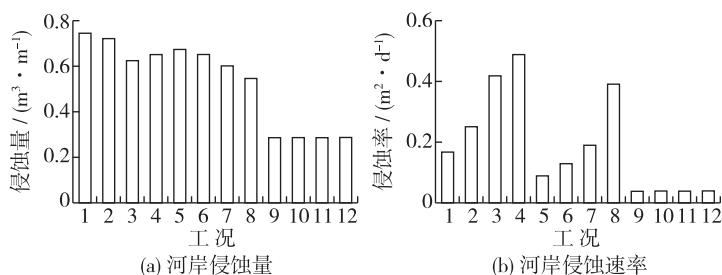


图 7 河岸侵蚀量和侵蚀速率

Fig. 7 Erosion amount and its rate of river bank

河岸侵蚀由水流边界剪切力与河岸临界剪切力之间的差值决定, 在模拟泥炭型河岸中, 各种工况的水流条件相同, 因此, 河岸物质的可侵蚀性(即抗侵蚀强度)是崩岸的最主要因素。泥炭的抗侵蚀性强, 但粉沙的抗侵蚀性弱。因此, 泥炭型河岸中泥炭层厚度与粉沙层厚度之比, 成为了河岸侵蚀的关键因素。当粉沙层的厚度越薄时, 河岸可侵蚀的物质越少, 侵蚀量也就越小。河岸的侵蚀还与侵蚀的时间长短有关, 泥炭层的含水量越高, 河岸崩塌得越快, 即水流侵蚀河岸的时间越短。对于粉沙层厚度相同的河岸而言, 泥炭层的含水量越高, 河岸的侵蚀量越少、河岸崩塌越快。

3 河岸不同物质的厚度对河岸稳定性影响

以上 12 种工况, 揭示了相同水流条件和河岸高度条件下, 不同上层厚度和含水量的泥炭型河岸稳定性规律。为更深入地了解土层厚度对于泥炭型河岸稳定性的影响, 本研究又设计了 9 种新的工况(图 5)。若尔盖高原泥炭的含水量约为 200%, 在新工况下保持含水量不变, 在水流条件相同、泥炭层或粉沙层不变的条件下, 研究不同河岸高度河岸的稳定性。

工况 13~17, 泥炭层厚度保持不变(2.0 m), 粉沙层厚度依次递增; 工况 18~21, 粉沙层厚度保持不变(0.5 m), 泥炭层厚度依次递增。安全系数 F_s 、河岸崩塌宽度、河岸崩塌时间、河岸侵蚀量和侵蚀速率这 5 个要素都可以作为判定河岸稳定性的依据, 但是, 考虑到这几种工况河岸高度以及组成物质不一, 用河岸崩塌宽度与河岸的侵蚀评估河岸稳定性有些欠妥, 所以, 采用安全系数 F_s 和河岸崩塌时间评估河岸稳定性。

由图 8(a) 可见, 当粉沙层厚度为 0.2 和 0.3 m 时, 河岸的安全系数 F_s 都大于 1.3, 河岸未发生崩塌。当泥炭层厚度一定时, 粉沙层越厚, 河岸初始安全系数 F_s 越小, 并且 F_s 下降更快, 河岸崩塌越快。当河岸的粉沙层很薄时, 河岸不发生崩塌, 安全系数 F_s 下降到某一数值后, 基本保持不变。由图 8(b) 可见, 当粉沙层厚度一定时, 泥炭层越薄, 河岸初始安全系数 F_s 越大, 随着时间的推移, 4 条曲线接近重合, 最后崩塌时安全系数 F_s 几乎相等。图 8(c) 为 9 种工况的崩塌时间变化情况, 当泥炭层厚度一定, 粉沙层很薄时, 河岸不发生崩塌。当发生崩塌时, 粉沙层越厚, 河岸崩塌越快, 当粉沙层厚度一定时, 随着泥炭层厚度的增加, 河岸发生崩塌的时间越长。

河岸下部未发生侵蚀时, 岸高越低, 河岸初始安全系数 F_s 越大, 河岸高度是决定河岸稳定性的重要因

素。当河岸发生侵蚀时,下部粉沙层厚度的变化比上部泥炭层的变化更能影响河岸的稳定性。当泥炭层的厚度一定时,粉沙层越厚,河岸越不稳定,更易发生崩塌。当粉沙层的厚度一定时,泥炭层越厚,河岸发生崩塌的时间越长,说明河岸更稳定。从河岸发生崩塌的时间来看,主要集中在 25~40 d,说明对于泥炭型河岸而言,坡脚若无保护,河岸在水流的冲刷下,约 1 个月即可能发生崩塌。

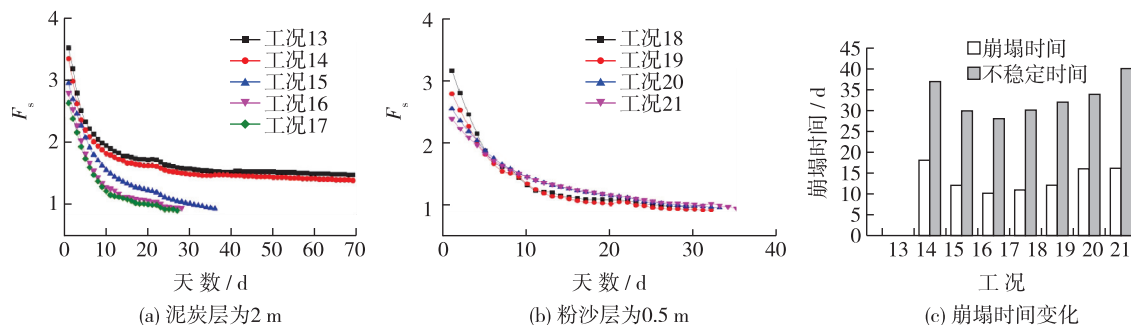


图8 不同土层厚度对于泥炭型河岸稳定性的影响

Fig.8 Influence of soil thickness on stability of peat-type river bank

4 结 语

若尔盖高原泥炭型弯曲河流的河岸稳定性是作用于河岸的驱动力与抵抗力共同作用的结果。泥炭型河岸的驱动力是泥炭层自身的重力,抵抗力是泥炭层的抗剪力。当泥炭层的含水率变大时,泥炭层的重力增加,即河岸驱动力增加,而且泥炭的抗剪强度降低。因此,泥炭层的含水量增加,使得河岸变得不稳定,河岸更易发生崩塌。

泥炭层弯曲河流的河岸是典型的二元结构,河岸二元物质组成的各自厚度对于河岸稳定性的影响大。泥炭层厚度的增加,提高了河岸的稳定性;而粉沙层厚度的增加,降低了河岸的稳定性,而且粉沙层厚度的变化对于河岸稳定性的影响大于泥炭层厚度的变化。

参 考 文 献:

- [1] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis. I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2): 134-150.
- [2] 沈婷, 李国英, 张幸农. 水流冲刷过程中河岸崩塌问题研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 260-263. (SHEN Ting, LI Guoying, ZHANG Xingnong. Numerical analysis of bank failure under lateral erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Suppl1): 260-263. (in Chinese))
- [3] 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, 60. (HUANG Bensheng, BAI Yuchuan, WAN Yanchun. Model for dilapidation mechanism of riverbank[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 49-54, 60. (in Chinese))
- [4] 朱海丽, 李志威, 胡夏嵩, 等. 黄河源草甸型弯曲河流的悬臂式崩岸机制[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 836-843. (ZHU Haili, LI Zhiwei, HU Xiasong, et al. Cantilever bank failure mechanism of meadow meandering river in the Yellow River source region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7): 836-843. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] SIMON A, POLLEN N, MAHACEK V, et al. Quantifying reductions of mass-failure frequency and sediment loadings from streambanks using toe protection and other means; Lake Tahoe, United States[J]. Jwara Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(1): 170-186.
- [7] LINDOW N, FOX G A, EVANS R O. Seepage erosion in layered stream bank material[J]. Earth Surface Processes and

- Landforms, 2009, 34(12): 1693-1701.
- [8] WILSON G V, PERIKETI R K, FOX G A, et al. Soil properties controlling seepage erosion contributions to streambank failure [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(3): 447-459.
- [9] CANCEENNE R M, FOX G A, SIMON A. Influence of seepage undercutting on the root reinforcement of streambanks[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(11): 1769-1786.
- [10] HEINLEY K N. Stability of streambanks subjected to highly variable streamflows: the Osage River downstream of Bagnell Dam [D]. Missouri: Missouri University of Science and Technology, 2010.
- [11] CELEBUCKI A W, EVISTON J D, NIEZGODA S L. Monitoring streambank properties and erosion potential for the restoration of Lost Creek[C]//World Environmental and Water Resources Congress, 2010.
- [12] 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 streambanks[J]. Geomorphology, 2012, 145-146: 107-114.
- [13] 冉冉, 刘艳锋. 利用 BSTEM 模型分析库岸边坡形态对其稳定性的影响[J]. 地下水, 2011, 33(2): 162-165. (RAN Ran, LIU Yanfeng. Analysis of impact of reservoir bank geometry on the stability via BSTEM model[J]. Ground Water, 2011, 33(2): 162-165. (in Chinese))
- [14] 王博, 姚仕明, 岳红艳. 基于 BSTEM 的长江中游河道岸坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(1): 1-7. (WANG Bo, YAO Shiming, YUE Hongyan. Stability analysis for typical riverbank slope in the middle reach of Yangtze River by BSTEM[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(1): 1-7. (in Chinese))
- [15] 柴岫. 若尔盖高原的沼泽[M]. 北京: 科学出版社, 1965. (CHAI Xiu. The swamp of the Zoige basin[M]. Beijing: Science Press, 1965. (in Chinese))
- [16] HANSON G J, SIMON A. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(1): 90-96.

Conceptually modelling of cantilever bank failure processes of peat-type meandering channel in the Zoige Plateau

LI Zhiwei^{1,2}, GUO Nan^{1,2}, HU Xuyue^{1,2}, WANG Xiaojuan³, LI Yanfu⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Department of Channel Management of Chuhe River, Nanjing 210048, China; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Bank failure plays a vital role in fluvial processes and river pattern transformation in meandering rivers, driving lateral migration and increasing channel sinuosity. Field surveys on meandering rivers of the Zoige Plateau in the Yellow River source region during 2011–2016 demonstrated that the bank failure in the outer bank is the cantilever pattern in the peat-type meandering river, but the processes of this cantilever bank failure is little known so far. To analyze the cantilever bank failure, the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) is applied to study the stability of bank and slope, and to simulate bank erosion and collapsing processes. The stability of the peat-type bank is closely related to the water content of the peat layer. If the water content increases, not only the driving force of bank failure is strengthened, but also the shearing resistance is weakened, which is unfavorable to the stability of the peat-type bank. The thickness of two-layer bank material has an important influence on the bank stability. The increasing of the peat layer thickness strengthens the bank stability, whereas the increasing of silt layer thickness reduces the stability.

Key words: peat-type meandering river; bank failure; bank stability; BSTEM; Zoige Plateau