

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222585

基于 BSTEM 的河岸崩塌机理研究

吴新宇^{1,2}, 张 向^{2,3a,3b}

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450004; 3. 黄河水利委员会 a. 黄河水利科学研究院; b. 黄河流域生态保护和高质量发展研究中心, 河南 郑州 450004)

摘要: 河岸崩塌现象在天然河流中非常普遍,在河道演变中发挥着重要作用。为了量化研究河岸土体性质和岸坡倾角对河岸稳定性的影响,基于计算河岸稳定和坡脚冲刷的 BSTEM 模型,选取 6 种不同典型物质的河岸,研究了 6 种岸坡倾角下均质河岸的稳定性。在忽略潜水位的条件下,非粘性岸坡和粘性岸坡的崩塌模式不同。对于非粘性河岸,影响河岸稳定性的主导因素是有效内摩擦角,有效内摩擦角越大,河岸越稳定;对于粘性河岸,影响河岸稳定性的主导因素是有效粘聚力,有效粘聚力越大,河岸越稳定。有效粘聚力差值相同时,有效内摩擦角差值的绝对值越小,安全系数增加越多。岸坡倾角增加使河岸稳定性降低,安全系数减小。非粘性河岸的有效内摩擦角越大,安全系数对岸坡倾角的变化越敏感。而对于粘性河岸,有效粘聚力越大,安全系数对岸坡倾角的变化越敏感。

关键词: 河岸崩塌; BSTEM; 土体性质; 岸坡倾角

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0137-04

1 引言

河岸崩塌在河道演变过程中具有重要作用,不同类型的河岸物质组成直接影响河道形态。河岸崩塌取决于河道中水流的流态和河岸岸坡的稳定性^[1]。影响河岸崩塌的主要因素有岸坡土壤地质结构、水流条件和河床冲淤演变,既涉及河床演变学中河道的横向演变和河流动力学中水流的流态,又与土力学中岸坡的稳定性密切相关^[2]。河岸崩塌在天然河道中非常普遍,同时也与防洪密切相关^[3]。如黄河下游游荡型河段河岸崩塌使河势发生变化,给河道的系统性综合治理和高质量发展带来新的问题^[4-5]。河岸的稳定性与河岸物质的压实程度、细砂含量、底部泥沙粘度成正比,影响河岸稳定的重要因素是泥沙中值粒径与摩擦休止角^[6]。此外,河岸崩塌还与水流冲刷作用有关^[7]。近年来,美国密西西比州泥沙实验室开发的河岸稳定评估模型 BSTEM 应用广泛。如

MIDGLEY T L 等^[8]运用 BSTEM 模型预测二元结构河岸的崩塌宽度,并评估了模型的预测能力,同时指出模型存在的问题; KLAUVON K 等^[9]总结了 BSTEM 模型的应用和局限,提出未来的研究方向。总结已有研究成果发现,现有研究成果多侧重于定性分析,多为语言描述引起河岸崩塌的主要因素,缺乏定量的研究成果。鉴此,本文基于 BSTEM 模型量化研究了河岸土体性质和岸坡倾角对岸坡稳定性的影响,旨在为河道的系统性综合治理提供参考。

2 BSTEM 模型计算原理

BSTEM 模型在 Excel 内基于宏命令运行,由河岸稳定性模块 BSM 和坡脚冲刷模块 TEM 组成。其中 BSM 模块用来分析河岸稳定性,TEM 模块用来计算坡脚横向冲刷速率和冲刷量,为坡脚防护提供依据。

(1) 河岸稳定性模块 BSM。BSM 模块通过

收稿日期: 2022-12-14, **修回日期:** 2023-01-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930643); 华北水利水电大学科研启动项目(40830); 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室开放课题基金项目(LYRCER202203); 国家自然科学基金项目(42041006, U2243222); 河南省自然科学基金项目(212300410372); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2020-15)

作者简介: 吴新宇(1989-),女,讲师,研究方向为河道演变, E-mail: wuxinyu@ncwu.edu.cn

通讯作者: 张向(1991-),男,工程师,研究方向为游荡性河流河床演变与河道整治, E-mail: zhangxiangdut@163.com

计算河岸的安全系数 F_s 来判断河岸的稳定性。安全系数 F_s 是抵抗力与滑动力的比值,当 $F_s > 1.3$ 时,河岸处于稳定状态;当 F_s 在 $1.0 \sim 3.0$ 之间时,河岸处于条件稳定状态。当 $F_s < 1.0$ 时,河岸处于不稳定状态。河岸失稳的滑动力由岸高和坡度、土壤的单位重量和其中的水量及任意物体在岸上施加的附加力控制。安全系数的计算有 3 种方法,即水平层法、垂直切片法和悬臂剪切崩塌法。①水平层法。水平层法基于极限平衡分析计算安全系数。除了正负孔隙水压力外,还包括层状土壤、基于水分含量的土壤单位重量变化及来自水流的外部围压。模型将河岸剖面划分为 5 个有独特岩土特性的用户可定义层。 F_s 的计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^l (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w) L_i \tan \phi_i^b + [W_i \cos \beta - \mu_{wi} L_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \varphi_i')}{\sum_{i=1}^l (W_i \sin \beta - P_i \sin(\alpha - \beta))} \quad (1)$$

式中, c'_i 为第 i 层的有效粘聚力, kPa; L_i 为第 i 层的滑动平面长度, m; ϕ_i^b 为第 i 层土壤强度随着基质吸力增加而增加的速率,一般在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间; W_i 为第 i 层土的重量, kN; P_i 为外部水位作用于第 i 层的静水压力, kN/m; β 为滑动面与水平面的夹角, ($^\circ$); μ_a 为孔隙气压; μ_w 为孔隙水压力, kPa; μ_{wi} 为第 i 层的孔隙气压; α 为河岸坡度, ($^\circ$); l 为河岸划分的层数; φ_i' 为第 i 层土壤的有效内摩擦角。②垂直切片法。除了水平层方法中包含的力外,垂直切片方法还评估了崩塌块中活动的法向力和剪切力。在水中垂直延伸滑移面,并在滑移面的垂直部分施加水平静水压力来模拟河水引起的限制力。河岸被分成垂直切片,切片的数量和水平层数相等。然后将每个切片细分为 3 个子切片,以提高 F_s 计算的准确性。 F_s 的计算公式为:

$$F_s = \frac{\cos \beta \sum_{j=1}^J (c'_j L_j + (\mu_a - \mu_w) L_j \tan \phi_j^b + [N_j - \mu_{aj} L_j] \tan \varphi_j')}{\sin \beta \sum_{j=1}^J (N_j) - P_j} \quad (2)$$

式中, J 为垂直切片的数量; N_j 为作用在第 j 个切片底部的法向力, N; P_j 为作用在第 j 个切片的外部水位引起的表水压力, kN · m。③悬臂剪切崩塌法。悬臂剪切崩塌法是水平层法的特例,即令安全系数 F_s 计算公式中 $\beta = 90^\circ$ 得到悬臂剪切崩塌法 F_s 的计算公式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^l (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w) L_i \tan \phi_i^b + [P_i \sin \alpha - \mu_{ai} L_i] \tan \varphi_i')}{\sum_{i=1}^l (W_i + P_i \cos \alpha)} \quad (3)$$

(2)坡脚冲刷模块 TEM。作用在河岸每个节点上的平均边界剪切应力的计算公式为:

$$\tau_0 = \gamma_w R S \quad (4)$$

式中, τ_0 为平均边界剪切应力, Pa; γ_w 为水的单位重量,取 9.807 kN/m^3 ; R 为水力半径, m; S 为渠道坡度。

计算侵蚀距离 E 时先使用超剪应力法计算每个节点的平均侵蚀速率,然后将该速率对时间积分。计算公式为:

$$E = k \Delta t (\tau_0 - \tau_c) \quad (5)$$

式中, k 为侵蚀系数, $\text{m}^3/\text{N s}$; Δt 为时间步长, s; τ_0 为平均边界剪应力, Pa; τ_c 为临界剪应力, Pa。

3 河岸崩塌机理分析

选取 BSTEM 模型中具有代表性的 6 种河岸物质,分别为小圆石、砂砾石、细角砂、可侵蚀淤泥、可侵蚀粘土、可侵蚀硬粘土,而不针对具体的某条河流。研究均质河岸不同物质组成条件下河岸安全系数、平均边界剪切力、侵蚀距离等参数的变化规律。6 种河岸物质的特性参数见表 1。小圆石、砂砾石是松散物质,代表非粘性河岸,有效粘聚力 c' 为 0,有效内摩擦角 φ' 分别为 42° 、 36° 。其余 4 种为粘性物质,代表粘性河岸,有效内摩擦角 φ' 从 32.3° 逐渐减小至 21.1° ,而有效粘聚力从 0.4 kPa 逐渐增加至 12.6 kPa 。设计河岸高度为 5 m ,坡脚长度为 1 m ,坡脚倾角为 25° ,坡脚与河岸物质相同。河段长度为 100 m ,河道比降为 0.001 。假设潜水位与河床齐平保持不变,即潜水位距离河岸 5 m 。水深变化由小到大,从 0.2 m 逐渐增加至 5 m ,间隔 0.2 m ,每个水深持续时间为 24 h 。为研究岸坡倾角对河岸稳定性的影响,每种河岸物质计算 6 个岸坡倾角,分别为 85° 、 82.5° 、 80° 、 77.5° 、 75° 、 72.5° 。因此,计算工况共有 36 种。

表 1 河岸物质特性

序号	河岸物质	φ' / ($^\circ$)	c' / kPa	饱和容重 / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	ϕ^b / ($^\circ$)
1	小圆石	42.0	0	20.0	15
2	砂砾石	36.0	0	20.0	15
3	细角砂	32.3	0.4	18.5	15
4	可侵蚀淤泥	26.6	4.3	18.0	15
5	可侵蚀粘土	26.4	8.2	17.7	15
6	可侵蚀硬粘土	21.1	12.6	17.7	15

3.1 土体性质对安全系数的影响

非粘性河岸崩塌模式是坡脚被水流冲刷带走,上部土体滑落。粘性河岸崩塌模式是坡脚土

体被水流淘空,上部土体失稳倒塌。用 x 表示水深与河岸高度的比值。以岸坡倾角 $\alpha = 85^\circ$ 为例,安全系数 F_s 随 x 的变化见图 1,非粘性河岸和粘性河岸的 F_s 随水深的变化规律不同。非粘性河岸(小圆石、砂砾石有效粘聚力为 0)的 F_s 随 x 增大逐渐增大。而粘性河岸(有效粘聚力不为 0)的 F_s 先减小至某一最小值,然后逐渐增大。影响粘性河岸和非粘性河岸稳定性的主导因素不同。对于非粘性河岸,内摩擦角是影响河岸稳定的主要因素,内摩擦角越大,河岸稳定性越大,如内摩擦角较大的小圆石河岸的稳定性高于砂砾石河岸。对于粘性河岸,有效粘聚力对河岸稳定性的影响占主导地位,高于内摩擦角对河岸稳定性的影响。如细角砂河岸虽然内摩擦角大,但有效粘聚力最小,河岸稳定性最低。而可侵蚀硬粘土河岸则相反,内摩擦角最小,有效粘聚力最大,河岸稳定性最高。无论岸坡倾角如何变化,可侵蚀硬粘土河岸均处于稳定状态。4 种粘性物质河岸的稳定性随有效粘聚力的增加而增加。非粘性河岸的安全系数不一定都高于粘性河岸,二者之间无可比性。其他岸坡倾角下,安全系数 F_s 有类似规律。

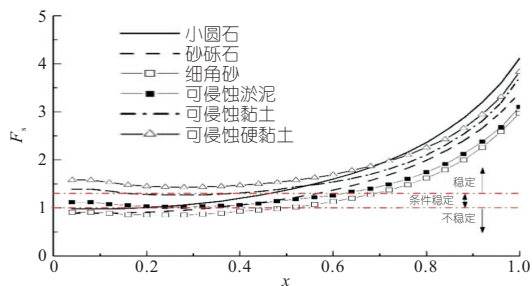


图 1 安全系数随水深变化 ($\alpha = 85^\circ$)

Fig. 1 Variation of safety factor with water depth ($\alpha = 85^\circ$)

对安全系数 F_s 随 x 的变化趋势进行二次多项式拟合,拟合程度用 R^2 表示。拟合公式为:

$$F_s = Ax^2 + Bx + C \quad (6)$$

R^2 越接近 1,说明数据点越符合二次多项式分布规律,拟合结果见表 2。由表 2 可看出,各种岸坡倾角下拟合的 R^2 值均接近 1。说明 F_s 随 x 呈现出二次多项式的变化规律,而且非粘性河岸拟合程度更高。

表 2 不同岸坡倾角二次式拟合程度 R^2 值

Tab. 2 R^2 value of quadratic fitting degree for different bank slope inclinations

河岸物质	拟合程度 R^2					
	72.5°	75.0°	77.5°	80.0°	82.5°	85.0°
小圆石	0.983	0.984	0.988	0.984	0.984	0.984
砂砾石	0.983	0.983	0.983	0.984	0.984	0.984
细角砂	0.974	0.973	0.973	0.971	0.971	0.971
可侵蚀淤泥	0.970	0.969	0.968	0.967	0.968	0.969
可侵蚀粘土	0.967	0.966	0.966	0.966	0.967	0.968
可侵蚀硬粘土	0.971	0.970	0.970	0.970	0.970	0.969

非粘性河岸有效内摩擦角减小 6° 时,安全系数 F_s 减小百分比见图 2(a)。可以看出,随 x 的增加, F_s 减小百分数逐渐增加。 $x < 0.4$ 时,不同岸坡倾角下 F_s 减小百分数差距稍大,在 9.1%~12.0% 之间; $x > 0.4$ 时各倾角下 F_s 减小百分数非常接近。岸坡倾角越大, F_s 减小百分数越小。对于粘性河岸,以粘性河岸岸坡倾角 77.5° 为例,其他倾角下 F_s 变化值和趋势类似,安全系数 F_s 减小百分比见图 2(b)。用 $\Delta\varphi'$ 表示有效内摩擦角差值,用 $\Delta c'$ 表示有效粘聚力差值。对比细角砂河岸和可侵蚀淤泥河岸,有效内摩擦角减小 5.7° ,即 $\Delta\varphi' = -5.7^\circ$,有效粘聚力增加 3.9 kPa,即 $\Delta c' = 3.9$ kPa,可侵蚀淤泥河岸的安全系数比细角砂河岸增加 4.21%~20.56%。 F_s 的增加值随水深增加而减小,且减小速率最大。同理,对比可侵蚀淤泥河岸和可侵蚀粘土河岸,有效内摩擦角减小 $\Delta\varphi' = -0.2^\circ$,有效粘聚力增加 $\Delta c' = 3.9$ kPa, F_s 的增加百分数为 19.39%~24.58%,同样随水深增加而减小,但减小速率最小。可以看出, $\Delta c'$ 相同时, $\Delta\varphi'$ 的绝对值越小, F_s 增加百分数越大即 F_s 增加越多。最后,对比可侵蚀粘土河岸和可侵蚀硬粘土河岸,有效内摩擦角减小 $\Delta\varphi' = -5.3^\circ$,有效粘聚力增加 4.4 kPa, F_s 增加百分数为 3.14%~13.83%,随水深变化趋势不变。 F_s 增加百分数随水深减小速率居中,见图 2(b)。

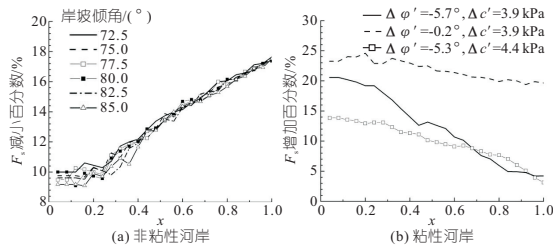


图 2 安全系数变化

Fig. 2 Variation of safety factor

3.2 岸坡倾角对河岸稳定性的影响

无论是粘性河岸还是非粘性河岸,安全系数 F_s 随岸坡倾角 α 的变化规律相同。岸坡倾角越大,河岸的安全系数越小,河岸越不稳定。以砂砾石河岸为例,具体的变化趋势见图 3。岸坡倾角每增加 2.5° ,6 种河岸安全系数 F_s 的平均减小数值见图 4。随着水深增加,安全系数 F_s 减小值逐渐增加,非粘性河岸增加速率大于粘性河岸。小圆石河岸在 x 值从 0.2 增加到 1.0 的过程中, F_s 减小数值由 0.064 增加至 0.210。而砂砾石河岸 F_s 减小数值则由 0.056 增加至 0.172。说明非粘性河岸有效内摩擦角越大,安全系数 F_s 对岸坡倾角的变化越敏感。细角砂粘性河岸 F_s 减小

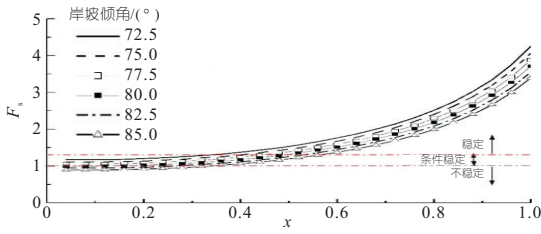


图3 砂砾石河岸 F_s 变化

Fig. 3 Variation of F_s on gravel banks

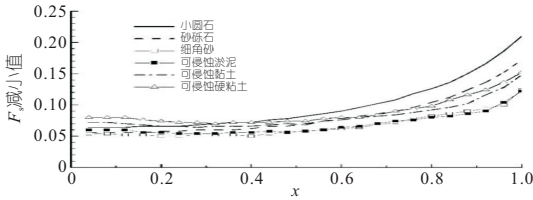


图4 安全系数 F_s 的减小数值

Fig. 4 Reduced value of safety factor F_s

数值最小,随 x 的变化 F_s 的变化范围为 0.054~0.124。而可侵蚀硬粘土河岸 F_s 减小数值最大,变化范围为 0.08~0.152。可侵蚀淤泥和可侵蚀粘土河岸则居中。可见,随着有效粘聚力增加,安全系数 F_s 对岸坡倾角的变化越敏感。

3.3 坡脚冲刷

平均边界剪应力 τ_0 与水力半径 R 有关,与河岸物质无关,因此各种物质的岸坡 τ_0 数值相同。 τ_0 随水深和岸坡倾角的变化而变化,随水深变化明显,岸坡倾角对 τ_0 影响较小,各种倾角下 τ_0 的变化见图 5。岸坡倾角 α 通过影响平均边界剪应力 τ_0 ,进而影响侵蚀距离 E 。因此,岸坡倾角 α 对 E 有影响,但影响程度较小。岸坡倾角 α 越大, E 值越大。各种岸坡的侵蚀距离 E 随水深的变化见图 6。对于非粘性河岸,有效内摩擦角越

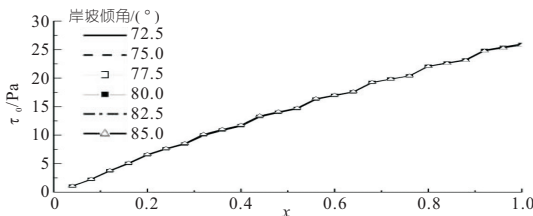


图5 平均边界剪应力 τ_0 的变化

Fig. 5 Variation of average boundary shear stress τ_0

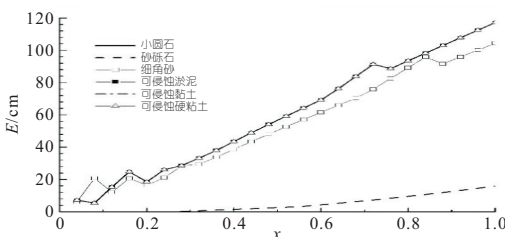


图6 侵蚀距离 E 随水深的变化(岸坡倾角 $\alpha=85^\circ$)

Fig. 6 Variation of erosion distance E with water depth ($\alpha=85^\circ$)

小,河岸侵蚀距离 E 越大。有效内摩擦角最大(42°)的小圆石河岸在水深增大的过程中, E 均为 0,河岸未被侵蚀。砂砾石河岸的有效内摩擦角减小 $6^\circ(36^\circ)$,在各种岸坡倾角下,均是从 $x=0.28$ 以后河岸被侵蚀,而且侵蚀距离 E 随水深增加而增大,最大值达 15.94 cm。与非粘性河岸相比,粘性河岸较易被水流冲刷侵蚀。粘性河岸的 E 值远大于非粘性河岸。可侵蚀淤泥、可侵蚀粘土和可侵蚀硬粘土 3 种河岸的 E 值相同,大于细角砂河岸。以可侵蚀粘土河岸为例,侵蚀距离 E 同样随水深增加而增大,最大值达 117.15 cm。

4 结论

a. 非粘性河岸的有效内摩擦角是影响河岸稳定的主要因素,崩塌模式是坡脚被水流冲刷带走,上部土体滑落;粘性河岸的有效粘聚力对河岸稳定性的影响占主导地位,高于有效内摩擦角,崩塌模式是坡脚土体被水流淘空,上部土体失去稳定性而倒塌。

b. 若忽略潜水位的影响,安全系数随水深增加呈现出二次多项式的变化规律,而且非粘性河岸更好地体现这一规律。岸坡倾角增加使河岸的安全系数减小。两种河岸的安全系数对岸坡倾角的敏感性不同。非粘性河岸有效内摩擦角越大,安全系数对岸坡倾角的变化越敏感。而对于粘性河岸,有效粘聚力越大,安全系数对岸坡倾角的变化越敏感。

c. 平均边界剪应力随水深和岸坡倾角的变化而变化,与河岸物质无关。粘性河岸的侵蚀距离远大于非粘性河岸,侵蚀距离随水深增加而增大。岸坡倾角变化对侵蚀距离有影响,岸坡倾角越大,侵蚀距离越大。

参考文献:

[1] 王延贵,陈吟,陈康. 冲积河流岸滩崩退模式与崩退速率[J]. 水利水电科技进展,2018, 38 (4): 14-20.
 [2] 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.
 [3] 王远见,江恩慧,李新杰,等. 黄河下游宽滩区滞洪沉沙功能与减灾效应二维评价模型及其应用[J]. 水利学报,2020, 51 (9): 1111-1120.
 [4] LINJUAN X, ENHUI J, LIANJUN Z, et al. Research on the asymmetry of cross-sectional shape and water and sediment distribution in wandering channel[J]. Water,2022, 14 (8): 1214: 1-17.

组运行效率具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 戴理韬,高剑,黄守道,等. 变速恒频水力发电技术及其发展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 169-177.
- [2] 赵军科,刘云平,刘建俊,等. 变转速抽水蓄能机组控制策略选择[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6): 62-64.
- [3] 马小亮. 变频器新应用——变速抽水蓄能水电机组[J]. 电气传动, 2022, 52(2): 3-10.
- [4] 畅欣. FSC 可变速抽水蓄能机组功率调节特性研究

[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2016.

- [5] 杨正文. 全功率变速恒频抽蓄机组 VSG 控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
- [6] 蔡卫江,许栋,徐宋成,等. 可变速抽水蓄能机组调速器的控制策略[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(2): 81-85.
- [7] 胡万丰,樊红刚,王正伟. 双馈式抽水蓄能机组功率调节仿真与控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(6): 591-600.
- [8] 李辉,黄樟坚,刘海涛,等. 交流励磁抽水蓄能机组快速功率响应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 156-161, 175.

Control of Variable Speed Pumped Storage Unit Speed Regulation System Based on Adaptive Backstepping Sliding Mode

HAN Zhang¹, XING Zuo-xia¹, E Chun-liang², GUO Shan-shan¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Beijing Corona Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: At present, most variable-speed pumped-storage units use converters (AC excitation) to control power. There is a problem of reverse speed overshoot caused by rapid power changes, and the traditional governors are difficult to ensure good control effects, which affects the operating efficiency of variable-speed units. In order to study the control of the speed regulation system under the active power regulation of the variable speed unit, the speed regulation system of the variable speed pumped storage unit with adaptive backstepping sliding mode control (ABSMC) was proposed. Firstly, a mathematical model of the variable-speed pumped-storage unit speed control system including the optimal speed module was established. Secondly, taking the electromagnetic power as the system disturbance, an adaptive backstepping sliding mode controller for the variable-speed pumped-storage unit speed control system was designed and its stability was analyzed. Finally, a simulation test platform for the speed regulation system of the variable speed pumped storage unit was built, and the dynamic response simulation analysis of the speed of the variable speed pumped storage unit was carried out under the given power of the power generation condition. Compared with the sliding mode controller (SMC) and PID controller, the results show that the reverse overshoot of the controlled unit speed by the ABSMC is small, the adjustment time is short, and the effect of tracking the optimal speed is ideal. The effectiveness of the designed controller was verified.

Key words: optimal speed; variable speed governor; variable speed turbine; full power converter; reverse overshoot; power given

(上接第 140 页)

- [5] 江恩慧,屈博,王远见,等. 基于流域系统科学的黄河下游河道系统治理研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 7-15.
- [6] MILLAR R G, QUICK M C, MEMBER A. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers[J]. Journal of hydraulic engineering, 1995, 121(4): 382-385.
- [7] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis. I: theory[J]. Journal of hydraulic engineering, 1988, 114(2): 134-150.

- [8] 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.
- [9] KLAVON K, FOX G, GUERTAULT L, et al. Evaluating a process-based model for use in stream-bank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)[J]. Earth surface processes and landforms, 2017, 42: 191-213.

Research on Mechanism of Riverbank Failure Based on BSTEM

WU Xin-yu^{1,2}, ZHANG Xiang^{2,3a,3b}

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, MWR, Zhengzhou 450004, China; 3a. Yellow River Institute of Hydraulic Research; 3b. Research Center of YB Conservation and Development, YRCC, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: River bank collapse is very common in natural rivers and plays an important role in the evolution of river channels. In order to quantitatively study the influence of river bank soil properties and bank slope inclination on river bank stability, the BSTEM model for calculating river bank stability and bank toe erosion was adopted, and six typical river bank materials were selected to study the stability of homogeneous river banks under six bank slope inclination angles. Under the condition of ignoring the water table, the collapse modes of non-cohesive bank slope and cohesive bank slope are different. For non-cohesive bank, the dominant factor affecting bank stability is the effective internal friction angle. The larger the effective internal friction angle is, the more stable the bank is. For cohesive bank, the dominant factor affecting the stability of the cohesive bank is effective cohesion. The greater the effective cohesion is, the more stable the bank is. When the effective cohesion difference is the same, the smaller the absolute value of the effective internal friction angle difference is, the more the safety factor increases. The increase of bank slope inclination reduces river bank stability and the safety factor. The larger the effective internal friction angle of the non-cohesive bank is, the more sensitive the safety factor to the change of bank slope inclination is. For cohesive banks, the greater the effective cohesion is, the more sensitive the safety factor to the change of bank slope inclination is.

Key words: river bank collapse; BSTEM; soil properties; bank slope inclination