

水流冲刷过程中河岸崩塌问题研究

沈 婷, 李国英, 张幸农

(南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘 要: 采用土工数值分析方法, 对水流冲刷过程中的河岸崩塌问题进行了分析。分析了水流冲刷引起的河岸后退距离及后退过程中坡内的渗流情况与坡体的稳定性; 探讨了水流冲刷过程中岸坡崩塌的发生机理; 指出了坡内的渗流作用与坡前水流的冲刷作用是岸坡发生崩塌的主要动力因素, 而岸坡土体的物质组成和分布、岸坡坡度等则是岸坡发生崩塌的主要内在因素; 并提出了相应的工程防护措施。

关 键 词: 崩岸; 横向后退距离; 渗流; 稳定

中图分类号: TU 4; TV 871

文献标识码: A

Numerical analysis of bank failure under lateral erosion

SHEN Ting, LI Guo-ying, ZHANG Xing-nong

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Bank failure under lateral erosion is analyzed by numerical method. A method to calculate lateral erosion distance is put forward. With continual lateral erosion seepage and stability of bank have dynamic changes. Mechanism and cause of bank failure under lateral erosion are put forward. The seepage and erosion are primary dynamic influence factors on bank failure; and the soil composition, soil distribution and slope angle of bank are primary internal influence factors on bank failure. Based on mechanism analysis relevant treatment measures to bank stability are presented.

Key words: bank failure; lateral erosion distance; seepage; stability

1 前 言

河岸崩塌问题是我国防洪减灾事业中亟需研究解决的重要问题之一。我国许多河流经常会发生岸坡崩塌, 尤其是一些大江大河由于缺乏完全彻底的治理, 许多河道河势不稳, 冲淤变化频繁, 岸滩冲刷崩塌的现象十分普遍和严重, 例如, 长江中下游的江西九江和湖口河段、安徽官洲河段、江苏扬州六圩河段和江都嘶马河段, 黄河下游郑州至东坝头河段、沁河口河段、济南河段等, 均出现过十分严重的崩岸险情^[1]。江河崩岸会造成河道洪水滩地流失, 严重威胁防洪大堤的安全, 甚至直接使堤防开裂形成洪灾。崩岸还破坏河势稳定, 造成沿河工程中诸多难以补救的后果。另外, 崩岸使岸边大量农田丧失、威胁沿河港口码头、厂矿安全, 使国民经济遭受巨大损失。

岸坡破坏是水流淘刷河岸、岸坡崩塌交替作用反复循环的一个过程^[2]。岸坡坡脚土体被冲掉后, 其余部分塌入河中, 水流继续破坏暂存的岸坡使岸坡节节后退。河岸崩塌破坏的影响因素众多, 问题复杂, 故至今对其产生机理尚不十分清楚, 在防治措施方面大多仍凭经验采用传统的方法。因此, 进一步加强对崩岸机理的研究, 探索其形成原因和规律, 对防洪减灾和江河治理具有重大的现实意义。

崩岸的影响因素很多, 导致岸坡崩塌的原因除了人为破坏、突加荷载和地震等偶然因素外, 主要有两方面因素: 岸坡土质方面和河流动力方面。其中, 岸坡土质方面的因素有岸坡土层组成及性质、剖面形状(坡高、坡度等)、岸坡的渗流状态等; 河流动力方面的因素有河流的流路, 表面流速大小和沿深度分布、流量、流态等^[3]。

目前对河岸崩塌问题的研究往往从河流河势方面考虑的较多, 土力学方面的研究较少, 而将二者有机结合在一起的研究则更不多见。本文以某室内大比尺砂质概化模型坡体为例, 通过土工数值分析手段, 研究水流冲刷过程中坡体内的渗流状态及稳定变化情况, 并对河岸发生崩塌的机理进行探讨。

概化模型坡体如图 1 所示, 其初始坡比为 1:2.5, 坡高 1.6 m, 坡体前后水位差 $\Delta H = 40$ cm, 坡前水位 0.639 1 m, 坡前水流表面流速为 51.4 cm/s。模型材料选用长江细砂, 制模时材料颗粒级配与长江实

际崩岸段土体基本一致^[1], 模型砂体的物理力学性质指标见表 1。

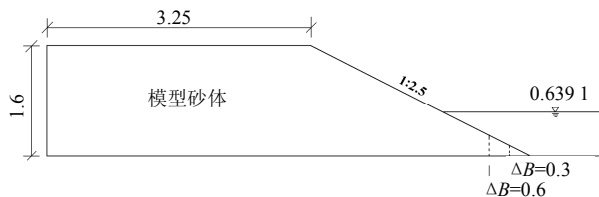


图 1 概化模型坡体 (单位: m)

Fig. 1 Sketch plan of slope model(unit: m)

表 1 模型砂的物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of model sand

土样	物理指标				力学指标				
	含水率 w /%	湿密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	干密度 ρ_d / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	c /kPa	φ / ($^\circ$)	渗透系数 k_{20} / $10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	压缩系数 a_v / MPa^{-1}	压缩模量 E_s /MPa
细砂	29.3	1.94	1.50	0.78	0	31.1	4.06	0.07	24.0

2 冲刷过程河岸的横向后退距离

对于考虑冲刷作用的河岸崩塌问题, 首要的就是确定河岸被水流横向冲刷后退的距离。国内外某些学者在实测资料或极值假说基础上提出了一些河岸横向后退距离的经验公式, 但这些方法存在较大的局限性, 均不能考虑河岸冲刷崩塌时内在的力学机理^[4], 因此, 本文采用建立在力学机理分析基础上的 Osman and Thorne 方法考虑横向后退距离。

Osman and Thorne 提出, 在 Δt (s) 时间内粘性河岸被水流冲刷后退的距离为

$$\Delta B = [C_t \Delta t (\tau - \tau_c) e^{-1.3\tau_c}] / \gamma_s \quad (1)$$

式中 ΔB 为 Δt 时间内河岸被水流横向冲刷后退的距离 (m); C_t 为横向冲刷系数, 是一常数, Osman 根据室内实验研究成果得到 $C_t = 3.64 \times 10^{-4}$; τ 为作用在岸坡上的水流切向力 (N/m^2), $\tau = \gamma_w R_h S$, γ_w 为水的重度; R_h 为水力半径; S 为水流能坡, 与河床纵向坡度、粗糙程度及横截面形状有关; τ_c 为河岸土体的起动切应力 (量纲同 τ), 与岸坡土体的颗粒粒度、钠原子吸收率、孔隙流体盐度集中、介电扩散等物理化学性质有关^[5, 6]。

式 (1) 是针对粘性土岸坡的后退距离经验公式。有关崩岸发生段的岸坡土体组成资料显示, 崩岸段土体组成多为二元结构, 上层为亚粘土和粉质粘土, 下层为砂层, 主要是粉细砂及中砂。显然, 二元结构中的细砂层抗冲性能相对于上层粘土层极

差, 最易起动和分散搬运。对于无粘性土组成的岸坡, 国内外现还未见理论上或经验上的计算公式反映水流侧向冲刷对其形状的影响。本文在 Osman 公式的基础上, 对此类无粘性土坡体考虑一影响因子 m ($m > 1$), 以修正砂质岸坡被水流横向冲刷后退的距离。 m 的大小和砂土的物理力学性质、岸坡的形状、组成及岸坡的渗流状态等因素有关。

对于概化模型坡体, 砂的干重度 $\gamma_s = 15.0 \text{ kN/m}^3$, 水流切向力 $\tau = 7.5 \text{ kPa}$, 砂体起动切应力 $\tau_c = 1.5 \text{ kPa}$ 。修正因子 $m = 2.0$ 时, 由式 (1) 可得到: 前端水流淘刷 1 h 后坡体后退距离 $\Delta B = 0.15 \text{ m}$, 前端水流淘刷 2 h 后坡体后退距离 $\Delta B = 0.30 \text{ m}$, 前端水流淘刷 4 h 后坡体后退距离 $\Delta B = 0.60 \text{ m}$ 。

3 冲刷过程中岸坡渗流分析

对保持坡体前后水位差 $\Delta H = 0.40 \text{ m}$ 下的初始坡比及横向后退 0.30, 0.60 m 情况下的概化模型坡体分别进行了渗流计算。

图 2~4 分别为初始坡比 1:2.5, 坡体后退 0.30 m, 0.60 m 时坡内的渗流计算结果 (图中, 80%, 60%, ..., 10% 代表分界线)。

稳定渗流计算结果显示: 在初始坡比下, 渗流出逸坡降为 0.143; 当坡前水流冲刷 2 h 且坡体后退 0.30 m 时, 渗流出逸坡降为 0.152; 而当坡前水流冲刷 4 h 且坡体横向后退 0.60 m 时, 渗流出逸坡降为 0.289。

对于斜坡土体, 临界水力坡降^[7]:

$$J_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \cos \beta (\tan \varphi - \tan \beta) \quad (2)$$

式中 J_{cr} 为临界水力坡降; γ' 为土体浮重度; γ_w 为水的重度; β 为坡角; φ 为土体的内摩擦角。而对于文中的模型坡体, $\gamma' = 9.5 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 31.1^\circ$, 则对应于坡度 1:2.5 时, 坡体的临界坡降 $J_{cr} = 0.179$ 。

比较渗流出逸坡降与其临界坡降可以发现: 初始坡比时, 渗流出逸坡降为 0.143, 小于其临界坡降 0.179, 坡体不会发生渗透破坏。而随着水流对坡体的冲刷, 坡体不断后退, 渗流逸出处水力坡降越来越大, 当坡体后退 0.30 m 时, 出逸坡降为 0.152, 仍小于其临界坡降, 坡体不会发生渗透破坏; 而当坡体后退 0.60 m 时, 出逸坡降则达到 0.289, 大于坡体临界坡降, 坡体发生渗透破坏。

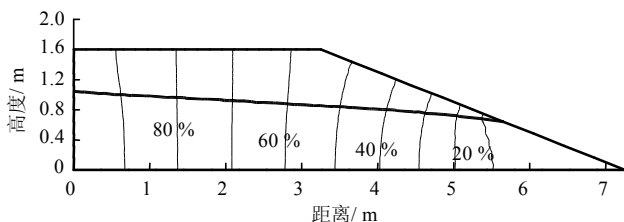


图 2 初始坡比 1:2.5 时坡内渗流计算结果

Fig. 2 Seepage in initial slope of 1 to 2.5

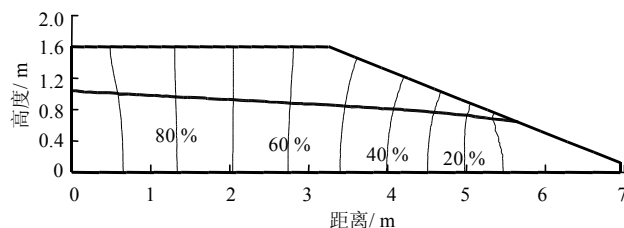


图 3 坡体后退 0.30 m 时坡内渗流计算结果

Fig. 3 Seepage in slope (lateral erosion distance: 0.30 m)

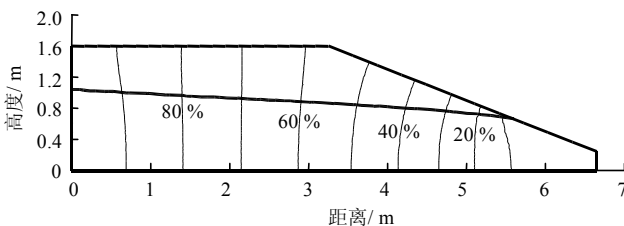


图 4 坡体后退 0.60 m 时坡内渗流计算结果

Fig. 4 Seepage in slope (lateral erosion distance: 0.60 m)

由冲刷过程中坡体的渗流计算结果可见, 水流冲刷过程中, 坡体不断后退, 坡内渗流的渗径不断

缩短, 渗流出逸点不断后缩, 渗流出逸坡降逐渐增大, 当坡体后退到一定程度时渗流坡降大于坡体的临界水力坡降, 坡体将会发生渗透破坏, 表征为砂颗粒不断流失, 坡体局部失稳。

4 冲刷过程中岸坡稳定性分析

稳定分析方法采用极限平衡方法中的 Bishop 方法、Morgenstern-Price 方法。计算时将上述渗流分析计算出的坡体内水头分布转化为孔隙水压力, 再进行有效应力分析。模型砂强度计算指标见表 1。

表 2 列出了 3 种计算工况下模型坡体的稳定性计算结果。其结果显示, 随着坡前水流对水下坡体的冲刷, 坡体不断后退, 水下坡度越来越陡, 坡体的稳定安全系数越来越小, 坡体从稳定状态到临界稳定状态, 再到失稳状态。

表 2 坡体最小安全系数

Table 2 Stability factors of slope

计算工况	$F_s \min$	
	Bishop 法	M-P 法
初始坡比 1:2.5	1.093	1.069
坡体后退 0.30 m	1.072	1.038
坡体后退 0.60 m	1.004	0.972

5 冲刷过程中河岸崩塌机理分析

从上述分析中可以看出, 粉细砂层是河岸崩塌与否的关键土层。粉细砂凝聚性差, 强度指标低, 难于抵抗坡前水流的冲刷作用, 对于粉细砂坡体, 由于易被水流所侵蚀, 而被侵蚀的粉细砂又迅即被水流带走, 因此, 粉细砂坡体在水流冲刷作用下坡脚后退快。而粘质坡体由于土体强度指标高, 土体颗粒不易被起动, 在水流冲刷作用下则坡脚后退缓慢。河岸坡度也是崩岸发生的内在原因之一。显然, 坡体坡度越陡, 坡体抗渗透破坏的能力越差, 坡体的稳定性也越差, 崩岸更易于发生。

坡内的渗流作用与坡前水流的冲刷作用是河岸发生崩塌的主要动力因素。当水流流速大于土体的起动流速, 土体将被起动, 并被水流冲走, 坡脚土体在水流的淘刷下不断流失, 尤其对于以粉细砂为主的土体, 抗冲刷能力极低。另外, 坡内地下水对土体的软化效应, 使得土体更易被水流所冲走。坡前水流的冲刷使得水下坡体不断后退, 水下坡度越来越陡, 坡内渗流状况也随之不断改变, 从而使得坡体的稳定性不断下降。在渗流与坡前水流冲刷的双重作用下, 坡体的稳定性越来越差, 岸坡越易于发生崩塌破坏。

6 结 语

河岸土体的物质组成与分布、河岸的坡度是河岸崩塌发生与否的主要内在因素，而岸坡内的渗流作用与坡前水流的冲刷作用是河岸发生崩塌的主要动力因素。

导致河岸发生崩塌的原因可能是某单因素作用的结果，也可能是多因素共同作用的结果。因此，对于由物理力学性质较差土体组成的岸坡，处于枯水期或长期浸泡在洪水中的岸坡，位于迎流顶冲部位和水位浮动区的岸坡等这些内、外在因素影响强烈的岸坡，将更易发生失稳与崩塌。

除削坡减载、加固土体、打抗滑桩等常用边坡稳定加固措施外，根据水流冲刷过程中河岸崩塌发生机理，下列措施也是解决水流冲刷过程中岸坡崩塌破坏问题的重要措施：

(1) 稳定河势。水下可采用抛石、绞链沉排、抛土工包等固基措施，水上可采用干砌块石或混凝土块护坡，以消除或减缓迎流顶冲对岸坡的冲击。

(2) 控导地下水水流。采用排水、防渗等措施，改善坡内渗流对河岸稳定的不利影响。

上接第 254 页

以上这些计算结果与实际情况基本吻合，可见城墙内侧护坡采用包裹式加筋土挡墙设计方案，能够有效地减小对城墙的土压力作用，提高城墙的稳定性，同时也能保证自身的整体稳定，是一种比较好的方案。

5 结 语

在城墙内侧场地狭小、地基情况较差的情形下，采用包裹式加筋土挡墙护坡设计方案能够取得良好效果。能够确保高陡边坡的自身稳定，同时减小对墙体的土压力作用，提高城墙的稳定性，使墙体的水平位移相对减少，满足工程质量要求。由于其占地少，使得城墙周围住宅等建筑的整体环境得到保

参 考 文 献

- [1] 张辛农, 应强, 余湘娟, 等. 江河崩岸现象形成原因和机理的研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.
- [2] 陈祖煜, 孙玉生. 长江堤防崩岸机理和工程措施探讨[J]. 中国水利, 2000, (2): 28—29.
- [3] 包承纲, 李青云. 关于崩岸研究和预测的若干意见[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(1): 14—16.
- [4] 夏军强, 王光谦, 张红武, 等. 河道横向展宽机理与模拟方法的研究综述[J]. 泥沙研究, 2001, (6): 71—78.
- [5] Osman A M, Thorne C R. Riverbank stability analysis-I: theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering*, 1988, 114(2): 134—150.
- [6] Thorne C R, Osman A M. Riverbank stability analysis-II: application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering*, 1988, 114(2): 151—172.
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

护;同时本方法还具有填土量少,技术简单等优点,降低了工程费用,具有一定的经济效益。

参 考 文 献

- [1] 周萍, 刘文, 陈淑敏. 土力学与地基基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [2] 杨果林. 现代加筋土技术应用与研究进展[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 9 - 16.
- [3] 邓长平, 周立新, 李虹. 包裹式加筋土挡墙在治理高速公路边坡小塌方中的应用[J]. 岩土工程技术, 2003, (5): 302 - 304.
- [4] GB 50007—2002, 建筑地基基础设计规范[S].