

干湿交替对长江荆江段典型断面岸滩土体力学性能的影响

王 军¹, 宗全利^{2,3*}, 岳红艳¹, 刘昭希³

(1. 长江科学院河流研究所, 武汉 430010; 2. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109;
3. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000)

摘 要: 河道水位水文年内的动态变化使得河岸土体处于干湿交替的状态。为研究干湿交替对粘性岸滩土体力学性能及河岸稳定性的影响, 以长江荆江段 8 个典型崩岸断面岸滩的粘性土体为研究对象。采用历史资料分析、实地勘察取样、室内土工试验、BSTEM 模型模拟相结合的方法, 分析了上、下荆江河岸土体组成及力学特性, 并且定量研究了干湿交替条件下粘性岸滩土体力学性能的变化; 运用 BSTEM 模型对荆 61 和北门口断面在 2013 水文年内的崩岸过程进行了模拟, 并分析了干、湿条件下土体抗剪强度指标对河岸稳定性的影响。结果表明: 随着土体含水率的增加, 粘聚力先增大后减小, 而内摩擦角呈指数关系减小, 并得出含水率与粘聚力和内摩擦角的定量关系式; 2 个断面计算崩塌宽度与实际一致, 误差分别为 1.69% 和 3.74%; 干湿交替情况下安全系数值主要受土体粘聚力值的影响, 并分别得到了 2 个典型断面粘聚力和内摩擦角与安全系数的一元线性关系。这样已知河岸土体含水率时, 就可以通过关系式计算得出土体的粘聚力和内摩擦角, 从而得出安全系数, 判断河岸稳定性。

关键词: 土壤; 力学性能; 干湿交替; 粘性岸滩; BSTEM 模型; 荆江

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.019

中图分类号: TV141.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0144-09

王 军, 宗全利, 岳红艳, 刘昭希. 干湿交替对长江荆江段典型断面岸滩土体力学性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 144—152. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.019 http://www.tcsae.org

Wang Jun, Zong Quanli, Yue Hongyan, Liu Zhaoxi. Influence of dry-wet alternation condition on mechanical properties of riverbank soil for typical sections in Jingjiang Reach of Yangtze River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 144—152. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.019 http://www.tcsae.org

0 引 言

自然河流的水位总在不断变化, 导致河岸土体长期处于干湿交替的状态。干湿交替会较大程度改变粘性岸滩土体本身的力学性能, 进而影响岸滩土体抗冲性能。如河流岸坡迎水面上的土体在干湿交替作用后, 土体的一些物理化学性质发生变化, 降低了土体的稳定性, 使得水流侵蚀岸滩的程度激增, 加剧了河岸的横向拓宽, 甚至引发崩岸; 库水位周期性地涨落, 也使库岸消落带上的土体受到干湿交替作用而降低其稳定性, 加剧了蓄水消落过程中的库岸冲刷^[1-2]。

Osman 等^[3]从河床上冲刷深度与河岸侵蚀两个方面分析了粘性河岸, 他们认为造成崩岸最普遍的原因是河岸侧向侵蚀过程致使河道宽度增加和岸坡变陡, 或者是由于河床下切增加了河岸的高度; Robert 等^[4]提出了河岸泥沙的中值粒径大小和摩擦休止角是分析河岸稳定性的关键参数; Simon 等^[5-6]分析了河岸植被对河岸稳定性的影响; 此外, 美国许多经验丰富的工程师和地质学家提

出, 大多数河流中有 90% 到 99% 不等的重要岸线侵蚀发生在主汛期, 这也说明了水力因素在岸滩侵蚀以及导致崩岸过程中发挥主导作用^[7]; 饶庆元等^[8-10]从土力学角度对河岸土体力学性能进行分析; 岳红艳等^[11-15]通过试验或模拟等方法探究了河岸的崩岸机理; 杨怀仁等^[16]根据荆江河段的相关实测资料, 分析并指出了弯曲河道中凹岸的河岸崩退强度的主要影响因素, 并提出对崩岸强度起着主要作用的是汛期水流; 高志斌等^[17]分析了荆江河段的边界条件, 研究了边界条件对荆江河段河床演变的影响; 宗全利等^[18-20]分析了上荆江河段河岸土体组成为上部粘性土层比下部非粘性土层厚的二元结构, 进行了岸坡稳定性计算, 提出了上荆江二元结构河岸在不同时期(枯水期、高水期和退水期)的崩塌计算模式; 并采用 BSTEM 模型对荆 34 断面右岸崩退过程进行模拟, 提出坡脚冲刷和潜水位变化对河岸稳定性具有重要影响; 夏军强等^[21-22]分析了下荆江二元结构河岸土体特性为下部非粘性土层较上部粘性土层厚, 以及河岸稳定性安全系数 F_s 在一个水文年内呈周期性变化; 张翼等^[23]发现下荆江河岸的崩岸多发生在洪水期和退水期; 弯道二次流的影响会使河岸坡脚冲刷更为严重, 不利于凹岸的稳定性, 岸顶植被覆盖可增强粘性土体的抗剪强度, 有利于岸坡稳定; 李洁等^[24]分析提出相较于岸滩土体组成及其力学特性和滩槽高差等要素, 来水来沙条件是影响岸滩崩退过程的主要因素; 黄本胜等^[25]引入边坡稳定分析和

收稿日期: 2018-05-23 修订日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479008; 51569029); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2016018/HL)

作者简介: 王 军, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事河流动力学方面研究。Email: 9518552@qq.com

*通信作者: 宗全利, 教授, 博士, 主要从事生态水力学方面研究。

Email: quanli1871@126.com

渗流计算方法，对主要影响因素进行了敏感性分析，提出导致崩岸的主要原因有土体自身的物理性质及力学指标、水流对坡脚的冲刷以及外界因素扰动了土体；刘黎明等^[26-27]通过大量水文资料对荆江河段的河床演变和崩岸护岸进行了研究分析；韦杰等^[28-29]对不同地区土壤进行室内三轴试验，提出土壤黏聚力随着含水率的增加呈先增加后减小趋势，而内摩擦角呈非线性衰减；冉冉等^[30-31]利用 BSTEM 模型对长江河道岸坡稳定性进行了计算分析，提出水位变化对河岸稳定性有重要影响。

上述分析表明，目前对二元结构河岸崩岸机理及影响因素的研究，还未从干湿交替情况下粘性岸滩土体的力学特性变化方面来开展定量研究。本文以长江荆江河段典型二元结构河岸为研究对象，引入干湿交替条件，通过分析理论与实测资料、进行室内土工试验以及对典型断面在一个水文年内的崩岸情况进行概化模拟，定量地研究与分析干湿交替条件下荆江河段粘性岸滩土体力学特性与安全系数的变化规律。

1 长江荆江段崩岸现场调查

1.1 荆江河段概况

荆江位于长江中游，上起湖北枝城，下至湖南城陵矶，全长约 347.2 km，其径流和输沙量都主要来自宜昌以上的长江干流。河段以藕池口为界，分为上、下两段，分别名为上荆江和下荆江。上荆江河段长 171.7 km，河弯平顺且分汊明显，为典型的微弯分汊河型。其河道总体形变不大，但在微弯分汊段主流摆动频繁，局部河势不断调整^[7]。自 20 世纪 90 年代以来，上荆江河势总体上趋于稳定状态，但在沙市微弯河段和突起洲汊道附近变化较大。尤其是“九八”大水之后，河道弯段的演变更为剧烈，汊道段水沙比大幅改变，主流易汊，导致崩岸发生频繁。下荆江河段长约 175.5 km，段内总共有十几个弯段（包括石首、调关和监利等），属于典型的弯曲型河道^[7]。

1.2 近期荆江崩岸情况

上荆江河段崩岸以沙市和公安河段最为剧烈。文村夹河段于 2002 年和 2005 年均发生了宽达 300 m 以上的崩岸^[26]；1998 年 9 月—2000 年 4 月文村夹、郝穴、新厂等河段主泓线在三峡水库蓄水后向左岸发生了不同程度的逼进，最大主泓摆幅高达 1 100 m^[27]。2013—2014 年，

荆 4、荆 55、公 1 等多处断面发生了长 10 m 以上的崩岸。下荆江河段近年来崩岸情况严重，2002—2010 年河床冲刷量累计达 2.71 亿 t^[20]。2013—2014 年 jss84、荆 110、石 5 断面均发生 40 m 以上的崩岸。由此可见，下荆江崩岸情况通常比上荆江严重及下荆江河岸断面的崩宽往往大于上荆江的断面，且河道左岸崩宽多于右岸。2013—2014 年荆江典型断面崩岸情况统计见表 1。

表 1 2013—2014 年荆江段典型断面崩岸宽度统计表
Table 1 Failure width of typical sections at Jingjiang Reach from 2013 to 2014

断面 Sections	河岸 Riverbank	崩宽 Failure width/m	断面 Sections	河岸 Riverbank	崩宽 Failure width/m
荆 4	左	18.9	荆 110	左	41.0
	右	11.1	石 5	右	64.9
荆 48	左	9.6	石 9	右	72.7
荆 55	右	14.9	荆 133	左	38.1
荆 61	左	7.1	荆 149	左	18.1
公 1	左	8.5		右	21.1
	右	18.9	荆 181	左	22.7
荆 84	右	25.4		右	11.9
jss84	右	45.4	JJL179	左	8.1
石 3+3	左	16.2	JJL181	右	22.5
	左	81.3	荆 182	右	10.3
荆 95	右	25.1	荆 183+	左	26.4
荆 98	右	19.0	利 11 Li11	左	22.6

2 典型崩岸断面取样

为了分析荆江崩岸断面土体的垂向组成与力学特性，在收集崩岸断面实际形态变化、土体类型、河道水位及河床坡降等资料的基础上，于 2016 年 12 月（退水期）对选取的荆江河段 8 个典型崩岸断面进行现场勘测、取样，取样点主要布设在河岸上部粘性土层，每个断面设置 2 个取样点，上层、中层（或下层）各一个，每个取样点取 2 环刀原状土（约 4 kg），且每个断面取 2 袋上层的散土（约 10 kg）。其中上荆江 4 个典型崩岸断面，分别为荆 47（112°16′08.2″E，30°15′48.7″N）、荆 55（112°13′27.2″E，30°10′11.4″N）、荆 61（112°13′16.7″E，30°04′57.9″N）、荆 73（112°23′14.0″E，30°02′15.3″N）；下荆江 4 个典型崩岸断面，分别位于石 3（112°23′30.9″E，29°44′55.7″N）、北门口（112°26′16.6″E，29°45′35.4″N）、来家铺（112°40′18.7″E，29°45′42.8″N）和熊家州（113°04′11.0″E，29°30′06.2″N）。根据现有荆江河段示意图标注的取样点位置如图 1，取样点现场如图 2 所示^[1]。

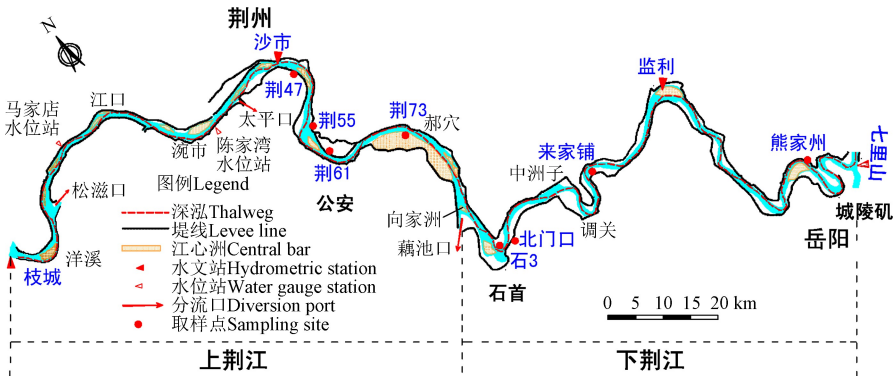


图 1 荆江河段示意图及取样点位置

Fig.1 Sketch map of Jingjiang Reach with locations of bank soil sampling sites

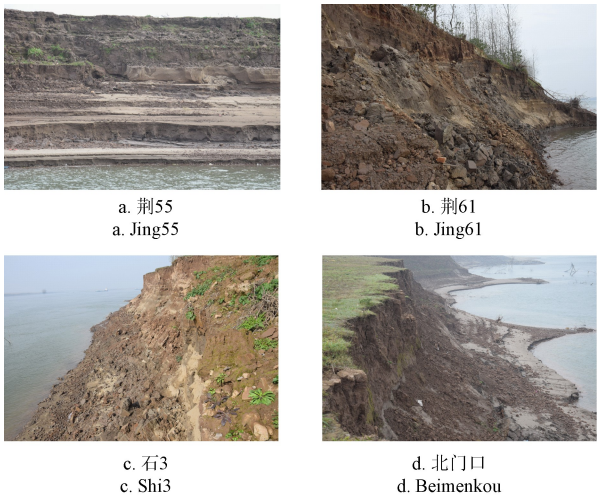


图 2 取样点现场 (2016.12.02)
Fig. 2 Sites of sampling points (2016.12.02)

依据各断面不同垂向结构及土体组成, 进行分层取样, 同时量测取样断面土体中各类土层的厚度, 并绘制出断面垂向土层分布图。

3 干湿交替对崩岸土体力学性能影响分析

3.1 室内土工试验

室内土工试验方法及土类划分标准主要依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)和《岩土工程勘察规范》GB50021-2001(2009 版)。为了研究上、下荆江河段土体组成及干湿交替情况下土体的力学特性, 试验内容主要包含了原状土体颗粒级配、密度(包括干密度和湿密度)、含水率, 以及原状土和扰动土的直剪试验等。试验结果能反应河岸土质的类别、黏粒含量、抗剪强度指标及不同含水率下土体抗剪强度指标变化等, 如表 2 所列。由于部分岸滩下部土体未揭露, 故无法给出其在天然状态下的物理指标及抗剪强度。

表 2 荆江河岸土体的物理及力学特性

Table 2 Physical and mechanical properties of riverbank soils in Jingjiang Reach

断面 Sections	取样 分层 Layer	土样 名称 Soil sample	土层厚度 Thickness/m	I_p	CC /%	天然状态下的物理指标 Physical properties under natural conditions					抗剪强度 Shear strength	
						$\rho_w/(t \cdot m^{-3})$	$\omega/\%$	$\rho_d/(t \cdot m^{-3})$	e	$S_r/\%$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
荆 47 Jing47	U	SC	2.9	12.9	19.3	2.0	24.7	1.6	0.7	96.5	9.0	6.5
	M	SC	13.6	16.4	34.6	1.9	34.5	1.4	0.9	99.6	5.0	6.0
荆 55 Jing55	U	SC	3.0	16.3	30.2	1.8	34.4	1.4	1.0	95.9	12.0	7.5
	M	SS	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	L	SC	5.1	15.7	22.7	1.9	35.7	1.4	1.0	99.7	6.5	6.0
荆 61 Jing61	U	MC	3.6	17.2	25.6	1.8	43.0	1.3	1.2	100.0	5.0	6.5
	M	SC	2.4	14.0	16.3	1.8	36.6	1.3	1.0	96.7	2.0	5.5
	L	SS	5.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
荆 73 Jing73	U	ss	1.8	7.6	15.9	1.9	35.8	1.4	1.0	99.2	2.0	7.5
	M	MSC	4.8	15.8	36.5	1.8	45.5	1.2	1.2	99.3	6.0	6.0
石 3 Shi3	U	SC	2.0	12.3	28.4	1.9	32.0	1.4	0.9	95.4	10.0	7.5
	M	MC	1.7	17.2	38.0	1.8	42.9	1.2	1.2	97.2	2.5	5.5
	L	FS	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
北门口 Beimenkou	U	ss	2.8	9.6	14.7	1.9	27.8	1.5	0.8	89.5	8.0	6.5
	M	SC	1.4	13.5	13.1	1.8	38.4	1.3	1.1	95.6	15.0	6.5
	L	FS	5.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
来家铺 Laijiapu	U	ss	2.0	6.4	13.0	1.9	35.5	1.4	1.0	99.4	20.5	6.5
	M	SC	3.8	14.0	38.2	1.9	31.8	1.4	0.9	95.4	14.0	6.4
	L	FS	7.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
熊家州 Xiongjiashou	U	MSC	5.0	16.0	21.1	1.8	42.7	1.3	1.2	98.3	10.5	6.5
	M	SC	4.7	10.3	17.6	1.9	36.5	1.4	1.0	98.6	9.0	5.5

注: U 表示上层, M 表示中层, L 表示下层, SC 为粉质粘土, SS 为粉砂, MC 为淤泥质粘土, MSC 为淤泥质粉质粘土, FS 为细砂, ss 为粉土, I_p 为塑性指数, CC 为黏粒含量, ρ_w 为湿密度, ω 为含水率, ρ_d 为干密度, e 为孔隙比, S_r 为饱和度, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角。
Notes: U=upper layer, M=middle layer, L=lower layer, SC=silty clay, SS=silty sand, MC=mucky clay, MSC=muddy silty clay, FS=fine sand, ss=silty soil, I_p =plasticity index, CC=clay content, ρ_w =wet density, ω =water content, ρ_d =dry density, e =pore ratio, S_r =saturation, c =cohesion, φ =internal friction angle.

3.2 河岸土体组成及力学特性

3.2.1 土体垂向组成及沿程变化特点

实地调查及试验结果表明, 荆江河岸土体垂向分层结构明显, 是由上部的粘性土和下部的非粘性土组成二元结构。上荆江河岸土体基本为上部的粉土和粘土等组成的粘性土体, 下部为细沙等非粘性土体组成的层状结构, 有的两粘土层中间夹一薄层沙土(荆 55 断面), 土体垂向分层结构明显。上荆江河岸土体上部的粘性土层

较厚, 下部的非粘性土层较薄。如在荆 61 断面(图 3a), 上部粘性土层厚 6 m, 下部的非粘性土层厚 5.1 m(其中已知沙土层厚 1.1 m)。下荆江段河岸上部粘性土层厚度通常在 3~6 m 之间, 相对较薄; 下部的非粘性土层较厚, 出露在水面以上的厚度都大于 5 m, 故大部分断面下部的非粘性土层厚度大于其上部的粘性土层厚度。如在北门口断面(图 3b), 河岸上部的粘性土层厚度为 4.2 m, 下部非粘性的沙土层的厚度则大于 5.2 m,

上部土层的干密度为 1.40 t/m^3 , 黏粒含量为 14.7%。部分断面上部的粘性土层之间可能会夹有一层薄薄的沙土(来家铺断面)。由于上部土层的黏粒含量明显多于

下部土层的黏粒含量, 而且沙土夹层厚度往往相对较小, 因此仍将整个河岸看作是由上部粘性土层和下部非粘性土层组成的典型二元结构。

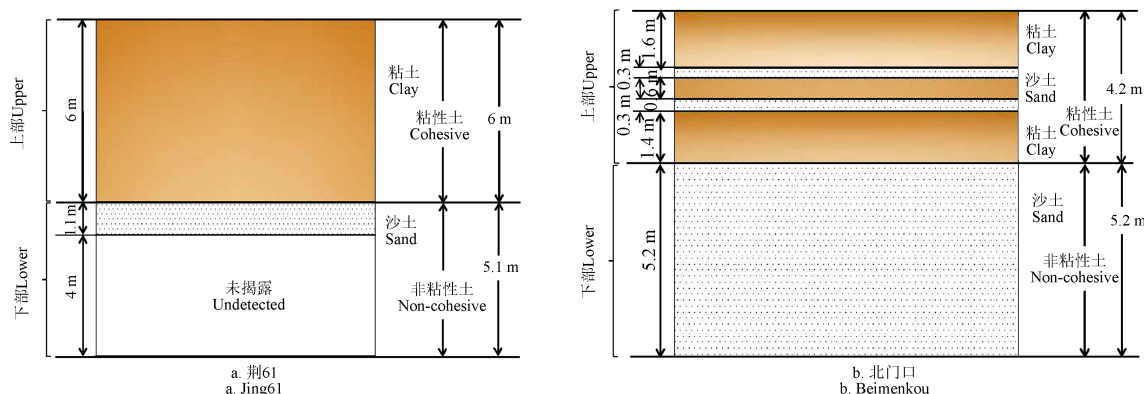


图3 典型二元结构河岸土体的垂向组成

Fig.3 Vertical stratification structures of typical riverbank soils

由表 2 可知, 上荆江二元结构河岸的上部粘性土层主要由粉质粘土、粉土或淤泥质粘土组成。土体自然状态下的含水率介于 $24.7\% \sim 45.5\%$, 干密度大小介于 $1.2 \sim 1.6 \text{ t/m}^3$, 粘聚力值介于 $2.0 \sim 12.0 \text{ kN/m}^2$, 内摩擦角介于 $5.5^\circ \sim 9.0^\circ$; 下部非粘性土主要由细沙和粉砂组成, 其抗冲性较差。对大部分河岸而言, 尽管河岸下部非粘性土层(沙土层)抗冲能力很弱, 但由于上部粘性土层厚度大于下部沙土层的厚度, 因此认为坡脚抗冲性能远远地大于沙土层本身, 利于河岸上部的稳定。

下荆江河岸上部粘性土体主要分为粉土、粉质粘土、淤泥质粘土及淤泥质粉质粘土。由于其塑性指数 I_p 介于 $10.3 \sim 17.2$, 液塑限含水率 ω_L 均较小, 因此可认为上部河岸土体为均匀的低液限粘土组成。由于原状土含水率范围为 $27.8\% \sim 42.9\%$, 干密度大约为 $1.2 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$, 说明该粘性土层含水率较高、干密度相对较小, 故土体相对较松散, 岸滩土体在近岸水流冲刷下易分解。并且下荆江河岸下部沙土层较厚, 一般一定厚度的沙土层出露在水位以上, 因此汛期近岸水流将下部沙土层掏刷后, 容易引起河岸上部粘性土层的崩塌, 不利于河岸稳定性。

整个荆江河段, 河岸上部粘性土层黏粒含量均较大, 下部沙土层黏粒含量较小; 对比上、下荆江土体组成, 可知上层粘性土均为粉质粘土和淤泥质粘土。因此, 认为荆江河岸土体组成沿程变化程度小。

3.2.2 土体的力学特性

粘性土体的力学特性一般用抗剪及抗拉强度表示。针对荆江粘性河岸, 本文主要探讨粘土的抗剪强度指标粘聚力 c 及内摩擦角 φ 。由试验结果可知, 不同断面的原状土粘聚力值为 $2.0 \sim 20.5 \text{ kPa}$ 不等, 且变化幅度较大; 内摩擦角值为 $5.5^\circ \sim 7.5^\circ$, 因此土体与其含水率关系密切。由于土体含水率与粘聚力的关系受土体黏粒含量多少的影响, 所以应基于同一断面土体分析总结含水率与抗剪强度指标的关系。对荆 61 和北门口断面上层粘土(重塑土)在不同含水率状态下的粘聚力及内摩擦角关系进行分析, 给出含水率与抗剪强度指标的关系曲线, 如图 4 所示。

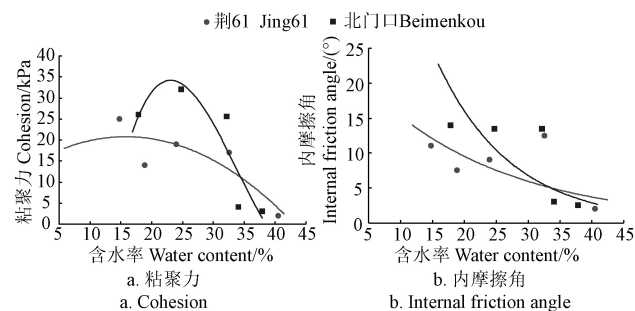


图4 典型断面土体抗剪强度与含水率关系

Fig.4 Relationships between water content and shear strength at typical sections

河岸粘性土的粘聚力值随着含水率的增大表现为先增加、后减小的趋势, 且存在某一临界含水率, 使其粘聚力达到峰值, 并且不同河岸断面土体的黏粒含量不同, 其粘聚力峰值一般也不同, 如图 4a, 荆 61 断面上层土体的黏粒含量约为 25.6%, 图中临界含水率 16% 对应的粘聚力峰值为 21 kPa ; 北门口断面上层土体的黏粒含量为 14.7%, 其临界含水率 22.8% 对应的粘聚力峰值为 34 kPa 。如图 4b, 在荆 61 断面, 当土体含水率从 11% 增加到 43% 时, 对应内摩擦角可从 14° 减小到 3° ; 在北门口断面, 当含水率从 16% 增加到 41% 时, 对应内摩擦角可从 23° 减小到 2° , 表明粘性土内摩擦角随含水率的增大呈指数关系减小。因此粘性土的含水率值能间接反映其抗剪强度的大小。

3.3 干湿交替情况下粘性岸滩土体力学特性分析

根据长江水位周期性涨落, 将一个水位周期分为枯水期(12月中旬—3月底)、涨水期(4月—5月底)、洪水期(6月—10月底)和退水期(11月—12月中旬)四大时期^[7]。据 2013 年荆江段水文数据, 荆江水位从枯水期最低 26.79 m , 经过涨水期的两次涨跌, 在洪水期达到最高水位 35.99 m , 之后水位开始下降, 在退水期经历一次涨跌之后回到较低的水位状态。对于长江荆江段粘性岸滩, 季节变换和河道内水位周期性涨落使岸滩土体含水率持续动态地变化。由此带来的干湿交替作用使岸

滩土体力学特性发生变化。

对于非饱和状态的粘性土,当含水率较低时,土颗粒间水膜很薄,此时的水膜黏结力较小,土颗粒间摩擦力较大;随着含水率的增加,土颗粒间的水膜增厚,水膜黏结力增大到一定程度开始减小(薄膜水变为自由水),因此粘聚力表现为先增大后减小,而内摩擦角受水分的润滑作用持续减小^[28-29]。夏军强等人对黄河下游段以及长江下荆江段岸滩粘性土体的野外查勘及室内试验,发现粘性土的抗剪强度也随不同含水率而变化,且也存在上述类似的变化规律^[9,21]。土的抗剪强度指标受土的结构、密度、孔隙比及含水率等因素影响,由于河道水位变化主要会引起土体含水率变化,所以此处只考虑单一因素土壤含水率对抗剪强度指标的影响。将本次数据与 2012 年试验数据进行拟合,得出长江荆江段粘性岸滩土体力学特性关系曲线(如图 5)及定量关系式

$$c = 0.0021\omega^3 - 0.2112\omega^2 + 5.7385\omega - 20.538, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.630$$

$$\varphi = 99.573e^{-0.0742\omega}, R^2 = 0.654 \quad (2)$$

式中 ω 为含水率,%; c 为粘聚力,kPa; φ 为内摩擦角,(°)。

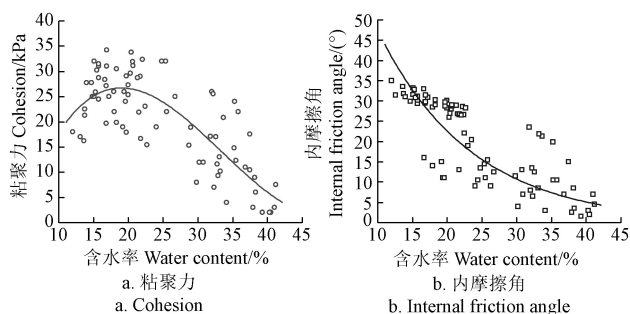


图 5 荆江粘性土抗剪强度与含水率关系

Fig.5 Relationships between shear strength and water content of cohesive soil in Jingjiang Reach

粘聚力随含水率的增大,先增大后减小。当土体含水率从 11.0% (较为干燥) 上升到 19% (非饱和状态) 时对应的粘聚力值增大 30.0%;当含水率继续增大到 42.0%

时,粘聚力值迅速减小为最大粘聚力值的 17.3%。内摩擦角则随含水率的增大而减小,最终趋于稳定。当土体含水率从 11.0% (较为干燥) 上升到 42.5% (非饱和状态) 时,其内摩擦角减小为原来的 11.4%,最后趋于稳定值 3°。

4 干湿交替对河岸稳定性的影响

BSTEM 模型是由美国国家泥沙实验室提出的模拟坡脚冲刷和河岸稳定性的模型,主要由 2 个模块组成,分别为河岸稳定性模块(BSM)和坡脚冲刷模块(TEM),该模型通过 EXCEL 宏命令运行。其中 BSM 模块主要是通过极限平衡法计算得到边坡最小安全系数 F_s (factor of safety),从而分析河岸稳定性;TEM 模块是用来计算坡脚横向冲刷速率和冲刷量(包括河岸、坡脚、河床及总冲刷量),并探究坡脚冲刷可能对河岸稳定性造成的影响。宗全利等^[19]利用 BSTEM 模型对上荆江河段荆 34 断面右岸进行了模拟,根据 2009 水文年内河岸崩塌参数的率定结果对 2010 水文年的河岸崩塌过程进行模拟,并用 2010 年实测河岸边坡形态对模拟结果进行验证,模拟结果与实测岸坡符合较好,说明 BSTEM 模型适用于荆江河段的模拟。所以,本文采用 BSTEM 模型对干、湿情况下河岸崩塌过程进行概化模拟和计算四大不同水位时期的河岸稳定性。

4.1 干、湿情况下坡脚冲刷及河岸稳定性计算

分别对上荆江河段的荆 61 断面和下荆江河段的北门口断面在 2013 水文年的枯水期、涨水期、洪水期和退水期四大时期的坡脚冲刷及稳定性进行计算,计算结果如表 3。冲刷计算中,河岸土体临界切应力取值分别为粘性土 $\tau_c=0.5 \text{ N/m}^2$,非粘性土 $\tau_c=0.06 \text{ N/m}^2$ 。冲刷系数根据 BSTEM 中的公式 $k_d=2 \times 10^{-7} \tau_c^{-0.5}$ 进行估算,分别得到粘性土 $k_d=0.1 \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$,非粘性土 $k_d=0.4 \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$;计算坡脚冲刷时,考虑施加在土体上的有效应力,计算中取曼宁糙率系数为 0.02~0.03^[1]。若 $F_s < 1.0$,说明河岸不稳定,容易发生崩塌;若 $1.0 \leq F_s \leq 1.3$,说明河岸为条件稳定(conditionally stable),此时河岸仍可能发生崩塌;若 $F_s > 1.3$,说明河岸稳定,一般不会发生崩塌^[30-31]。

表 3 2013 年荆 61 (左岸) 断面和北门口 (右岸) 断面坡脚冲刷及河岸稳定性计算结果

Table 3 Results of toe erosion and bank stability for both left bank at Jing61 section and right bank at Beimenkou section in 2013

断面 Sections	时段 Period	时间 Duration/h	河道坡度 Reach slope/ (m·m ⁻¹)	河道 水位 Elevation/m	坡脚冲刷 Toe erosion		河岸稳定性 Bank stability			
					水流切应力 Shear stress/ (N·m ⁻²)	冲刷量 Eroded quantity/ (m ³ ·m ⁻¹)	安全系数 Factor of safety F_s	是否 崩塌 Failure or not	崩塌宽度 Failure width/m	崩塌量 Failure volume/ (m ³ ·m ⁻¹)
荆 61 Jing61	枯水期	2544	0.000 03	30.13	1.38	129.41	9.82	否	-	-
	涨水期	1464	0.000 04	32.29	1.59	124.10	2.06	否	-	-
	洪水期	3672	0.000 04	35.41	2.31	154.50	0.13	是	5.75	127.60
	退水期	1104	0.000 04	30.28	1.76	65.23	0.14	是	1.47	26.40
	合计					473.24			7.22	154.00
北门口 Beimenkou	枯水期	2544	0.000 03	27.32	1.08	125.80	2.35	否	-	-
	涨水期	1464	0.000 04	30.41	1.23	109.30	2.21	否	-	-
	洪水期	3672	0.000 04	34.07	2.51	114.02	0.43	是	4.09	60.90
	退水期	1104	0.000 04	29.45	1.76	59.50	0.86	是	15.62	113.20
	合计					408.62			19.71	174.10

将 BSTEM 模型模拟计算的结果与实测资料相对比, 荆 61 断面左岸模拟崩岸宽度 (7.22 m) 与实际崩退宽度 (7.10 m) 相差 0.12 m, 相对误差为 1.69%; 北门口断面模拟计算的崩退值为 19.71 m, 实际崩退宽度为 19.0 m, 相对误差为 3.74%。说明河岸崩塌宽度的概化模拟计算结果与实测结果符合较好。

4.2 干、湿情况下安全系数 F_s 的变化情况

4.2.1 含水率与 F_s 的关系

安全系数的大小受河岸断面形态、河道水位和来水来沙条件以及土体物理力学特性等因素影响, 为了研究干、湿情况下安全系数 F_s 的变化情况, 及含水率对河岸安全系数 F_s 值的影响。分别将荆 61、北门口断面上层粘性土体 (重塑状态) 在 5 个不同含水率情况下对应的粘聚力值和内摩擦角值代入 BSTEM 模型进行计算, 得出各自的安全系数 F_s 值。

由于图 6 中含水率数值均为实测值, 故每个取样断面位置测量了 5 组试验, 所以图 6 中只有 5 个实测的含水率数据。虽然样本数量偏少, 但从图 6 可以看出: 随着含水率的增大, 安全系数 F_s 值总体呈先增大后减小的趋势。当含水率最大时, 安全系数值最小, 如在北门口断面, 当含水率达到最大值 37.9% 时, 安全系数 F_s 为最小值 0.44; 当含水率为最小值时, 安全系数并不是最小值, 如当北门口断面土体含水率为最小值 17.9% 时, 安全系数值为 1.53, 介于 F_s 最大、最小值之间, 这与图 5a 中粘聚力随含水率变化趋势一致。说明岸滩土体含水率会对土体的抗剪强度指标 (粘聚力和内摩擦角) 产生重要影响, 且两者存在一定的数量关系 (如图 5 及式 (1) 和 (2)); 同时, 河岸稳定性又受到抗剪强度指标的影响 (粘聚力对河岸稳定性起主要作用, 如式 (3) 和 (5)), 进而也会受到含水率影响, 理论上这三者之间是有一定数量关系的。

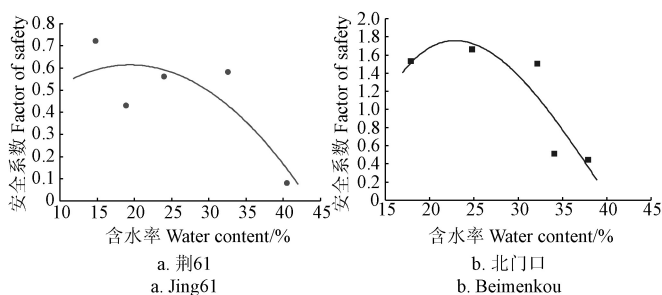


图 6 粘性土含水率与安全系数的关系

Fig.6 Relationships between water content and safety factor of cohesive soil

当含水率达到临界值时, 随着含水率的增大, 安全系数值急剧减小。在荆 61 断面, 此时期为退水期, 河岸稳定性较差, 安全系数 F_s 一直小于临界值 1.3。当含水率达到 20% 后, 随着继续增大到 40%, 安全系数 F_s 值从 0.6 减小到 0.15, 即安全系数降低了 75%。在北门口断面, 当含水率大于临界值 23% 之后, 随着含水率继续增大至 38%, 安全系数值由 1.7 (河岸稳定) 骤降至 0.3 (不稳定), 减少了 82.4%, 河岸由稳定迅速变为不稳定, 极易发生崩

岸。故当河岸土体处于干、湿交替情况下时, 安全系数值变化幅度大, 通常不利于河岸稳定。

4.2.2 抗剪强度指标与 F_s 的关系

由于含水率间接影响安全系数大小, 为了更清楚分析抗剪强度对安全系数的影响程度, 通过拟合实测数据 (如图 7、图 8 中的实测数据), 可知安全系数 F_s 与粘聚力 c 和内摩擦角 φ 的关系均成一元线性关系:

荆 61:

$$F_s = 0.0283c + 0.0383, R^2 = 0.980 \quad (3)$$

$$F_s = 0.0561\varphi + 0.0026, R^2 = 0.876 \quad (4)$$

北门口:

$$F_s = 0.044c + 0.3319, R^2 = 0.992 \quad (5)$$

$$F_s = 0.0995\varphi + 0.2027, R^2 = 0.986 \quad (6)$$

当粘聚力达到最大值时的临界含水率对应的河岸安全系数值也为峰值。如北门口断面, 当含水率为临界值 24.8% 时, 对应粘聚力最大值 32kPa 及安全系数最大值 1.66。

为了验证粘聚力和内摩擦角与安全系数的关系, 在土体实际含水率范围内, 给定不同的含水率值, 并以公式 (1) 和 (2) 计算出土体的抗剪强度指标后, 通过 BSTEM 模型计算出典型断面的安全系数值, 如图 7 和 8 中计算数据。从图中可以看出, 计算值基本与拟合曲线一致, 图 7 相对误差分别为 7.3% 和 3.1%, 图 8 相对误差分别为 17.9% 和 2.9%, 进一步说明了建立关系式的可靠性。

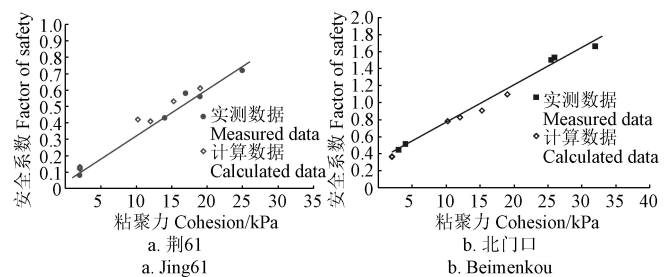


图 7 河岸上层粘性土粘聚力与安全系数关系

Fig.7 Relationships between cohesion and safety factor of upper cohesive soil

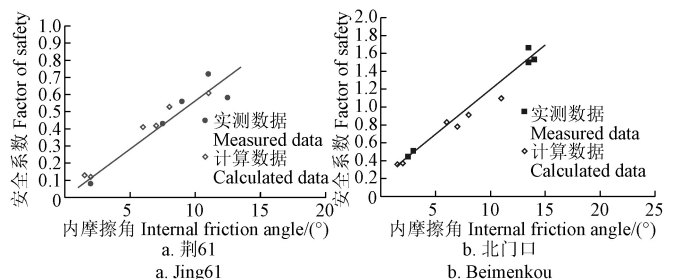


图 8 河岸上层粘性土内摩擦角与安全系数关系

Fig.8 Relationship between internal friction angle and safety factor of upper cohesive soil

上述分析表明, 由于粘聚力随含水率的增大, 先增大、后减小, 与安全系数随含水率变化关系相契合, 并且安全系数值与粘聚力成正相关, 可以认为安全系数值的大小主要受土体粘聚力值的影响。因此, 当已知河岸

土体含水率值时, 可以通过定量关系式计算出该土体的粘聚力和内摩擦角, 进而计算出安全系数值, 从而可以判断河岸稳定性。

5 结 论

本文首先分析了荆江近期的崩岸情况, 然后对上、下荆江共 8 个典型断面土体进行了现场取样与土工试验, 分析了上、下荆江岸滩土体组成及力学特性, 定量地分析了干湿交替对粘性土体力学特性及河岸稳定性的影响。主要结论如下:

1) 上、下荆江河段均属于典型二元结构, 上部为粘性土, 下部为非粘性土。上荆江河段上部粘性土层厚度通常大于下部非粘性土层厚度, 下荆江河段则相反。

2) 在干湿交替情况下, 粘性岸滩土体的粘聚力随含水率增大, 先增大到临界值后开始减小并逐渐趋于稳定; 内摩擦角随含水率的增大而减小, 最后趋于稳定。

3) 结合试验结果和历年数据, 得出了粘聚力与土体含水率的三阶多项式以及内摩擦角与含水率的指数函数关系式。

4) 定量分析了荆 61 断面和北门口断面在一个水文年内的河岸稳定性。并对 2013 年的河岸崩塌过程进行了模拟, 得到荆 61 左岸年内总崩退 7.22 m 与实际崩宽 7.1 m 符合较好 (相对误差 1.69%); 北门口崩退计算值为 19.71 m 与实际崩宽 19 m 也基本一致 (相对误差 3.74%)。

5) 干湿交替情况下, 安全系数值大小主要受土体粘聚力值的影响。提出荆 61 和北门口断面的粘聚力和内摩擦角与安全系数的定量关系式。因此, 当已知河岸土体含水率时, 可以计算出该土体的粘聚力和内摩擦角, 进而计算出安全系数值, 从而可以判断河岸稳定性。

[参 考 文 献]

- [1] 夏军强, 宗全利. 长江荆江段崩岸机理及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 584.
- [3] Osman A M, Thorne C R. Riverbank stability analysis I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2): 134—150.
- [4] Robert G M, Michael C Q. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(12): 1343—1363.
- [5] Simon A, Curini A, Darby S E, et al. Bank and near-bank processes in an incised channel[J]. Geomorphology, 2000, 35: 193—217.
- [6] Simon A, Collison A J C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on stream-bank stability[J]. Earth Surface Processes and Land Forms, 2002, 27(5): 527—546.
- [7] 余文畴, 卢金友. 长江河道崩岸与护岸[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 260.
- [8] 饶庆元. 粘性土抗冲特性研究[J]. 长江科学院院报, 1987(4): 73—84.
Rao Qingyuan. A study on the characteristics of clay[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1987(4): 73—84. (in Chinese with English abstract)
- [9] 夏军强, 吴保生, 王艳平, 等. 黄河下游游荡段滩岸土体组成及力学特性分析[J]. 科学通报, 2007(23): 2806—2812.
- [10] 杨进良. 土力学 (第 4 版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [11] 岳红艳, 姚仕明, 朱勇辉, 等. 二元结构河岸崩塌机理试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(4): 26—30.
Yue Hongyan, Yao Shiming, Zhu Yonghui, et al. Experimental research on the mechanism of binary riverbank collapse[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(4): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [12] 唐金武, 邓金运, 由星莹, 等. 长江中下游河道崩岸预测方法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(1): 75—81.
Tang Jinwu, Deng Jinyun, You Xingying, et al. Forecast method for bank collapse in middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(1): 75—81. (in Chinese with English abstract)
- [13] 假冬冬, 张兴农, 应强, 等. 流滑型崩岸河岸侧蚀模式初探[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 813—817.
Jia Dongdong, Zhang Xingnong, Ying Qiang, et al. Preliminary study on the analytical model for slide collapse of riverbanks[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 813—817. (in Chinese with English abstract)
- [14] 假冬冬, 邵学军, 张幸农, 等. 水沙调节后荆江典型河道横向调整过程的响应: I: 二、三维耦合模型的建立[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 82—87.
Jia Dongdong, Shao Xuejun, Zhang Xingnong, et al. Responses of channel migration to changes of flow and sediment regime in Jingjiang segment of the middle Yangtze River: I: 2-D and 3-D coupled model[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 82—87. (in Chinese with English abstract)
- [15] 夏军强, 邓珊珊, 周美蓉. 荆江河段崩岸机理及多尺度模拟方法[J]. 人民长江, 2017, 48(19): 1—11.
Xia Junqiang, Deng Shanshan, Zhou Meirong. Bank collapse mechanism of Jingjiang River reach and multi-scale simulation[J]. Yangtze River, 2017, 48(19): 1—11. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨怀仁, 唐日长. 长江中游荆江变迁研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 245.
- [17] 高志斌, 段光磊. 边界条件对三峡坝下游河床演变影响[J].

- 人民长江, 2006, 37(12): 92—94.
- [18] 宗全利, 夏军强, 许全喜, 等. 上荆江河段河岸土体组成分析及岸坡稳定性计算[J]. 水力发电学报, 2014(2): 168—178.
- Zong Quanli, Xia Junqiang, Xu Quanxi, et al. Soil composition analysis and slope stability calculation of riverbanks in the Upper Jingjiang Reach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(2): 168—178. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 with English abstract)
- [20] 宗全利, 夏军强, 张翼, 等. 荆江段河岸粘性土体抗冲特性试验[J]. 水科学进展, 2014(4): 567—574.
- Zong Quanli, Xia Junqiang, Zhang Yi, et al. Experimental study on scouring characteristics of cohesive bank soil in the Jingjiang reach[J]. Advances in Water Science, 2014(4): 567—574. (in Chinese with English abstract)
- [21] 夏军强, 宗全利, 许全喜, 等. 下荆江二元结构河岸土体特性及崩岸机理[J]. 水科学进展, 2013(6): 810—820.
- Xia Junqiang, Zong Quanli, Xu Quanxi, et al. Soil properties and erosion mechanisms of composite riverbanks in Lower Jingjiang Reach[J]. Advances in Water Science, 2013(6): 810—820. (in Chinese with English abstract)
- [22] 夏军强, 宗全利, 邓珊珊, 等. 三峡工程运用后荆江河段平滩河槽形态调整特点[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015(2): 238—245.
- Xia Junqiang, Zong Quanli, Deng Shanshan, et al. Adjustments in reach-scale bankfull channel geometry of Jingjiang reach after operation of Three Gorges Project[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015(2): 238—245. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张翼, 夏军强, 宗全利, 等. 下荆江二元结构河岸崩退过程模拟及影响因素分析[J]. 泥沙研究, 2015(3): 27—34.
- Zhang Yi, Xia Junqiang, Zong Quanli, et al. Modeling of the failure process of a composite riverbank and influencing factors analysis in the Lower Jingjiang Reach[J]. Journal of Sediment Research, 2015(3): 27—34. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李洁, 夏军强, 邓珊珊, 等. 近期黄河下游游荡段滩岸崩退过程及特点[J]. 水科学进展, 2015(4): 517—525.
- Li Jie, Xia Junqiang, Deng Shanshan, et al. Recent bank retreat processes and characteristics in the braided reach of the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2015(4): 517—525. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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.
- Huang Bensheng, Bai Yuchuan, Wan Yanchun. Model for dilapidation mechanism of riverbank[J]. Journal of Chinese Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 49—54. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘黎明, 段光磊. 荆江文村夹堤岸近岸河床演变分析[J]. 水利水电快报, 2003, 24(22): 21—24.
- Liu Liming, Duan Guanglei. Analysis on near bank riverbed evolution of Jingjiang Wencunjia[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 2003, 24(22): 21—24. (in Chinese with English abstract)
- [27] 姚仕明, 岳红艳, 何广水, 等. 长江中游河道崩岸机理与综合治理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [28] 韦杰, 史炳林, 李进林. 紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 153—160.
- Wei Jie, Shi Binglin, Li Jinlin. Response of soil shear strength to soil water content in purple soil slope cropland bunds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(20): 153—160. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 21—25.
- Chen Hongxing, Li Fahu, Hao Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [30] 冉冉, 刘艳峰. 利用 BSTEM 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 the impact of reservoir bank geometry on the stability via BSTEM model[J]. Ground water, 2011, 33(2): 162—165. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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 with English abstract)

Influence of dry-wet alternation condition on mechanical properties of riverbank soil for typical sections in Jingjiang Reach of Yangtze River

Wang Jun¹, Zong Quanli^{2,3*}, Yue Hongyan¹, Liu Zhaoxi³

(1. River Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. School of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

3. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: The dynamic change of water level in a hydrological year can keep riverbank soil in the state of alternating dry and wet. The variety of water content of riverbank soil can change the mechanical properties of soil to a certain extent, which can affect riverbank stability. In order to investigate quantitatively the influence of dry-wet alternation condition on mechanical properties of riverbank clay soil, a field observation and sampling were first conducted at eight typical riverbanks in upper and lower Jingjiang Reach, which the clay soil of the typical riverbanks in Jingjiang Reach of the Yangtze River was taken as the study area. Through a comprehensive analysis of measured data, indoor soil tests and BSTEM simulation, the composition and mechanical properties of these samples were obtained, which indicated that the vertical soil composition of riverbank was characterized by a typical composite structure of non-cohesive lower bank and cohesive upper bank. The indoor soil test results revealed the quantitative change of soil mechanics with dry-wet alternation condition, and a close relationship between water content and shear strength indicators was obtained. With an increase of water content, the cohesion first increased and then decreased, with the peak values of 21 kPa and 34 kPa for the critical water content of 16.0% and 22.8% at Jing 61 and Beimenkou sections, and eventually reached a constant, while internal friction angel decreased significantly. Considering the dry-wet alternation condition of riverbank soil and the change of river water level in a hydrological year, the degrees of riverbank stability at Jing 61 and Beimenkou sections were analyzed during four different water level periods using BSTEM, and the process of bank failure of two sections were simulated in 2013. The results indicated that: the model-predicted results of the total bank retreat width were in close agreement with the measured data with the relative errors 1.69% and 3.74%, respectively. At the same time, the safety factors under different dry and wet conditions were calculated based on the BSTEM simulated results of two typical sections. The relationship between safety factor and water content was obtained, which indicated the safety factor first increased and then decreased with an increase of water content. It was consistent with the relationship between soil cohesive and water content which proved that the soil cohesive has an important influence on the stability of river bank. Quantitative relationships between safety factors and cohesive and internal friction angle of two typical sections were identified, respectively, and the correlation coefficients were 0.980 and 0.876 for Jing 61 section, and 0.992 and 0.986 for Beimenkou section, respectively. The relationships between them were linear function from which the safety factors increased with the increase of the cohesive and internal friction angle, respectively. Thus, a conclusion can be drawn that the safety factor was mainly affected by soil cohesive under different dry and wet conditions. For actual project, when water content of the riverbank soil was obtained, the cohesive and internal friction angle of soil can be calculated by proposed formulas, thereby the safety factor of riverbank can be calculated and the stability of river bank can be identified.

Keywords: soils; mechanical properties; dry-wet alternation; cohesive riverbank; BSTEM model; Jingjiang