

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022321

姚仕明,黎礼刚,岳红艳,等.长江中下游崩岸机理与护岸工程技术回顾与展望[J].中国防汛抗旱,2022,32(9):7-15.YAO Shiming, LI Ligang, YUE Hongyan, et al. Review and prospect of bank collapse mechanism and bank protection engineering technology in the Middle and Lower Yangtze River[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(9): 7-15. (in Chinese)

长江中下游崩岸机理与护岸工程技术回顾与展望

姚仕明 黎礼刚 岳红艳 渠 庚

(1.长江水利委员会长江科学院,武汉430010;2.水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室,武汉430010)

摘 要:崩岸是长江中下游河道平面变形的主要形式之一,会对防洪安全、航道畅通、涉水工程安全运行及河势稳定等产生影响。护岸工程是长江中下游防洪体系、河势控制和河道整治工程的重要组成部分,在防洪保安、稳定河势与改善通航条件等方面发挥了重要作用。新的水沙情势下长江经济带高质量发展的战略格局、长江大保护和以人为本的生态绿色发展理念对长江中下游河势稳定和护岸工程技术提出了更高的要求。在系统总结长江中下游河道河床演变特性和趋势、崩岸机理及监测预警、护岸工程技术成果的基础上,对长江中下游崩岸机理与护岸工程技术进行了回顾与展望。该工作对于贯彻落实长江经济带建设的国家战略、提高长江流域防灾减灾应急预警能力和保障中下游沿江地区乃至全流域经济社会的高质量发展具有重要意义。

关键词:长江中下游;崩岸;监测预警;护岸工程;生态护岸

中图法分类号:TV882.2;TV853

文献标识码:A

文章编号:1673-9264(2022)09-07-09

0 引 言

长江中下游干流河道上起宜昌,下迄长江河口原50号灯标,全长1 893 km(图1),是推动长江经济带发展的核心和战略腹地。目前长江中下游沿江两岸实施了大量的护岸工程,据不完全统计^[1],1998年前累计完成抛石量6 687万m³,沉排410万m²,累计完成护岸长度1 189 km;1999—2003年,水利部长江水利委员会(以下简称长江委)组织实施了长江重要堤防隐蔽工程,对湖北、湖南、安徽、江西4省辖区内的长江干堤及汉江遥堤、赣江赣抚大堤等超过2 000 km堤防累计实施了护岸,总长436 km,完成抛石方2 215万m³,混凝土铰链沉排100万m²;三峡水库蓄水后的2003—2010年,又实施了部分河段河势控制应急工程,总长约200 km;2011年后,对宜昌至城陵矶河段的重点崩岸段以及目前受其影响逐渐显现的城陵矶至湖口河段部分重点岸段进行守护,在172项重大水利工程中对湖口

以下重点河段河道崩岸进行治理,目前已完成和正在实施的护岸工程长度超过300 km。此外,自20世纪90年代以来,交通运输部持续开展了长江中下游“黄金水道”航道整治工作,在已竣工的153处航道整治工程中,护岸工程有16处^[2]。目前长江中下游河道整治已取得了显著成效,河势向稳定方向发展,对沿江地区经济社会发展发挥了重要作用。

2018年4月,习近平总书记考察长江,强调治理水患要有战略举措。目前治江事业发展中防洪减灾能力仍存短板,防洪减灾体系仍然存在诸多薄弱环节。长江中下游护岸工程是防洪体系、河势控制和河道整治工程的重要组成部分,护岸工程建设中仍存在诸多亟待解决的问题。近年来,受全球气候变化,海平面上升,长江干支流梯级水库建设,水土保持,南水北调工程以及松滋口—芦家河浅滩和洞庭湖口、三峡蓄水后鄱阳湖口、长江口及太湖入江口等侵蚀基准面对长江中下游干流河势控制作用增强^[3],局部

收稿日期:2022-08-03

第一作者信息:姚仕明,男,正高级工程师,E-mail:yzshymq@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U2240224)。

洲滩与岸线开发利用率高及江砂过度开采等诸多因素综合影响,长江中下游干流河床“沿程冲刷”和“溯源冲刷”导致了河道的长期冲刷与河势调整,崩岸和已有护岸工程崩塌风险明显增大,不利于防洪安全、河势稳定、航道安全、岸线利用和水沙资源综合利用等。因此,新形势下长江中下游护岸工程仍将面临长江防洪安全问题的严峻挑战。据不完全统计,三峡工程蓄水运用后的2003—2020年,长江中下游干流河道共发生崩岸1 010处,累计总崩岸长度约729.5 km;已建护岸工程仍存在治理目标较单一、标准偏低、守护范围有限、重要控制节点守护效果不佳、后续保护和管理不到位以及对崩岸复杂机理认识不够而理论指导护岸设计不足等方面的问题;同时存在生态环保新技术研发不够和运用进展较为缓慢,与新形势要求不相适应等问题。由于崩岸的发生具有隐蔽性和突发性,其监测预警技术一直是研究瓶颈,目前崩岸风险评估与预警技术

还不够成熟,长路段河道崩岸监测与信息化综合管理系统平台研发相对较少;已有护岸工程技术针对某一局部河段或某一类护岸结构形式开展的单项深入研究较多,系统性、有效性与多目标研究仍显不足。因此,对长江中下游崩岸机理和护岸工程技术进行总结回顾和对未来研究方向进行展望,对于贯彻落实长江经济带建设的国家战略、提高长江流域防灾减灾应急预警能力和保障中下游沿江地区乃至全流域经济社会的高质量发展具有重要意义。

新的水沙情势下长江经济带高质量发展的战略格局、长江大保护和以人为本的生态绿色发展理念对长江中下游河势稳定和护岸工程技术提出了更高的要求,本文在系统总结长江中下游河道河床演变特性和趋势、崩岸机理及监测预警、护岸工程技术成果的基础上,对长江中下游崩岸机理与护岸工程技术进行了回顾与展望,成果可为崩岸机理、监测预警及护岸工程新技术研究提供参考。

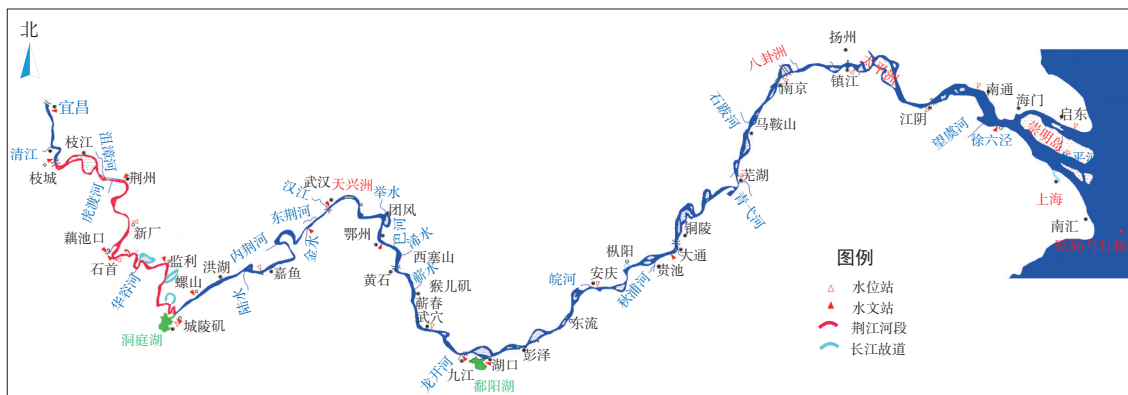


图1 长江中下游干流河道河势图

1 新形势下长江中下游干流河道演变特性

1.1 上游来沙量锐减

20世纪80年代以前,长江中下游干流宜昌站年均来沙量接近5亿t^[4];20世纪90年代以来,受上游水利工程拦沙、降雨时空分布变化、水土保持等因素的综合影响,长江干流输沙量逐渐减少,三峡水库蓄水运用前长江中下游干流主要控制站宜昌、螺山、汉口、大通多年输沙量分别为4.92亿t、4.09亿t、3.98亿t、4.27亿t;2003年三峡水库蓄水运用后,长江上游入库的大部分来沙被拦截在三峡水库内,长江中下游输沙量大幅减小。2003—2020年中下游干流主要控制站宜昌、螺山、汉口、大通年平均输沙量分别为

0.349亿t、0.844亿t、0.967亿t、1.340亿t,减小幅度分别为93%、79%、76%、69%。随着长江上游干支流上更多水库陆续建成运用,预计长江河道来沙量在较长时期仍将维持较低水平。

1.2 河道冲淤变化特点和演变趋势

三峡水库蓄水导致水沙过程变异,长江中下游干流河段河床出现沿时沿程的复杂调整过程。其中宜昌至湖口河段沿程冲刷且“滩槽均冲”,冲刷则主要集中在枯水河槽^[5]。2002年10月至2013年10月宜昌至湖口河段平滩河槽累计冲刷量11.71亿m³,年均冲刷泥沙约0.97亿m³,且91%的河床冲刷集中在枯水河槽;从沿程分布来看,宜昌至城陵矶河段河床冲刷较为剧烈,冲刷量为8.41亿m³,占总冲刷

量的72%；城陵矶至武汉、武汉至湖口河段冲刷量分别为1.00亿 m^3 、2.30亿 m^3 ，分别占总冲刷量9%、19%。金沙江下游溪洛渡、向家坝水电站建成蓄水后，三峡入库、出库泥沙进一步减少，坝下游河床冲刷强度明显增大。2013年10月至2019年10月，宜昌至湖口河段平滩河槽累计冲刷量13.88亿 m^3 ，年均冲刷泥沙约2.31亿 m^3 ，枯水河槽冲刷量12.66亿 m^3 ，占比与2002—2013年相比变化不大；从沿程分布来看，宜昌至城陵矶、城陵矶至武汉、武汉至湖口河段冲刷量分别为5.17亿 m^3 、4.67亿 m^3 、4.04亿 m^3 ，分别占总冲刷量的37%、34%、29%，城陵矶至武汉、武汉至湖口河段冲刷量占比明显增大，冲刷有下移趋势。

湖口至河口段河道总体以冲刷为主^[5]。2001年10月至2011年10月，湖口至江阴河段枯水河槽、平滩河槽冲刷量分别为4.93亿 m^3 、6.88亿 m^3 ，72%的河床冲刷集中在枯水河槽；2011年10月至2019年10月，湖口至江阴河段平滩河槽冲刷量6.71亿 m^3 ，其中，枯水河槽冲刷量6.70亿 m^3 ，占比进一步增大，达99%以上，而枯水河槽以上仅冲刷泥沙0.01亿 m^3 。

三峡水库运用以来，长江中下游河道冲淤由总体基本平衡转为总体冲刷。主要表现为近坝宜昌至枝城段的砂卵石河床冲刷粗化速度快且渐趋相对平衡；荆江弯道段凸岸边滩普遍遭受冲刷，有的弯道段出现切滩撇弯；分汊河道中短汊冲刷发展相对占优等演变特点。

数学模型计算结果表明，上游水库联合运用40年，长江干流宜昌至大通河段悬移质累计总冲刷量为38.35亿 m^3 ，其中宜昌至城陵矶河段冲刷量为20.41亿 m^3 ，城陵矶至大通段为17.94亿 m^3 。由于宜昌至大通段跨越不同地貌单元，河床组成各异，各分河段在水库联合运用后出现不同程度的冲淤变化。根据数学模型计算和实体模型试验成果，水库联合运用后长江中下游仍将发生长期长距离的冲刷。上游水库联合运用10年后，荆江河段总体河势与近期基本一致，随工程运行年限的延长，河床沿程呈逐步整体冲刷下切的趋势，深槽有所冲刷拓宽，河势调整主要表现为过渡段主流平面摆动较大，局部段江心洲滩及汊道段变化较为剧烈，弯道顶冲点有所调整，部分弯道撇弯切滩现象有所放缓。上游水库联合运用40年后，城陵矶至武汉河段，单一段将继续保持相对稳定状态，分汊段主流随着来水来沙条件的变化而左右摆动，深槽上提下移，洲滩分割合并，滩

槽冲淤交替；武汉至湖口河段，团风段为多汊河道，洲滩冲淤变化较大，如不加以控制，右汊有可能进一步发展，龙坪河段江心洲左汊继续衰退，九江河段人民洲左汊也处于缓慢淤积趋势；湖口以下河段冲刷历时更长，近期河势不会发生重大调整，多分汊型河段受上游河势及来水来沙变化影响，将继续呈主流易于摆动、滩槽移动频繁、主支汊周期性易位等演变特点的可能性仍存在。

2 崩岸机理与监测预警技术研究回顾

2.1 崩岸机理与监测预警技术研究进展

2.1.1 崩岸机理研究进展

河道崩岸的影响因素可分为自然因素和人为因素，绝大多数崩岸发生与河道自然因素影响直接相关，如水流动力条件、河道水位变化、渗流、河岸形态及河岸土体组成等，同时人为荷载、河道采砂等人为因素也会对河岸稳定性产生重要影响。一直以来，国内外学者关于崩岸机理研究方面做了大量的探索^[6-29]，采用理论或资料分析、数值计算或模型试验研究手段开展了诸多工作，其中资料定性或定量分析工作多于试验研究工作。以往经验性的定性分析多是基于河流动力学的观点，如纵向水流、弯道环流、回流淘刷作用等，并认为近岸水流冲刷作用是造成崩岸的主要原因^[11]；从野外大量实测数据分析可知，崩岸多发生于水流顶冲河段，水流冲刷河岸导致岸坡变陡，特别是坡脚被淘刷，上层岸坡因失去支撑极易失稳并引发崩岸^[8,12-15]；姚仕明等^[8]通过收集长江中下游崩岸段资料对崩岸影响因素的权重进行排序，其中排在首位的是纵向水流冲刷，并明确在治理长江中下游崩岸的过程中，主要任务是预防由纵向水流冲刷和河湾曲率较大所引起的崩岸；Osman等^[16]假设河岸发生平面滑动，并将河岸横向展宽、临界坡度、临界剪切力以及河床冲刷等因素考虑进来，建立了黏性土河岸稳定计算模型；Darby等^[17]在Osman等模型基础上考虑了静水压力和孔隙水压力的影响，建立了新的河岸稳定性模型。当前也有很多研究者运用BSTEM模型对堤岸的稳定性进行了分析^[18-21]，如王军等^[21]借助BSTEM模型分别对荆61和北门口断面在2013年一个水文年周期的坡脚冲刷和河岸稳定性进行计算，计算结果与实测资料相吻合，该模型可以考虑在多种影响因素作用下计算河岸坡脚的冲刷量和河岸的稳定系数，但分析计算是建立在有详细野外观

测资料条件下进行的,实测资料越丰富计算结果越符合实际情况。岳红艳等^[22-23]最先采用不同粒径的新型复合塑料沙模拟了天然二元结构河岸开展河道崩岸试验研究,并结合原型观测数据,初步探讨了“口袋型”崩窝形成后崩窝区内水流结构特性和土体崩塌特点;段国胜等^[24]采用黄河黏性原型沙,通过概化水槽试验,模拟了不同岸坡条件下河岸崩塌破坏过程和崩塌体泥沙输移转化过程,并计算了不同岸坡条件下崩塌量、崩塌体起动力和淤积量;通过对崩岸的多因素分析发现,有些崩岸并非发生在冲刷严重的洪水期,而是发生在退水期。如Abam^[25]研究发现西非尼日尔河上1988年某一河段河岸崩塌次数随河道内水位上升而减少,当河道水位急剧下降时崩塌次数反而增多;张幸农等^[26]在研究崩岸类型及特征时曾指出条崩及窝崩多发生于汛后枯水期;马崇武^[27]将河岸看作均质土体,在采用多个假定的基础上,建立了河道内水位变化引起河岸内地下水位变化的数学模型,然后采用数值模拟方法,研究了河道内水位变化跟河岸边坡稳定性的关系;陶桂兰等^[28]通过岸坡稳定性分析得出在河道岸坡水位涨落阶段,崩岸现象的发生不仅与水流的冲刷作用密切相关,还受河道水位涨落变化的影响;岳红艳等^[29]模拟了天然河道一个水文年周期内不同涨落水过程对不同坡比二元结构河岸稳定性的影响,针对同一时间段内汛末缓降落水期和陡降落水期过程,分析了近岸河床冲淤变化规律和河岸崩塌形态特点,同时揭示了近岸垂线流速对崩岸的影响。

2.1.2 崩岸监测预警技术研究现状

目前治江事业发展中防洪减灾能力仍存短板,防洪减灾体系仍然存在诸多薄弱环节。崩岸是重要的致灾因素。开展崩岸监测预警技术研究有利于补齐崩岸防治工程措施的短板,并强化崩岸风险管理,可达到降低崩岸灾害风险和减少灾害损失的目的,同时促进长江生态保护与经济发展协同并进,还可为维持长江中下游河道河势稳定、防洪安全、岸线与洲滩开发利用和航运发展等提供技术保障。

崩岸监测技术主要根据崩岸主控因子的变化特点以及水动力、河道边界等变化条件下监测指标的敏感性,针对不同河段、不同类型、不同风险等级的崩岸,分别提出河道崩岸的监测内容、测次安排、监测指标和监测技术。

20世纪70年代以来,人们对崩岸预测方法进行了大

量研究^[30-48]。研究方法主要包括传统的经验方法、极值假说方法、水动力学—土力学方法和人工智能方法如神经网络以及模糊综合评价法等。关于崩岸预测问题,目前许多研究者分别采用临界崩塌高度^[37]、崩塌临界坡度^[38]、黏土层与砂土层崩塌临界厚度比(二元结构河岸)^[39]、临界起动流速公式^[40]、安全系数等临界指标预测崩岸的发生。对于自然河岸及已护岸线的崩塌过程,采用安全系数作为岸坡崩塌的临界指标具有一定合理性,也易于操作。由于崩岸问题的复杂性,这些临界指标在预测实际崩岸现象时都有一定的局限性。加之,三峡水库蓄水运用后新泥沙条件下,长江中下游冲刷幅度明显不同于蓄水前天然情况,已有的崩岸临界指标能否继续适用尚需进一步复核研究。这也进一步增加了长江中下游崩岸预警预测的难度。

关于崩岸预警问题,得到治河科研工作者或管理部门的日益重视。2006年以来,长江委长江科学院与荆州市长江勘察设计院共同完成了多项荆江河道演变监测及分析项目,对荆江河势每年针对新的水下地形图开展了监测分析,对荆江河段近期演变和监测岸段近岸河床的冲淤变化进行了分析研究,并对监测岸段的岸坡稳定性进行了分类评估^[41]。可以较全面完整地反映了荆江河道监测岸段岸坡稳定性状况,并对其进行风险预警。从2007年传统的典型断面比较法、冲刷坑面积法、最深点分析法,发展到2008年提出的监测导线分析方法;2009年和2010年在监测导线分析方法的基础上,结合传统分析方法,综合影响岸坡稳定各因素之间关系,整理了“岸坡稳定性综合评估体系”;2013年引入包络线,完善了基于近岸地形监测成果资料的数据处理方法;2014年引入相关的时程变化图,以便于发现监测岸段地形变化趋势和简便后续分析工作。

2011年以来,安徽省长江河道管理部门采用河道演变分析、近岸断面套绘、岸坡稳定计算等方法^[42],在崩岸预警预测方面进行了有益的尝试。以崩岸发生的可能性、崩岸造成的危害程度为尺度,将预警级别划分为三级。并根据崩岸造成的危害程度,发布长江崩岸预警,取得了较好的社会效益。

近年来,长江委水文局根据重点险工、崩岸段地形(断面)监测资料,以及汛前崩岸巡查资料,并结合沿江各省(直辖市)的崩岸险情与反馈意见,已开展了多期长江中下

游及汉江下游干流河道崩岸分析预警工作。主要采用河道演变分析、近岸断面套绘、岸坡稳定计算等方法,结合已护岸工程、岸坡抗冲能力等情况,预测崩岸可能发生的地点、时间、类型及规模等,通过长江委防御局将预警简报发布给长江中下游沿江各省(直辖市)^[43]。

水利部2006年就已提出了加强水利科技创新、坚持以水利信息化促进水利现代化的要求,在此基础上,国内各级水利主管单位陆续开展了数字流域、智慧水务等建设和研发,并基于水雨情监测、地形监测等信息,集成或开发了大量的河道管理信息系统、防洪决策信息系统等,如“水利一张图”主要包括国家基础地理数据、水利基础空间数据、水利业务专题数据和水利遥感数据等,但未涉及崩岸监测预警相关内容。

2017年12月,长江委发文要求沿江各省(直辖市)开展长江河道崩岸预警工作。2018年,长江委防汛抗旱总指挥部办公室发布两期长江中下游及汉江兴隆以下河道崩岸预警简报,湖北省防办要求各地结合实际做好崩岸监测预警相关工作。湖北省水利厅决定在荆江寻找试点开展崩岸预警工作。2019—2021年,受湖北省水利厅委托,长江科学院开展了湖北省长江河道崩岸监测预警研究(第一期)工作,初步提出了湖北省长江河道崩岸预警方法,构建了崩岸信息化综合管理系统,并对荆江河段进行了初步预警^[44]。

2.2 崩岸机理与监测预警技术主要成果和认识

2.2.1 崩岸机理主要成果与认识

通过多年来对长江中下游崩岸及防治相关项目的研究,获得主要成果和认识如下:

(1)长江中下游崩岸是在重力与水流切应力双重作用下发生的。影响河道崩岸的内因有河床与河岸组成及力学特性,河弯曲率与断面形态等;外因有来水来沙条件与水流动力条件,降雨、地下水及植被,突出水工建筑物、附加荷载及近岸采砂等人类活动。来水来沙条件与水流动力条件、近岸采砂及突出水工建筑物主要通过改变河弯曲率与断面形态,植被、降雨、地下水及水位变化主要通过改变侧向压力与渗透压力及土体力学性质,岸滩附加荷载主要通过增加坡面重力,由此引起坡面土体受力状态发生变化,当出现下滑力大于抗滑(剪)力时就会引起河岸失稳。治理崩岸的过程中,主要任务是预防由纵向水流冲刷和河湾曲

率较大所引起的崩岸,自然条件下突发崩岸概率大于突出水工建筑物、岸滩附加荷载、近岸采砂等人类活动因素引起的崩岸。

(2)在冲积平原河道自然演变过程中,崩岸是河道平面变形的具体表现形式。不同的河型其崩岸的规律与河型的演变过程息息相关。崩岸频率和规模大小直接受崩岸段深泓线贴岸程度、近岸流速和含沙量大小的影响。

(3)长江中下游河道的河岸组成基本上为二元结构。上层黏性土层在崩岸过程中一般不是直接受水流冲刷变形,而是由于下层河床相中的细沙受冲刷后,岸坡变陡失去稳定而滑入水中。崩塌土体在滑动中形成剪切面,使黏性土层往往分裂成大小不等的块体,与滑动体的其他部分一起滑至崩窝的坡脚处。就不同崩岸形式而言,窝崩大多出现在水流动力作用较强的岸段,岸坡上层一般具有一定厚度的黏性土层,在较长岸线近岸遭受冲刷的情况下,沿岸会出现一个个连续的崩窝,岸线在平面上呈锯齿形。条崩多发生在河岸上层黏性土层较薄或土质较松散的岸段,尤其是淤积年限不长的江心洲滩与高边滩;崩塌前,近岸滩面一般产生与岸线大致平行的裂缝,当下部沙性土体受冲刷、上部黏性土体失去支撑时,在重力作用下在较长岸段几乎同时等厚发生坍塌。洗崩主要是因长期受水面风浪或船行浪使上层河岸受到冲蚀,河岸多以碎块的形式崩塌,沿岸岸坡呈小台阶状。

(4)水位变化对河岸稳定性有重要影响,高、低水位岸坡稳定性与河岸组成密切相关,涨退水速率对不同岸坡组成的安全系数影响不一样,涨水有利于黏性土层较薄河岸的稳定,退水反之;坡面实施护岸工程与植被覆盖会增加岸坡的稳定性。

(5)在一个水文年周期内落水期水位不同降落速率对崩岸具有重要影响,在落水期历时相同的情况下,水位陡降落水期崩塌情况与水位缓降落水期相比,河岸崩塌频率和规模明显要大;不同河岸坡比在相同的水位涨落变化条件下,近岸河床冲淤变化规律大致相同,崩塌强度在一个水文年周期内随流量变化而变化,即枯水期崩岸最弱,涨水期较弱,洪水期最强,水位陡降时次强,水位缓降时较水位陡降时强度明显偏弱;其次崩岸集中发生在凹岸弯顶及下游顶冲河段,可见近岸水流冲刷作用对崩岸起主导作用,近岸垂线流速越大,崩塌程度和规模越大。

2.2.2 典型河道(荆江)崩岸监测预警主要成果和认识

经过分析总结荆江崩岸监测预警工作,获得主要成果和认识如下:

(1)近十几年来,针对荆江重点险工段开展了一系列护岸观测与巡查,可为水利主管部门及时准确地发送荆江堤防现势资料,为崩岸整治提供了基础信息。但监测手段和内容还不够全面,观测方案需结合变形监测设备高新技术进一步细化。

(2)荆江河道崩岸以窝崩为主,且主要发生在汛前涨水期和汛后退水期;下荆江河段崩岸发生强度大于上荆江河段,荆江左岸崩岸多于右岸;局部河势调整、近岸河床冲刷下切导致崩岸时有发生,但重点险工段基本稳定,崩岸段大多集中在未护段,已护段也时有损毁;下荆江部分弯曲半径较小的急弯段出现“凸冲凹淤”现象,导致崩岸时有发生。

(3)建立了基于多因素影响下的崩岸风险评估方法,评估了自2007年以来冲刷最为剧烈的荆江监测岸段的崩岸风险等级,准确预测了荆江典型监测岸段崩岸风险等级变化。其中从2019年分析评估成果的统计数据来看:在湖北荆州市辖江段的61.60 km(不含荆南三口)监测岸线中,蓝色岸段总长34.55 km、橙色岸段长18.73 km、红色预警岸段总长8.32 km,分别占监测岸线总长的56.0%、30.5%、13.5%。

(4)初步构建了崩岸信息化综合管理系统,收集了河道基础地理数据、水文数据、河道崩岸护岸相关信息等,集成了涵括崩岸巡查数据管理系统、河势和近岸河床冲淤变化信息系统、崩岸预警系统等,能够实现崩岸巡查相关数据的综合与高效管理、崩岸风险评估及预警等功能。该成果下一步还需不断总结和完善,待条件成熟后进一步推广运用。

3 护岸工程技术研究回顾

3.1 护岸工程技术研究进展

70多年来在解决治河实践中不断更新的工程问题和需求中,长江中下游护岸工程技术研究在河道观测、分析研究、科学试验、规划设计、工程技术、河道和施工管理等方面积累了较丰富的经验,并取得了一些技术性突破^[6]。在工程型式上,由传统的守点工程(包括矾头、丁坝)改进为平顺型护岸。在护岸材料上,由20世纪50—80年代起采用抛石、沉柴排、柴枕、混凝土铰链排、塑护软体排、枕和模袋

混凝土等材料,到20世纪90年代末先后采用了系接压载软体排、四面六边透水框架、混凝土异形块和钢丝石笼护岸,再到2015年先后开始使用宽缝加筋生态混凝土护坡技术和网模卵石排护脚工程技术等新技术。同时,自20世纪50—60年代,首次开展了护岸块石移动规律的水槽试验,对荆江大堤护岸工程形式及加固进行了研究;60—70年代,进一步对平顺护岸的块石移动规律开展室内水槽实验,取得的研究成果已应用于护岸工程设计及工程实践;70—80年代,为了总结实践经验,对长江中下游护岸工程效果、险情、结构设计指标进行了广泛而深入的调查研究,在室内弯道水槽中开展了对丁坝、矾头和平顺护岸3种形式护岸效果对比试验和不同护岸形式的水流和冲刷试验,提出了平顺、矾头和丁坝等护岸形式的适用条件,并对软体排和塑料土枕、铰链混凝土排、小颗粒块石等新材料、新技术进行试验研究;80年代初,就抛石工程初步制定了护岸规划、设计和施工等有关规定,对荆江大堤护岸进行了现场探测,取得了水下块石分布资料;80年代中期至90年代初,对柴排破坏过程和护岸持久性进行了试验研究,此外还开展了塑料编织布护岸工程现场试验。

21世纪初,在长江重要堤防隐蔽工程及河势控制应急工程建设中,选择局部岸段开展了新材料、新技术护岸试验研究,如石首北门口沉放钢丝网石笼,岳阳、九江河段局部实施了四面六边透水框架促淤工程,铜陵河段试验段采用固化沙、预制混凝土植生块、串联式混凝土预制块、工字形混凝土预制块等结构型式护坡,护脚选取压布抛石、模袋砂、改进型混凝土铰链排、模袋混凝土等;2002年和2010年,长江科学院在对崩岸机理充分研究基础上,不断升级优化模型试验的动岸与复杂防护体的模拟技术,分别对不均匀块石守护、小颗粒块石守护、混凝土铰链排、模袋混凝土、土工织物砂枕袋、四面六边透水体、网模卵石排、钢筋混凝土网架促淤沉箱等多种平顺护岸工程新材料的破坏机理、适用条件、守护效果和施工方法等进行了系统研究,取得了新的研究成果和进展;2002年以来研发了多种生态型护岸工程新技术和新型生态护岸材料。依据护岸植被在长江中下游不同生态分区的适应性研究成果,基于护岸工程结构安全、生态修复、科技环保、资源节约等多因素需求,研发了新型生态护岸(人工卵石及钢丝网石垫护

岸)、宽缝加筋生态混凝土、分格现浇网筋生态混凝土等水上护坡工程新技术以及网模卵石排、网筋人工石群等水下护岸工程技术,相关技术准则或方法直接应用于三峡后续长江中下游崩岸重点治理工程、荆江河段和“645”航道整治工程等长江中下游河道治理及航道建设与管理。

3.2 护岸工程技术主要成果和认识

经过分析总结多年来护岸工程研究及工程实践^[1,30],获得主要成果和认识如下:

(1)护岸工程布置应以《长江流域综合规划》和《长江中下游干流河道治理规划》中的防洪规划、河势控制规划为依据,正确处理好上下游、左右岸的关系,首先考虑抑制河势恶化和保护堤防工程安全,先重点后一般,远近结合,分期实施。

(2)长江中下游河道不同河型呈现出不同的演变规律,相应控制河势的护岸措施也有所不同。其中顺直型河道主要通过工程措施控制适宜河宽与滩槽格局,达到稳定或调整河势的目的;蜿蜒型河道要通过治导线的布置及工程措施控制适宜河宽、河长及弯曲半径,并控制河长与弯曲半径的比值在合理范围内;分汊型河道要通过治导线的布置及节点、江心洲与岸线控制等工程措施控制适宜河宽、河长、弦长及弯曲半径,使其朝有利河势方向发展。

(3)需要针对不同河型和崩岸发展趋势,选择有针对性的护岸型式,提高治理的时效性。

(4)护岸工程的平面布局及型式(包括治导线、防护范围和实施时机)、工程设计(包括防护标准和护岸材料)等对控制河道的平面变形、稳定江心洲汊道分流,从而达到稳定河势的目的起着至关重要的作用。护岸工程设计工作中应参考规范性文件《长江中下游护岸工程技术要求(试行)》和《长江中下游平顺护岸工程设计技术要求(试行)》。护坡材料需综合考虑岸坡土体结构、水流顶冲、风浪、破坏变形、环境生态要求等适当选择。水下护脚工程结构根据崩岸强度、河势现状及发展趋势、近岸地形、各种材料结构的适应范围及环保等因素综合确定。在固脚工程设计中,防冲石和上下游裹头必不可少,抛护方量及宽度尽可能富裕,以适应河床冲刷调整,保证工程效果。

(5)随着经济发展和社会进步,集防洪效应、生态效应、景观效应于一体的新型护岸工程研究是现代河流治理的发展趋势。为减小对生态环境的不利影响,护岸工程实

施中还应尽量采取一些生态护岸措施(如水上适当采用生态护岸,水下采用有利于生物栖息的多孔隙透结构等),同时在护岸工程布置和工期安排上尽量考虑生态的需求(如尽量避开生态核心区和鱼类产卵期等)。

4 展 望

(1)新形势下长江中下游护岸工程实施目标更加多元化,崩岸治理难度也将加大,因此今后有必要在系统总结长江中下游河道河床演变特性和趋势、崩岸机理、护岸工程及崩岸监测与预警现有技术成果的基础上,采取多学科、多专业和多种技术手段,对长江中下游崩岸监测预警和护岸工程现有技术进行再认识,不断改进和推广运用,同时在兼顾防洪和通航安全、生态保护及景观效应等多目标基础上,构建长江中下游多目标护岸工程技术科学理论体系。

(2)继续加强河道观测的基础上,借助先进的信息化技术、室内和现场试验研究以及数值模拟技术,结合河流动力学、水文学、地质地貌学、土力学等专业知识,将现有护岸工程技术研究工作推向深入,为未来指导长江中下游河道护岸实践提供有效技术支撑。

(3)护岸工程设计前应首先充分掌握守护河段崩岸特点和已有护岸现状,必要时对于重要的参数可结合一系列比选试验研究来最终确定。

(4)未来长江中下游护岸工程实践中,需正确处理好岸线资源科学利用和有效保护的关系,并兼顾河流生态发展。

(5)由于现有护岸工程相关技术规范不能完全满足新形势对护岸工程提出的需求,特别是针对不同生态型护岸工程的设计、施工或维护及岸线保护方面的要求,目前尚缺乏有关技术规范,今后需制定或修订相关技术标准,以满足护岸工程实践和长江岸线保护的需要。

参考文献

- [1] 长江水利委员会. 长江中下游护岸工程65年[J]. 水利水电快报, 2017, 38(11):1-5.
- [2] 后爱兵,高雪娟. 长江中下游河段护岸工程保护工作现状及对策探讨[J]. 中国水运·航道科技, 2020(1):28-31.
- [3] 董耀华,李凌云,王维国,等. 2021年长江荆江河道再查勘与治理新

- 认识[J].长江技术经济,2021(4):5-10.
- [4] 岳红艳,金中武,郭超,等.湖北省河道砂石资源供需困局初探[J].人民长江,2022,53(4):20-25.
- [5] 水利部长江水利委员会.长江中下游干流河道采砂管理规划(2021-2025年)[R].2021.
- [6] 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.
- [7] 卢金友,朱勇辉,岳红艳,等.长江中下游崩岸治理与河道整治技术[J].水利水电快报,2017,38(11):6-14.
- [8] 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.
- [9] 岳红艳,余文畴.长江河道崩岸机理[J].人民长江,2002,33(8):20-22.
- [10] 夏军强,邓珊珊.冲积河流崩岸机理、数值模拟及预警技术研究进展[J].长江科学院院报,2021,38(11):1-10.
- [11] Thorne C R. Processes and mechanisms of river bank erosion[M]//Hey R D, Bathurst J C, Thorne C R, et al. Gravel Bed Rivers: Fluvial Processes, Engineering, and Management. New York: Wiley, 1982: 227-259.
- [12] 张幸农,蒋传丰,应强,等.江河崩岸问题研究综述[J].水利水电科技进展,2008(3):80-83,94.
- [13] 吴玉华,苏爱军,崔政权,等.江西省彭泽县马湖堤崩岸原因分析[J].人民长江,1997(4):29-32.
- [14] 金腊华,王南海,傅琼华.长江马湖堤崩岸形态及影响因素的初步分析[J].泥沙研究,1998(2):69-73.
- [15] 岳红艳,余文畴.层次分析法在崩岸影响研究中的应用[C]//长江重要堤防隐蔽工程建设管理局,长江科学院.长江护岸及堤防防渗工程论文选集.北京:中国水利水电出版社,2003:63-68.
- [16] Osman A M, Thorne C R. Riverbank stability analysis I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2): 134-150.
- [17] Darby S E, Thorne C R. Simulation of near bank aggradation and degradation for width adjustment models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(4): 382-385.
- [18] 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.
- [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.
- [20] Kate Klavon, Garey Fox, Lucie Guertault, et al. Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(1): 191-213.
- [21] 王军,宗全利,岳红艳,等.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.
- [22] 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.
- [23] 岳红艳,姚仕明,朱勇辉,等.“口袋型”崩窝区水流特性与土体崩塌特点研究[J].台湾水利,2015,63(4):57-65.
- [24] 段国胜,舒安平,陈浩,等.粘性河岸塌岸泥沙输移过程实验研究[C]//第十届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集,2017:69-74.
- [25] Abam T K S. Factors affecting distribution of instability of river banks in the Niger delta[J]. Engineering Geology, 1993, 35(1-2): 123-133.
- [26] 张幸农,蒋传丰,陈长英,等.江河崩岸的类型与特征[J].水利水电科技进展,2008(5):66-70.
- [27] 马崇武,刘忠玉,苗天德,等.江河水位升降对堤岸边坡稳定性的影响[J].兰州大学学报,2000(3):56-60.
- [28] 陶桂兰,谭彬政,束梁.基于坡面冲刷的荆江典型岸坡稳定性分析[J].长江科学院院报,2017,34(8):30-35.
- [29] 岳红艳,吕庆标,朱勇辉,等.河道岸坡水位涨落变化对崩岸影响试验研究[J].人民长江,2021,52(S2):15-20.
- [30] 姚仕明,岳红艳.长江中下游生态护岸工程发展趋势浅析[J].中国水利,2012,696(6):18-21.
- [31] 张幸农,应强,陈长英.长江中下游崩岸险情类型及预测预防[J].水利学报,2007(增刊):246-250.
- [32] ASCE Task Committee on Hydraulic, Bank Mechanics, Modeling Of Riverbank Width Adjustment, River width adjustment II: modeling [J]. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(9): 903-918.
- [33] ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, Modeling of Riverbank Width Adjustment, River width adjustment I: Processes and Mechanisms II: Modeling [J]. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(9): 881-917.
- [34] 夏军强.河岸冲刷机理研究及数值模拟[D].北京:清华大学水利水电工程系,2002.
- [35] 许全喜,谈广鸣,张小峰.长江河道崩岸预测模型的研究与应用[J].武汉大学学报(工学版),2004,37(6):9-12,21.

- [36]宗全利,夏军强,邓春艳,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,2014,33(2):168-178.
- [37]王延贵.冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析及试验研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2003.
- [38]李义天,邓金运.长江中下游河道崩岸机理及防治研究[R].武汉大学,2010.
- [39]Torrey V H, Dunbar J B, Peterson R W. Progressive Failure in Sand Deposits of the Mississippi River, Field investigations, laboratory studies and analysis of the hypothesized failure mechanism[R]. USA: Department of the ARMY Waterway Experiment Station, Corps of Engineers, 1988.
- [40]冷魁.长江下游淤崩形成条件及防护措施初步研究[J].水科学进展, 1993, 4(4): 281-287.
- [41]汪记锋,刘国亮,张艳.湖北荆江河道演变监测及分析项目综述[J].水利水电快报, 2018, 39(7): 24-28.
- [42]湖北省水利厅.赴安徽省考察调研长江崩岸预警的报告[R].2017.
- [43]长江水利委员会水文局.长江中下游及汉江下游干流河道崩岸预警简报, 2019年第1期(总第5期)[R].2019.
- [44]长江水利委员会长江科学院.湖北省长江河道崩岸监测预警研究(第1期)[R].2022.
- [45]彭良泉.长江中下游崩岸预测方法研究[J].水利水电快报, 2022, 43(2): 1-8.
- [46]陈飞,杨维明.荆江河段崩岸预测[J].中国防汛抗旱, 2014, 24(6): 29-32.
- [47]周建红.荆江河道险工段崩岸监测技术与预警方法探讨[J].水利水电快报, 2017, 38(12): 12-16.
- [48]徐芳,陈占涛,岳红艳.崩岸灾害模拟与预测初探[J].中国港湾建设, 2005(3): 13-15, 26.

Review and prospect of bank collapse mechanism and bank protection engineering technology in the Middle and Lower Yangtze River

YAO Shiming, LI Ligang, YUE Hongyan, QU Geng

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010; 2. Key Laboratory of River and Lake Regulation and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010)

Abstract: Bank collapse plays a key roles in the channel deformation in the Middle and Lower Yangtze River (MYR and LYR), which could cause serious problems to the flood management, navigation safety, safe operation of the riparian hydraulic works and could affect the stability of river regime. As an important part of the flood control system, bank protection engineering on preventing the flood disasters, stabilizing the river regime and improving the navigation conditions. However, the high-quality development of the Yangtze River Economic Belt (YEB), the grand protection of the Yangtze River, the vision of people-oriented ecological green development have put forward higher requirements on the bank protection engineering in the MYR and LYR. The current research results are systematically reviewed the achieved progresses in channel bed evolution characteristics and trends, mechanisms, monitoring and early-warning of bank collapse, and bank protection technology in the MYR and LYR. The future prospect on the bank collapse mechanisms and bank protection technology were also conducted. This research is of great significance for implementing the national strategy of the development of the YEB, improving the capabilities of disaster prevention and relief, emergency response and early-warning in Yangtze River basin, and ensuring the high-quality development of economy and society in the MYR and LYR and even the whole basin.

Keywords: Middle and Lower Yangtze River; bank collapse; monitoring and early-warning; bank protection; ecological revetment

责任编辑 马 啸