

长江江苏河段嘶马弯道崩岸与护岸研究

魏延文 李百连

(南京水利科学研究院 江苏 南京 210029)

摘要 在总结前人研究的基础上,对长江江苏河段嘶马弯道来水来沙、河床边界组成、弯道横向环流情况下的水沙运动和河床演变进行分析,探讨了嘶马弯道崩岸坍江的原因、特点和工程防护措施。对弯道的稳定性运用钱宁公式进行了计算分析研究,结合嘶马河段护岸工程实践,对丁坝、沉排、平顺抛石等护岸形式进行总结比较,探求最佳护岸类型,进一步对长江扬中河段特别是嘶马弯道作出系统的整治规划。

关键词 长江 嘶马弯道 崩岸与护岸 研究

中图分类号:U61

文献标识码:A

文章编号:1000-198X(2002)01-0093-05

1 嘶马河段的河床形态和水沙运动浅析

嘶马弯道位于长江下游、扬中河段的上游,上游承接镇扬河段的谏壁—大港弯道,下游与泰兴水道相连接,是典型的弯曲分汊型陡弯河道,在长江中下游颇为有名。弯道的曲率半径为 2.9 km 左右。弯道进口受五峰山节点的控制和马鞍矶到五峰山长 4 km 多导流岸壁的影响,动能高度集中,挑流后直冲长江北岸。从三江营附近向下,主流线全部贴向北岸,直至泰兴境内的高港方转折向南。整个嘶马弯道自三江营至扬湾全长约 14 km,其江面由宽转窄。按照长江科学院罗海超的弯道河相关系式,主流弯曲半径 $R = 0.0588 Q_0^{0.51}$,式中 Q_0 为多年平均流量,理想的曲率半径应在 11.15 km,故弯道约束了水流,水流又顶冲凹岸,现在的弯道顶冲段在西一号丁坝与东二号丁坝一线。

嘶马河段内还存在着长 4500 m、最大宽度 1050 m、面积约 3.1 km² 的落成洲,把长江分成左右两汊。左汊为主汊,江面宽窄不一,杜家圩处最窄仅 1.4 km 宽,向下游逐渐扩展,河段平均宽约 2070 m。据 1984 年 5 月测图,凹岸深槽的最深点为 -52.7 m(黄海标高,下同),在东一号丁坝前。次年 5 月测图,深潭被分成两个,一个在西—东一号坝前,另一个在东二号坝下,最深点达 $\nabla -54.7$ m。地质钻探资料表明,嘶马段江岸 $\nabla -50 \sim \nabla -55$ m 以上除表层有部分壤土外,其余大多皆为粉土、粉沙和极细沙,颗粒粒径在 0.05 ~ 0.005 mm 的占 55% ~ 69%,0.1 ~ 0.05 mm 的占 12% ~ 25%,大于 0.1 mm 或小于 0.005 mm 的占 10% ~ 15%,天然空隙率为 0.88 ~ 1.03,内摩擦角 16° ~ 18°,这种土体渗透作用强、易崩解,抗冲力很差,只有 -15 m 以下有层不厚的礁板沙,抗冲性较强^①。

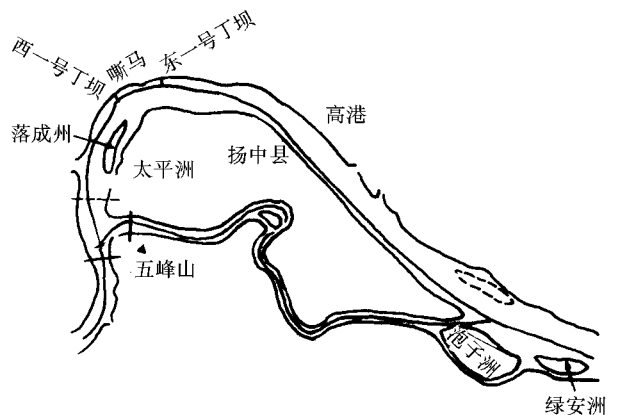


图 1 长江嘶马弯道河势变化示意图

Fig.1 Sketch of evolution of the Sima bend

据现有资料分析,嘶马弯道形成至今有 190 年的历史,在弯道的水流动力条件下,同时受淮水下泄和潮

收稿日期 2000-12-15

基金项目 江苏省自然科学基金资助项目(BK97184)

作者简介 魏延文(1949—),男,江苏宝应人,工程师,主要从事航道整治研究。

①长江九江至河口段河床边界条件与崩岸的关系,中国科学院地理研究所《长江下游护岸工程经验选编》长江流域规划办公室。

汐的影响,弯道不断发育,沿着“凹岸越凹,凸岸越凸,曲率半径日益缩小”的方向演变,其曲率半径仅为3~4 km. 100 多年江岸已崩退 1.5 km 左右,最大崩塌达到 2.2 km.

关于弯道水流运动与底沙运动的关系,曾庆华^①进行了长期的研究,其研究成果如图 2 所示.同时国内外许多学者的研究还表明,在天然的河弯情况下,底沙运动轨迹存在着分歧,当离开凹岸的泥沙在尚未到达对岸之前,就已出弯段,带过过渡段,在受下一个弯道相反方向环流的影响下,才能在下一个弯道的凸岸沉积下来.只是在河弯的曲率半径很小而且弯角较大的陡弯情况,横向环流强,底部的旋度大,一部分离开凹岸上段的泥沙才能推移到对面的凸岸沉积下来.

对于河弯中的悬沙运动,张洪武等^②做了细致的研究.悬移质运动与螺旋流的关系也是非常密切的.螺旋流将表层含沙较少而粒径较细的水体带到凹岸,并折向河底攫取泥沙,而后再将这些含沙较多而粒径较粗的水体带向凸岸边滩,形成横向输沙不平衡(见图 3).横向输沙的不平衡,将使含沙较多的水体和较粗的泥沙集中靠近凸岸,含沙量沿水深分布更不均匀,而凹岸附近含沙较少且泥沙较细,含沙量分布较为均匀.河弯中垂线上不同深度的悬沙,因各点旋度的不同而取不同的运动轨迹,呈现上层转向凹岸、底层转向凸岸的特有图形.从平面上看为扇形展开,展开的范围一方面取决于螺旋的旋度,另一方面它又预示着悬沙淤积的部位是不同的,达到凸岸的上下前后都有差异,且能看出粒度上的分选现象.然而应该引起特别注意的是,在天然河弯情况下,泥沙输移多见于同岸转移.在螺旋流的作用下,凹岸冲刷下来的底沙总是转移到凸岸,由此形成床面上的横向底坡,且又转而影响泥沙的运移.

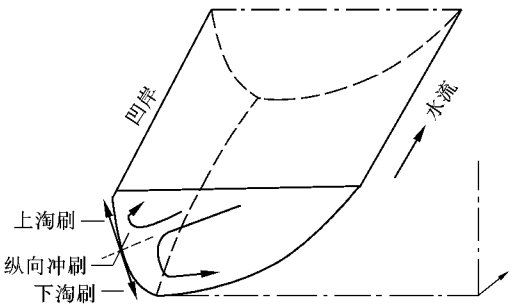


图 3 凹岸冲刷机理示意图

Fig.3 Sketch of scouring mechanism at concave bank

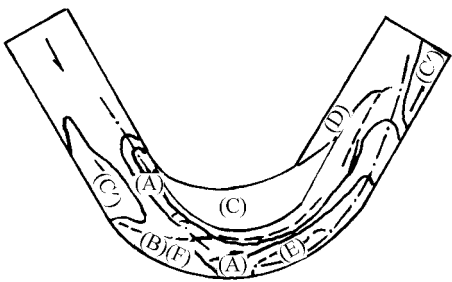
如图 2 所示,在弯道进口段,水流向凸岸方向转移,但因有底沙补给,凸岸不会造成很大的冲刷坑.当进入弯道后,在环流的作用下,泥沙向凸岸部分(C)区集中,这里水面纵比降小、流速低,形成底沙的大量淤积,其形式呈镰刀状,镰刀形边滩的下游内侧存在一个底沙不进入的(D)区.(C')区是凸岸沙嘴的边缘,这里大部分泥沙是过境的,但也有淤积,当凸岸边滩形成后,来自上游的泥沙就沿着这一边缘运动.边滩不断发展,水流动力轴线就不断地外延,水流动力轴线逼近凹岸,在顶弯以下形成最大的冲刷区.弯道出口以下的水面纵比降很大,相应的流速仍然较大,但因有来自上游凹岸冲刷下来的泥沙及来自(C')区过境泥沙的补给,这里将会出现淤积.上述水流动力轴线亦名为主流线.诚然知道了纵向流速分布后,自然能够了解水流动力轴线的变化特征.即主流一般在弯道进口段甚至弯道上游的过渡段靠近凸岸,进入弯道后,主流则逐渐向凹岸过渡到顶弯以下靠近凹岸,自此以下相当长的距离内,仍靠向凹岸.主流最初逼近凹岸的部分亦即“顶冲点”,该位置对河岸崩坍和护岸以及工程设计十分重要.主流线尚随流量而变化,因水量大小影响惯性的大小,进而引起主流线曲率半径的大小有所变动,即大水时“居中”,小水时“傍岸”.并且与此相应,水流对凹岸的顶冲点也随之变为大水“下挫”,小水“上提”的状况.

对于稳定河弯,其平面形态特征与河流尺度的关系一般为:

$$\gamma = (3 - 5)w \quad L_m = (12 - 14)w$$

式中: r ——曲率半径, L_m ——河弯跨距, w ——直段河宽.

另一些水利界的研究者建立的河弯平面特征与流量的关系式^①,如钱宁给出:



(A)冲刷区 (D)底沙不进入区
(B)底沙运动 (E)最大冲刷区
(C)泥沙严重淤积 (F)水流流向
(C')泥沙淤区 --- 水流动力

图 2 典型弯道泥沙输移特性

Fig.2 Characteristics of sediment transport at a typical bend

①曾庆华.关于弯道的底沙运动问题.水利水电科学研究院研究报告集,1981.

②张红武,汪家寅.河弯水力学.黄委会水利科学研究所,1987.

$$L_m = 50Q_{\text{平}}^{1/2}$$

在采用平均流量为特征流量时,河流跨度与流量的关系具有如下形式:

$$L_m = 156Q_m^{0.46}$$

笔者根据长江嘶马河段的有关水文资料,进行了该河弯弯距其平面形态与流量关系的实际计算,取 $Q_{\text{平}} \approx 44\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_m = 28\,800\text{ m}^3/\text{s}$,式中 $Q_{\text{平}}$ 为平滩流量, Q_m 为年平均流量.上述两者计算结果分别为 10.5 km 和 17.6 km.结果表明,嘶马弯道的平均河宽仅为 2 km, L_m 应在 24 km 至 28 km 之间,现仅为 10.5 km 至 17.6 km,弯道仍在发展之中.

总之,在弯道进口段的凹岸及出口段的凸岸,将有可能发生水流分离现象,此分离区中出现漩涡,流况更为紊乱,因而分流增加能量损失,这些都是导致河岸崩坍的本质所在,特别是大规模的窝崩与这种紊动性很强的漩涡流有很大关系.弯道水流损失的主要表现为 (a)环流使水流的内摩擦增加 (b)环流使床面剪切力增加 (c)急弯处由于水流受挤压和形成漩涡造成能量损失 (d)纵向流速沿河宽及水深改变及部分能量消耗于环流.国内外不少学者所做过的环流强度计算^[2],近底层环流强度为近表层的将近 4 倍.弯道环流的纵向发展,考查主流线附近的水流可知,在顶冲点附近环流强度达到最大值,且出口段的环流强度大于进口段的环流强度.

关于凹岸冲刷机理如图 3 所示,凹岸环流纵向淌量分量为 Ω .凹岸冲刷的前强弱与切应力的关系是纵向切应力分布最大值所在处冲刷最强烈.故如上所述,弯道凹岸冲刷最强的部位处于此点及其附近.

按上所述可知,在近壁处凹岸漩涡回转方向向上,其动力作用将引起滞点以上部位的淘刷(即上淘);而该处主漩涡回转方向向下,其动力作用将引起滞点以下部位的淘刷(即下淘);此外,近壁处纵向流速分布最大值位置与滞点相对应.上述 3 种作用叠加在一起,造成滞点及其附近的严重冲刷,冲刷后的岸坡形状则成抛物形.

2 嘶马河段的崩岸与护岸

嘶马河段崩岸剧烈,历史较长.据有关资料,1954 年特大洪水以后,崩岸更加显著,40 多年来,崩岸位置从三江营河口开始,到嘶马河口以下 1 km 处,全长约 8 km,崩岸强度见表 1.表 1 中将全部嘶马弯道分为 3 段,以杜家圩和嘶马河口为 3 段的分界点.从时间上看,在上段内,以 1959~1966 年期间崩岸强度最大,中段以 1966~1969 年期间崩岸强度最大,下段以 1969~1976 年期间崩岸强度最大,可见崩岸在向下发展;从时空分布看,1969~1998 年期间,以下段崩岸强度最大.可见 1959 年强烈崩岸区已不在上段,并逐渐向下游发展.70 年代中期至 80 年代中期,上下两段的年崩率绝对值较小,这是因为修建了丁坝以后,岸线没有大幅后退之故.总之,嘶马弯道崩岸历史悠久,1959 年后,强崩地段是在杜家圩下游,1969 年以后强崩地段是在嘶马河口以下,强崩地段随着时间向下游移动.1984 年东一号坝与西一号坝之间发生了历史上罕见的特大崩岸(见图 4.5),83 h 之内坍失陆地 11.5 万 m^2 ,失去不少厂房和房屋;1985 年东二、西五、西七诸坝又濒临出险,危及主要公路.南京水利科学研究院河港研究所李昌华、孙梅秀两位教授在南京河段江岸崩窝和八卦洲控制工程的试验研究中,所拍照片明显可见在崩窝前相应岸边前沿多先发生淘刷,并且被淘刷形成顺岸深槽逐渐向岸契入,当土体结构承受不住自身的重量时,土体发生崩落,崩岸土体每次成快状崩落,窝崩土体往往为左、右、中依次交替崩落,不断地向纵横发展.这一点正如上面所叙述,陈引川研究的长江下游 1984 年嘶马现

表 1 嘶马河段的崩岸情况

Table 1 Bank caving of the Sima reach

年 份	上段崩退		中段崩退		下段崩退		全段崩退	
	长度/m	年平均数/m	长度/m	年平均数/m	长度/m	年平均数/m	长度/m	年平均数/m
1959~1966	84	12	195	28	154	22	144	21
1966~1969	29	10	111	37	61	20.3	67	22
1969~1976	65	9	150	21	172	24	129	18.4
1976~1981	38	8	-10.2	-2	58	12	28.6	7.1
1981~1985	6	1.5	8.7	2.2	55	13.7	23.1	5.8
1959~1985	222	8.5	455	17.5	500	19.2	392	15.1
1986~1998	60	5	125	10.1	139.5	116.2	526	43.8

场崩窝雷同(仍见图4.5),可见模型试验中的窝崩过程和天然窝崩很相像.据有关资料统计,1979~1991年嘶马河口以东大幅度后退250~280 m,与此相应,弯道对岸凸岸边滩淤宽300~650 m.按南京水文实验站1985年资料分析,嘶马弯道的崩坍主要与原杜家圩上游水下土埂被冲失、主流向下游发展有关.1991~1995年期间,上游过渡段水下地形有新的变化,出五峰山后主流右偏,深槽向左右两侧扩展.三江营下游长约1.8 km处仍有坍岸,嘶马弯道东三坝上游部分江岸线后退受到抑制,水下地形变化幅度减缓.西七坝附近仍深达-60 m,并向下游扩大到西五坝附近,嘶马河口以上深槽仍然向岸边逼近.

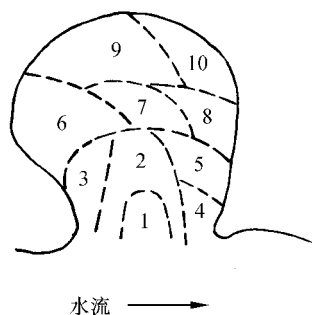


图4 嘶马河段崩前水下地形图

Fig.4 Underwater topography of the Sima reach

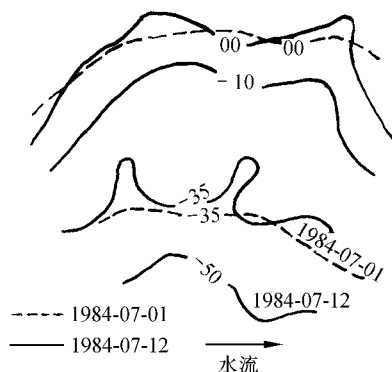


图5 窝崩过程示意图

Fig.5 Sketch of bank caving

1970年嘶马镇前大坝后,对嘶马弯道实施护岸整治,至今已将近30年,成效较为显著^[3].其护岸整治工程可分为4个阶段:

- a. 第一阶段(1970~1973年)守点固线护岸.共修建丁坝9座、守嘴一座,除三座砌石坝外其余均为土体与砌石混合坝,坝长一般为60 m左右,坝距均在300 m以上,最大坝距达600 m.
- b. 第二阶段(1974~1983年)围绕守坝固点护岸,加固坝身.此地着重在丁坝前沿和两侧采用柴排和抛石加固坝身.
- c. 第三阶段(1984~1990年)开始平顺抛石护岸.弯顶下侧西二至东三坝抛护至深槽边,弯顶向上抛护至极易变化的-15 m(吴淞基面)线以下,初步控制了坍势.
- d. 第四阶段(1991年以后)节点控制平抛加固护岸.1991年开始,按总体规划实施节点整治工程.前期重点加固坝区间已抛地段,使抛石外缘大部分接近于深槽边,后期计划顶冲点下延伸,扩大护岸范围.

嘶马段护岸整治工程实施近30年来,基本控制了最严重的弯顶部坍势,达到了抑制弯道发育、促进河势好转的目的.近30年来长江嘶马段治坍工程的经验表明,护岸整治需把握下述基本原则^①:(a)规划的科学性.有一个科学的规划作指导,并与岸线的开发利用相结合.(b)工程的整体性.若工程整体性强,则抗拒水流冲刷、控制河势变化的能力即强,护岸效果越佳,投资亦省.(c)整治的连续性.冲击平原上自然河流演变剧烈,河势与护岸工程又有相互作用.按规划重点,延续实施,护岸工程发现抛区有破坏时需经常进行加固,以巩固护岸效果.

嘶马弯道系一单向发展的陡弯河道.护岸之初先护弯顶部,对控制全弯道河势尚属正确.80年代后,嘶马丁坝区连续发生大面积坍江,故对河床演变原因和护岸效果进行分析研究.从1985年起,逐步在嘶马弯道形成了一个“丁坝加平抛”的整体防护系统,取得了显著效果.嘶马弯道在实现平顺护岸后,基本河势没有发生大的变化.可以初步论定,弯顶部位的已护工程和河势变化基本处于相对稳定状态.此外,位于杜家圩附近有两个抗冲性能较强的水下土埂,好似两个挑流丁坝^②.在近30年的演变过程中,土埂顶以水流漫过埂顶后,形成跌水,冲刷土埂下游,形成冲刷坑亦是消能作用,水流虽能冲刷下游江岸,但其强度较弱.因为土埂随缩窄河宽,使水流单宽流量增大,因而加强了水流对下游的冲刷,淘刷其下游江岸下层的粉细沙土层,然后造成崩岸.

①王志昆.嘶马段崩岸变化及其原因分析.长江中下游护岸工程论文集(第四集).水利部长江水利委员会,1990.303~307.

②师哲.嘶马护岸工程稳定趋势的初步分析.长江中下游护岸工程论文集(第四集).水利部长江水利委员会,1990.323~327.

3 结语和建议

通过对长江嘶马弯道的河床形态、水沙运动特性、河床演变规律及其崩岸防护等方面的分析研究 ,有以下初步认识 :

- a. 长江嘶马弯道处于扬中河段的弯顶部位 ,弯曲半径仅 3 ~ 4 km ,受上游五峰山的挑流顶冲而出现严重崩岸 .多年来崩退严重的是其下段 ,即嘶马河口以下河段 .
- b. 嘶马河段崩岸系由其弯道河床边界和水流特性所决定的 .弯道环流引起的横向输沙不平衡 ,致使凹岸冲蚀和凸岸淤积 .
- c. 水流是崩岸的动力因素 .弯道中强大的底部水流在凹岸特别是顶冲点部位产生强烈的紊动 ,使之发生最严重的窝崩 .
- d. 土质抗冲条件差亦是嘶马弯道崩岸发展的原因之一 .该河段属全新松散的河床沉积物 .表层(1 ~ 2 m)壤土、下层粉沙和细土 ,在江岸受强劲的水流顶冲后 ,则出现严重的崩岸 .
- e. 嘶马弯道实施平顺抛石护岸后 ,基本河势未再发生大的变化 .可以初步论定 ,弯顶部位的已护工程和河势变化现基本处于相对稳定状态 ,惟弯顶护岸区下段的坍势甚于上段 .下段受已护工程影响 ,顶冲点下移 ,河床深泓自 80 年代以来连续冲深北移 .1988 年后该段年年有崩坍发生 ,未来一段时期内下段为崩坍主要发生地段 ,以后仍有下移趋势 .

在战胜 1998 年长江全流域型特大洪水后 ,在落实江堤达标包括坍江监测监控和预报非工程性措施的同时 ,应进一步对整个扬中河段进行整治规划 ,特别注意保持良好的河势 .

参考文献 :

[1] 钱宁 ,张仁 ,周志德 .河床演变学 [M]. 北京 :北京科学出版社 ,1989. 156 ~ 180 ,370 ~ 371 .
[2] 王平义 .弯曲河道动力学 [M]. 四川 :成都科技大学出版社 ,1995. 125 ~ 140 .
[3] 杭学军 .嘶马护岸整治的回顾与思考 [J].江苏水利 ,1996(6): 52 ~ 53 ,57 .

Bank Caving and Protection at Sima Bend of Jiangsu Section of Yangtze River

WEI Yan-wen , LI Bai-lian

(Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China)

Abstract : Based on a summary of previous researches , analyzed are coming water and sand into the Sima bend , components of the river bed boundary , and water and sand movement and river bed deformation under transverse circulation. The causes and characteristics of bank caving and engineering protection measures are discussed , and the stability of the Sima bend is calculated and analyzed by use of the QianNing formula. In combination with the Sima bank protection project , some bank protection measures , such as construction of spur dikes , sinking mattress , and smooth rock riprap , are compared for search of the optimum measures. Finally , a general plan is proposed for the regulation of the Yangzhong reach of the Yangtze River.

Key words : the Yangtze River ; the Sima Bend ; bank caving and protection ; research