钱塘江河口泥沙特性及河床冲淤研究

潘存鸿,曾 剑,唐子文,史英标

(浙江省水利河口研究院,浙江杭州 310020)

摘要:简要介绍了钱塘江河口含沙量、泥沙粒径的分布特性,建立了钱塘江河口泥沙起动流速和挟沙能力公式,分析了河床大冲大淤、大冲以后大淤、上游段洪冲潮淤、下游段洪淤潮冲等河床演变特性,研究了河床冲淤 对洪水和潮汐的巨大反作用.分析研究表明,涌潮到达时,水流激烈冲刷河床,引起含沙量剧增,大多在涌潮过 后的20 min 内达到极值,形成大含沙量区.在平水期和枯水期,涨潮输沙量明显大于落潮,加剧了河口上游的淤 积,涌潮是钱塘江河口大冲大淤的机理之一.

关键	词:	涌潮;泥沙;	河床冲淤; 钱塘江河口		
中图分类	€号:	TV 148	文献标志码:A	文章编号: 1009-640X(2013)01-00	01-07

钱塘江河口为世界著名的强潮河口,潮强流急,涌潮汹涌,河道宽浅,海域来沙丰富,泥沙易冲易淤,河床 冲淤变化剧烈,主槽摆动频繁.钱塘江河口特殊的水动力条件和泥沙条件,决定了不同于其他潮汐河口的泥 沙输移.1949年后,钱塘江河口泥沙输移和河床演变研究进入了新的时代,取得了显著的成绩^[1-9],宏观上基 本搞清了钱塘江河口泥沙输移和河床演变规律,但钱塘江河口水沙运动非常复杂,还有许多问题需要进一步 研究.本文在前人研究的基础上,探讨了钱塘江河口段泥沙特性、涌潮对泥沙输移的影响、河床演变规律,以 及河床冲淤对水动力的巨大反作用.

1 钱塘江河口概况

钱塘江富春江电站以下为感潮河段,即钱塘江河口,长282 km(图1).根据各段水动力条件和河床演变特性的差异,将钱塘江河口分为3段:富春江电站至闻家堰为近口段,长75 km,以径流作用为主,河床基本稳定;闻家堰至澉浦为河口段,长122 km,受径流与潮流共同作用,河床冲淤剧烈,是本文研究的重点;澉浦以下口外海滨段,习称杭州湾,长85 km,以潮流作用为主,河床相对稳定.

钱塘江(富春江电站)多年平均径流量 952 m³/s, 年际分布不均,年内分配呈单峰型,3—6月(或4— 7月)为丰水期,径流量占全年的 70% 左右.1960 年新



Fig. 1 Qiantang estuary

安江水库建成后,对径流的影响较大,丰水期径流减少20.6%,枯水期增加22.3%(见图2).

收稿日期:2012-06-10

- **基金项目:**国家自然科学基金项目(10772163);水利部公益性行业科研专项(201001072);浙江省自然科学基金项目 (Y5100243);浙江省重点科技创新团队(2010R50035)
- 作者简介:潘存鸿(1963-),男,浙江宁波人,教授级高级工程师,博士,主要从事河口海岸水动力学、泥沙、水环境研究. E-mail: panch@ zjwater. gov. cn

东海潮波传入钱塘江河口过程中,因受钱塘江河口杭州湾喇叭形平面形状的影响,潮波能量集中,潮差 增大,在杭州湾湾顶澉浦附近达到最大,澉浦站多年平均潮差达5.57 m,历史最大潮差9.0 m. 乍浦以上,存 在钱塘江沙坎,水深急剧减小,浅水效应显著,潮波进一步变形,终在澉浦以上的尖山河段形成举世闻名的涌 潮.澉浦以上,除高潮位继续抬高外,低潮位急剧抬高,且幅度大于高潮位抬高,因此向上游潮差减小(图3), 至闸口多年平均潮差只有0.46 m^[5].



2 钱塘江河口泥沙特性

钱塘江流域来沙很少,多年平均含沙量在 0.25 kg/m³ 以下.随着上游水库建设和植被的好转,流域来沙 呈减小趋势.据推算,1980年以来闻家堰以上陆域来沙量年平均约 340 万 t,澉浦以上陆域来沙量约422 万 t. 钱塘江河口泥沙主要来自海域,澉浦断面平均潮差下涨潮输沙量约 500 万 t,大潮(潮差约 8 m)时可达 1 000 万t.因此,澉浦断面 1 个潮的输沙量大于流域来沙 1 年的输沙量.

2.1 含沙量

根据实测资料分析,钱塘江河口澉浦以下的杭州湾平均 含沙量一般在1~3 kg/m³;七堡以上含沙量也大多在1~ 3 kg/m³(图4).最大含沙量区位于澉浦至仓前河段,其中尤 以曹娥江口至盐官河段含沙量为最大.

钱塘江河口曹娥江汇入口至盐官河段潮强流急,涌潮汹 涌. 在涌潮河段,涨潮最大流速一般出现在涌潮过后数分钟 至数十分钟内,最大垂线平均流速澉浦断面为4 m/s 左右, 在尖山至盐官河段达到最大,达5 m/s 以上. 往上游,流速逐 渐减小,七堡最大流速降至2.5 m/s 左右. 钱塘江河口最大 含沙量区与最大流速区基本相符,图4为2007年10月实测 最大和最小含沙量沿程分布. 由图可知,最大含沙量位于大 缺口下游,与该段流速较大有关外,还与水深较小有关. 钱塘 江河口含沙量除最大含沙量量值较大外,还存在含沙量变化 幅度大的特点. 除闸口外,最大含沙量均在10°~10¹量级,最 大为65.8 kg/m³;而最小含沙量则在10⁻²~10⁰量级,最小为 0.022 kg/m³. 各站最大、最小含沙量之比至少在1个量级以 上,大多为2个量级,最多可相差3个量级.

2.2 泥沙粒径

图 5 为钱塘江河口段悬沙和底沙的中值粒径沿程变化. 底沙平均中值粒径为 0.055 mm,明显大于悬沙平均中值粒



the Qiantang River





径 0.023 mm. 从上游到下游, 悬沙中值粒径变化不大, 但底沙中值粒径有明显增大趋势, 其原因可能与近 20 年来近口段和河口段上游段大规模采沙有关.

2.3 挟沙能力公式

2.3.1 半潮平均挟沙能力公式 20世纪60年代初,根据钱塘江河口段各站实测资料(共 398个点据),得到半潮 平均挟沙能力公式^[5]:

$$\overline{S} = K \frac{V^2}{H} \quad (K = 12) \tag{1}$$

式中: \overline{S} 为半潮平均挟沙能力; K 为系数; V 为流速; H 为水深. 其复相关系数 R = 0.88, 均方差 $\sigma = 0.29$.

式(1)为钱塘江河口半潮平均挟沙能力公式的基本形式,但由于钱塘江河口段的涨潮过程线形状,以及 涨、落潮含沙量等因素有明显差异,因而同一站的涨、落潮输沙系数 K_f和 K_e有较大差异,不同站 K_f(或 K_e) 也有明显差异.因此,应用半潮平均输沙模型计算河床冲淤量时,还需根据各站的实测资料应用式(1)结构 形式分别求得各站的 K_f和 K_e值,才能较好地与实际相符.

2.3.2 潮流挟沙能力公式 钱塘江河口潮流挟能力公式仍采用式(1).依照水流挟沙能力的定义,根据实 测资料确定水流挟沙能力经验公式中的挟沙系数 *K* 时,应选用水流挟沙处于饱和状态时的资料.鉴于闸口 站落潮流历时长,落潮流期间的水力条件和泥沙因子随时间变化缓慢,水流挟沙情况可视为接近饱和状态. 选用闸口连续半个月的落潮流期间和洪水涨落过程中变化平缓时段的实测资料,求得潮流挟沙能力经验公 式中的 *K* 值^[5]:大潮时为7,小潮和洪水时为5,因此得到钱塘江河口潮流挟沙能力公式 *S*_{*}为:

大潮:
$$S_* = 7 \frac{V^2}{H}$$
; 小潮和洪水: $S_* = 5 \frac{V^2}{H}$

考虑悬沙沉速ω的钱塘江河口潮流挟沙能力公式为[5]:

大潮:
$$S_* = 0.008 \frac{V^2}{H\omega}$$
; 中、小潮和洪水: $S_* = 0.0055 \frac{V^2}{H\omega}$

近期,通过量纲分析和敏感性分析,并通过实测资料率定,得到挟沙能力公式

$$S_* = f\left(\frac{V^2}{gH}, \frac{V}{\omega}\right) = k\left(\frac{V^3}{gH\omega}\right)^{\alpha} = 1.66\left(\frac{V^3}{gH\omega}\right)^{0.55}$$
(2)

2.4 泥沙起动流速公式

对于河口泥沙起动流速,一般认为要明显小于相同粒径的河流泥沙起动流速,其原因可能与河口的水动 力特点、泥沙特性有关.河口泥沙因径流与潮汐交互作用,上、下游往返搬运,致密实程度较河流低;涨、落交 替,流路随时变化,泥沙易在有利于滑动或滚动的方向起动;涨、落急时段流速梯度显著增加,尤其是强潮河 口,产生由当地加速度引起的附加应力;垂向流速分布随时变化,与河流中近底层流速总是小于中、上层的情 况不同.因此,当粒径较细且水深较大时,对于河口泥沙起动流速,各家公式的计算值往往比实际值要大^[10].

为此,采用水槽试验结果(试验泥沙样本中值粒径 D 为 0.004~0.069 mm,试验水深 0.17~0.35 m,起 动流速介于 0.21~0.88 m/s,代表小水深值)和实测资料分析值(代表大水深值),以大水深条件下拟合精度 较高的张瑞瑾公式为框架,得到钱塘江河口泥沙起动流速公式^[11]:

$$V_{\rm c} = \left(\frac{H}{D}\right)^{0.14} \left[17.6 \frac{\gamma_{\rm s} - \gamma}{\gamma} D + 0.000\ 031\ 4 \times \frac{10 + H}{D^{0.32}} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(3)

式中: γ_{s} 为泥沙重度; γ 为水的重度.

3 钱塘江河口泥沙冲淤与水动力的相互作用

钱塘江河口为冲淤性强潮河口,水动力条件变化大,河床主要由粉砂组成,起动流速小,泥沙易冲易淤. 钱塘江河口的水动力条件和泥沙条件决定了河口河床具有大冲大淤和易冲易淤的特性.不同于其他潮汐河 口,钱塘江河口水深浅,河床冲淤幅度大,河床冲淤变化对水动力条件具有巨大的反作用.

3.1 上段洪冲潮淤,下段洪淤潮冲,大冲大淤

河口段是径流与潮流相互作用、相互消长的区域.洪水期,河口段先从上游发生冲刷,随着洪水的增大, 冲刷逐渐下移,泥沙随洪水(落潮流)带向下游,导致河口下游段淤积.枯水期,河口上游段受潮流作用控制, 涨潮输沙量大于落潮输沙量,导致河床上游段淤积、下游段冲刷.因钱塘江河口涨、落潮输沙量较大,从而造 成了大冲大淤的河床演变特性.

钱塘江河口段上段(盐官以上)具有明显的洪冲潮淤特征. 年际变化为丰水年河床冲刷,枯水年河床淤积;年内变化为丰水期(3—7月)河床冲刷,枯水期(10月至次年2月)河床淤积. 洪水(包括洪峰流量和洪量)和初始河床地貌主要决定了河床冲刷量和冲刷位置. 洪峰流量和洪量越大,冲刷量越大,冲刷河段越长; 初始河床容积越小,即河床水深小,在同样洪峰流量和洪量作用下,冲刷量越大. 沙坎是钱塘江河口段最重要的地貌单元,它的演变可以代表河口段纵向演变特征. 根据多年实测资料统计分析,得到河床不冲不淤流量 Q_e 与沙坎顶部平均高程 Z₀ 的关系式为 Q_e = 4 168.7Z₀^{-1.23}, 表明 Q_e 与 Z₀ 为负相关,即沙坎顶部高程越高,不冲不淤流量越小.

表1为1997年"7.9"(7月9日)洪水前(4月)和洪水后(7月)以及11月河床容积冲淤变化.由表可知,洪水后闸口至老盐仓河段全线发生冲刷,冲刷幅度为34%~157%,平均为88%.洪水过后,一方面上游径流量减小;另一方面因河床冲刷,低潮位下降,潮差增大,进潮量增大,向上游净输沙量增大,从而引起河床迅速回淤,11月测图与7月测图比较,淤积量占4—7月冲刷量的50%~69%,平均为57%.因此,河床大冲以后是大淤,大冲是大淤的前提,没有大冲,也就没有大淤.事实上,该年4月至洪水前因上游径流量偏估,洪水前的河床比4月测图的河床容积还要小,所以表1中洪水引起的河床冲刷量还要大.

表 1	1997	年河床容积冲淤变化
~ 1	1///	

Tab. 1 Erosion and deposition change of riverbed volume in 1997

项 目	闸口—五堡	五堡—七格	七格—仓前	仓前—老盐仓	平 均
4-7月冲刷量占4月河床容积(%)	63	98	157	34	88
7-11月淤积量占4-7月冲刷量(%)	54	55	69	50	57

图 6 为 1997 年 4—7 月和 7—11 月沿程 冲淤量. 由图可明显看出河口段河床沿程冲 淤变化规律,大致以盐官为界,上、下段冲淤 恰好相反,4—7 月上段冲、下段淤;7—11 月 上段淤、下段冲,而闸口至澉浦河段总冲淤 量基本接近. 说明河口段上、下段之间大量 的泥沙交换决定了河床大冲大淤的特征.



3.2 河床冲淤对水动力的反作用

水动力条件对河床冲淤起着决定性作 用,反过来河床冲淤面貌对水动力条件也有 重要的影响.河床容积越大,洪水位越低,反

之洪水位越高. 在同样洪峰流量条件下,闸口洪水位可相差1m以上. 如1995年6月(洪峰流量14000m³/s) 和1997年7月(洪峰流量12500m³/s)2次洪水,洪峰流量相当于5年一遇,但因河道容积相差较大,闸口洪 水位差1.22m. 同样,在相同洪水位下,洪峰流量可相差3倍. 如1983年7月洪峰流量12100m³/s,1955年 6月洪峰流量29000m³/s,2次洪水上游洪峰流量相差近3倍,但因河道容积相差3倍多,闸口洪水位仅相差 0.08m.

河床冲淤对潮汐的影响也很大.河口段下端澉浦潮汐受河床冲淤影响很小,曹娥江汇入口以上河段潮汐 明显受河床冲淤影响,特别是低潮位影响最为明显,河床淤积时低潮位抬高,潮差减小,潮流动力减弱.图7 为澉浦站和闸口站1997年月平均潮差变化.由图可知,澉浦站月平均潮差变化很小,而闸口站月平均潮差变 化很大,"7.9"洪水前河床淤积严重,低潮位高,潮差小;"7.9"洪水后河床冲刷,低潮位下降,潮差增大; 10月以后河床回淤,低潮位抬高,从而潮差减小.



Fig. 7 Variation in month average tidal ranges at Ganpu and Yanguan stations in 1997

4 涌潮对泥沙输移的影响

钱塘江河口涌潮河段的含沙量观测非常困难,缺乏系统泥沙资料,现根据仅有的几次含沙量观测资料分析涌潮对泥沙输移的影响.2007年10月水文测验大潮汛期间,在盖北至闸口涌潮河段利用岸边潮位站进行了表层含沙量取样观测,涌潮到达后1h内每隔10min取样1次,其余时间每隔半小时或1h取样1次.表2为该次实测涌潮前后沿程表层平均含沙量统计结果.由表可知,尽管盖北站还没有涌潮,但涨潮流速已较大,涨潮后含沙量明显增大,并在1h后达到最大含沙量10.60 kg/m³;曹娥江汇入口以上的涌潮河段,除闸口最大含沙量出现在涌潮后20min外,其余各站最大含沙量均出现在涌潮后10min^[12].

表 2 涌潮前后沿程实测表层含沙量

	Tab. 2 Me	easured surface	sediment con	centration befor	re and after tid	lal bore along t	he River	kg∕m³
时 刻	间 口	七堡	仓前	盐官	大缺口	廿二工段	曹娥江口	盖北
涨潮前/涌潮前	0.06	0.06	0.90	1.97	0.61	7.21	1.58	0.04
涨潮后/涌潮后	0.23(20)	0.76(10)	9.22(10)	22.30(10)	8.35(10)	18.10(10)	19.6(10)	10.60(60)

注:()中值为出现时刻,以涌潮后时间计,单位为 min.

图 8 为 2010 年 10 月盐官站连续 3 d 同步流速和含 沙量每分钟变化过程.可见,含沙量变化过程与流速变化 基本同步,在涌潮到达后 1 h 内含沙量达到极值,在落急 时刻也存在含沙量峰值,但峰值明显小于涨潮峰值.在 大、中潮期间涌潮过后,由于流速紊动急剧,涨潮时段存 在 2 个含沙量峰值,但小潮汛期间,因流速较小,无论是 涨潮还是落潮含沙量峰值均明显降低,并且由于没有涌 潮,涨潮期只存在 1 个含沙量峰值.

从第1个潮周期变化过程可见,涌潮到达前(02:49) 落潮含沙量为1.6 kg/m³,涌潮过后(02:50)水流迅速从



落潮流转为涨潮流,含沙量急剧增大到 10.0 kg/m³,2 min后(02:52)达到第1个峰值 14.5 kg/m³,以后随着 流速增速减缓甚至流速减小,水流紊动强度减弱,含沙量又快速回落,约半小时后(03:21)含沙量达到涨潮 过程的最小值 1.5 kg/m³,然后随着流速的振荡增大,含沙量也相应地振荡增大,约 20 min 后(03:43)达到第 2个峰值 15.8 kg/m³,且其值大于第1个峰值,再后随着流速的振荡减小,含沙量也随之振荡降低.03:57 后 含沙量急剧降低,至 05:47 涨潮转为落潮前含沙量维持在 2.7 kg/m³ 左右.转流后,落潮流速逐渐增大,相应

地含沙量也缓缓振荡增大,至08:37 落潮流速达到最大值2.60 m/s,3 min 后(08:40)含沙量达到落潮最大值6.7 kg/m³,以后随着落潮流速的减小,含沙量也振荡降低,基本上在涨潮(涌潮)前达到最小值.

从几次观测结果来看,在强涌潮河段,大、中潮涌潮期间最大含沙量基本在10¹量级,而落潮期最大含沙 量均小于10 kg/m³.说明钱塘江涌潮河段不同于一般的潮汐河口,涌潮对泥沙输移、河床演变有着较大的影 响,挟带高含沙量的涌潮水流促使下游泥沙向上游输移,使得涨落潮输沙更加不平衡.根据计算结果分析,盐 官断面涨潮输沙量是落潮输沙量的2~3倍,从而在枯水期加剧了河口上游的淤积.涌潮是钱塘江河口大冲 大淤的机理之一^[13].

5 结 语

(1)钱塘江河口潮强流急,涌潮汹涌.海域来沙丰富,澉浦断面1个潮的输沙量大于流域1年的输沙量; 钱塘江河口泥沙主要由粉沙组成,悬沙、底沙平均中值粒径分别为0.023和0.055mm,易冲易淤;钱塘江河 口含沙量随潮汐变化,具有涨潮含沙量大于落潮、大潮大于小潮和变化幅度大等特点.针对钱塘江河口泥沙 特点,建立了泥沙挟沙能力公式和泥沙起动公式.

(2)钱塘江河口河床具有大冲大淤、洪冲潮淤特性,河床冲淤对水动力反作用很大.洪水期,河床冲刷, 河床容积扩大,洪水位下降;同时,低潮位下降,潮差增大,进潮量增大,涌潮增大,向上游净输沙量增大,从而 引起枯水期的更大淤积.因此,河床大冲以后是大淤.

(3) 涌潮对泥沙输移影响很大,是钱塘江河口大冲大淤的机理之一. 涌潮不但流速大,并且紊动剧烈,挟 沙能力极大,高紊动涌潮水流冲刷河床,引起含沙量剧增,在1个潮周期内最大含沙量出现在涌潮时段,涌潮 造成钱塘江河口大含沙量区. 挟带大含沙量的涌潮水流促使下游泥沙向上游输移,使得涨落潮输沙更加不平 衡,导致平水期和枯水期河口上游淤积加剧.

参考文献:

- [1] 戴泽蘅,李光炳. 钱塘江河口河槽冲淤变化及悬移泥沙的运行[J]. 泥沙研究, 1958, 3(4): 54-69. (DAI Ze-heng, LI Guang-bing. Riverbed variation and suspended sediment transport in the Qiantang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 1958, 3(4): 54-69. (in Chinese))
- [2] 钱宁,谢汉祥,周志德,等. 钱塘江河口沙坎的近代过程[J]. 地理学报,1964,30(2):124-142. (QIAN Ning, XIE Hanxiang, ZHOU Zhi-de, et al. The fluvial processes of the big sand bar inside the Qiantang Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 1964, 30(2): 124-142. (in Chinese))
- [3] 陈吉余,罗祖德,陈德昌,等. 钱塘江河口沙坎的形成及其历史演变[J]. 地理学报,1964,30(2):109-123. (CHEN Jiyu, LUO Zu-de, CHEN De-chang, et al. The formation and historical development of the big sand bar inside the Qiantang Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 1964, 30(2):109-123. (in Chinese))
- [4] 蒋国俊,张志忠. 钱塘江河口段动力沉积探讨[J]. 杭州大学学报:自然科学版, 1995, 22(3): 306-402. (JIANG Guojun, ZHANG Zhi-zhong. Dynamical sedimentation in Qiantang Estuary[J]. Journal of Hangzhou University(Natural Science), 1995, 22(3): 306-402. (in Chinese))
- [5] 韩曾萃, 戴泽蘅, 李光炳, 等. 钱塘江河口治理开发[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003. (HAN Zeng-cui, DAI Zeheng, LI Guang-bing, et al. Regulation and exploitation of Qiangtang Estuary[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [6] 余炯,曹颖. 治江缩窄后钱塘江河口泥沙淤积和成因探讨[J]. 泥沙研究, 2006(1): 17-23. (YU Jiong, CAO Ying. Sediment deposition after regulation and reclaiming of Qiantang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2006(1): 17-23. (in Chinese))
- [7] 余炯,曹颖. 钱塘江河口段长周期泥沙冲淤和河床变形[J]. 海洋学研究, 2006, 24(2): 28-38. (YU Jiong, CAO Ying. Long-term sediment erosion/deposition and deformation of river-bed in the Qiantangjiang River Estuary[J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(2): 28-38. (in Chinese))

- [8] 吴荣荣,李九发,刘启贞,等. 钱塘江河口细颗粒泥沙絮凝沉降特性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007(3): 29-34. (WU Rong-rong, LI Jiu-fa, LIU Qi-zhen, et al. Study on flocculation and setting characteristics of cohesive fine grain sediment in the Qiantang Estuary, 2007(3): 29-34. (in Chinese))
- [9] 曾剑,孙志林,潘存鸿,等. 钱塘江河口径流长周期特性及其对河床变形的影响[J].浙江大学学报:工学版,2010,44 (8):1584-1588. (ZENG Jian, SUN Zhi-lin, PAN Cun-hong, et al. Long-periodic feature of runoff and its effect on riverbed in Qiantang Estuary[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2010, 44(8): 1584-1588. (in Chinese))
- [10] 熊绍隆, 胡玉棠. 潮汐河口悬移质动床实物模型的理论与实践[J]. 泥沙研究, 1999(1): 1-6. (XIONG Shao-long, HU Yu-tang. Theory and practice of movable bed model with suspended load for tidal estuary[J]. Journal of Sediment Research, 1999(1): 1-6. (in Chinese))
- [11] 曾剑, 陈刚, 熊绍隆. 钱塘江河口细颗粒泥沙起动流速研究[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 347-351. (ZENG Jian, CHEN Gang, XIONG Shao-long. Study on incipient velocity of fine sediment in the Qiantang Estuary[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(5): 347-351. (in Chinese))
- [12] 潘存鸿, 鲁海燕, 胡建炯. 钱塘江涌潮对泥沙输移的影响[C]//西安理工大学. 第七届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集(下). 西安: 陕西科学技术出版社, 2008: 707-710. (PAN Cun-hong, LU Hai-yan, HU Jian-jiong. Effect of tidal bore in the Qiantang Estuary on sediment transport[C]//Xi'an University of Technology. Proceedings of the 7th National Conference on Sediment Basic Theory. Xi'an; Shanxi Science and Technology Press, 2008; 707-710. (in Chinese))
- [13] PAN Cun-hong, HUANG Wen-rui. Numerical modeling of suspended sediment transport in Qiantang River: an estuary affected by tidal bore[J]. Journal of Coastal Research, 2010, 26(6): 1123-1132.

A study of sediment characteristics and riverbed erosion/deposition in Qiantang estuary

PAN Cun-hong, ZENG Jian, TANG Zi-wen, SHI Ying-biao (Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: In this paper, the distribution characteristics of sediment concentration and sediment grain size are introduced in brief, and the formulas of the sediment incipient velocity and the sediment carrying capacity in the estuary are established. The characteristics of the large variation amplitude of the riverbed, the rapid deposition after rapid erosion, the flood-induced eroding and the tide-induced silting in the upper reach, and the flood-induced silting and the tide-induced eroding in the lower reach are analyzed. The riverbed variation has a great impact on flood and tides. When tidal bore arrives, the flows of the tidal bore violently erode riverbed and result in sharply increased sediment concentration, which mostly reaches a peak value after twenty minutes, thus forming a high sediment concentration region. In normal and dry periods, sediment discharge in flood tide is larger than that in ebb tide, resulting in silting in the upper reach. The tidal bore is one of the mechanisms for serious erosion and deposition of riverbed in the Qiantang estuary.

Key words: tidal bore; sediment; fluvial process; the Qiantang estuary