

# 钱塘江河口过江隧道河段极端洪水冲刷深度的预测

史英标<sup>1,2</sup>, 鲁海燕<sup>1,2</sup>, 杨元平<sup>1,2</sup>, 曹颖<sup>1,2</sup>

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310020)

**摘要:** 钱塘江河口为强冲积性河口, 在洪潮水流共同作用下河床冲淤剧烈, 极端洪水条件下河床的冲刷深度是过江隧道工程的关键问题之一。基于河床演变分析、动床数值模拟和动床物理模型等研究手段, 建立了钱塘江河口过江隧道河段洪水冲刷深度的预测模型, 分别经钱塘江河口的典型实测地形、水流泥沙及河床冲淤等实测资料进行验证。在此基础上预测了某过江隧道河段在极端洪水作用下河床最大冲刷深度, 三种研究方法所得的结果定性定量基本合理, 且与后来地质详勘的沉积分析成果基本一致, 进一步表明了预测模型的可靠性, 预测的最大冲刷深度可为过江隧道的合理埋设提供科学依据。

**关键词:** 河相关系; 动床数模; 动床物模; 极端洪水冲刷深度; 钱塘江河口; 预测

**中图分类号:** TV147      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2008)05-0685-08

钱塘江河口为强冲积性河口(图1), 在洪潮水流共同作用下河床冲淤剧烈, 据多年实测水下地形资料分析, 闸口至仓前段河床冲淤幅度可达5~10 m。在此河段上埋设过江隧道, 极端洪水作用下河床冲刷深度是关键参数之一, 它直接关系到工程的运营安全和投资大小。河床最大冲刷深度包括工程引起的局部冲刷和河流自然冲刷两种类型, 近十年来均有不少研究。Summer<sup>[1]</sup>等对此作过系统的总结, 伍冬领等<sup>[2]</sup>通过水槽局部冲刷模型试验建立了钱塘江河口桥墩局部冲刷坑深度与水流因子的经验关系。但对第二类冲刷问题国内外研究不多, 尤其在洪潮水流共同作用下的河口环境中, 由百年以上极端洪水造成的最大自然冲刷深度的研究未见报道。对于重大涉水工程设计参数的确定, 一般均采用河床演变分析、数学模型计算及物理模型试验研究等3种手段, 相互印证, 使预测结果更可靠。本文采用基于河床演变分析、动床数学模型和物理模型等三种研究手段对过江隧道河段河床的最大冲刷深度进行了综合研究, 并进行了设计条件下隧道断面最大冲刷深度的预测, 预测成果与后来地质详勘资料进行对比, 结果基本合理, 进一步表明了综合研究成果的可靠性, 可为过江隧道的合理埋设提供科学依据。

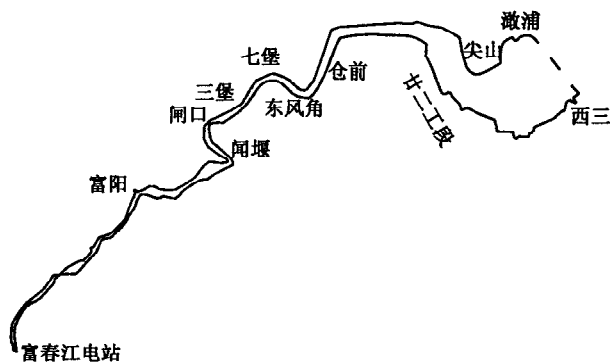


图1 钱塘江河口形势图  
Fig.1 Sketch of the Qiantang Estuary

## 1 基于河床演变分析的预测方法

### 1.1 过江隧道河段河床演变特性

(1) 过江隧道河段(三堡~东风角)年内具有明显的洪冲潮淤特点, 钱塘江流域4~7月的洪汛期径流大,

收稿日期: 2007-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772163)

作者简介: 史英标(1967-), 男, 浙江嵊州人, 教授级高级工程师, 主要从事河口海岸水沙动力学方面的研究。

E-mail: sybiao@mail.hz.zj.cn

本河段普遍冲刷, 容积扩大, 一般梅汛期洪峰流量越大, 或洪水总量越大, 则冲刷幅度越大; 8~11月因径流减少, 潮汐增大, 外海来沙大量淤积, 河床容积减小; 11月至次年3月径流少, 潮汐弱, 河床处于相对的平衡状态。1979-2002年工程河段多年平均高潮位下河床容积的统计结果表明: 4月份河段平均容积为0.480亿 $m^3$ , 经洪水冲刷后至7月底容积扩大至0.678亿 $m^3$ , 11月回淤至0.476亿 $m^3$ , 基本与汛前容积相当。

(2) 本河段河床容积的年际变化受流域连续丰、枯水文年的影响相当大。1978-1987年遭遇连续枯水年, 钱塘江河口尖山河段主槽弯曲, 本河段河床冲淤幅度无论年内还是年际都比较小; 1988-1995年为连续偏丰水文年, 钱塘江河口尖山河段主槽顺直, 过江隧道河段大冲大淤, 冲淤幅度显著增大。随着钱塘江河口尖山河段的继续治理, 工程河段的冲淤幅度可望有所减小, 但潮量减少, 相对加强了径流作用, 河床会有明显的冲刷, 同流量下河床冲刷幅度将增加。

(3) 工程河段年际间主槽摆幅较大。图2是工程断面主槽位置出现的频率沿河宽的分布, 图3是工程断面实测上下包络线图。从图可知工程断面河床冲淤幅度可达16m左右, 主槽摆动基本遍及整个河宽, 河床冲淤呈现强烈的随机性。

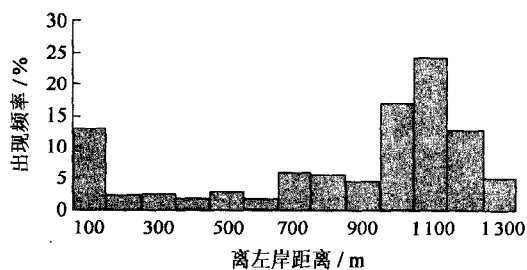


图2 隧道断面主槽位置出现频率分布

Fig.2 Occurred probability of the location of main channel

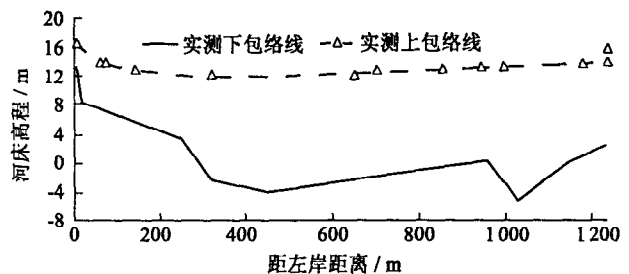


图3 隧道断面实测包络线图

Fig.3 Measured envelope curve of the tunnel section

## 1.2 冲刷深度预测公式的建立

河口地区的河相关系是流域来水来沙及海域来水来沙与河床边界相互作用的结果, 可利用实测资料直接建立经验河相关系。河口地区河床冲淤的主要动力因子是潮流和径流, 特别是强潮河口, 径流的丰枯变化对河床的冲淤演变影响较大。因此, 断面河相关系可转化为与断面平均落潮流量有关<sup>[3]</sup>。考虑到本文主要研究极端洪水作用下的断面极限形态, 故下面重点介绍洪水作用下的断面面积与洪水流量等因子的关系, 对冲刷深度的关系还建立了断面面积与主槽最深点的相关式。

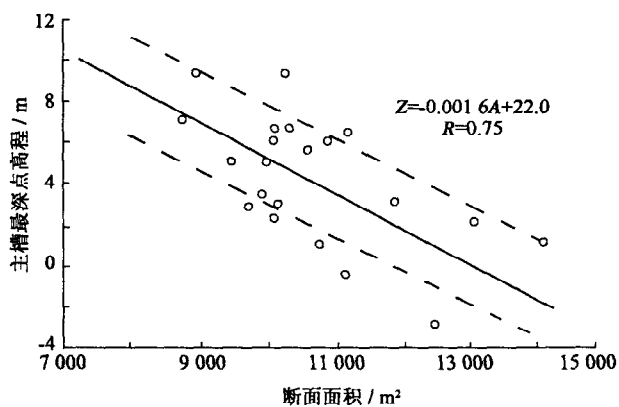


图4 隧道断面主槽最深点高程与断面面积的关系

Fig.4 Relationship between the bed level of main channel and cross-sectional area

根据河床演变分析, 过江隧道工程断面面积的最大值与汛期(4~7月)流量大小有关, 年内主槽最深点主要出现在汛期7月。因此可建立汛末7月断面面积与汛期流量的回归关系, 再用断面面积与主槽最深点高程的相关关系推求隧道断面的最大冲刷深度。回归公式的因变量取工程河段治理到位后的7月份测次18m高程(假定基面, 下同)下断面面积 $A$ , 自变量取汛期平均流量 $Q_1$ 、汛期最大一月平均流量 $Q_2$ 和最大洪峰流量 $Q_3$ 等3个因子。这样, 既考虑了一次洪峰的造床作用, 又包括了汛期洪水总量对河床冲刷作用的影响, 反映了洪量决定河床断面大小, 洪峰反映断面最深点深浅的特点, 两者相辅相成, 其概念遵循河口河相关系。建立的回归关系如下:

$$A = C_0 + C_1 Q_1 + C_2 Q_2 + C_3 Q_3 \quad (1)$$

式中  $A$  为断面积； $C_0 \sim C_3$  为待定系数。根据实测资料回归分析得到系数  $C_0 = 7659 \text{ m}^2$ ， $C_1 = 1.301 \text{ s/m}$ ， $C_2 = 0.538 \text{ s/m}$ ， $C_3 = 0.015 \text{ s/m}$ ；单相关系数分别为 0.73、0.72、0.59，复相关系数为 0.75。由此表明 3 个自变量中以汛期平均流量的相关性最为明显，其次是最大一月平均流量，洪峰流量的相关性相对较差，回归方程系数及回归方程的显著性水平  $\alpha$  均在 0.01 以上，属高度显著。验证计算的误差为 14% ~ 29%，表明上述关系相关性良好，精度尚可用于预报。为预测工程断面极端洪水冲刷深度，可用实测资料点绘断面面积与主槽最深点高程的相关关系（图 4），据此关系求得极端洪水条件下的最大冲刷深度。从图 4 可见，断面主槽的最深点与断面面积大小的关系趋势基本合理，但同面积下主槽最深点高程可差  $\pm 2 \text{ m}$  左右，反映了断面最深点变化的随机性。

## 2 基于动床数学模型的预测方法

### 2.1 动床数学模型简介

动床数学模型的基本方程包括水流连续方程和运动方程、不平衡泥沙输移方程及河床变形方程，限于篇幅，下面重点介绍悬沙运动和河床变形控制方程<sup>[4-7]</sup>：

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \beta \left( \frac{\partial hus}{\partial x} + \frac{\partial hvs}{\partial y} \right) = \omega (T_2 s_* - T_1 s) + \frac{\partial}{\partial x} \left( hE_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hE_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\gamma'_s \frac{\partial Z_0}{\partial t} = \omega (T_1 s - T_2 s_*) \quad (3)$$

式中  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的垂线平均流速； $h$  为水深； $\omega$  为泥沙的沉降速度； $\gamma'_s$  为泥沙的干容重； $s$ 、 $s_*$  分别为垂线平均含沙量和垂线平均挟沙能力； $T_1$  为底部含沙量与垂线平均含沙量之比； $T_2$  为底部挟沙能力与垂线平均挟沙能力之比<sup>[8,9]</sup>； $E_x$ 、 $E_y$  分别为在  $x$ 、 $y$  方向上的泥沙扩散系数； $Z_0$  为河床高程； $\beta$  为含沙量与速度沿垂线分布的剖面因子。

动床数学模型的建立除离散格式的收敛性快、稳定性好及精度高等要求外，更主要的是对一些关键参数的合理确定。这些计算参数除泥沙的沉速  $\omega$ 、起动流速  $U_c$ <sup>[10]</sup>、扬动流速  $U_f$  等外，还有悬沙控制方程中的 3 个无量纲剖面因子  $\beta$ ， $T_1$ ， $T_2$  和水流挟沙能力  $s_*$ ，表达式如下：

$$\beta = \frac{J_1 \ln \xi_a + J_2}{(1 + \ln \xi_a) J_1} \quad T_2 = \frac{h}{J_1 (h + z_0)} \left( \frac{h - a}{z_0 + a} \right)^{Z_1} \quad s_* = k \left( \frac{u^3}{gh\omega} \right)^m \quad (4)$$

式中  $\xi_a = \frac{z_0}{h + z_0}$ ； $J_1 = \int_{\xi_a}^1 \left( \frac{1 - \xi}{\xi} \right)^{Z_1} d\xi$ ； $J_2 = \int_{\xi_a}^1 \left( \frac{1 - \xi}{\xi} \right)^{Z_1} \ln \xi d\xi$ ； $Z_1 = \frac{\omega}{ku_*}$  为泥沙悬浮指标； $z_0$  为床面粗糙高度。经验系数  $T_1$  根据钱塘江河口的实测资料建立底部含沙量与垂线平均含沙量的比值与水流泥沙因子的经验关系<sup>[11]</sup>，其表达式为： $T_1 = 3.25 + 0.55 \ln \left( \frac{\omega}{ku_*} \right)$ 。

### 2.2 模型的率定及验证

为检验上述动床数学模型及有关参数处理的合理性，利用钱塘江河口的水沙实测资料对模型进行验证。动床数学模型的计算范围上边界为富阳，下边界为激浦，以闸口至仓前河段为研究重点（图 1）。首先利用 2001 年 6 月的洪水过程对模型的潮位、流速、含沙量进行了率定，再利用 1997 年 7 月的中等洪水对河床冲淤进行验证。率定计算结果表明高低潮位的计算误差在 0.15 m 之内，流速、断面流量的计算误差在 15% 以内，含沙量计算过程与实测基本一致（图 5）。上述计算的曼宁系数为 0.008 ~ 0.013，水流挟沙力公式中的系数  $k = 0.07$ ， $m = 1$ ，率定结果表明有关计算参数取值基本合理。在模型水流含沙量率定的基础上，再利用钱塘江河口 1997 年 7 月发生的洪水冲刷进行验证，模型的有关物理及数值计算参数采用率定得到的值，初始地形采用 1997 年 4 月的实测地形，上边界采用 1997 年 4 月至 7 月流量过程，下边界采用对应的实测潮位过程。

验证计算结果表明动床数模计算得到的冲淤部位与实测基本一致。闸口至三堡河段河床实测冲刷0~3 m, 计算值在0~2.5 m; 三堡至七堡河段冲刷实测为2~4 m, 计算为1~3 m。闸口至七堡河段的冲淤量统计结果表明, 实测冲刷量约0.78亿 $\text{m}^3$ , 而计算值为0.68亿 $\text{m}^3$ , 计算误差为15%左右。由此进一步表明模型的计算方法和参数的选用基本合理, 基本上可用于极端洪水冲刷深度的预测, 但验证计算值略偏小。

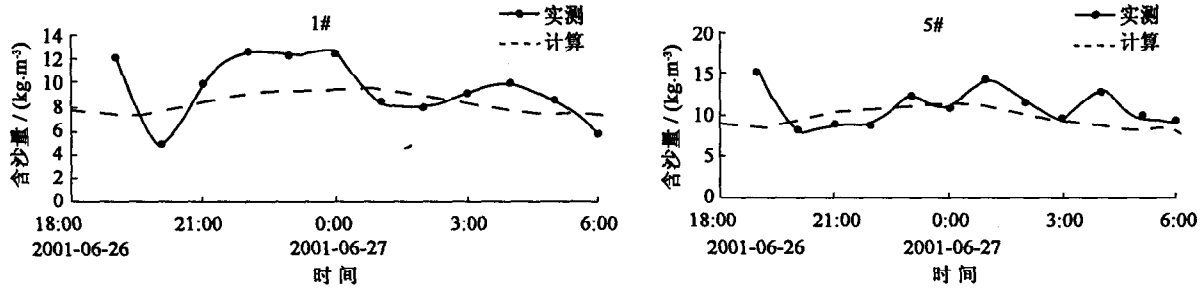


图5 含沙量过程计算和实测值比较

Fig.5 Comparison between the calculated and the measured sediment concentration

### 3 基于动床物理模型的预测方法

#### 3.1 动床物理模型简介

钱塘江河口底、悬沙粒径差异不大, 河床变形取决于悬移质运动, 故物理模型按悬移质动床模型设计。为研究过江隧道附近河床冲淤变化, 动床模型的范围取闸口至七堡河段, 整个模型的试验范围为上边界为富阳, 下边界为曹娥江口上游廿二工段与尖山连线断面, 模拟江道长110 km, 总水域面积35 $\text{km}^2$ 。根据研究问题的特点, 确定模型平面比尺 $\lambda_L=600$ , 垂直比尺 $\lambda_h=120$ , 变率 $\eta=5$ 。模型按满足水流运动相似和悬沙运动相似条件设计。模型选用比重为1.06 $\text{t}/\text{m}^3$ , 中值粒径为0.2 mm的塑料沙作为动床试验的模型沙, 经计算, 模型沙能基本满足泥沙起动相似的要求, 模型的有关相似条件按文献[12]设计。

#### 3.2 模型验证

模型经定床清水和动床冲刷二步验证。验证结果为: 模型潮位过程和流速过程与原型基本吻合, 涨落潮流速的最大误差在20%内, 表明模型的水流运动与原型相似。在定床水流验证的基础上对工程河段1997年4~7月的洪水冲刷进行验证, 模型试验的河段冲淤量与原型的对比为: 断面1#~3#河段冲刷量实测为921万 $\text{m}^3$ , 试验值为951万 $\text{m}^3$ ; 断面3#~5#河段冲刷量实测为1480万 $\text{m}^3$ , 试验值为1200万 $\text{m}^3$ 。可见, 模型试验的冲刷量与原型基本一致, 河段1#~5#河段冲刷量误差约12%, 冲淤分布的部位也与原型基本一致, 动床模型的验证精度较高, 表明模型的泥沙运动也与原型相似, 可为过江隧道河段的动床冲刷试验奠定了可靠基础。

## 4 过江隧道河床极端洪水冲刷深度的预测

过江隧道设计的关键参数之一是在百年一遇设计条件下隧道断面河床最深冲刷线。根据河床演变分析, 隧道所在河段的河床冲刷一般发生在流域汛期4~7月, 系洪水冲刷所致。洪水冲刷深度不仅与洪峰流量有关, 而且与汛期的洪水总量有关。因此隧道断面设计条件下河床冲刷的水流边界条件应是流域发生百年一遇的洪水过程, 以及汛期4~7月的洪量也基本达到百年一遇这样极端的洪水过程。为此根据前面建立的3种预测方法, 进行隧道河段在极端洪水作用下冲刷深度的预测研究。

#### 4.1 预测输入条件

(1) 水流边界条件 根据河床演变分析, 隧道工程断面最大冲刷深度主要由洪水冲刷作用造成。为此统计

了上游富春江、新安江建库 40 年以来的径流资料, 统计了汛期 120 d、30 d 及 7 d 等多时段的洪水特征值, 分别得到百年一遇的汛期洪量约为 390 亿  $\text{m}^3$ 、158 亿  $\text{m}^3$ 、100 亿  $\text{m}^3$ ; 百年一遇的洪峰流量为 23 100  $\text{m}^3/\text{s}$ 、最大月平均流量 6 070  $\text{m}^3/\text{s}$  及汛期月平均流量为 3 678  $\text{m}^3/\text{s}$ 。选择 1995 年 4~7 月为典型水文年, 该年汛期洪量 290 亿  $\text{m}^3$ , 最丰的 30 d 洪量为 130 亿  $\text{m}^3$ , 最大洪峰流量为 14 000  $\text{m}^3/\text{s}$ , 如在此基础上再遭遇百年一遇洪水过程, 洪量约为 100 亿  $\text{m}^3$ , 洪峰为 23 100  $\text{m}^3/\text{s}$  后, 则洪峰流量和汛期洪量基本满足百年一遇的设计条件。以此过程作为动床数模的边界条件, 将 1995 年 4~7 月水文过程同比放大至上述设计条件作为物理模型的上游水边界条件, 下边界为对应的洪水期大、中、小潮组合潮位过程。

(2) 泥沙条件 钱塘江河口段上游流域来沙很小, 年输沙量约 500 万 t, 含沙量仅 0.2  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 为少沙河流; 下边界激浦断面含沙量与潮差大小有关, 大潮平均为 5.0  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 中潮 3.5  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 小潮 2.0  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。因此下边界涨潮时按上述条件给定, 落潮时不需给含沙量边界条件。

(3) 泥沙粒径沿河床垂线分布 泥沙颗粒沿河床垂线分布是河床极限冲刷深度研究的一个重要参数。据地质初勘情况知, 隧道断面床面至高程 3.8 m 的泥沙为粉砂, 中值粒径约 0.04 mm; 3.8 ~ -3.2 m 为粉质粘土, 中值粒径 0.025 mm; -3.2 ~ -8.2 m 层泥沙粒径 0.08 mm; -8.2 ~ -14.8 m 层为粉质粘土, 泥沙粒径 0.005 ~ 0.01 mm。

#### 4.2 预测成果分析

(1) 基于河床演变的预测方法 将设计洪水条件  $Q_1 = 3678 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_2 = 6070 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $Q_3 = 23100 \text{ m}^3/\text{s}$  以及前面求得的回归系数  $C_0 \sim C_3$  代入式(1), 可得隧道断面在百年一遇设计洪水条件下的过水断面面积约为 16 057  $\text{m}^2$ , 再利用过水面积与主槽高程的相关关系(图 4)可得设计条件下最大冲刷深度的平均值为 -4.0 m, 考虑置信度, 取 -4.0 ~ -6.4 m 作为实测资料分析的成果。

(2) 基于动床数学模型的计算方法 根据数学模型计算得到百年一遇洪水作用后隧道附近地形平面分布及隧道断面的形态(图 6)。结果表明在 1995 年 7 月的河势下, 遭遇百年一遇洪水过程, 隧道断面最深点高程为 -6.8 m, 离左岸约 450 m, 断面最深点冲刷约 3 m, 离左岸 400 m 范围内冲刷 2~4 m, 700~1 200 m 范围内 3~5 m。主要原因是隧道右岸处于微弯段的凹岸, 大洪水的水流顶冲点有所下移, 冲刷深度相对要深一些。为分析径流大小对河床最大冲刷深度影响的敏感性, 又计算了洪峰流量为三百年一遇( $Q = 28400 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 的最大冲刷深度, 结果仅增加 0.5 m 左右。为探讨初始

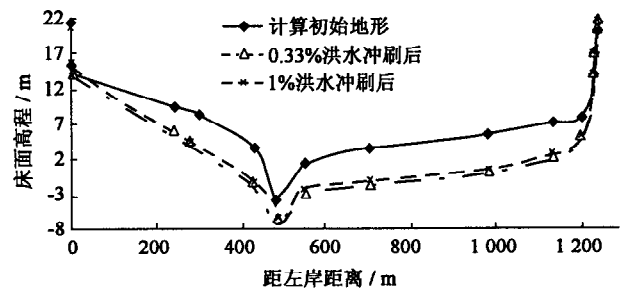


图 6 百年一遇特大洪水冲刷后隧道断面附近地形平面图  
Fig.6 Topography of the river bed nearby the tunnel after the 100-year flood

地形对最大冲刷深度平面分布的影响, 选用 1984 年 4 月的江道地形, 隧道断面最深点高程为 -4.6 m, 主槽位置在离左岸约 1 000 m 处, 利用动床模型进行了冲刷计算, 结果表明, 隧道断面最低冲刷高程为 -7.0 m, 位置在离左岸 960 m 附近。因此, 综合动床数模的各种计算成果, 隧道断面最低高程 -6.8 ~ -7.4 m, 位于左岸 450 ~ 1 000 m。

(3) 基于动床物理模型的预测结果 动床物理模型的上边界条件根据前面求得的水沙过程, 下边界潮位及泥沙条件采用动床数学模型计算得到, 模型试验的潮型个数按动床物模冲淤验证得到的河床变形时间比尺确定, 初始地形选用 1995 年 4 月实测地形, 试验得到的隧道断面附近的河床冲淤分布参见图 7。可见隧道断面附近河床最深点高程约 -7.7 m, 位于距左岸 960 m 处, 距右岸 300 m, 隧道断面附近右岸出现深槽冲深较大的原因主要是洪水期弯道弯顶下移, 主流贴近南岸所致。在上述试验的基础上, 还就初始地形的高低及洪峰流量大小对冲刷深度的敏感性分析, 结果表明在相同洪水历时条件下, 洪水流量越大, 冲刷高程越低, 当流量大于 20 000  $\text{m}^3/\text{s}$  时, 到达平衡后的高程基本相同, 差异在 0.5 m 内; 最深点位置随洪水流量增大也逐渐右移, 当流

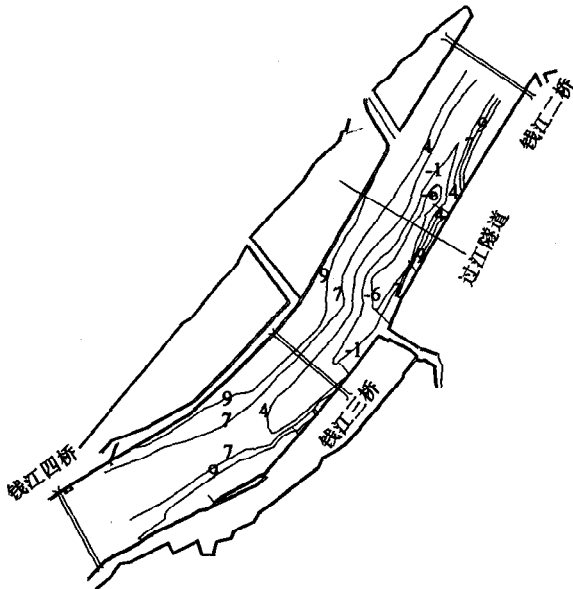


图 7 动床物理模型试验成果  
Fig.7 Experiment result of the physical model

量在 5000 ~ 10000 m<sup>3</sup>/s, 最深点在离左岸 500 m 左右; 不同的起冲高程, 在相同的洪水条件下其冲刷高程有差异, 分别以较高和较低的江道地形作为起冲地形, 冲刷高程相差约 2 m, 前者比后者高。

(4) 成果讨论及过江隧道断面冲刷线确定的综合分析  
前面采用河床演变分析法、动床数学模型及动床物理模型分别对隧道河段极端洪水作用下的冲刷深度进行了研究, 每种研究方法各有侧重和优缺点。河床演变分析法的计算结果只与汛期、最大月平均流量和洪峰流量大小有关, 与洪水的过程无关, 其精度取决于样本的精度。钱塘江河口汛期地形测量一般在洪水后, 洪水过程中的最深点不一定能测到。因此, 基于河床演变的分析方法的结果往往偏小。而数模与物模则是基于过程模拟的预测方法, 只要数据采集时间足够密, 能测到过程中的最深点, 但不足之处在于主槽最深点及其位置与初始地形、水沙过程有较大的影响, 且目前动床数模还是动床物模在模拟河槽横向摆动方面还存在一定的困难。从图 6 与图 7 的数学模型与

物理模型的研究结果比较可以看出, 两者的最深点高程基本一致, 但其位置有差异, 主要原因是两者的初始地形不同, 数学模型是以 1995 年 7 月为初始地形, 最深点在左侧, 水动力条件是在前期径流过程的基础上再遭遇 7 天百年一遇洪水过程, 而物理模型是以 1995 年 4 月为初始地形, 断面平坦, 水沙过程是 1995 年 4 月至 7 月的过程同比放大至百年一遇设计条件, 尽管两种的最大洪峰及洪量相同, 但位置的差异比较明显。因此, 一般通过不同的初始地形及水沙过程进行敏感性分析, 以弥补其不足。

过江隧道工程建设的关键技术参数是断面设计冲刷线的确定。本文在前面三种研究手段分析的基础上, 主要根据隧道断面的长系列实测地形资料分析得到的实测下包络线及其走向(图 3)、动床数学模型及动床物理模型试验得到的最低冲刷高程及横向分布、模型试验及计算的敏感性分析等成果, 经综合比较分析得到的设计冲刷线(图 8)。从图 8 可见, 动床数学模型和物理模型等预测得到的冲刷线与地质详堪的资料⑤-1 层的层顶(粉质粘土层, 泥沙中值粒径为 0.005 mm)高程线基本吻合, 进一步表明了三种预测方法的可靠性。

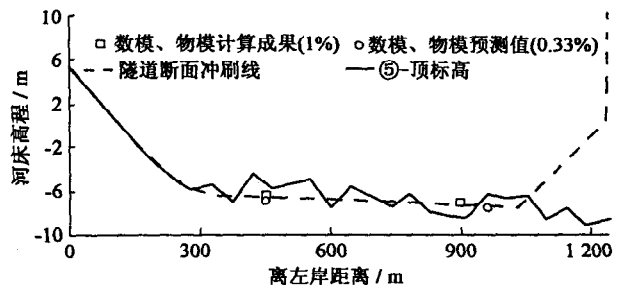


图 8 隧道河床断面冲刷线

Fig.8 Erosion curve of the cross-section in the river bed nearby the tunnel

## 5 结 论

洪潮水流作用下钱塘江河口闸口至仓前段河床冲淤幅度大, 在此河段埋设过江隧道, 极端洪水作用下的冲刷深度是工程设计的关键参数之一。单一的研究方法难以保证结果的可靠性, 采用多学科的研究手段综合分析确定非常必要。

(1) 基于河床演变分析的方法, 根据河口河相关关系式建立隧道断面洪水冲刷面积与钱塘江河口汛期平均流量、最大月平均流量和洪水洪峰流量的回归预报关系, 通过钱塘江河口的实测地形资料进行相关性和显著性检验, 结果表明基于河床演变分析的预报模型的精度可用于实际预报。

(2) 建立了钱塘江河口平面二维动床数值模拟和动床物理模型, 根据钱塘江河口的实测水沙资料和河床地

形资料, 对动床数学模型和物理模型均进行了验证, 结果表明本文的动床数学模型和物理模型能够模拟钱塘江河口在极端洪水作用下的水沙运动及河床的冲淤变化。

(3) 基于建立的洪水冲刷深度预报模型, 综合研究了钱塘江河口过江隧道河段在极端洪水作用下的冲刷深度, 探讨了模型水沙边界条件的确定, 并对各预测模型成果进行了讨论。基于河床演变分析的方法、动床数学模型及动床物理模型的预测成果与地质详勘的实测资料基本吻合, 表明了预测模型的可靠性, 综合研究得到的预测成果可为过江隧道的合理埋设提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] SUMER B M, WITTHEHOUSE R J S, TORUM A. Scour around coastal structures: A Summary of recent research[J]. Coastal Engineering, 2001, 44(2): 153 - 190.
- [2] 伍冬领, 邢艳, 谢晓波, 等. 钱江四桥桥墩局部冲刷试验研究[J]. 桥梁建设, 2005(2): 19 - 22. (WU Dong-ling, XING Yan, XIE XIAO-bo, et al. Test study of local scouring at Piers of the 4th Qiantang River bridge[J]. Bridge Construction, 2005(2): 19 - 22. (in Chinese))
- [3] 史英标, 李志永, 宋立松, 等. 河口河床长历时河床演变数值模拟初探[J]. 泥沙研究, 2006(3): 40 - 46. (SHI Ying-biao, LI Zhi-yong, SONG Li-song, et al. Modeling of long-term fluvial processes in the estuarine zone[J]. Journal of Sediment research, 2006(3): 40 - 46. (in Chinese))
- [4] 史英标, 林炳尧, 徐有成, 等. 钱塘江河口洪水特性及动床数值模拟[J]. 泥沙研究, 2005(1): 7 - 14. (SHI Ying-biao, LIN Bing-yao, XU You-cheng, et al. Characteristic of the flood level in the Qiantang estuary and mobile-bed model for forecast[J]. Journal of Sediment research, 2005(1): 40 - 46. (in Chinese))
- [5] 李义天, 赵明登, 曹志芳. 河道平面二维水沙数学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (LI Yi-tian, ZHAO Ming-deng, CAO Zhi-fang. 2-D flow and sediment mathematical model in channels[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2001. (in Chinese))
- [6] FALCONER R A, OWENS P H. Numerical modeling of suspended sediment fluxes in estuarine waters[J]. Coastal of Shelf Science, 1990, 31(6): 745 - 762.
- [7] 史英标. 潮汐河口平面二维悬沙输移及河床变形数值模拟研究[A]. 河床演变与泥沙防治[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000. (SHI Ying-biao. Study on numerical model of 2-D suspended load transport and river bed deformation[A]. Fluvial and sediment prevention[C]. Urumchi: Xinjiang People Press, 2000. (in Chinese))
- [8] LIN B N, HUANG J, LI X. Unsteady transport of suspended load at small concentration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1983, 109(1): 86 - 98.
- [9] EINSTEIN H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows[J]. U S Dept Agriculture, Soil Conservation, Ser Tech Bull, 1950, 1026.
- [10] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1 - 9. (DOU Guo-ren. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. Journal of Sediment research, 1999(6): 1 - 9. (in Chinese))
- [11] 韩曾萃, 程杭平. 钱塘江河口河床变形计算方法[A]. 第二次国际河流泥沙学术会议论文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HAN Ceng-cui, CHENG Hang-ping. Calculated method of river bed deformation in Qiantang estuary[A]. Proceeding of the second international symposium on river sedimentation[C]. Beijing: China Water Power Press, 1983. (in Chinese))
- [12] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1980. (Wuhan institute of hydraulic and engineering. River sediment engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1980. (in Chinese))

## Prediction of erosion depth under the action of the exceptional flood in the river reach of a tunnel across the Qiantang estuary\*

SHI Ying-biao<sup>1,2</sup>, LU Hai-yan<sup>1,2</sup>, YANG Yuan-ping<sup>1,2</sup>, CAO Ying<sup>1,2</sup>

(1. *Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;*

2. *Key Laboratory of Estuarine and Coastal of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China*)

**Abstract:** The Qiantang estuary is a strong alluvial estuary. The sedimentation/erosion extends usually reaches 5 – 10 under the action of the flood or tidal flow. So the riverbed erosion extend is the key technical problem for the tunnel project across the Qiantang estuary. In the paper, three prediction methods on the maximum erosion depth of the river bed nearby this tunnel are set up based on the analysis of the hydraulic geometry of river channel, the sediment mathematical model and the movable bed physical model. These models are calibrated using hydrographic field data as well as those on the historical morphological changes in the Qiantang estuary. After the calibration these models are used to investigate the maximum scour depth caused by an exceptional flood in the cross-section of a tunnel across the Qiantang estuary. Finally, the maximum erosion depth and erosion curve of the riverbed cross-section nearby the tunnel under the 100-year flood is predicted by the three predicting methods, and the predicted result agrees very well with the geologic drilling data. It is shown that the predicted result is basically reasonable and the scientific basis is offered for the study of this tunnel.

**Key words:** hydraulic geometry of river channel; sediment mathematical model; movable-bed physical model; maximum erosion depth under the exceptional flood; Qiantang estuary; prediction

---