

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.001

魏帅, 李国禄, 陈述. 长江下游过江隧道河段最大冲深数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 1-8. (WEI Shuai, LI Guolu, CHEN Shu. Mathematical model studies on maximum bed erosion depth near Shiyezhou river-crossing tunnel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 1-8.)

长江下游过江隧道河段最大冲深数值模拟

魏 帅¹, 李国禄², 陈 述³

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 中交一航局第三工程有限公司 辽宁 大连 116083; 3. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司 湖北 武汉 430050)

摘要: 隧道工程所在位置河床的最大冲刷深度是过江隧道方案设计的关键参数之一,合理确定最大冲刷深度能为保证工程安全和减少投资提供重要设计依据。在分析近年来河道演变特点和前人所做研究的基础上,以长江下游仪征水道世业洲河段拟建过江隧道为例,分析工程河段的来水来沙特点,采用二维水流泥沙数学模型对不同水文年条件下河段河床最大冲刷深度进行了研究。在验证模型水流和泥沙冲淤相似的前提下,确定了动床模拟的不利水沙系列为2007—2010年+1998年+300年一遇洪水流量过程,并结合地质勘测资料对模拟结果进行了合理预测。最终确定过江隧道断面河床左汊最大冲深为10.85 m,右汊最大冲深为8.87 m,该结果对拟建过江隧道工程而言偏于安全。

关键词: 过江隧道; 河道演变; 水沙条件; 最大冲深

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)01-0001-08

长江下游顺直(微弯)分汊河段众多,河段内洲滩冲淤及左右汊兴衰变化剧烈,规划设计过江通道方案时常采用跨河桥梁或穿江隧道。相比桥梁,过江隧道是一种比较隐蔽的工程,隧道交通不会受天气干扰,工程建设不受通航净空高度的限制,可靠性也较高。当采用隧道过江时,工程所在位置的河床最大冲刷深度是规划设计的关键参数之一,它直接关系到工程运营的安全性和投资经费。因此合理确定最大冲深能为保证工程安全和减少投资提供关键的设计依据。

河床最大冲刷深度一般包括工程引起的局部冲刷和河流自然冲刷两种类型。对于第一类冲刷,B. M. Summer等^[1]对此作过系统的总结,倪志辉等^[2]通过建立平面二维潮流数学模型对复合桥墩附近水域可能发生的最大局部冲深位置进行了研究。但隧道埋设在河床下,并未干扰河流的水沙运动,因此主要是第二类冲刷。相比而言,对河床自然冲刷问题国内外研究较少,史英标等^[3]对钱塘江河口过江隧道河段极端洪水条件下的冲刷深度开展了研究,但对特大洪水对应水沙过程的确定是基于钱塘江河口段水沙特点,对来沙过程的确定描述较为简单;岳红艳等^[4]结合武汉市轨道交通三号线穿越汉江隧道,验证了河工模型试验和数学模型在模拟隧址断面河床最深点高程上的一致性,但汉江河段水沙过程主要受上游丹江口水库控制和下游武汉河段水流顶托作用影响;何用等^[5]对珠江三角洲拟建过江隧道工程所在的复杂网河区河道进行了极限冲刷的模拟计算,认识到河道最大冲深受河道水动力特点影响较大,与三角洲地区径流潮流运动特点相对应,网河河道的泥沙既有上游径流挟带泥沙,也有下游上溯潮流挟带泥沙,故其泥沙来源和冲淤变化特性有所不同。张为等^[6]以长江南京河段拟建纬三路过江隧道为例,对三峡水库运行以来河段来水来沙特点变化

收稿日期: 2015-03-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB417002);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB04B00)

作者简介: 魏 帅(1990—),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面研究。

E-mail: weishuai1229@163.com

进行过一定探索性研究,但对河床地质情况考虑较少。

水沙过程选择的正确与否直接关系到预测结果的合理性,而三峡水库蓄水拦沙作用改变了天然下泄的水沙过程,给特大洪水的水沙过程,尤其是沙量过程的确定增加了难度。在总结前人研究的基础上,本文以拟建的长江世业洲隧道方案为背景,采用河演分析、水沙数学模型、地质勘探资料相结合的方法对隧址河床最大冲刷深度进行研究。重点考虑三峡水库蓄水拦沙作用对长江下游水沙过程的影响,对确定不利水沙系列进行讨论,并利用地质勘探资料,结合不同地质层抗冲性能,对复杂地质情况影响下隧址河段最大冲刷范围作出合理预测和分析,为隧道埋深和过江通道比选提供参考和依据。

1 河段工程概况

世业洲隧道位于长江仪征水道中下段。仪征水道上起三江口,下至瓜州,全长约 31 km,为微弯分汉河型,世业洲将水道分为左右两汉。其中,世业洲汉道自泗源沟至瓜洲渡口,长约 20 km,左汉为支汉,呈顺直型,平均河宽约 880 m;右汉为主汉,是曲率比较小的弯曲河道,平均河宽约 1 450 m。拟建世业洲隧道位于世业洲中下部,隧道断面左侧位于世业洲左汉土桥附近,隧道断面右侧位于世业洲右汉七摆渡附近,隧道所在河段河势和工程平面位置见图 1。

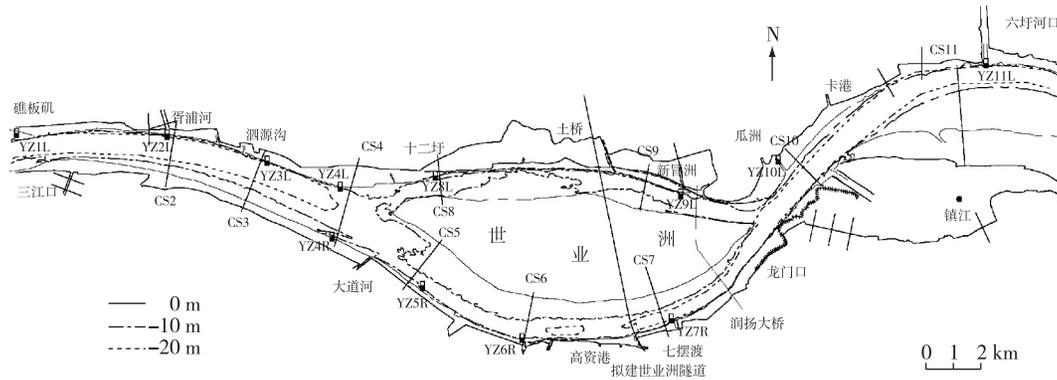


图 1 仪征水道河势

Fig. 1 Sketch of Yizheng waterway

2 河段近期演变特点

2.1 汉道分流比变化

近年来,世业洲汉道处于左汉缓慢发展、右汉相对萎缩阶段,左汉分流比缓慢增加。20 世纪 70 年代以前,左右汉的分流一般维持在 1:4.4 左右,即左汉的分流比为 18.5%,两汉处于相对稳定阶段。20 世纪 70 年代中期至 90 年代初期,左汉分流比开始缓慢增加,年均增大约 0.1%;1995 年后连续大洪水作用期间,左汉分流比增加速度明显加大,1997—1999 年年均增大达 2.8%;2000 年以后增速又趋缓,但增长幅度相对 1998 年大洪水前有所增大,至 2012 年 12 月左汉分流比增加至 38.8%。

2.2 隧址处横断面变化

目前世业洲总体冲淤变化大致表现为左汉整体冲深,局部位置冲刷幅度比较大,而右汉表现为“冲滩淤槽”,中下段世业洲右缘边滩淤长,深槽冲刷^[7]。隧址附近断面冲淤变化特点如下。

隧址左汉断面在 1964—1994 年冲淤变化较大(见图 2),左岸冲刷崩退,河道展宽;随着护岸工程及加固工程的实施,河道左右岸边界趋于稳定,但河床仍有所变化,主要表现为深槽冲刷发展,这与世业洲左汉分流比增加是相对应的。右汉断面在 1987 年以前,七摆渡以下随着右岸自上而下的崩退,深槽右移,1987 年以

后随崩退减缓而渐趋稳定。近年来,右汊断面表现为世业洲右缘淤积,深槽有冲有淤,但幅度较小。左右汊断面总体形态比较稳定。

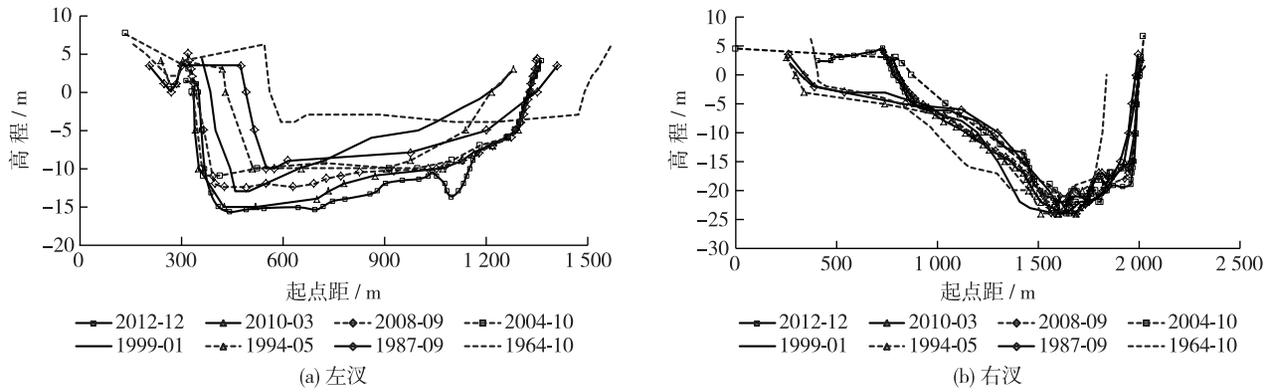


图 2 世业洲隧道左右汊河床断面形态变化

Fig. 2 Section morphologic variation of left and right branch channels at Shiyezhou tunnel

从表 1 的断面统计数据可见,2004 年 1 月至 2012 年 12 月左汊最深点处有所冲刷,冲深为 4.7 m;右汊最深点处有所淤积,淤高约 2.0 m。从最深点的位置来看,基本上左汊均位于左侧,右汊均位于右侧,横向摆动幅度均在 100 m 以内,摆动幅度较小。

表 1 世业洲隧道左右汊河床最深点特征值统计

Tab. 1 Bed elevation of left and right branch channels at Shiyezhou tunnel

| 日期 | 左汊 | | 右汊 | |
|---------|-------|---------|-------|---------|
| | 起点距/m | 最深点高程/m | 起点距/m | 最深点高程/m |
| 1964-10 | 633 | -4 | 1 545 | -22 |
| 1987-09 | 550 | -10 | 1 530 | -24 |
| 1997-03 | 565 | -13 | 1 592 | -24 |
| 1999-01 | 460 | -13 | 1 580 | -24 |
| 2004-01 | 416 | -11 | 1 645 | -24 |
| 2008-09 | 426 | -12.5 | 1 679 | -24 |
| 2010-03 | 468 | -15.3 | 1 616 | -24.8 |
| 2011-01 | 466 | -15.5 | 1 573 | -23.6 |
| 2012-12 | 443 | -15.7 | 1 662 | -22 |

3 数学模型的建立与验证

3.1 模型建立

数学模型的基本方程包括水流连续方程、运动方程和不平衡泥沙输移及河床变形方程,限于篇幅,在此主要介绍泥沙输移及河床变形方程:

(1) 悬移质不平衡输移方程:

$$\frac{\partial(HS_i)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H u S_i) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H v S_i) \right] = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\varepsilon_\xi}{\sigma_s} \frac{C_\eta}{C_\xi} H \frac{\partial S_i}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\varepsilon_\eta}{\sigma_s} \frac{C_\xi}{C_\eta} H \frac{\partial S_i}{\partial \eta} \right) \right] + \alpha \omega_i (S_i^* - S_i) \quad (1)$$

式中: α_i 为泥沙的含沙量恢复饱和系数; ω_i 为第 i 组泥沙沉速; S_i 为分组粒径含沙量; S_i^* 为分组粒径挟沙力; $\varepsilon_\xi, \varepsilon_\eta$ 分别为坐标系 ξ, η 方向的泥沙扩散系数, $\varepsilon_\xi = \varepsilon_\eta = \nu_t$; σ_s 取常数 1.0。

(2) 非均匀推移质按其粒径大小可分成 n_b 组, 窦国仁^[8] 推移质不平衡输移方程为:

$$\frac{\partial h S_{bL}}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta h u S_{bL}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi h v S_{bL}) \right] = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\varepsilon_\xi}{\sigma_b} \frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial h S_{bL}}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\varepsilon_\eta}{\sigma_b} \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial h S_{bL}}{\partial \eta} \right) \right] + \alpha_{bL} \omega_{bL} (S_{bL}^* - S_{bL}) \quad (2)$$

式中: S_{bL}^* 为第 L 组推移质的挟沙能力, $S_{bL}^* = g_{bL}^* / (\sqrt{u^2 + v^2} h)$, g_{bL}^* 为单宽推移质输沙率; S_{bL} 为床面推移层的含沙浓度, $S_{bL} = g_{bL} / (\sqrt{u^2 + v^2} h)$, α_{bL} 为第 L 组推移质泥沙的恢复饱和系数; ω_{bL} 为推移质沉速, $\sigma_{bL} = 1$ 。推

移质与悬移质的划分通常采用悬移指标 $\omega/k u_*$ 的概念, $\omega/k u_* \geq 5$ 时为推移质, 当 $\omega/k u_* < 5$ 时为悬移质。根据实测泥沙级配资料, 模型将泥沙粒径分为 9 组, 分别为 0.002, 0.006, 0.012, 0.0235, 0.047, 0.094, 0.187 5, 0.375, 0.750 mm。

$$(3) \text{ 河床变形方程: } \gamma_0 \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial g_{b\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial g_{b\eta}}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^n \alpha \omega_i (S_i - S_i^*) \quad (3)$$

式中: $g_{b\xi}$, $g_{b\eta}$ 分别为坐标系 ξ, η 方向的推移质输沙率, 即 $(g_{b\xi}, g_{b\eta}) = (g_b \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, g_b \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}})$, γ_0 为淤积物干重度。

基于 Fortran 语言编制了平面二维水流泥沙数学模型计算程序, 在正交贴体曲线坐标系下采用控制体积分法离散方程, 并利用 S. V. Partaker 等^[9] 提出的 SIMPLE 计算式^[10-11] 求解耦合方程, 计算采用不等距网格, 网格线基本保持正交。数值计算定解条件为进口给定流量及含沙量, 出口给定水位。

3.2 模型验证

为检验数学模型及有关参数选取的合理性, 利用收集的地形、水文测验资料对模型进行了水流和泥沙冲淤验证, 模型计算范围上迄三江口, 下至六圩河口, 模拟河段全长约 40 km。由 2014 年 7 月实测水文测验资料对模型水位、河道分流比及流速进行了验证。仪征水道内水文测量断面和水位测站沿程布置如图 1。图 3 为沿程水位和典型断面流速的验证结果, 可见验证计算与实测值较为一致。

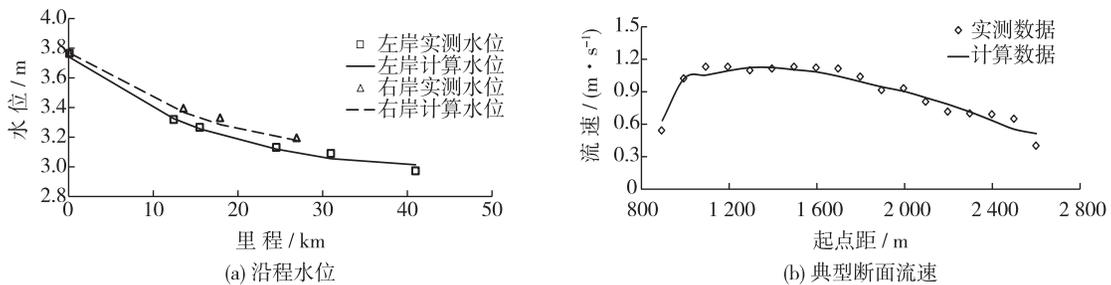


图 3 模型水位与流速验证

Fig. 3 Results of computed and observed water levels and velocities at project location

模型冲淤验证采用 2010 年 3 月测图地形作为初始地形, 2012 年 12 月测图地形作为验证地形。进口流量和含沙量控制值均由大通站实测流量和含沙量过程概化求得 (5~6 d 概化成一级流量), 出口水位由镇江站多年水位-流量关系插补得到, 验证河段涨水期、落水期以及整个水文年的冲淤变化。河段河床冲淤分布验证如图 4 所示, 计算与实测冲淤部位和冲淤分布符合较好, 符合《内河航道与港口水流泥沙、模型技术规程》(JTJ 232—1998) 的要求。以上结果表明模型的计算方法和参数选取基本合理, 其水流泥沙运动基本反映了天然河道的情况, 可用于最大冲刷深度的预测。

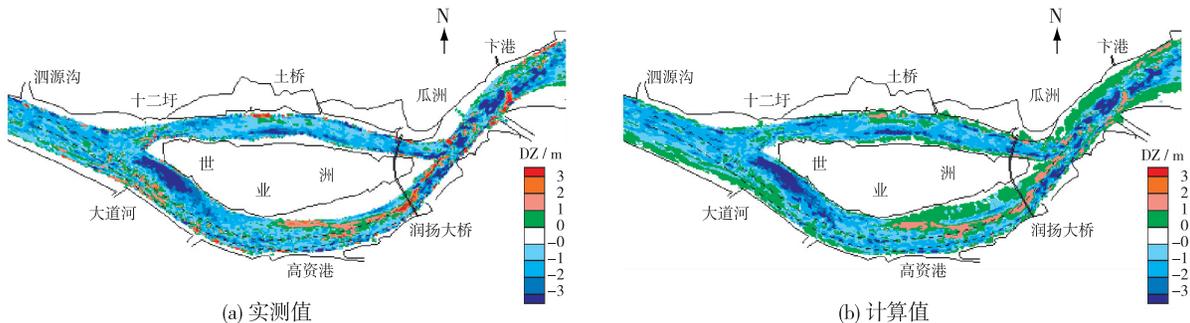


图 4 工程河段实测与计算冲淤分布对比 (2010-03—2012-12)

Fig. 4 Comparison between calculated and measured scouring-silting distributions from Mar. 2010 to Dec. 2012

4 过江隧道河段最大冲深预测

4.1 河段水流条件分析

世业洲隧道位于世业洲中下部。世业洲左汊主流居中,右汊主流靠右岸,表现为弯道水流运动特性。在300年一遇、100年一遇和多年平均流量级条件下,隧道左汊断面水位为2.55~7.38 m,右汊为2.55~7.45 m;图5为各流量级条件下隧址断面流速分布,当流量为300年一遇洪水时,断面左汊最大流速为2.69 m/s,右汊最大流速为2.91 m/s。

4.2 水沙系列的选择

水沙系列代表性选择的正确与否,关系到工程的设计、造价及二维数值模拟成果的正确性^[12]。针对研究河段来水来沙特点,考虑三峡水库蓄水以来进口水沙条件变化的影响,从工程安全角度出发,提出水沙条件的确定方法,并确定不利水沙条件。

4.2.1 水文年的选择

(1)系列年的选择。一般水沙系列是选择一典型系列年加上特大洪水年(如100年一遇、300年一遇大洪水)作为计算条件进行模拟。对于系列年,主要是模拟估算年内、年际的冲刷幅度及趋势性变化。分析三峡蓄水前后大通站1950—2011年水沙资料,尽管蓄水以来上游来流量不大,多为中小水年,但沙量变化反映了三峡水库蓄水拦沙作用,输沙量明显小于蓄水前^[13]。三峡水库蓄水前,大通站多年输沙量为4.27亿t,蓄水后,2004—2011年年均输沙量为1.43亿t,较蓄水前减少了66%。图6给出了1951—2011年大通站逐年径流量和输沙量,由图可见,选择2007—2010年连续4年的系列

组合能较好地代表三峡建库后水沙变化的特点。考虑到1998年大洪水的特殊作用影响,有必要增加对其水沙流量过程的模拟,最终确定系列年为2007—2010年+1998年(300年一遇放大)。

(2)特大洪水年的确定。根据隧道的设计标准(100年一遇洪水设计、300年一遇洪水校核),从工程安全角度出发,选择300年一遇洪水作为特大洪水过程。对于300年一遇洪水过程的确定可沿用以往的研究成果^[14],具体为采用1998年作为典型年,按照300年一遇的洪峰流量过程进行放大。

4.2.2 特大洪水年沙量确定 考虑三峡水库运行后的蓄水拦沙作用,需结合水库运行后实测资料确定特大洪水年的沙量过程。三峡水库蓄水前,长江中游以下各河段泥沙主要依靠上游和沿程河床补给,而三峡水库蓄水运行以后,将上游的绝大部分来沙拦蓄在水库内,使得水库下游泥沙的来源和组成发生了较大变化,下游各河段泥沙只能依靠沿程河床的补给。从大通站输沙量历史统计资料中可以看出三峡工程运行后,运用模型计算的河段总输沙量比实测值都要大一些,因此不能单纯运用某一年份的输沙量过程进行放大得到特大洪水年的沙量过程。在已有三峡水库运行实测资料的情况下,通过拟合流量和输沙率的相关关系,确定特大洪水年的沙量过程。这里采用三峡蓄水后(2004—2011年)大通站流量输沙率资料,点绘流量与输沙量的相关关系图(见图7),并绘制泥沙下包线。从图7中可以看出,随着流量的增大,输沙量也逐渐增大,且两者能有较好的幂函数相关关系,因此可以利用流量输沙率关系推求特大洪水对应的沙量过程。基于工程安全考虑,采用流量输沙率关系下包线推求特大洪水年对应的沙量过程。

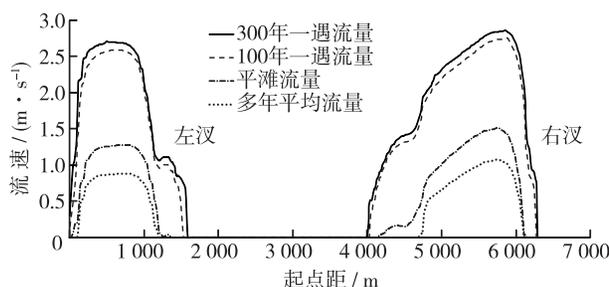


图5 世业洲隧道所在断面流速分布

Fig. 5 Velocity distribution of cross section at Shiyezhou tunnel

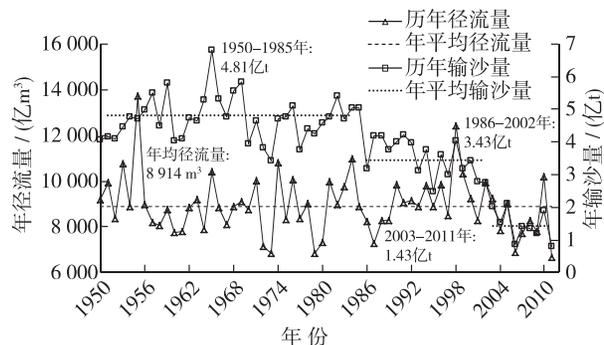


图6 1950—2011年大通站年径流量、年输沙量分布

Fig. 6 Annual runoff and sediment load at Datong station from 1950 to 2011

4.3 最大冲深预测

利用建立的二维数学模型和选取的水沙系列条件,对工程位置最大冲深进行计算分析。世业洲隧道所在断面左汊现状河床最低点高程为 -15.39 m ,右汊河床最低点高程为 -26.62 m 。从隧址断面地质勘探钻孔资料可知:左汊河床组成可分为覆盖层和基岩,上层为粉细砂,厚度 34 m 左右,层底高程为 -50.10 m ;中间层为含砾中粗砂,厚度 9 m 左右,层底高程为 -59.50 m ;最底层为砂岩。右汊中部深槽河床组成为含砾中粗砂和基岩,深槽最低点高程距基岩仅 0.9 m ;右汊两侧河床覆盖层为粉细砂和基岩,其中粉细砂厚度约 $4\sim 6\text{ m}$ 。

表2给出了冲刷平衡后隧址断面的冲深统计数据,冲刷后现状河床左汊深泓点高程为 -25.23 m ,对应的冲刷深度 10.73 m ;右汊河床深泓点高程为 -27.12 m ,对应的冲刷深度 1.51 m 。根据隧道所在断面各点冲深最大值,得到各点冲刷深度的包络线如图8所示,与原始地形相比,左汊断面最大冲深 10.85 m ,右汊断面最大冲深为 8.87 m 。图9为隧道断面最深点出现时河床冲淤变化分布,总的来说,在2007—2010年+1998年系列水沙年和300年一遇特大洪水来流过程作用下,世业洲左汊以冲刷为主,且冲刷主要发生在深槽部位;右汊进口段“冲滩淤槽”,中下段以冲刷为主,冲刷主要在右岸主槽部分。

表2 世业洲隧址断面冲刷统计

Tab. 2 Statistics of cross section erosion at Shiyezhou tunnel

| 水文条件 | 汊道 | 断面最大冲刷深度/m | 现状河床深泓点高程/m | 冲刷后断面深泓点高程/m | 深泓点冲刷深度/m |
|--------|-------|------------|-------------|--------------|-----------|
| 300年一遇 | 世业洲左汊 | 8.53 | -15.39 | -22.95 | 8.45 |
| 特大洪水年 | 世业洲右汊 | 7.67 | -26.62 | -27.12 | 1.51 |
| 系列水文年 | 世业洲左汊 | 10.85 | -15.39 | -25.23 | 10.73 |
| | 世业洲右汊 | 8.87 | -26.62 | -27.12 | 1.51 |

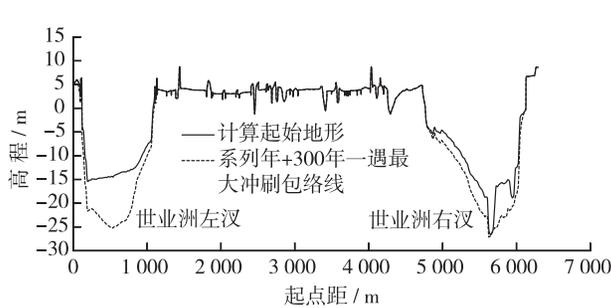


图8 河床最大冲刷包络线

Fig. 8 Envelope curves of maximum riverbed erosion depth

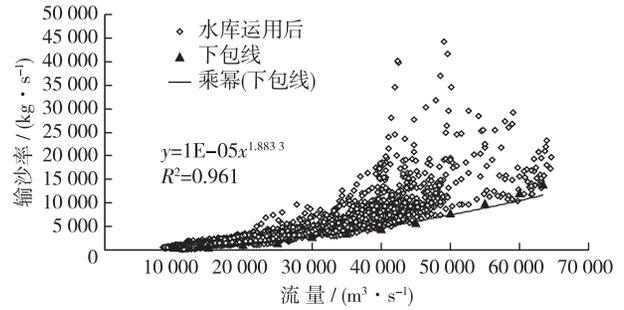


图7 大通站流量与输沙率相关关系

Fig. 7 Relationship between discharge and sediment transport rate at Datong station

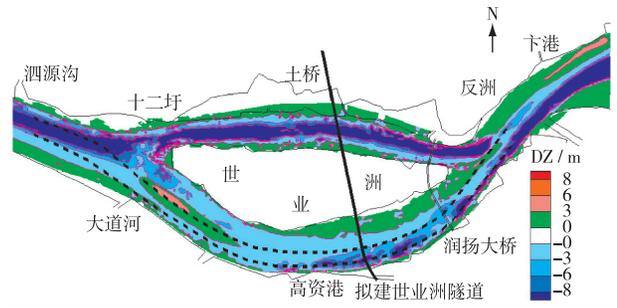


图9 隧道断面最深点出现时河床冲淤变化

Fig. 9 Riverbed changes of tunnel section at maximum erosion depth

从以上结果可以看出河床地质情况对冲刷深度有很大影响,左汊河床和右汊两侧河床暴露在表层的均为粉细砂,其抗冲性差,易被冲刷,所以这些位置处冲刷深度范围比较大;而右汊中部深槽表层为含砾中粗砂,抗冲刷能力较强,能有效限制冲刷范围的扩大,冲深仅 1.51 m 。最终在保证工程安全的基础上,可以确定隧址断面左汊最大冲深为 10.85 m ,右汊最大冲深为 8.87 m ,冲刷后断面最深点高程左汊 -25.23 m ,右汊 -27.12 m ,预测结果比较合理,可作为隧道合理埋设的参考依据。

5 结 语

以仪征水道世业洲河段拟建过江通道为例,采用河演分析、水沙数学模型、地质勘探资料相结合的手段对隧址河床最大冲刷深度进行了研究,讨论了三峡水库蓄水拦沙作用影响下不利水沙系列的确定,并利用地质勘探资料,对复杂地质情况影响下隧址河段最大冲深范围作出合理分析和预测,得出以下结论:

(1)分析了工程河段来水来沙特点,建立世业洲隧道二维水沙数学模型,利用收集的地形、水文测验资料对模型进行水流和泥沙验证,验证结果符合较好。

(2)在验证相似基础上,合理确定了动床模拟的计算水沙系列条件。分析得出2007—2010年连续4年的系列组合能较好地代表三峡建库后水沙变化的特点,最终确定水沙系列为2007—2010年+1998年+300年一遇洪水流量过程。

(3)利用数模预测了在不同水文年条件下工程引起的河床冲淤变化,总体上左汊河床和右汊两侧表层粉细砂河床冲刷深度范围比较大;而右汊中部深槽含砾中粗砂表层,抗冲刷能力较强,冲深仅1.51 m,结果充分说明河床地质条件对冲刷深度的重要影响。最终预测的隧址断面最大冲刷深度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, WITHEHOUSE R J S, TORUM A. Scour around coastal structures: a summary of recent research[J]. Coastal Engineering, 2001, 44(2): 153-190.
- [2] 倪志辉,王明会,张绪进. 潮流作用下复合桥墩局部冲刷研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 45-50. (NI Zhi-hui, WANG Ming-hui, ZHANG Xu-jin. Local scour of composite piers under action of tidal current [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 45-50. (in Chinese))
- [3] 史英标,鲁海燕,杨元平,等. 钱塘江河口过江隧道河段极端洪水冲刷深度的预测[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 685-692. (SHI Ying-biao, LU Hai-yan, YANG Yuan-ping, et al. Prediction of erosion depth under the action of the exceptional flood in the river reaches of a tunnel across the Qiantang estuary [J]. Advance in Water Science, 2008, 19(5): 685-692. (in Chinese))
- [4] 岳红艳,谷利华,张杰. 武汉汉江过江隧道河床演变及最大冲深预测[J]. 人民长江, 2010, 41(6): 35-39. (YUE Hong-yan, GU Li-hua, ZHANG Jie. Fluvial process and prediction of maximum erosion depth of riverbed in tunnel location across Hanjiang River[J]. Yangtze River, 2010, 41(6): 35-39. (in Chinese))
- [5] 何用,徐峰俊. 珠江洲头咀河段过江隧道工程极限冲刷模拟研究[J]. 人民珠江, 2007(5): 32-35. (HE Yong, XU Feng-jun. Pearl River Zhoutouzui section river-crossing tunnel construction limit scour modeling study[J]. Pearl River, 2007(5): 32-35. (in Chinese))
- [6] 张为,李义天,袁晶. 长江下游过江隧道河段最大冲刷深度预测研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 90-97. (ZHANG Wei, LI Yi-tian, YUAN Jing. Prediction of maximum bed erosion depth near a crossing tunnel located at lower reach Yangtze River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 90-97. (in Chinese))
- [7] 伍文俊,李青云,李国斌. 长江仪征水道航道条件分析及整治方案研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(6): 75-81. (WU Wen-jun, LI Qing-yun, LI Guo-bin. Navigable conditions and regulation schemes of Yizheng waterway in lower reaches of Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(6): 75-81. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [10] 许慧. 丁坝水流数值模拟关键技术研究[D]. 南京:南京水利科学研究所, 2009. (XU Hui. Research on key technique of numerical simulation in flow movement around dike-spur [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [11] 许慧,李国斌,尚倩倩,等. 淹没丁坝群二维水流数值模拟新方法[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 407-413. (XU Hui,

- LI Guo-bin, SHANG Qian-qian, et al. A new numerical simulation approach for 2-D flow with submerged spur-dikes [J]. *Advance in Water Science*, 2014, 25(3): 407-413. (in Chinese))
- [12] 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 Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [13] 蔡国正, 李国斌. 新建连镇铁路过江通道比选二维水沙数学模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2014. (CAI Guo-zheng, LI Guo-bin. 2-D flow and sediment mathematical model research on choosing river-crossing passage of the new Lian-Zhen railway project[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [14] 李国斌, 许慧. 长江南京以下深水航道二期工程仪征水道航道整治工程数学模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2014. (LI Guo-bin, XU Hui. Waterway regulation mathematical model study on Yizheng waterway of deepwater channel phase II project along Yangtze River downstream Nanjing[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))

Mathematical model studies on maximum bed erosion depth near Shiyezhou river-crossing tunnel

WEI Shuai¹, LI Guo-lu², CHEN Shu³

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *No. 3 Engineering Co. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Dalian 116083, China*; 3. *China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China*)

Abstract: The maximum riverbed erosion depth near the crossing tunnel is a key parameter for the tunnel design. And its reasonable determination can provide a critical design basis for project safety and reduction of investment. Based on the analysis of previous studies, a two-dimensional flow and sediment mathematical model was developed to predict the bed erosion depth at the tunnel location, based on a case study of the Shiyezhou river-crossing tunnel that would be constructed in the Yizheng waterway. The Yizheng waterway is a critical river section of the lower reaches of the Yangtze River, and the river-bed evolution in the past century is as follows: the head of Shiyezhou sandbar collapsed continually, the left branch developed slowly with the mainstream moving towards the right after the confluence, and the right inlet still played a dominant role. So it is very necessary to study the maximum bed erosion depth near the location of the river-crossing tunnel. After analyzing the incoming water and sediment conditions in the project reach, we verified the mathematical model based on the existing data of the river processes, the features of river flow movement and the law of sediment erosion and deposition. The calculated values agreed well with the actual measured values. After model calibration using hydrographic field data and data of the historical morphological changes in the Yizheng waterway, the discharge processes in 2007—2010, 1998, and of the three-hundred-year return period were determined as the adverse flow and sediment conditions with consideration of the incoming flow and sediment conditions. The simulated results are predicted with the survey data of river bed drilling, and eventually the predicted maximum erosion depths of the branch channel in the left and right are 10.85 m and 8.87 m respectively during different flow and sediment series. The results are sufficiently safe for the construction of the river-crossing tunnel project and will be a scientific basis for the engineering design.

Key words: tunnel across river; channel evolution; flow and sediment series; maximum erosion depth