

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.003

陈述,李雨晨,许慧,等.长江下游河段桥墩压缩冲刷预测研究[J].水利水运工程学报,2019(3):16-24.(CHEN Shu, LI Yuchen, XU Hui, et al. Prediction of bridge pier compression scour in lower reaches of Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3):16-24. (in Chinese))

# 长江下游河段桥墩压缩冲刷预测研究

陈 述<sup>1</sup>,李雨晨<sup>2</sup>,许 慧<sup>3</sup>,尚倩倩<sup>3</sup>,陈梓猷<sup>4</sup>

(1. 中铁大桥勘测设计院有限公司,湖北 武汉 430050; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072; 3. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室,江苏 南京 210029; 4. 河海大学,江苏 南京 210098)

**摘要:**建桥引起的河床变化可分为压缩冲刷和局部冲刷。相比于局部冲刷,压缩冲刷研究较少,压缩冲刷使桥址断面产生整体性下降,不利于桥墩基础安全。在总结前人研究成果基础上,以长江下游世业洲桥位方案为例,建立了桥墩压缩冲刷预测模型。探讨了不同空间尺度下桥墩边界的处理方法;针对长江下游河段水沙特点,从工程安全角度出发,提出了水沙过程的选取方法;最后预测了桥位上下游河床变形和桥墩压缩冲刷深度,并与长江下游已建桥址断面冲刷深度进行比对,两者基本相当。结果表明,文中确定的桥墩压缩冲刷是合理的,可为桥墩基础埋深提供技术依据。

**关键词:**桥梁工程;桥墩处理;水沙过程;压缩冲刷;预测模型

**中图分类号:** U442.3+2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2019)03-0016-09

桥梁下部结构对水流存在束狭作用,促使河床发生相应冲淤变化。建桥引起的河床变化可分为压缩冲刷和局部冲刷,压缩冲刷是指桥墩压缩断面后发生的普遍冲刷,包括天然河床冲刷和桥墩压缩水流引起的冲刷;局部冲刷是指在水流漩涡作用下桥墩周围河床形成的冲刷坑。目前,大量研究集中在桥墩局部冲刷<sup>[1-5]</sup>,对压缩冲刷研究较少<sup>[6-8]</sup>。桥墩压缩冲刷使得桥址断面出现整体冲刷下切,对建筑物基础安全不利<sup>[9]</sup>。就长江中下游而言,三峡水库蓄水后,下泄沙量急剧减小,加剧了下游河床冲刷,因此在过江桥梁设计中,桥墩压缩冲刷预测是关键技术问题之一。

以往学者通过模型试验或野外实测分析,得到桥墩压缩冲刷预测经验公式,其中较为著名的有:铁路及公路规范 64-1 式、64-1 修正式和 64-2 简化式<sup>[10-11]</sup>,美国 HEC-18 式<sup>[12]</sup>,但此类公式只能反映某一水沙条件持续作用下压缩冲刷平衡值,且系数存在不确定性。近年来,国内外学者开始采用水沙数模预测桥墩压缩冲刷。刘有录等<sup>[13]</sup>通过调整桥墩附近网格局部水头损失系数,模拟了百年一遇特大洪水期间黄河中游某铁路桥墩冲刷,床面冲淤趋势与试验基本吻合,但具体量值存在差异;Lai 等<sup>[6-9,14]</sup>对长压缩段矩形水槽试验进行了验证,得出模型可较好地模拟沿程水位变化及压缩段冲刷分布,但未考虑上游泥沙过程及悬沙造床作用。对于长江下游而言,三峡水库蓄水拦沙使得下泄的水沙过程明显有别于天然情况。下游河床冲淤复杂,相比于过江隧道<sup>[15-16]</sup>,桥墩压缩冲刷影响因素较多,因此要想较好地预测桥墩压缩冲刷,模型需具备以下几方面条件:① 选取合理水沙过程;② 模型参数需进行多次率定和验证,能复验河道年内和年际冲淤变化;③ 能较好反映建桥前后水流泥沙运动。

**收稿日期:** 2018-09-12

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402306);三峡后续工作项目“水沙变化对长江河流健康的影响研究”(12610100000018J129-06)

**作者简介:** 陈 述(1983—),男,江西景德镇人,高级工程师,主要从事桥梁设计、桥渡水文研究。

E-mail: chens@brdi.com.cn

本文以新建连云港至镇江铁路世业洲大桥桥位方案为背景,对桥墩压缩冲刷模型的建立、参数验证、桥墩边界处理、水沙过程选取、冲刷深度预测等进行研究,为类似问题的研究提供参考。

### 1 工程概况

新建的连云港至镇江铁路全长 249 km,北承新长铁路,中联宁启铁路,南与京沪高铁、沪宁城际铁路相接,是连接苏北、苏中、苏南地区的南北纵向铁路主通道。铁路拟在长江世业洲至五峰山河段处跨越长江,过江通道拟采用跨江桥梁,根据桥梁位置的不同,分为世业洲桥位、五峰山桥位方案。其中,世业洲桥位方案为:桥址位于世业洲中上部,采用悬索桥方案,左汉主跨为 406 m,右汉主跨为 910 m。平面、立面布置及桥墩结构布置见图 1~2。

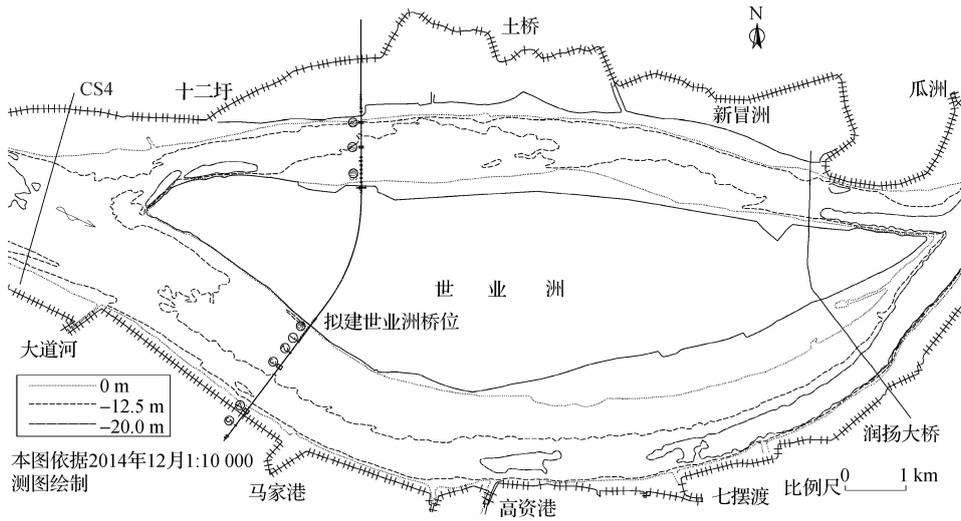


图1 世业洲桥位方案平面布置

Fig. 1 Plan layout of Shiyezhou bridge location scheme

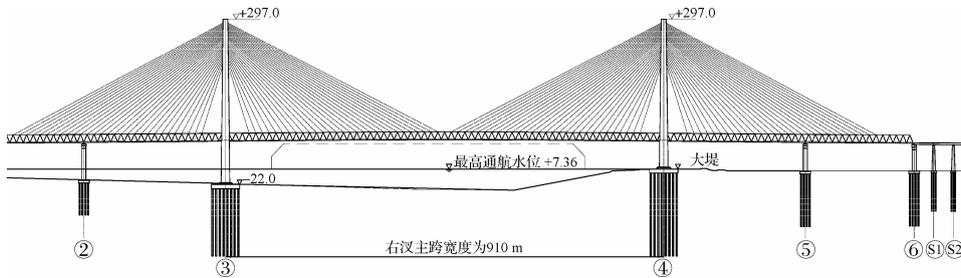


图2 桥墩立面布置(世业洲右汉)(单位:m)

Fig. 2 Elevation layout of piers (right branch of Shiyezhou)(unit: m)

世业洲河段为微弯分汉河型,江中有世业洲将河道分为左右两汉,见图 1。左汉为支汉,2012 年 12 月实测分流比为 38.8%,右汉为主汉。由于河道有良好的进出口节点控制及岸线守护作用,总体河势变化不大,但局部区域演变仍较为明显。主要表现为汉道分流格局变化及洲滩冲淤调整。

(1) 汉道分流格局变化主要是左汉分流比增加,右汉分流减小。20 世纪 70 年代中期至 90 年代初期,左汉分流比缓慢增加,年均增幅为 0.1%;1995 年后,受到连续大洪水作用,增幅速度明显加大,其中 1997—1999 年,年均增大达 2.8%;2000 年以后增速趋缓。世业洲左汉分流比由 20 世纪 70 年代的 20% 增至 40% 左右。

(2) 洲滩冲淤调整体现为世业洲头低滩持续冲刷后退;左汊整体冲刷,局部位置冲深幅度4 m;世业洲右汊进口段左侧边滩冲刷、右侧深槽淤积,中下段则表现为世业洲右缘边滩淤长,深槽冲刷。桥址断面冲淤变化见图3。

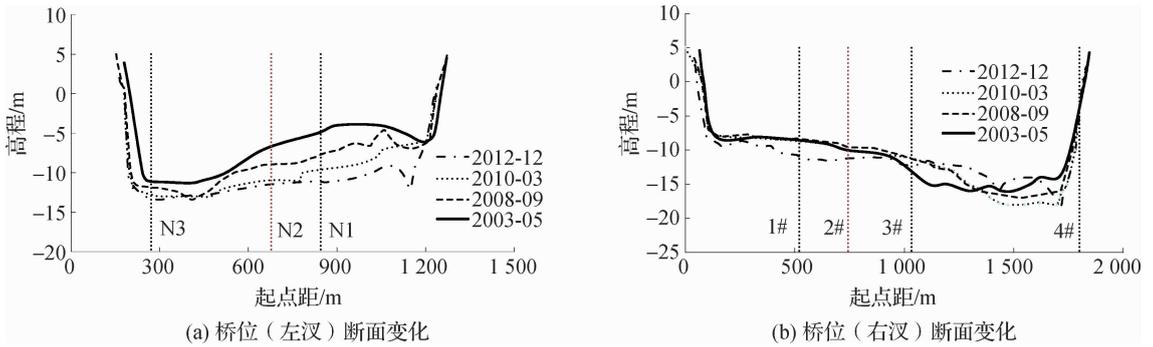


图3 世业洲桥位桥址断面多年冲淤变化

Fig.3 Changes in erosion and siltation at site section of Shiyezhou bridge over years

## 2 模型建立和验证

### 2.1 控制方程组

正交曲线坐标系下的平面二维水沙数模控制方程组如下:

(1) 水流连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial (C_\eta H u)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi H v)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

(2) 水流运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (H u)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H u u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H v u) + H v u \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - H v^2 \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] = - \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \frac{g H}{C_\xi} \frac{\partial Z}{\partial \xi} + \\ \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H \sigma_{\xi\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H \sigma_{\eta\xi}) + H \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - H \sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (H v)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H u v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H v v) + H u v \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - H u^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] = - \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \frac{g H}{C_\eta} \frac{\partial Z}{\partial \eta} + \\ \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H \sigma_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H \sigma_{\eta\eta}) + H \sigma_{\eta\xi} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - H \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $(\xi, \eta)$  为曲线坐标系坐标;  $(x, y)$  为物理坐标;  $C_\xi, C_\eta$  分别为  $\xi, \eta$  方向拉梅系数;  $u, v$  分别为  $\xi, \eta$  方向流速分量;  $Z$  为水位;  $t$  为时间;  $H$  为水深;  $C$  为谢才系数,  $C = \frac{1}{n} H^{1/6}$ ,  $n$  为糙率;  $\sigma_{\xi\xi}, \sigma_{\eta\eta}, \sigma_{\xi\eta}, \sigma_{\eta\xi}$  为紊动切应力。

(3) 悬移质不平衡输移方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (H S_i)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H u S_i) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H v S_i) \right] = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\varepsilon_\xi}{\sigma_s} \frac{C_\eta}{C_\xi} H \frac{\partial S_i}{\partial \xi} \right) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\varepsilon_\eta}{\sigma_s} \frac{C_\xi}{C_\eta} H \frac{\partial S_i}{\partial \eta} \right) \right] + \alpha_i \omega_i (S_i^* - S_i) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_i$  为泥沙的含沙量恢复饱和系数;  $\omega_i$  为第  $i$  组泥沙沉速;  $S_i$  为第  $i$  组悬移质含沙量;  $S_i^*$  为第  $i$  组悬移

质挟沙力,  $\varepsilon_\xi, \varepsilon_\eta$  分别为  $\xi, \eta$  方向泥沙扩散系数;  $\sigma_s$  取常数 1.0。

(4) 推移质不平衡输移方程:

$$\frac{\partial HS_{bl}}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H u S_{bl}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H v S_{bl}) \right] = \alpha_{bl} \omega_{bl} (S_{bl}^* - S_{bl}) \quad (5)$$

式中:  $S_{bl}^*$  为第  $L$  组推移质挟沙能力;  $S_{bl}$  为第  $L$  组推移质含沙浓度;  $\alpha_{bl}$  为第  $L$  组推移质恢复饱和系数;  $\omega_{bl}$  为第  $L$  组推移质的沉速。

(5) 河床变形方程:

$$\text{悬移质冲淤引起的河床变形: } \gamma_{0i} \frac{\partial Z_i}{\partial t} = \alpha_i \omega_i (S_i - S_i^*)$$

$$\text{推移质冲淤引起的河床变形: } \gamma_{0bl} \frac{\partial Z_{bl}}{\partial t} = \alpha_{bl} \omega_{bl} (S_{bl} - S_{bl}^*)$$

$$\text{河床总的冲淤厚度为: } Z = \sum_{i=1}^M Z_i + \sum_{L=1}^N Z_L \quad (6)$$

式中:  $M$  为悬移质分组数;  $N$  为推移质分组数;  $\gamma_{0i}$  为  $i$  组悬移质泥沙干重度;  $Z_i$  为第  $i$  组悬移质引起的河床冲淤厚度;  $\gamma_{0bl}$  为  $L$  组推移质泥沙干重度;  $Z_L$  为第  $L$  组推移质引起的河床冲淤厚度;  $Z$  为河床总冲淤厚度。

### 2.2 模型设置

为数值求解水流运动方程组(1)~(3),采用积分守恒的控制体积法离散方程,并利用 SIMPLER 方程式求解耦合方程,反复迭代直到流场收敛;对悬移质输移方程(4)和推移质输移方程(5)在离散后采用欠松弛技术及逐行扫描的 TDMA 技术隐式求解;对河床变形方程(6)采用有限差分离散,显式求解。

水流运动方程主要参数有:糙率  $n$  和紊动黏性系数  $\nu_t$ 。糙率反映了天然河流的阻力,可通过与实测水位及流速验证确定;紊动黏性系数  $\nu_t = k u_* H$ ,  $u_*$  为摩阻流速,  $k$  为常数。

泥沙运动方程主要参数有:悬移质分组挟沙能力  $S_i^*$ 、推移质分组输沙率  $g_{bl}^*$ ,其中悬移质分组挟沙能力  $S_i^* = P_* S_*$ ,  $P_*$  为分组挟沙力级配( $P_*$ 可根据文献[15]附录 B 提供的方法确定),  $S_*$  为水流总的挟沙力,一般采用张瑞瑾公式确定:

$$S_* = k \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{gh\omega} \right)^m \quad (7)$$

式中:  $\omega$  为泥沙平均沉速;  $k, m$  为系数。推移质分组输沙率  $g_{bl}^* = P_{bl} \eta_L g_b^*$ ,  $P_{bl}$  为第  $L$  组泥沙在床沙中的百分比,  $\eta_L$  为隐蔽系数,  $g_b^*$  为推移质输沙率,可根据文献[15]附录 A 列出的公式计算确定。

### 2.3 计算中对桥墩的考虑

以往计算中主要采用局部地形修正、附加糙率等方法概化桥墩,但此类方法仅能模拟桥墩阻水效应,无法给出桥墩附近细部流场变化,因而也无法计算桥墩压缩冲刷。随着计算机性能和数值方法的提高,可采用加密网格法处理桥墩,使得网格与桥墩尺度一致。如何处理桥墩边界是准确模拟桥墩附近水沙运动的关键,根据模拟空间尺度不同,可分为小尺度和大尺度两类模型。

小尺度模型通常用于实验室桥墩模拟,网格尺度较小,为厘米级,桥墩边界可采用大系数法与壁面率相结合的方法进行处理,即桥墩内的网格(图 5 中网格节点 1~16 所围的内部网格)采用大系数法处理,亦即在计算时,令其源项为一大系数,则其计算结果为 0;而与桥墩壁面相邻的网格节点(网格节点 1~13)则采用壁面率进行处理。



图 4 桥墩边界处理示意

Fig.4 Schematic diagram of bridge pier boundary treatment

大尺度模型通常用于天然河道中桥墩模拟。河道边界复杂,网格尺度一般为米级别,采用壁面率时,壁面第一个计算节点与壁面间的距离为 $z^+ = z_1 u_* / \nu$ ,  $30 < z^+ < 100$ ;对于长江下游而言,当流速取为 $2 \text{ m/s}$ ,水深取 $10 \text{ m}$ ,糙率为 $0.025$ 时, $z_1$ 为 $0.001 \text{ m}$ 。可见,计算所需尺度远远小于桥墩尺度,故实际计算时,很少采用壁面率,而是直接在桥墩壁面上规定不可入条件及无滑动条件。实践证明,此方法可较好地模拟桥墩附近绕流现象。

## 2.4 模型验证

建立了世业洲河段平面二维水沙模型,模型范围上迄三江口,下至六圩河口,模拟河段全长约 $40 \text{ km}$ 。为提高模型预测精度,对模型参数进行了反复率定及验证。图5为沿程水位和典型断面流速的验证结果。限于篇幅,这里仅给出中长期河床冲淤验证。模型采用2011年10月地形作为初始地形,2015年11月作为验证地形。进口流量和含沙量过程采用大通站实测资料,出口水位由镇江站水位流量关系曲线得到。模型验证了河段经过4个完整水文年后的河床冲淤。由图6可见,计算与实测冲淤部位和冲淤分布符合较好。

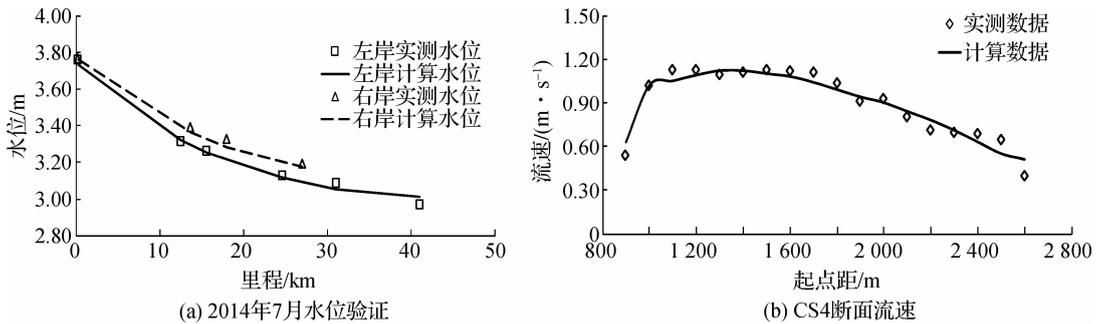


图5 模型水位与流速验证结果

Fig. 5 Verification results of water level and flow velocity given by model

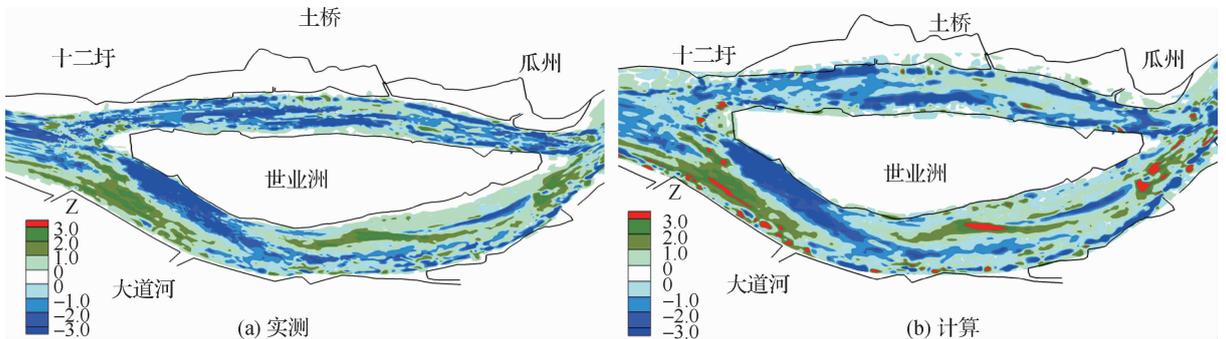


图6 河段实测与计算冲淤分布对比(2011年10月—2015年11月)(单位:m)

Fig. 6 Comparison between measured and calculated riverbed scouring and silting distribution along Shiyezhou reach (from Oct. 2011 to Nov. 2015) (unit: m)

## 3 桥墩压缩冲刷预测

### 3.1 水沙过程的选取

预测成果合理性与水沙过程的选取密切相关。针对长江下游河段来水来沙特点,考虑三峡水库蓄水后长江下游水文控制站(大通)水沙变化,从偏安全的角度出发,提出水沙过程的确定方法。

(1) 特大洪水年水沙过程:根据世业洲桥位方案的设计标准(100年一遇洪水设计,300年一遇洪水校核),选取300年一遇洪水作为特大洪水年。其中,流量过程是以1998年(100年一遇)为基础,根据频率对洪峰流量进行放大;沙量过程则根据三峡水库蓄水后大通站流量和输沙率关系曲线,从工程安全角度出发,采用下包线推求特大洪水年所对应的沙量过程(见图7)。

(2) 系列水文年水沙过程:采用典型系列年,并考虑特大洪水年的组合。根据大通站1950—2014年水沙资料,三峡水库蓄水以来大通站流量变化不大,且多为中小水年,但输沙量明显小于蓄水前,这一变化反映了三峡水库的蓄水拦沙作用。三峡水库蓄水前,大通站多年输沙量为4.27亿t,蓄水后,2004—2014年均输沙量为1.43亿t,较蓄水前减少了66%(图8)。2007—2010年能较好地代表三峡建库后2004—2014年水沙特点;据统计2007—2010年径流量为8372亿m<sup>3</sup>,与三峡建库后平均径流量8321亿m<sup>3</sup>基本相当,年最大流量为64600m<sup>3</sup>/s,最小流量为10000m<sup>3</sup>/s,见图9。考虑到1998年大洪水的影响,最终确定系列水文年为2007—2010年+1998年(沙量过程用图7下包线)。

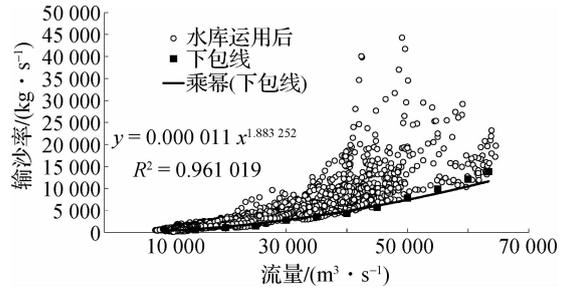


图7 三峡水库蓄水后大通站流量与输沙率关系

Fig.7 Relationships between discharge and sediment-transport rate at Datong station after impoundment of Three Gorges reservoir

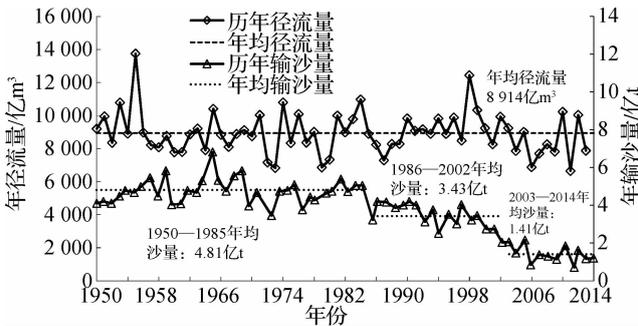


图8 1950—2014年大通站年径流量、输沙量

Fig.8 Annual runoff and sediment runoff by Datong station from 1950 to 2014

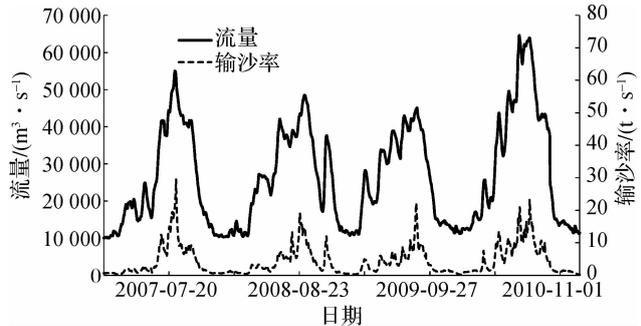


图9 2007—2010年流量输沙率过程

Fig.9 Process of discharge and sediment-transport rate from 2007 to 2010

### 3.2 桥墩压缩后桥址断面水动力变化

桥梁建设引起桥区一定范围内水位与流速分布变化,二者将直接影响到桥址断面单宽流量分布。一般而言,建桥后桥墩间单宽流量有所增加(见图10),桥墩上下游受墩柱壅水及掩护影响,单宽流量有所减小。在世业洲右汊左侧,由于桥墩间距较小,阻力较大,使得桥墩间单宽流量减小,同时右侧河道单宽流量增幅较大。

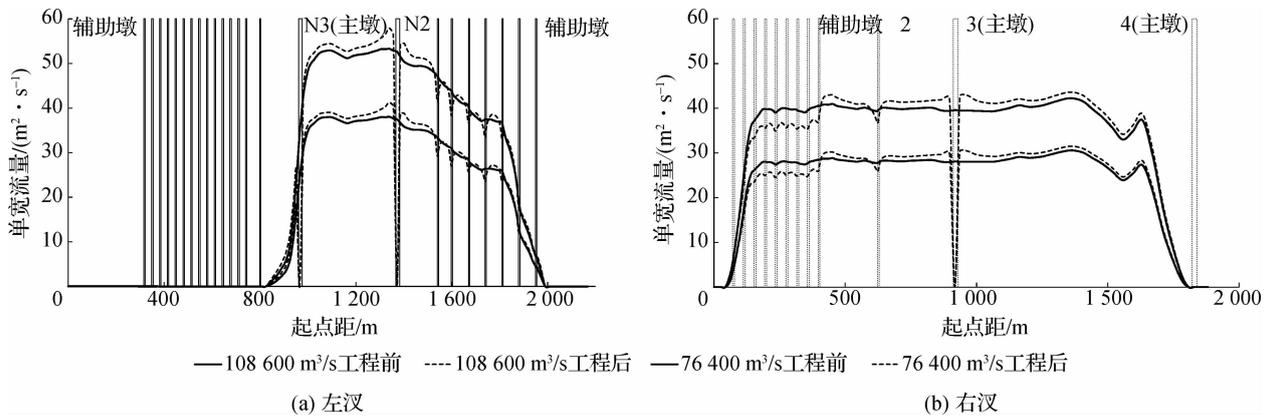


图10 桥址断面单宽流量横向分布

Fig. 10 Transverse distribution of unit discharge of bridge site sections

### 3.3 桥墩压缩冲刷预测

遭遇特大洪水年后,桥位上游由于桥墩阻水作用,流速减小,河床以淤积为主;桥位下游受桥墩挤压水流和掩护作用,河床有冲有淤;桥位断面,因桥墩存在,过水面积缩窄,单宽流量增加,出现压缩冲刷,其中冲刷幅度较大的位置是左汉 N3#桥墩(9.46 m)和 N2#桥墩(5.92 m),右汉桥址断面冲刷相对较小,2#辅助墩桥墩 2.81 m,3#主墩 3.70 m。

文献[17]采用1998年和2013年长江下游大通—吴淞口航行图,对长江下游典型桥梁桥址断面压缩冲刷进行统计(见表1),可见,因桥址所处位置和断面形态不一,各桥压缩冲刷深度有所差异,幅度在2.6~8.0 m之间,与世业洲桥位模型预测结果相当。

表1 长江下游典型桥梁桥址断面最大压缩冲刷深度实测统计(1998—2013年)

Tab. 1 Maximum compression scouring depths of typical bridge site sections in lower reaches of Yangtze River (1998 - 2013)

桥名	桥址宽度/m	断面形态	最大压缩冲刷深度/m
铜陵长江公路大桥	1.1	V形	4.0
芜湖长江大桥	2.1	U形,主槽偏右	4.2
大胜关长江大桥	1.4	不对称V形	8.0
南京长江大桥	1.2	V形,深槽靠右	2.8
南京长江二桥(右汉)	1.6	U形,北深南浅	2.6
南京长江四桥	1.9	宽V形,深槽靠右	6.0

## 4 结 语

(1) 建立了桥墩压缩冲刷预测模型,对小尺度模型,桥墩边界可采用大系数法与壁面律相结合方法;对天然大尺度模型,壁面率无法适用,可直接在桥墩壁面上规定不可入条件及无滑动条件。模型参数进行多次率定和验证,具备复验河道年内和年际冲淤变形的能力。

(2) 针对长江下游河段水沙特点,考虑三峡水库蓄水以来大通站水沙条件变化,从工程安全角度出发,提出水沙条件的确定方法,并确定不利水沙过程。

(3) 受桥墩影响,桥位断面出现压缩冲刷,其中冲刷幅度较大的位置是左汉 N3#桥墩(9.46 m)和 N2#桥

墩(5.92 m),右汊桥址断面冲刷相对较小。通过对长江下游典型桥梁桥址断面压缩冲刷深度统计可见,冲刷幅度在2.6~8.0 m,与模型预测结果基本相当。

## 参 考 文 献:

- [1] OLSEN N R B, KJELLESVIG H M. Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth [J]. *Journal Hydraulic Research*, 1998, 36(4): 579-590.
- [2] KARIM O A, ALI K H M. Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets[J]. *Journal Hydraulic Research*, 2000, 38(4): 279-287.
- [3] ROULUND A, SUMER B M, FREDSOE J, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile[J]. *Journal Fluid Mech*, 2005, 534:351-401.
- [4] 陈小莉. 局部绕流冲刷机理及数值模拟研究[D]. 北京:清华大学,2008. (CHEN Xiaoli. Study on mechanics and numerical simulation of flow and local scour around hydraulic structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] LAI Y G, GREIMANN B P. Predicting contraction scour with a two-dimensional depth-averaged model[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(3): 383-387.
- [7] FENOCCHI A, NATALE L. Using numerical and physical modeling to evaluate total scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142(3): 06015021.
- [8] 郭辉,齐梅兰. 跨河桥梁压缩冲刷数值模拟研究[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(5): 43-49. (GUO Hui, QI Meilan. Numerical simulation study on the contraction scour of bridge cross the river[J]. *China Railway Science*, 2011, 32(5): 43-49. (in Chinese))
- [9] 郭辉. 桥渡压缩冲刷数值模拟研究[D]. 北京:北京交通大学,2013. (GUO Hui. Numerical study of contraction scour at bridge crossings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [10] TB 10017—1999 铁路工程水文勘测设计规范[S]. (TB 10017—1999 Code for survey and design on hydrology of railway engineering[S]. (in Chinese))
- [11] JTG C30—2002 公路工程水文勘测设计规范[S]. (JTG C30—2002 Hydrological specifications for survey and design of highway engineering[S]. (in Chinese))
- [12] SHIROLE A M, HOLT R C. Planning for comprehensive bridge safety assurance program (Transport Research Report No. 1290)[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1991: 137-142.
- [13] 刘有录,褚衍东. 桥渡全沙冲淤数值模拟[J]. *铁道学报*, 1993, 15(4): 96-102. (LIU Youlu, CHU Yandong. Numerical modelling of scouring and silting of full sediment in the bridge reach[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1993, 15(4): 96-102. (in Chinese))
- [14] DUE B M, RODI W. Numerical simulation of contraction scour in an open channel[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(4): 367-377.
- [15] 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 Yitian, YUAN Jing. Prediction of maximum bed erosion depth near a crossing tunnel under the lower reach Yangtze River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(4): 90-97. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] 陆雪骏. 长江感潮河段桥墩冲刷研究[D]. 上海:华东师范大学,2016. (LU Xuejun. Research on the local scour at bridge piers in the tidal reach of the Changjiang River[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. (in Chinese))

## Prediction of bridge pier compression scour in lower reaches of Yangtze River

CHEN Shu<sup>1</sup>, LI Yuchen<sup>2</sup>, XU Hui<sup>3</sup>, SHANG Qianqian<sup>3</sup>, CHEN Zisi<sup>4</sup>

(1. *China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China*; 2. *State Key Lab of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 3. *Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of the Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 4. *Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** The riverbed variation caused by the construction of bridges can be divided into the compression scour and local scour. Compared with the local scour, there are few studies on the compression scour. The compression scour makes the section of the bridge site decline integrally, which is adverse to the safety of the bridge pier foundation. On the basis of the summary of the findings given by the previous studies, taking the bridge location scheme of Shiyezhou at the lower reaches of the Yangtze River as an example, a prediction model for bridge pier compression scour is established in this study. Firstly, the treatment methods for the bridge pier boundaries under different spatial scales have been explored. Secondly, from the point of view of engineering safety, the selection method of the water-sediment process is put forward for analyzing the water and sediment characteristics in the lower reaches of the Yangtze River. Finally, the river channel process and the pier compression scour depth in the upstream and downstream of the bridge location are predicted, and compared with the scouring depth of the cross section of the existing bridge site in the lower reaches of the Yangtze River, showing that they are basically the same. The simulated results show that the compression scour of the bridge piers determined by the above methods is reasonable, thus providing a technical basis for the buried depth of the pier foundation.

**Key words:** bridge engineering; pier treatment methods; water-sediment process; compression scour; prediction model