

福州市城市轨道交通 1 号线过江段冲淤演变分析

丁 坚¹ 李安中¹ 宋荔钦² 蔡佳佳³

(1.河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室 江苏 南京 210098 ;
2.河海大学港口海岸与近海工程学院 江苏 南京 210098 ;3.河海大学文天学院 安徽 马鞍山 243031)

摘要 :为研究福州市城市轨道交通 1 号线对过江段河床冲淤演变的影响 ,采用实测资料进行河床演变分析并与相关试验结果比较 ,在此基础上根据目前南北港河势及分流比变化进行二维水流和泥沙数学模型模拟计算。计算得出 1 号线过江河段在 100 年一遇洪水条件下最大冲刷坑高程为 - 24.80 m ,1 号线河底高程为 - 17.50 m ,可作为过江隧道埋置深度的依据。

关键词 河床演变 数值模拟 河床冲淤 冲刷坑深度 分流比

中图分类号 :P333.4 文献标识码 :B 文章编号 :1006-764X(2011)S1-0063-03

福建省东海岸是福州市主要前沿领域 ,闽江福州河段北港穿行福州市区 ,为了突破北港北岸一侧的福州市区的束缚 ,圈入南台岛 ,甚至扩至南港南岸 ,形成大福州市的概念 ,福州市城市轨道交通建设尤为重要。为提供过江管线处河床最大冲刷深度 ,以供设计部门确定管道过江高程参考 ,必须研究解放大桥下游河段的变化规律及其与河势的关系、与来水来沙的关系等。

笔者根据实测地形图和河道来水来沙条件等进行了河床演变分析 ,并在此基础上通过各种方法求出冲刷坑的极限深度。利用 20 世纪 90 年代进行的物理模型试验结果并采用 1998 年 6 月 23 日大洪水冲刷的实际资料求出 100 年一遇大洪水时的冲刷深度 ,根据历年分析成果 ,结合近年来由于南北港整治洪水分流比的变化情况进行数值模拟计算 ,提出用 100 年一遇洪峰时的极限冲刷深度作为地铁过江设计的依据。

1 河床演变分析

比较 1996 年、1998 年、2004 年、2008 年这 4 年解放大桥下游河床实测地形图可以看出河势基本不变。解放大桥下游左侧一直存在冲刷坑^[1] ,不同年份冲刷坑的深浅有所变化 ,但总的平面形态一致 ,主流由中洲头挑流成 45°斜向。水流通过解放大桥 ,受左岸江滨路大堤约束向右泄向下游 ,但此处水流紊乱 ,环流很强 ,淘刷河底 ,维持冲刷深坑。

闽江北港主要是底沙造床 ,造床泥沙的中值粒径 $d_{50} = 0.525 \sim 0.531 \text{ mm}$,多年来基本不变。闽江

北港来沙集中在 6—8 月洪水期 ,水口电站畅流泄洪 ,含沙量大 ,到中、枯水期关闸 ,下泄清水 ,故洪水时来沙量大 ,但此时水流动能也大 ,冲刷坑就在来沙来水较量中变化 ,往往洪峰动能最大的时刻冲刷坑最深 ,当水流动能稍弱 ,造床泥沙停淤 ,河床趋于回淤状态 ;当洪峰迅速减小后 ,深坑就稳定不变了。这 4 年实测河床地形图为当年枯水期测得 ,主要反映了河床冲淤平衡后的冲刷坑深度。

2 闽江北港二维水流数值模拟

2.1 二维水动力控制方程^[2]

连续性方程 :

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(ud) + \frac{\partial}{\partial y}(vd) = 0 \tag{1}$$

式中 : d 为水深 ; t 为时间 ; u 、 v 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向上的分量。

x 、 y 方向上的垂线平均动量方程 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = & -g \frac{\partial d}{\partial x} - g \frac{\partial z_b}{\partial x} + fv + \\ & \frac{1}{\rho d} \left[\frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{xy}) + \tau_x^s - \tau_x^b \right] \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = & -g \frac{\partial d}{\partial y} - g \frac{\partial z_b}{\partial y} - fu + \\ & \frac{1}{\rho d} \left[\frac{\partial}{\partial x}(\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yy}) + \tau_y^s - \tau_y^b \right] \end{aligned} \tag{3}$$

式中 : g 为重力加速度 ; z_b 为河床高程 ; f 为柯氏系数 ; ρ 为水的密度 ; τ_{ij} ($i, j = x, y$) 为紊动切应力 ; τ_x^s 、 τ_y^s 分别为风应力在 x 、 y 方向上的分量 ; τ_x^b 、 τ_y^b 分别

为水流引起的床面切应力在 x,y 方向上的分量。

流速闭边界条件采用法向为零的边界条件 ,上游文山里站开边界条件由流量控制 ,下游魁岐站开边界条件由水位控制。

悬沙计算的闭边界条件采用法向零通量边界条件。悬沙开边界条件为

$$\begin{cases} \alpha(x,y,t)|_{\Gamma} = C^*(x,y,t) & (\text{水流流入计算域}) \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\alpha C u}{\partial x} + \frac{\alpha C v}{\partial y} & (\text{水流流出计算域}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 : Γ 为水域开边界 ; $C^*(x,y,t)$ 为已知悬沙质量浓度 ,由式 (5) 给出 :

$$C^*(x,y,t) = \frac{0.034}{C_0^2} \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{(u^2 + v^2)^{\frac{3}{2}}}{gd\omega_s} \quad (5)$$

式中物理量符号含义见文献 [2]。

2.2 模型验证

模型计算区域自北港文山里站至魁岐站 ,如图 1 所示。大潮潮位、流速和流向过程线与计算值的比较如图 2~4 所示。由图 2~4 可知 ,中枯水的潮流场模拟达到了相似要求 ,说明数模计算中各参数的选取是合理的。

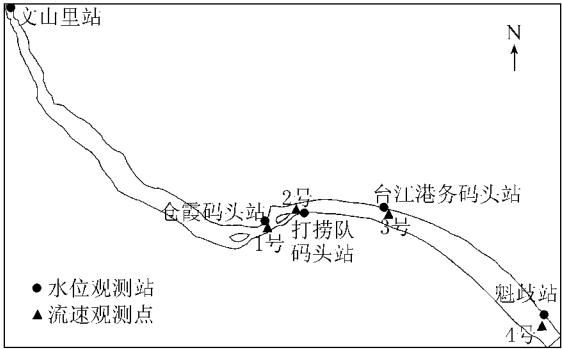


图 1 计算区域及观测站点分布示意图

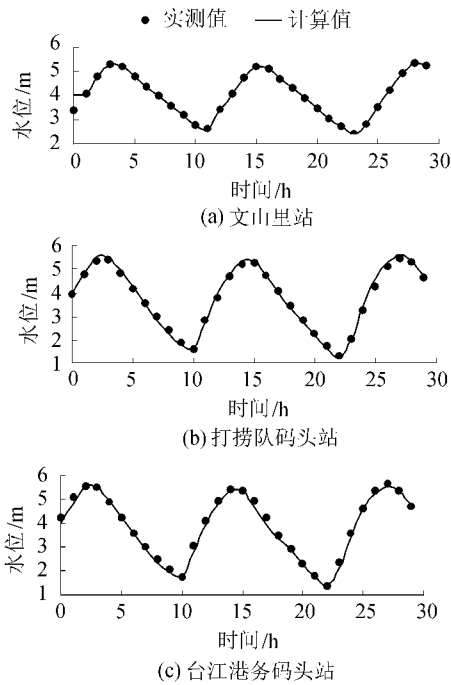


图 2 各观测站水位验证

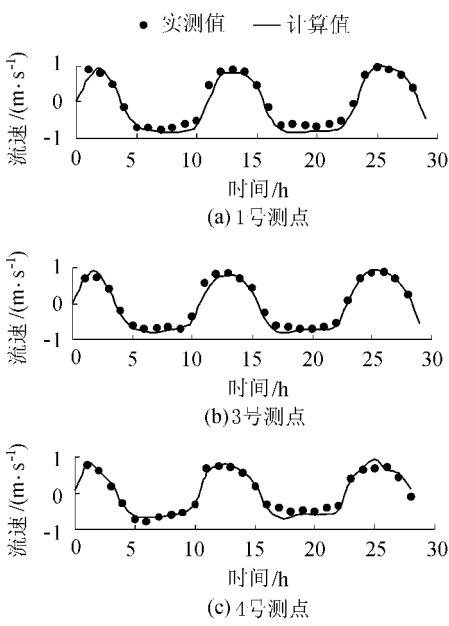


图 3 各观测点流速验证

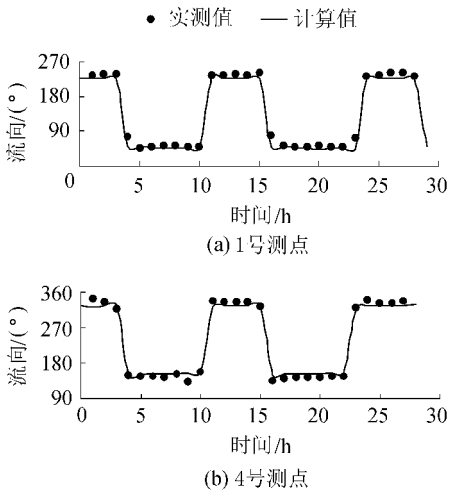


图 4 各观测点流向验证

3 冲淤计算

3.1 平面二维泥沙控制方程 [2]

平面二维悬沙运动方程 :

$$\frac{\partial dC}{\partial t} + \frac{\partial duC}{\partial x} + \frac{\partial dvC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon d \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon d \frac{\partial C}{\partial y} \right) + F_c \quad (6)$$

平面二维底沙运动方程 :

$$\frac{\partial dN}{\partial t} + \frac{\partial duN}{\partial x} + \frac{\partial dvN}{\partial y} = a_b w_b (N_* - N) \quad (7)$$

床面变形方程 :

$$\gamma_0 \frac{\partial z_b}{\partial t} = - F_c - F_N \quad (8)$$

式中 : ϵ 为垂向平均扩散系数 ; N 为垂向平均底沙输沙量 ; a_b 为推移质沉降几率 ; w_b 为推移质沉速 ; N_* 为垂向平均输沙能力 ; γ_0 为泥沙干密度。其他物理

推移质计算时,闭边界条件采用法向零通量边界条件。

3.2 来沙情况

由于资料有限,在 2008 年地形条件下计算 1 个水文年,与 2009 年三县洲至解放大桥段河床地形进行比较,结果吻合较好,表明冲淤计算模型相似,可以进行冲淤计算。

3.3 100 年一遇洪水冲刷坑深度的计算

采用 2009 年 10 月最新实测北港解放大桥河段地形图(图 5),其中冲刷坑高程为 -23.10 m,过江地铁 1 号线河床高程为 -15.31 m,在此河势条件下计算 100 年一遇大洪水时冲刷坑的最大深度^[3]。

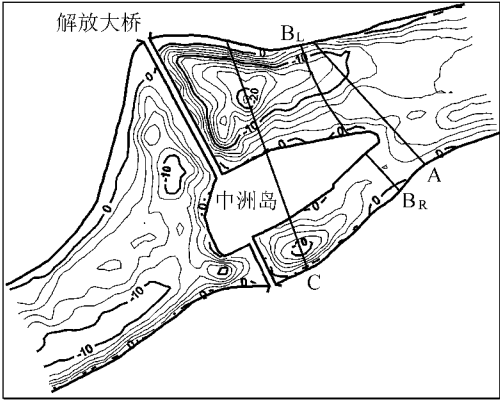


图 5 2009 年北港解放大桥河段河床高程等高线(单位:m)

从 100 年一遇洪水条件下的北港解放大桥河段河床高程等高线可以看出,河床冲刷的平面形态稳定,冲刷坑的位置不变,1 号线位于冲刷坑边坡上,河床逐渐抬高,多年历史情况和这次二维冲淤计算表明,最深坑位置稳定,不会下移至轨道线位置,1 号轨道线处于边坡上,深度较浅,有利于隧道埋设。计算冲刷坑高程为 -24.80 m(C 断面),1 号轨道线河底高程为 -17.50 m(B_L 断面)。根据此结果决定埋置隧道的高程。

采用相同方法计算 200 年一遇洪水条件下的冲刷坑深度。结果显示 200 年一遇洪峰时刻北港冲刷坑处流速达 1.89 m/s,1 号轨道线处流速达 2.50 m/s,冲刷坑高程为 -25.03 m(C 断面),1 号轨道线河床高程为 -18.06 m(B_L 断面),冲刷历时有所延长。

参考以往物模试验结果,将各工况下的计算结果列于表 1,由表中数据所反映的该河段冲刷变化幅度及规律表明,数模预报的数据是合理的。

4 结 语

根据洪峰流场,计算出 100 年一遇洪水条件下冲刷坑最深为 -24.80 m,1 号线过江河底高程为 -17.50 m;200 年一遇洪水条件下冲刷坑最深为

表 1 不同方法计算结果比较 m

工 况	解放桥下最大冲刷坑高程	1 号线河底高程
河床演变分析	-23.30	-15.31
动床试验(50 年一遇)	-24.29	-16.00
冲刷推算(100 年一遇)	-27.30	-18.70
冲淤二维数模计算(100 年一遇)	-24.80	-17.50
冲淤二维数模计算(200 年一遇)	-25.03	-18.06

-25.03 m,1 号线过江河底高程为 -18.06 m。

过江 1 号线的防护工程需慎重对待,主要是控制洪水分流比的变化。今后闽江福州河段治河总体规划应稳定南北港分流比。所有在闽江福州河段进行的工程措施必须确保不增加北港洪水的分流比。在保持目前河势的条件下,过江隧道适当加以保护可保持安全稳定。

参考文献:

[1] 张涤明,计算流体力学[M].广州:中山大学出版社,1991.
[2] 李安中,丁坚.福州市城市轨道交通一号线过江河段冲淤演变分析研究[R].南京:河海大学,2009.
[3] 马福喜,李文新.河口水流、波浪、潮流、泥沙、河床变形二维数学模型[J].水利学报,1999(5):39-43.

(收稿日期 2010-11-04 编辑 骆超)

(上接第 62 页)

保障人民生命财产安全、提供城乡用水以及建设农村小水电站等方面都发挥了重要作用,取得了极其显著的经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] 顾淦臣,束一鸣,沈长松.土石坝工程:经验与创新[M].北京:中国电力出版社,2004.
[2] 瑞格尔.土工合成材料应用手册[M].北京:中国标准出版社,1999.
[3] GB 50290—98 复合土工膜应用技术规范[S].
[4] 拉萨市水利勘察规划设计研究院.龙泉水库设计说明书[R].拉萨:拉萨市水利勘察规划设计研究院,2008.
[5] 拉萨市水利勘察规划设计研究院.根培水库设计说明书[R].拉萨:拉萨市水利勘察规划设计研究院,2007.
[6] 拉萨市水利勘察规划设计研究院.达孜县桑竹林水库设计说明书[R].拉萨:拉萨市水利勘察规划设计研究院,2009.
[7] 闫玉山,吴玉杰.复合土工膜在严寒地区水库建设中的应用[R].佳木斯:黑龙江省水利第三工程处,2008.

(收稿日期 2010-04-21 编辑 方宇彤)