

孙峰,郑亮,傅宗甫,等.超大直径越江隧道河段极端洪潮冲刷深度预测[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(4):95-106.
SUN Feng, ZHENG Liang, FU Zong-fu, et al. Prediction of extreme flood scour depths in river sections of very large diameter crossing tunnels[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(4): 95-106.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.04.008

超大直径越江隧道河段极端洪潮冲刷深度预测

孙峰¹,郑亮²,傅宗甫²,徐鼎平³

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北武汉 430063; 2. 河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北武汉 430071)

摘要:为确定富春江秦望通道工程过江段的合理埋深取值范围,通过数学模型模拟计算河段平面水位及流场情况,在此基础上结合物理模型试验研究上边界 100 年一遇洪水流量+下边界 100 年一遇洪水位、上边界 100 年一遇洪水流量+下边界最低潮水位、上边界 300 年一遇洪水流量+下边界 100 年一遇洪水位、上边界 300 年一遇洪水流量+下边界最低潮水位(工况 1~4)4 种洪潮组合工况下隧址处河床最大冲刷深度,并与数学模型计算结果进行相互验证。研究表明:在相同洪水流量下,下游低潮位时河道水流量大,水位低,上下游水位差较大,因此,流速相对较大,更容易在河槽产生冲刷;在工况 2 和 4 下,数学模型极限冲刷深度计算结果分别为 4.50 与 6.45 m;在 4 种工况,动床冲刷模型极限冲刷深度分别为 1.50、1.95、2.40、4.50 m;动床冲刷试验反映洪水相应历时(原型 70 h)及极限水文条件下的河床冲刷情况,冲刷深度比较符合实际情况,可为盾构穿越江河工程安全控制提供参考。

关键词:隧道工程;极端洪水冲刷深度;模型试验;隧道埋深

中图分类号:U452.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2025)04-0095-12

Prediction of extreme flood scouring depth of river-crossing section of very large diameter crossing tunnel

SUN Feng¹, ZHENG Liang², FU Zong-fu², XU Ding-ping³

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: To determine the reasonable burial depth range for the Qinwang Crossing Project's river-crossing section in the Fuchun River, a mathematical model was first employed to simulate the planar water level distribution and flow field condition of the river segment. Based on these simulations, physical model tests were conducted to study the maximum scour depth at the tunnel site under four combined flood-tide scenarios (Scenarios 1-4): upstream boundary with 100-year flood discharge + downstream boundary with 100-year flood water level, upstream boundary with 100-year flood discharge + downstream boundary with lowest tidal water level, upstream

收稿日期:2024-12-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB2603600);国家自然科学基金项目(52279117)

作者简介:孙峰(1985-),男,山东东阿人,高级工程师,E-mail:1040385071@qq.com。

boundary with 300-year flood discharge + downstream boundary with 100-year flood water level, and upstream boundary with 300-year flood discharge + downstream boundary with lowest tidal water level, results were cross-validated with mathematical model calculations for accuracy. The research results indicate that under the same flood discharge, when the downstream tide is low, the river flow is greater, the water level is lower, and there is a significant difference in water levels between upstream and downstream. Consequently, the flow velocity is relatively high, making erosion more likely in the river channel. For Scenarios 2 and 4, by calculated the mathematical model the maximum scour depths of 4.50 and 6.45 m, respectively, by yielded while the live-bed scour model the maximum scour depths of 1.50, 1.95, 2.40, and 4.50 m under the four scenarios respectively. The live-bed scour tests reflect the riverbed scour conditions during the corresponding flood duration (70 hours in prototype) and under the extreme hydrological conditions, with scour depths aligning well with actual conditions, providing valuable references for safety control in shield tunneling river-crossing projects. 8 tabs, 9 figs, 25 refs.

Key words: tunnel engineering; extreme flood scour depth; model test; tunnel burial depth

0 引言

目前越江隧道普遍采用盾构法修建,在水位变化、河床冲刷作用下,隧道顶部覆土厚度将会产生变化,若隧道上方卸载过大,会导致管片产生不均匀上浮,从而诱发管片病害。因此,有必要开展极端洪水作用下河床极限冲刷深度研究。

河床冲刷包括自然冲刷和工程造成的局部冲刷 2 种类型。自然冲刷指在不受建筑物影响的情况下,由水流挟带河床泥砂行进而引起的河床冲刷;局部冲刷指水流在受到水工建筑物阻拦时水流结果发生急剧变化引起的河床冲刷。富春江秦望通道采用盾构法施工,对河流水砂影响较小,河床冲刷以自然冲刷为主。近年来,众多学者采用河床演变分析、数学模型计算及物理模型试验等方法对河床自然冲刷问题进行了研究。河床演变分析方面,李伯昌^[1]根据实测长江口水下地形图,采用数字地形模型技术从多方面分析了长江口北支河床的演变过程,得出了北支河床总体演变以淤积萎缩为主的结论。邢雪艳等^[2]利用 Man-Kendall 检验法分析了瑞丽江水位变化规律,并探讨了瑞丽江水位变化与河床演变之间的关系。贺巧宁等^[3]基于 GIS 的河床演变断面分析方法体系,结合河床演变实测资料建立了数字化分析方法,揭示了河床演变过程与规律。朱子园等^[4]根据嘉鱼河段实测水下地形资料,全面分析了嘉鱼河段的河床演变特性,得到了该河段河床断面近年来趋于稳定的结论。李伯昌^[5]等根据长江口北港实测水下地形资料,分析了北港河段河床演变特征,得出了河道水深将持续增大的结论。可见,通过

分析河床演变过程与洪水流量及水位变化之间的关联,例如洪量和洪峰各自反映了河床断面的大小和深浅,同时结合大量实测数据资料可以建立相应的河相经验公式,用以预测冲刷深度。但经验公式计算误差较大,更多是说明河床演变与水流量之间的关系趋势。数学模型计算方面,杨芳等^[6]针对广佛过江隧道河段河床冲淤变化情况及水流泥砂运动情况,建立了二维动床数学模型,开展了过江隧道河段极端洪潮条件下河床最大冲刷深度的数值模拟,并于实测河床演变资料进行对比,验证了动床数学模型的可靠性。宝婉宁^[7]根据辽河流域河床断面资料,采用逐步回归分析的方法建立了辽河流域自然冲刷深度最优回归方程。王华等^[8]综合考虑长江下游南京河段水砂运动规律、三峡水库蓄水后砂量变化等影响因素确定了有代表性的河流冲刷计算工况,采用二维潮流泥砂数学模型对工程河段的河床冲淤进行了预测。魏帅等^[9]以长江下游仪征水道拟建过江隧道为例,结合工程河段河道演变及来水来砂特点,采用二维水流泥砂数学模型对不同水文年条件下河床最大冲刷深度进行了研究,并结合地质勘测资料对模拟结果进行了合理预测。孙凯旋等^[10]以重庆长江过江隧道为例,结合水区水砂资料及隧址断面冲淤变化,采用多种冲刷公式对不利水文条件下隧址断面河床冲刷深度进行预测,确定了隧址断面的河床冲刷深度。何用等^[11]以广州出海水道为例,采用二维潮流泥砂数学模型对工程河段极限冲刷深度进行模拟计算,提出了认识不同径流条件下河道的水动力特点是研究河道冲淤特性前提的看法。但这些数学模型的建立基于离散格式

收敛性快、稳定性好和精度高以及关键参数的合理确定,当计算方法与参数选用不合理时,计算误差较大。物理模型试验方面,赵建锋等^[12]以拟建绍兴市城市轨道交通2号线下穿曹娥江隧道工程河段为例,采用水槽试验与河工模型试验相结合的方法研究极端洪水作用下隧址河床的冲刷深度。李锦涛等^[13]进行了不同弯道角度、流量下的河道冲刷模型试验,综合考虑水深、相对流速和弯道角度的耦合作用,建立了简便的河流最大冲刷深度计算公式。郭保和等^[14]根据珠海隧道工程海域水文地质资料,通过河工动床泥砂物理模型试验,分析了隧道工程所在河段不利工况下的冲刷分布和极限冲刷深度。吴门伍等^[15]利用河工模型试验对邕江南宁段过江隧道工程附近河床的极限冲刷深度进行了预测。虽然物理模型试验结果精度相对较高,但依旧受到模型砂铺设厚度、隧址上下游宽度的选取等因素影响,同时费用相对更高。

综上所述,单独使用河床演变分析、数学模型计算或物理模型试验,计算结果都有一定的误差,因此近年来,部分学者结合多种研究方法对自然冲刷方法展开研究,取得了一定成果。史英标等^[16]采用河床演变分析,动床数值模拟和动床物理模型等多种研究手段研究钱塘江河口过江隧道河段冲刷深度,构建了隧址河段洪水冲刷深度的预测模型,取得了可信的预测结果。钟小代等^[17]通过平面二维数学模型结合理论公式对工程河段河床冲刷深度进行了初步计算,在此基础上采用水槽模型试验得到了工程位置处河床最大冲刷深度。于洋等^[18]以长江南京河段拟建过江隧道为研究对象,采用河工模型试验与数学模型计算相结合的研究方法,对隧址河道稳定性及河床极限冲刷深度进行了预测。严黎等^[19]分析了邕江南宁段过江隧道工程附近的水文特征,根据近期河道演变特点利用物理模型试验预测了不利水文条件下隧址处河床的极限冲深。岳红艳等^[20]分析了汉江第一越江隧道工程段的河床演化规律,采用物理模型试验结合数学模型计算的方式预测了不利水文条件下隧址断面河床的最大冲深。赵维阳等^[21]以江阴第二过江隧道工程为例,采用物理模型试验对隧址附近河床极限冲刷深度进行预测,结合数学模型计算结果得出了隧址河段的冲刷特性。张为等^[22]以长江下游南京河段拟建纬三路过江隧道为例,采用平面二维水砂数学模型和物

理模型试验相结合的方式对最大冲深的确定方法展开讨论,得出了以上确定最大冲深的方法偏于安全。刘中锋等^[23]通过物理模型试验结合数学模型和经验公式对南砂明珠湾区跨江隧道工程展开研究,得出了3种方法得出的极限冲刷结果较为接近,其中物理模型试验成果偏安全的结论。

本文在总结已有研究成果的基础上,以富春江秦望通道工程为例,通过 MIKE 21 FM 软件对典型洪潮组合下河段平面水位及流场情况进行模拟,并结合规范公式对河床冲刷深度进行计算。在数模计算结果及隧址段河床地质条件分析基础上构建隧址段局部冲刷水工物理模型,模拟不利洪潮组合条件下隧址河段的冲刷特性,研究结果可为盾构穿越江河工程安全控制提供参考。

1 工程概况

富春江系钱塘江干流的中游江段。发源于安徽省休宁县六股尖,与浦阳江汇合后称钱塘江,东流经杭州湾入东海。富春江全长约 110 km,江宽 700~1 000 m,平均水深 7 m,最深处鹤山矶头达 28 m。多处江段分而又合,合而又分,形成南北 2 个支行洪道,江水涨落多变,江心积砂成洲,水动力条件复杂。拟建秦望通道穿越富春江,全长 3 600 m,位于富阳大桥下游 3 km,富春江第一大桥上游 2 km,两岸分别连接富阳主城区秦望路和江南新区秦望南路,隧址示意如图 1 所示。

工程场地绝大部分地貌为富春江两岸的冲海积平原区,地貌形态受海侵影响,为第四系中晚期冲海积物质组成的江心岛及山前平原,岸边多为人工建造的防洪堤。平原区地面标高为 8.0~9.0 m,沿江及溪岸砌筑的防洪堤顶面标高为 9.8~11.0 m;富春江两岸地势平坦开阔,分布有道路、耕地、村庄、厂房等,沿江岸线标高为 4~5 m,江底最低标高约 4.6 m,江内最深处约为 12 m。隧址河段水位为 10.05 m,地层由上至下依次为细砂、粉土、粉质黏土和粉细砂。

2 数学模型

MIKE 21 FM 采用非结构化网格有限体积法求解二维浅水方程,模拟计算河段平面水位、流场及河床细部的变化情况,在短河段短时期的河床细部数值模拟计算中应用广泛。采用 MIKE 21 式计算隧址河段冲刷深度,以便与冲刷试验结果进



图1 隧址

Fig. 1 Tunnel site

行比较,也为模型高度设计以及模型砂铺设厚度提供依据。

2.1 控制方程

模型采用平面二维浅水方程模拟隧址段的水流运动,二维浅水控制方程组如下所示

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}_y}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial h \bar{v}_x}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}_y \bar{v}_x}{\partial y} = f \bar{v}_x h -$$

$$gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} -$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial h \bar{v}_y}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}_x \bar{v}_y}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}_y^2}{\partial y} = -f \bar{v}_y h -$$

$$gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} -$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: t 为时间; x, y, z 分别为右手笛卡儿坐标系中横向、纵向、竖向; η 为水面相对于未扰动水面的高

度,即通常所说的水位; h 为静止水深; v_x, v_y, v_z 分别为流速在 x, y, z 方向上的分量; p_a 为当地大气压; ρ 为水密度; ρ_0 为参考水密度; $f = 2\Omega \sin(\varphi)$ 为科里奥利参数, $\Omega = 0.729 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,为地球自转角速率, φ 为地理纬度; $f \bar{v}_x$ 和 $f \bar{v}_y$ 分别为 x, y 方向的科里奥利加速度; τ_{sx}, τ_{sy} 分别为 x, y 方向表面应力; τ_{bx}, τ_{by} 分别为 x, y 方向底部应力; s_{xx} 为作用面法向为 x 方向,应力沿 x 方向的辐射应力分量; s_{xy} 为作用面法向为 x 方向,应力沿 y 方向的辐射应力分量; s_{yx} 为作用面法向为 y 方向,应力沿 x 方向的辐射应力分量; s_{yy} 为作用面法向为 y 方向,应力沿 y 方向的辐射应力分量; T_{xx} 为作用面法向为 x 方向,应力沿 x 方向的黏滞应力分量; T_{xy} 为作用面法向为 x 方向,应力沿 y 方向的黏滞应力分量; T_{yx} 为作用面法向为 y 方向,应力沿 x 方向的黏滞应力分量; T_{yy} 为作用面法向为 y 方向,应力沿 y 方向的黏滞应力分量; S 为源汇项; u_s, v_s 分别为源汇项 x, y 方向水流流速分量。

2.2 模型计算范围及网格划分

二维计算模型采用非结构三角形网格元,以便于复杂河岸边线的模拟。同时,对于计算区域内滩地干湿过程,采用水位判别法进行模拟,即计算点水

深小于 0.1 m 浅水深时,假定为滩地干出,令该处流速为 0;计算点水深大于 0.2 m 时,假定为潮水上滩,进行计算。

模型计算范围主要为该工程上下游富春江河道,计算上边界为工程位置上游 19 km 处小桐洲溪与富春江汇合口,下边界为工程位置下游 26 km 处钱塘江闻堰水文站,模型计算范围见图 2。对于上边界洪水位的确定,秦望通道处水库调节后频率为 1% 的洪峰流量为 25 370 m³/s,而天然洪水条件下频率为 1% 的洪峰流量为 31 400 m³/s,基于最不利原则,选取天然洪水条件下洪峰流量作为设计洪峰流量;下边界洪水位取闻堰水文站频率为 1% 的设计水位 9.06 m。

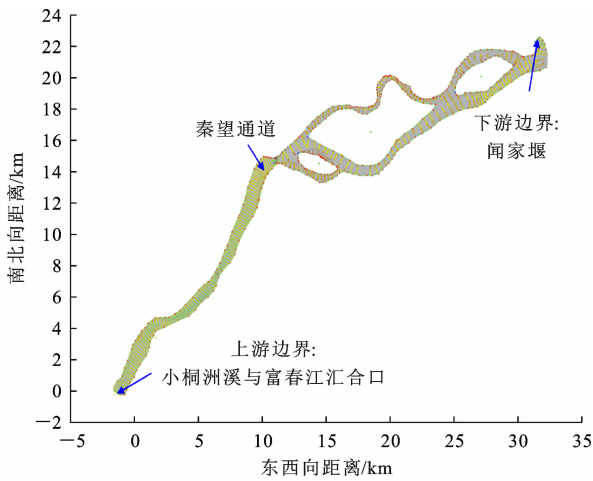


图2 模型计算范围

Fig. 2 Computing domain of model

计算区域内共布设 38 672 个三角形网格,20 700 个有效节点,最小空间步长 1 m,水流时间步长 30 s。工程位置附近数学模型网格详见图 3。

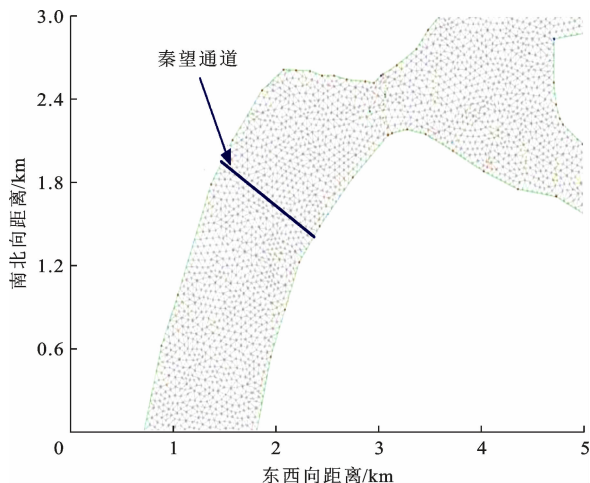


图3 工程位置附近数学模型网格划分

Fig. 3 Mesh division of mathematical model around engineering location

2.3 工况设置

结合该工程主体设计 100 年一遇和 300 年一遇洪水标准,本试验提出 4 种计算工况,分别为上边界 100 年一遇洪水流量+下边界 100 年一遇洪水位、上边界 100 年一遇洪水流量+下边界最低潮水位、上边界 300 年一遇洪水流量+下边界 100 年一遇洪水位、上边界 300 年一遇洪水流量+下边界最低潮水位,分别为工况 1~4。

下边界洪水位主要取决于洪峰流量、下游河口段江道冲淤和外海潮汐条件。富春江为钱塘江干流,经桐庐、富阳至萧山闻家堰与浦阳江汇合,富阳段洪水位主要受上游闻家堰洪峰流量控制,因此,采用其洪峰流量作为富阳洪水位设计参考标准,富春江闻家堰站 1% 频率设计水位为 9.06 m,因此,计算中下边界洪水位取为 9.06 m。计算工况如表 1 所示。

表1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

计算方案	工况	工况内容
100 年一遇标准	1	上边界 100 年一遇洪水流量 31 400 m ³ /s, 下边界 100 年一遇洪水位 9.06 m
	2	上边界 100 年一遇洪水流量 31 400 m ³ /s, 下边界最低潮水位 1.31 m
300 年一遇标准	3	上边界 100 年一遇洪水流量 38 680 m ³ /s, 下边界 100 年一遇洪水位 9.06 m
	4	上边界 100 年一遇洪水流量 38 680 m ³ /s, 下边界最低潮水位 1.31 m

2.4 模拟结果及分析

2.4.1 流场速度分布特征

图 4 为 4 种工况下,工程位置附近流场。由图 4 可以看出,隧址断面附近河道的流速分布基本相同,总体上呈顺岸流流动趋势,受上下游地形条件的影响,隧址断面的流速分布呈左岸小右岸大的规律分布。隧址断面的垂线平均流速相差不大,工况 1 相对较小,流速为 1.3~1.9 m/s,工况 4 相对较大,流速为 1.5~2.2 m/s。

2.4.2 河床冲刷深度分析

根据数学模型计算结果,表 2 列举了 4 种工况下隧址处的主要水流参数。

数模计算结果表明,在相同标准下,下游低潮位时来流量大,水位低,上下游水位差较大,因此流速相对较大,更容易在河槽产生冲刷。故选择工况 2 和工况 4 作进行冲刷计算。

根据《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30—2015)规定,黏性土河床的冲刷深度可按下式

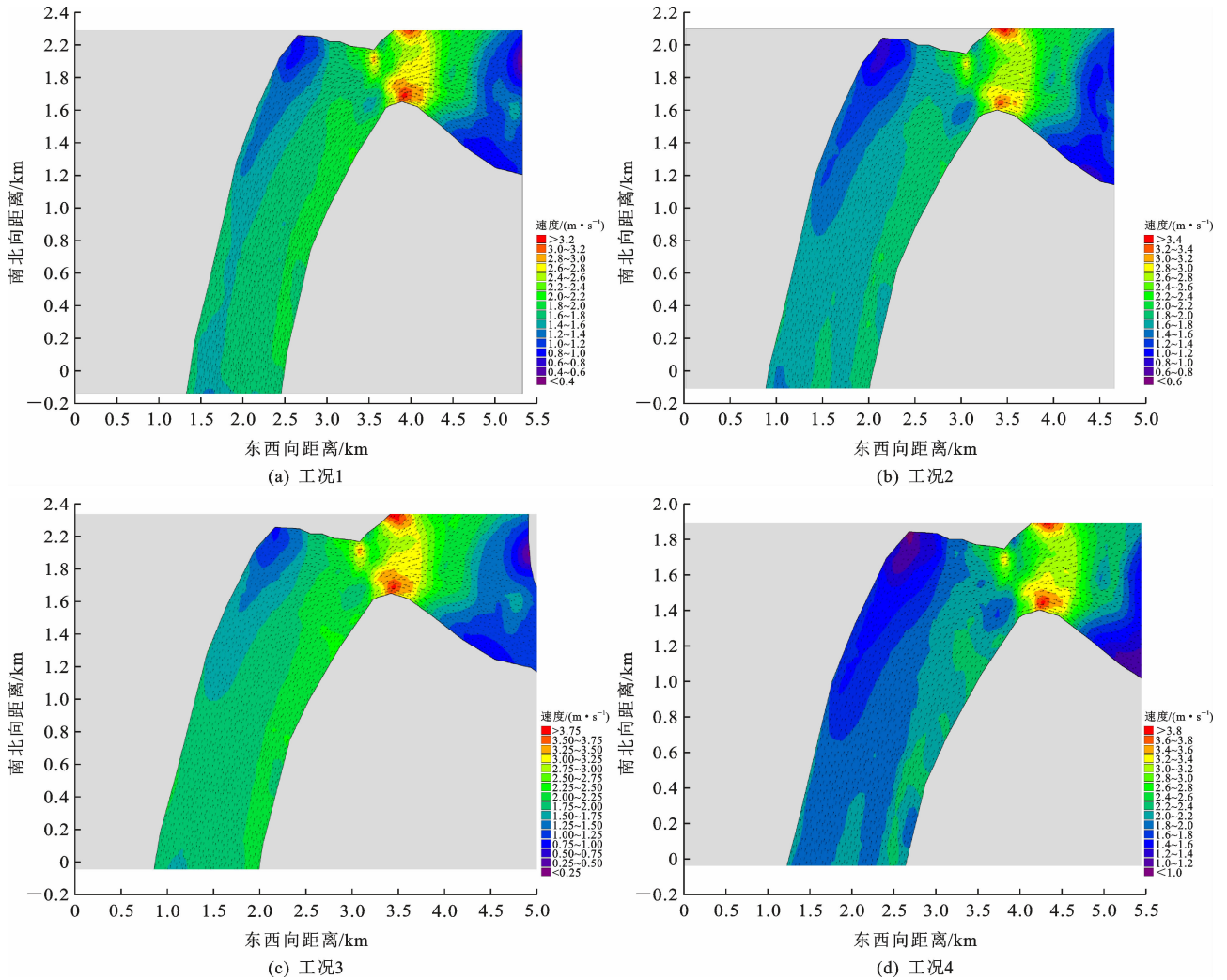


图4 工程位置附近流场

Fig. 4 Flow fields around engineering location

表2 隧址处主要水流参数

Table 2 Main water flow parameters at tunnel site

工况	水位/m	断面流速/(m·s ⁻¹)	备注
1	15.26	1.3~1.9	边界高水位时
2	14.73	1.3~2.1	边界低水位时
3	16.73	1.4~2.1	边界高水位时
4	16.26	1.5~2.2	边界低水位时

计算^[24],即

$$h_p = \left\{ A_d \frac{Q_2}{\mu B_{ej}} \left(\frac{h_{cm}}{h_{cq}} \right)^{5/3} \left[0.33 \left(\frac{1}{I_L} \right) \right]^{-1} \right\}^{5/8} \quad (4)$$

式中: h_p 为一般冲刷后水深; A_d 为单宽流量集中系数, $A_d = (B^{0.5}/H)^{0.15}$,取1.0~1.2(本文计算取1.2), B 、 H 分别为平滩水位时河槽宽度和河槽平均水深(本文计算分别取1000 m、9.38 m); Q_2 为河槽部分通过的设计流量; μ 为水流侧向压缩系数,根据公路桥位勘测设计规范取 $\mu = 0.98$; B_{ej} 为桥下河床部分桥孔过水净宽; h_{cm} 为桥下河床最大水深; h_{cq} 为

桥下河床平均水深; I_L 为冲刷坑范围内黏性土液性指数,取0.16~1.19(本文计算取1.18)。

隧址处河床冲刷深度计算值如表3所示。由表3可知,在100年一遇洪水设计流量下,工况2的河床冲刷深度为4.24 m,在300年一遇洪水设计流量下,工况4的河床冲刷深度为6.45 m。

3 物理模型设计

数学模型主要用来计算隧址处的断面流速,基于断面流速可以对冲刷深度进行估算,可以与试验结果进行比较,同时为模型试验中模型砂铺设厚度、隧址上下游宽度模拟提供依据。

3.1 模型模拟范围

在二维数学模型计算过程中,上边界为秦望通道上游19 km处小桐洲溪与富春江汇合口,下边界为秦望通道下游26 km处钱塘江闻堰水文站。在物理模型试验过程中,考虑隧址处河道水流、地形

表 3 河床冲刷深度计算
Table 3 Calculation of riverbed scour depth

工况	说明	潮位/m	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	河宽/m	河床最大水深/m	河床平均水深/m	冲刷后水深/m	河床冲刷深度/m
2	富春江 100 年洪水+最低潮位	1.31	31 400	1 000	19.85	17.95	24.09	4.24
4	富春江 300 年洪水+最低潮位	1.31	38 680	1 000	20.97	18.98	27.42	6.45

注:河床最低点高程为-4.6 m。

等因素,模型的模拟范围长度方向上游模拟至隧址以上 600 m,下游模拟至隧址以下 400 m;隧址断面宽度方向模拟 120 m,隧址上下游宽度方面模拟根据数学模型计算结果和河床地址条件确定,物理模型模拟范围示意为如图 5 所示。模型上下游增加过渡段及必要的稳流措施,以保证试验范围的水流条件相似。动床模型的模拟范围为隧址上游 250 m 和隧址下游 200 m,如图 6 所示。模型砂的铺设厚度按照最大计算冲刷深度并留有安全余量进行确定。

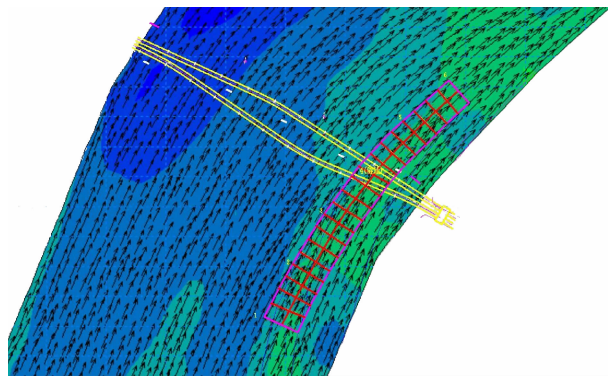


图 5 物理模型模拟范围

Fig. 5 Physical model simulation range

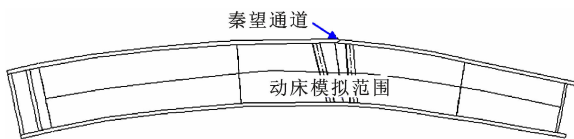


图 6 动床模拟范围

Fig. 6 Simulation range of mobile bed

3.2 模型相似比尺

模型按重力相似准则设计,兼顾阻力相似,几何正态,综合考虑试验观测内容和要求以及试验精度,选择模型平面比尺 $\lambda_L = 50$ 。根据试验选取河道范围及相似比尺,确定模型长度为 20 m,宽度为 2.4 m,动床长度为 9 m。秦望通道隧址河段冲刷试验物理模型比尺统计见表 4。

表 4 隧址河段冲刷试验物理模型比尺

Table 4 Scales of physical model for scour test of tunnel site river section

相似律	比尺名称	数值
几何相似	平面比尺	50
	水深比尺	50
水流运动相似	流速比尺	7.07
	流量比尺	17 677.67
	糙率比尺	1.92
	起动流速比尺	7.07

3.3 模型砂选择

隧址断面隧道上部河床质主要有 2 层:第 1 层为砂土,中值粒径约为 0.39 mm,厚度为 3~6 m;第 2 层为粉土,中值粒径约为 0.037 mm。考虑到第 1 层砂土厚度较小,且起动流速较小,在较大洪水作用下容易被水流穿透,因此动床模型试验按照第 2 层粉土进行模拟。根据经验选取性能稳定且在动床模型中常用的黑电木粉作为模型砂。采用文献[25]中公式对不同水深条件下原型砂及模型砂的起动流速进行计算(表 5),中值粒径为 0.36 mm、密度为 $1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的黑电木粉在模型水深为 0.20~0.44 m 时(对应原型水深为 10~22 m),其起动流速为 11.12~12.30 cm/s,起动流速比尺为 6.34~7.73(平均值为 7.06),与理论流速比尺 7.07 接近,满足起动相似要求。

表 5 原型砂及模型砂起动流速及起动流速比尺计算结果

Table 5 Calculation results of starting flow rates and their scales for prototype and model sands

原型砂		模型砂		起动流速比尺
原型水深/ m	起动流速/ ($cm \cdot s^{-1}$)	模型水深/ cm	起动流速/ ($cm \cdot s^{-1}$)	
10	70.55	20	11.12	6.34
12	75.12	24	11.39	6.60
14	79.45	28	11.62	6.84
16	83.58	32	11.82	7.07
18	87.56	36	12.00	7.30
20	91.39	40	12.16	7.52
22	95.09	44	12.30	7.73

3.4 模型率定

3.4.1 水面线比较

试验中,将模型中隧址断面水位通过尾门调至与数模计算中该断面的平均水位,然后读取进口和出口断面水位,与数模计算结果进行比较,各种工况下的实测结果见表6。

表6 模型实测水面线

Table 6 Tested water surface lines of model

测点	工况1		工况2		工况3		工况4	
	数模水位/m	物模水位/m	数模水位/m	物模水位/m	数模水位/m	物模水位/m	数模水位/m	物模水位/m
进口	15.33	15.32	14.80	14.78	16.82	16.81	16.35	16.34
隧址	15.26	15.26	14.73	14.73	16.73	16.73	16.26	16.26
出口	15.23	15.22	14.69	14.70	16.69	16.69	16.22	16.23

注:物模水位为根据水深比尺换算后的原型水位。

试验结果表明,物理模型中实测的水面线与数模计算值较为接近,水位误差在 ± 2 cm之内,表面模型和原型阻力达到较好相似。

3.4.2 河道流速分布比较

为观测河道流速分布,模型共布置6个测速断面,每个断面布置5条测速垂线,每条垂线上布置5个流速测点,取5个点的算术平均值作为该垂线的平均流速。模型中测速断面布置见图7。

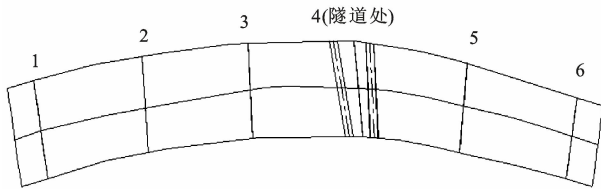


图7 河道测速断面布置

Fig. 7 Velocimetry section layout of river

试验观测结果表明,工况1~4各断面的流速分布与数模计算结果基本相同(相对误差在 $\pm 6\%$ 以内),表明模型的上下游模拟长度的确定合理,能保证隧址断面的水流流速分布与数模一致。

4 隧址河床冲刷试验

4.1 试验条件

结合工程主体设计100年一遇和300年一遇洪水标准,采用与数学模型相同的试验工况进行动床冲刷试验。冲刷时间以隧址处冲刷稳定为标准,模型试验中冲刷时间约为10 h,相当于原型70 h左右。

4.2 试验结果

实测工况1~4隧址断面冲刷参数见表7。由

表7 隧址处河道冲刷参数

Table 7 River scour parameters at tunnel site

工况	原河底最低高程/m	冲刷后河底最低高程/m	冲刷深度/m
1	-0.65	-2.15	1.50
2	-0.65	-2.60	1.95
3	-0.65	-3.05	2.40
4	-0.65	-5.15	4.50

表7可知:工况4的冲刷深度最大。实测工况4隧址断面冲刷后河底最低高程为 -5.15 m,与原河床断面最低点(-0.65 m)相比,最大冲刷深度为 4.50 m。

4.3 隧址冲刷深度分析

试验分别采用冲刷计算和局部冲刷试验2种方法对富春江秦望通道隧址的冲刷深度进行试验模拟及计算,由于2种方法各有其特点及适用范围,有必要对其结果进行综合分析比较。工况2、4试验得到的隧址处冲刷形态如图8所示。计算和模型试验得到的隧址冲刷深度见表8。

由表8可知,2种方法得出的结果相差较大,主要由于计算公式中存在较多假设条件,如将地层进行简化、公式中计算系数依据经验值确定,只能反映在持续水文条件下的冲刷情况。而局部冲刷试验采用洪水峰值流量和对应下游潮位的恒定流模拟原型冲刷70 h后的冲刷结果,反映相应历时及极限水文条件下的河床冲刷情况,冲刷深度较符合实际情况。

4.4 隧址最大冲刷线预测

河床冲刷是水流、泥砂共同作用的结果,影响因素复杂。由于隧址局部冲刷试验主要反映该区域的冲刷深度,难以准确反映整个隧址断面的冲刷深度。从隧址断面的流速分布特征可知,断面流速分布比较均匀,因此结合泥砂起动机理及局部冲刷模拟区域可以预测,在低于局部动床的隧址断面区域,由于水深较大,泥砂相对不容易起动,因此河床冲刷深度不会超过局部模型试验的冲刷深度。高于局部模型模拟区域的隧址河床冲刷深度会大于局部模型试验的冲刷深度,但其河床冲刷底高程不会低于局部模型区域的冲刷底高程。岸坡的冲刷尤其是较陡岸坡冲刷也是试验模拟的难点,因为在岸脚冲刷后岸坡会出现坍塌,试验难以模拟真实情况的坍塌形态。因此隧址冲刷线的预测遵循以下原则:①对于低于局部模型区域的河床冲刷深度,按照局部模型的冲刷深度进行预测;②高于模型模拟区域的河床冲刷深度,按



图 8 隧址断面冲刷形态

Fig. 8 Flood scour pattern of tunnel site section

表 8 冲刷计算及冲刷试验 2 种方法下隧址最大冲刷深度对比

Table 8 Comparison of maximum scour depths by scour calculation and test at tunnel site

工况编号	计算最大冲深/m	冲刷试验最大冲深/m
2	4.24	1.95
4	6.45	4.50

照冲刷底高程与局部模型模拟区域冲刷绝对高程相同进行预测;③两侧岸坡的冲刷深度亦按照冲刷底高程与局部模型模拟区域冲刷绝对高程相同进行预测。隧址断面冲刷线预测结果见图 9。隧址断面原河床高程与水平距离(左岸至右岸)间对应关系见表 9。

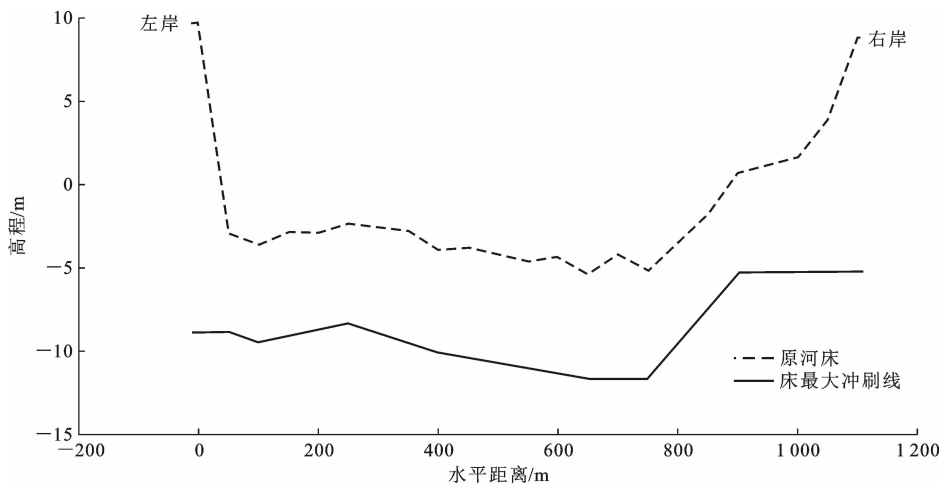


图 9 隧址断面预测最大冲刷线

Fig. 9 Predicted maximum scour line at tunnel site section

表9 隧址断面原河床高程

Table 9 Original riverbed elevation at tunnel site section

间距/m	0	50	100	200	250	300	350	400
高程/m	9.74	-2.87	-3.51	-2.78	-2.36	-2.57	-2.74	-3.90
间距/m	450	500	550	600	650	700	750	800
高程/m	-3.74	-4.04	-4.45	-5.29	-5.29	-4.14	-5.02	-3.39
间距/m	850	900	950	1 000	1 050	1 100		
高程/m	-1.67	0.76	1.29	1.73	3.97	8.87		

5 结 语

(1)根据数模计算结果,在相同标准下,下游低潮位时水流量大,水位低,上下游水位差较大,因此流速相对较大,更容易在河槽产生冲刷,因此,计算工况选择的依据合理。

(2)数学模型计算结果表明,在100年一遇洪水设计流量下,工况2的河床冲刷深度为4.24 m,300年一遇洪水设计流量下,工况4的河床冲刷深度为6.45 m。

(3)冲刷试验结果表明,在最不利工况(工况4)条件下,隧址断面河床最低冲刷高程为-5.15 m,与原河床断面最低点(-0.65 m)相比,最大冲刷深度为4.50 m,而该工况河道断面对应的冲刷计算河床最低冲刷高程为-11.06 m,冲刷深度为6.45 m。

(4)冲刷试验反映洪水相应历时(原型70 h)及极限水文条件下的河床冲刷情况,冲刷深度比较符合实际情况,而冲刷计算公式得到的冲刷深度反映在持续水文条件下的冲刷情况,冲刷深度结果偏于安全,可以作为极限冲刷深度时参考。

(5)建议实际工程隧道安全埋深按照现有河床最低高程以及局部冲刷试验冲刷深度并适当考虑安全富裕来考虑,根据局部动床冲刷模型试验结果预测的隧址断面最大冲刷线可以作为隧道埋深设计时参考。

(6)富春江远期规划方案中,隧址上游可能会建设水库,而水库的建设运行会对河段流量产生影响,即枯水期流量增加而蓄水期流量减小,后续应进一步展开研究。

参考文献:

References:

[1] 李伯昌. 1984年以来长江口北支演变分析[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 9-17.
LI Bo-chang. Channel evolution in North Branch of Changjiang River estuary since 1984 [J]. Hydro-

Science and Engineering, 2006(3): 9-17.

- [2] 邢雪艳, 寸杰, 赵兴佐, 等. 瑞丽江中游水位变化趋势与河床演变关系分析[J]. 三峡生态环境监测, 2024, 9(3): 84-89.
XING Xue-yan, CUN Jie, ZHAO xing-zuo, et al. Analysis on the relationship between the trend of water level change and river bed evolution in the middle reaches of Ruili river [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2024, 9(3): 84-89.
- [3] 贺巧宁, 丁贤荣. 基于GIS的河床演变断面分析方法研究[J]. 人民长江, 2008, 39(24): 99-100, 105.
HE Qiao-ning, DING Xian-rong. Research on GIS-based cross-section analysis method for riverbed evolution[J]. Yangtze River, 2008, 39(24): 99-100, 105.
- [4] 朱子园, 陈静, 毛武蓉. 三峡水库蓄水后长江中游嘉鱼河段河床演变特性分析[J]. 水利水电快报, 2024, 45(7): 24-28, 45.
ZHU Zi-yuan, CHEN Jing, MAO Wu-rong. Analysis of riverbed evolution characteristics of Jiayu reach in middle reaches of Yangtze River after impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2024, 45(7): 24-28, 45.
- [5] 李伯昌, 王珏, 唐敏娟. 长江口北港近期河床演变分析与治理对策[J]. 人民长江, 2012, 43(3): 12-15, 42.
LI Bo-chang, WANG Jue, TANG Min-jiong. Analysis on recent evolution of Beigang branch of Yangtze River Estuary and its regulation countermeasures[J]. Yangtze River, 2012, 43(3): 12-15, 42.
- [6] 杨芳, 何用. 广佛过江隧道河段极限冲刷数值模拟[J]. 人民珠江, 2010, 31(2): 14-18.
YANG Fang, HE Yong. Numerical simulation of extreme scouring in the river section of the Guangzhou-Foshan Crossing Tunnel[J]. Pearl River, 2010, 31(2): 14-18.
- [7] 宝婉宁. 辽河干流中下游河道特性及冲刷深度分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
BAO Wan-ning. Study on characteristics and scour depth in middle and lower reaches of liaohe river[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [8] 王华, 曹双, 于洋, 等. 南京河段拟建过江隧道河段河床冲刷数值模拟[J]. 水运工程, 2019(11): 67-73.

- WANG Hua, CAO Shuang, YU Yang, et al. Numerical simulation of river bed erosion for the proposed river-crossing tunnel under Nanjing reach[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019(11): 67-73.
- [9] 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 Guo-lu, CHEN Shu. Mathematical model studies on maximum bed erosion depth near Shiyezhou river-crossing tunnel [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(1): 1-8.
- [10] 孙凯旋,高亚军,李国斌,等.重庆长江隧道河床演变及冲刷预测[J].*水运工程*,2020(7):181-186,198.
SUN Kai-xuan, GAO Ya-jun, LI Guo-bin, et al. Riverbed evolution and erosion prediction of the Yangtze River-crossing tunnel in Chongqing[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2020(7): 181-186, 198.
- [11] 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*,2007,28(5):32-36.
HE Yong, XU Jun-feng. Pearl River Zhoutouzui Section River-crossing tunnel construction limit scour modeling study [J]. *Pearl River*, 2007, 28 (5): 32-36.
- [12] 赵建锋,杨奇霖,伍文俊,等.固结黏性土河床冲刷深度试验研究[J].*中国农村水利水电*,2024(8):169-174,179.
ZHAO Jian-feng, YANG Qi-lin, WU Wen-jun, et al. Experimental study on scour depth of consolidated cohesive soil riverbed [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(8): 169-174, 179.
- [13] 李锦涛,郭向红,贺丽丽,等.基于多因素协同作用的沿河公路护岸冲刷深度分析与计算[J].*山西水利科技*,2023(4):29-37,41.
LI Jin-tao, GUO Xiang-hong, HE Li-li, et al. Analysis and calculation of scouring depth of highway revetment along the river based on the synergistic action of multiple factors[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2023(4): 29-37, 41.
- [14] 郭保和,包鹤立.珠海隧道工程极限冲刷模型试验研究[J].*中国市政工程*,2021(5):1-3,112.
GUO Bao-he, BAO He-li. Experimental study on ultimate scouring model of Zhuhai Tunnel project[J]. *China Municipal Engineering*, 2021(5): 1-3, 112.
- [15] 吴门伍,严黎,胡晓张,等.南宁过江隧道河段极限冲刷深度预测[J].*人民珠江*,2012,33(1):47-51.
WU Men-wu, YAN Li, HU Xiao-zhang, et al. Prediction of ultimate scour depth in the river section of Nanning crossing tunnel[J]. *Pearl River*, 2012, 33(1): 47-51.
- [16] 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(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 reach of a tunnel across the Qiantang estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2008(5): 685-692.
- [17] 钟小代,高海静,郑国诞,等.富春江富阳河段过江管道最低冲刷高程研究[J].*人民长江*,2021,52(7):148-152.
ZHONG Xiao-dai, GAO Hai-jing, ZHENG Guo-dan, et al. Study on lowest scour elevation of crossing pipeline in Fuyang reach of Fuchun River [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(7): 148-152.
- [18] 于洋,李瑞杰,王华,等.南京市拟建过江隧道河段河床极限冲刷深度研究[J].*人民长江*,2020,51(9):6-11.
YU Yang, LI Rui-jie, WANG Hua, et al. Study on maximum scouring depth at riverbed of proposed cross-river tunnel section in Nanjing City [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(9): 6-11.
- [19] 严黎,吴门伍,佟晓蕾,等.南宁地铁三号线邕江过江隧道工程隧址河段冲深预测研究[C]//中国水利学会.中国水利学会2016学术年会论文集(上册).南京:河海大学出版社,2016:277-282.
YAN Li, WU Men-wu, TONG Xiao-lei, et al. Prediction of riverbed scour depth at the tunnel crossing section of Nanning Metro Line 3 beneath the Yong River [C]// Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the 2016 Annual Academic Conference of the Chinese Water Resources Society (Upper Volume). Nanjing: Hohai University Press, 2016: 277-282.
- [20] 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.
- [21] 赵维阳,胡勇,张胡.长江下游过江隧道工程河段极限冲刷深度研究[J].*水运工程*,2023(1):120-126.
ZHAO Wei-yang, HU Yong, ZHANG Hu. Maximum scouring depth for river reach of

- underwater tunnel project in lower reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(1): 120-126.
- [22] 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 under the lower reach Yangtze River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 90-97.
- [23] 刘中峰,刘 达,罗志发,等.珠江三角洲网河区过江隧道极限冲刷深度研究[J].广东水利水电,2023(11): 30-34.
LIU Zhong-feng, LIU Da, LUO Zhi-fa, et al. Study on maximum scouring depth of cross-river tunnel in the channel network system of the Pearl River Delta[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2023(11): 30-34.
- [24] JTG C30—2015,公路工程水文勘测设计规范[S].
JTG C30—2015, Hydrological specifications for survey and design of highway engineering[S].
- [25] 窦国仁.再论泥砂起动流速[J].泥砂研究,1999(6): 1-9.
DOU Guo-ren. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1-9.