

超大城市公路涉水桥梁防洪标识体系构建与预警技术研究

黄敏

(上海市嘉定区交通建设管理中心, 上海市 201899)

摘要: 针对全球气候变化与地面沉降背景下, 超大城市平原感潮河网地区涉水桥梁防洪安全面临的复杂挑战, 旨在构建一套融合水文统计与精细化水动力模拟的科学防洪标识体系及动态预警机制。基于上海市1995—2024年经严格地面沉降订正的长序列实测水文资料, 结合河网水流往复受控及桥梁密集的特性, 引入MIKE 11一维河网水动力模型, 聚焦桥梁结构的阻水效应。重点利用能量方程与动量方程的耦合, 推演桥梁缩窄断面的局部壅水过程, 实现了复杂非恒定流(潮汐叠加洪水)条件下桥前水位壅高的动态精确模拟。基于模拟结果, 进一步构建了雷达水位自动监测预警体系。应用验证表明, 局部壅水效应的计入显著提高了特征水位的计算精度, 有效解决了受控河网水位精准推求的难题, 为提升城市交通基础设施的防洪韧性提供了重要的科学依据。

关键词: 公路涉水桥梁; 防洪标识体系; 动态预警机制; 局部壅水效应; MIKE11模型; 非恒定流

中图分类号: TV13

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0300-04

Research on Construction of Flood Control Marking System and Early Warning Technology for Water-related Bridges on Highways in Megacities

HUANG Min

(Shanghai Jiading District Transportation Construction Management Center, Shanghai 201899, China)

Abstract: To address the complex challenges facing the flood control safety of water-related bridges in the plain tidal river network regions of megacities under the context of global climate change and land subsidence, which aims to construct a set of scientific flood control identification system and dynamic early warning mechanism that integrates hydrological statistics with refined hydrodynamic simulation. Based on the long-sequence measured hydrological data of Shanghai from 1995 to 2024, which have been strictly corrected for ground subsidence, and combined with the characteristics of controlled reciprocating water flow in the river network and dense bridges, the MIKE11 one-dimensional river network hydrodynamic model is introduced to focus on the water-blocking effect of bridge structures. The focus is on utilizing the coupling of the energy equation and the momentum equation to deduce the local water backwater process of the narrowed section of the bridge, achieving dynamic and precise simulation of the water level rise in front of the bridge under complex non-constant current conditions (tidal superposition flood). Based on the simulation results, a radar automatic water level monitoring and early warning system is established. Application verification demonstrates that the inclusion of the local backwater effect significantly improves the calculation accuracy of the characteristic water level and effectively solves the problem of precisely calculating the water level of the controlled river network, which provides an important scientific basis for enhancing the flood control resilience of urban transportation infrastructure.

Keywords: highway water-related bridge; flood control identification system; dynamic early warning mechanism; local backwater effect; MIKE11 model; unsteady flow

0 引言

收稿日期: 2025-12-31

作者简介: 黄敏(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事道路桥梁维修养护工作。

随着全球气候变化导致的极端天气事件频发和海平面上升, 加之城市化进程中不可避免的地面沉降累积效应, 超大城市平原河网地区的涉水桥梁面

面临着日益严峻的防洪安全风险^[1-3]。上海市水系纵横交错,公路交通网络中包含大量跨越黄浦江及骨干内河道的桥梁。

然而,当前桥梁防洪特征水位的确定往往存在一个关键短板:未能精确考虑桥梁自身结构(桥墩、桥台)束窄河道后对水流产生的局部阻滞和水位抬升效应(即“壅水”)。在平原感潮河网中,水流是复杂的非恒定流,流速大小和方向随潮汐时刻变化,传统的基于稳态最大流量的经验公式难以准确评估动态的壅水高度。忽略这一效应会导致特征水位定标偏低,增加洪涝风险^[4-5]。

为了解决这一问题,本文旨在构建一个考虑精细化水力学效应的闭环体系:首先,利用长序列数据和地面沉降修正夯实基础;其次,引入 MIKE11 水动力模型,并重点推演桥梁局部壅水计算公式,实现在非恒定流条件下对桥前水位的精准模拟;最后,基于精确的定标值构建智能预警技术。

1 基于桥梁局部壅水推演的特征水位分析与标识体系构建

1.1 多源水文数据融合与“三性”审查

为确保分析基准的可靠性,收集了上海市吴淞、黄浦公园、米市渡等 9 个国家基本水文站 1995—2024 年的长序列水文资料。关键步骤是对所有历史潮位数据进行了地面沉降订正,统一至 1985 国家高程基准,并完成 Mann-Kendall 趋势检验和 Pettitt 突变检验,确保数据序列的一致性^[6]。

1.2 三级特征水位标识体系的定义

依据交通运输部相关行动方案及国家规范,本文构建了包含 3 个层级的防洪标识体系,作为后续模型计算的目标输出值。

(1)设防警戒水位(红色)。依据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),特大桥设计洪水频率标准为 1/300。根据交通运输部《2025 年汛期公路灾害风险隐患排查行动方案》(交办公路函〔2025〕531 号)中关于防洪标识设置的技术要求,设防警戒水位的洪水频率取值应按设计洪水频率的 2 倍推算(即 $1/300 \times 2 = 1/150$)。因此,特大桥的设防警戒水位按 150 年一遇标准进行计算与定标。

(2)安全运行基准水位(黄色)。依据《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30—2015)计算,代表保证桥梁正常通航与结构安全的最高水位。

(3)历史最大洪水位(蓝色)。基于实测资料(如

2021 年出现的历史最高潮位)或洪痕调查确定,作为直观的历史风险参照^[7]。

防洪体系三级水位说明图见图 1。

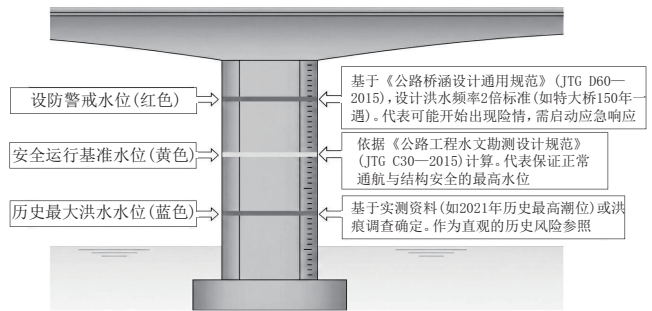


图 1 防洪体系三级水位说明图

1.3 复杂感潮河网中桥梁水位的精细化推演策略

针对上海市河网特性,本研究采用差异化策略:片外大江大河采用“频率算法+水面线法”;片内复杂河网引入 MIKE11 模型。

1.3.1 基础水面线推算(以片外河道为例)

对于黄浦江干流等片外河道,首先利用 P-III 型频率曲线推算控制站设计水位;随后利用伯努利能量方程推算天然状态下的沿程水面线(作为计算壅水的基准),计算公式如下:

$$Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

式中: Z_1 、 Z_2 分别为上游和下游断面的水位,m; V_1 、 V_2 分别为上游和下游断面的平均流速,m/s; α_1 、 α_2 为动能校正系数,通常取 1.0; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; h_f 为上下游断面间的沿程摩阻水头损失,m,由曼宁公式确定。

1.3.2 桥梁缩窄断面局部壅水机理与计算推演

当水流流经桥梁时,桥墩和桥台占据了部分过水断面,导致水流被迫收缩、加速通过桥孔,随后在下游扩散减速。这一过程伴随着显著的局部能量损失,从而迫使上游水位抬升以提供足够的势能梯度。在复杂的感潮河网非恒定流中,这一壅水过程是动态变化的。

1.3.2.1 物理模型概化

为推演计算公式,将桥梁河段划分为 4 个关键断面。断面 1:上游未受扰动断面;断面 2:紧靠桥墩上游断面(水位开始壅高);断面 3:桥孔内缩窄断面(流速最大、水位最低);断面 4:下游水流恢复断面。

河道断面布置图见图 2。

1.3.2.2 基于能量方程的壅水推演^[8-10]

在断面 1 和断面 4 之间建立能量平衡方程。桥梁引起的水位壅高 Δh (假设河底平坦,即 $\Delta h = Z_1 -$

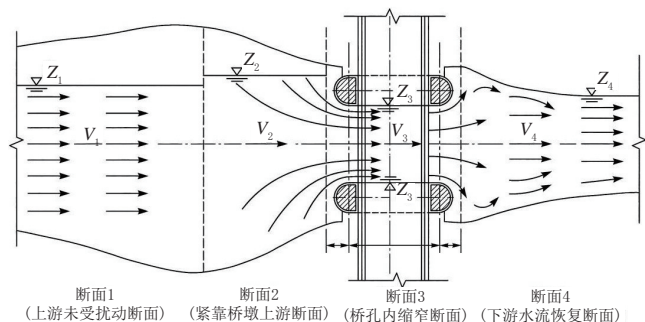


图2 河道断面布置图

Z_4)主要由通过桥梁结构产生的总水头损失 H_{bridge} 决定。

总水头损失由三部分组成,表达式为:

$$H_{\text{bridge}} = h_c + h_p + h_e \quad (2)$$

式中: h_c 为进口收缩损失,m; h_p 为桥墩绕流阻力损失,m; h_e 为出口扩散损失,m。

根据水力学原理,上述各项损失均可表示为流速水头的函数:

$$h_c = \zeta_c \left| \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad (3)$$

$$h_e = \zeta_e \left| \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_4^2}{2g} \right| \quad (4)$$

$$h_p = \zeta_p \frac{V_3^2}{2g} \quad (6)$$

式中: V_1 、 V_4 分别为上游和下游河道天然流速,m/s; V_3 为桥孔内断面平均流速,m/s, $V_3 = Q/A_{\text{opening}}$; ζ_c 、 ζ_e 、 ζ_p 分别为收缩系数、扩散系数和桥墩阻力系数。

联立式(2)至式(5),并将流速用流量 Q 和过水面积 A 表示,上游水位壅高量 Δh 可推演为:

$$\Delta h \approx H_{\text{bridge}} = \frac{Q^2}{2g} \left[\zeta_c \left| \frac{1}{A_3^2} - \frac{1}{A_1^2} \right| + \zeta_p \frac{1}{A_3^2} + \zeta_e \left| \frac{1}{A_3^2} - \frac{1}{A_4^2} \right| \right] \quad (6)$$

式中: Q 为通过断面的流量, m^3/s ; A_1 、 A_4 分别为上游和下游河道的过水面积, m^2 ; A_3 为桥孔内的净过水面积, m^2 。

1.3.2.3 MIKE11 模型中的耦合实现^[11-12]

在实际的 MIKE11 数值模拟中,为了处理非恒定流下的复杂流态转换(如亚临界流向超临界流转换),模型采用更为复杂的能量-动量耦合方法。

模型在桥梁位置插入特殊的结构节点,依据实时计算的弗劳德数(Fr)自动选择计算模式:当 $Fr < 1$ (亚临界流,上海市河网绝大多数情况)时,采用上述改进的能量方程计算损失;当流速极快出现 $Fr > 1$ 时,

则切换至动量方程计算水跃损失。

本研究详细测量了19座桥梁的桥墩尺寸、间距和桥台形态,在模型中精确设置了对应的阻力系数(如圆端形桥墩 $\zeta_p \approx 0.02 \sim 0.05$,矩形桥墩 $\zeta_p \approx 0.1 \sim 0.2$),从而实现了每座桥梁在设计洪水和潮汐作用下动态壅水过程的精准模拟。

2 公路涉水桥梁防洪预警技术-雷达水位自动监测系统^[13]

为克服传统人工观测和接触式设备在极端天气下易受损、响应慢的缺点,本研究设计了一套基于高精度毫米波雷达技术的非接触式水位监测系统。

(1)硬件部署。在桥梁主跨的梁底侧面安装防爆型雷达水位计,避免对通航造成干扰,同时确保其在大风大浪条件下仍能稳定工作。

(2)数据采集策略。系统采取“高频快采”模式,数据采集频率设定为1 s/次(Hz级)。采集到的原始数据通过内置算法进行初步处理,滤除因船行波、风浪引起的水面瞬时高频扰动噪声,确保数据的真实性。

3 典型桥梁壅水效应定量分析

选取位于片内骨干河道上的一座典型公路桥进行详细分析。该桥桥墩较粗,预计壅水效应显著。

建立了2种模型工况进行对比模拟。工况1(天然状态):模型中移除A桥梁,模拟天然河道在50年一遇设计暴雨+潮位下的水位过程;工况2(现状桥梁):模型中包含A桥梁精确结构数据,应用推演的壅水计算方法进行模拟。

各种工况下,河道断面纵向水面线变化及局部壅水分析图见图3。

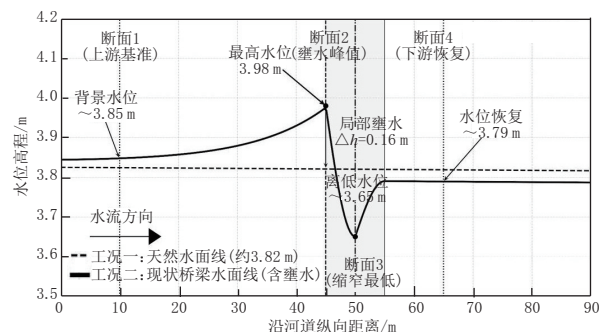


图3 河道断面纵向水面线变化及局部壅水分析图

分析可知:

(1)在设计工况下,若无桥梁阻水,该河段处的天然最高水位约为3.82 m。

(2)考虑桥梁结构后,受桥墩阻流和滞止效应影响,紧靠桥墩上游的断面2处水位抬升最为显著,达到峰值3.98 m。而上游远端的基准断面(断面1)虽然也受回水曲线影响,但水位略低于断面2,体现了壅水沿程向上游衰减的物理特性。

(3)水流进入桥孔缩窄区(断面3)后,由于过水断面减小,流速急剧增大,导致水位出现显著跌落(最低至约3.65 m);随后水流在下游扩散减速,至断面4处水位逐渐恢复,约为3.79 m。

定量分析显示,A桥的存在导致了 $\Delta h = 3.98 - 3.82 = 0.16$ m的显著局部壅水。这一壅高值叠加在天然水位之上,构成了实际的致灾风险水位。若忽略这0.16 m的壅水,将直接导致设防标准偏低。因此,本研究最终依据模型计算出的断面2峰值水位,将A桥的设防警戒水位定标为3.98 m。

4 结 语

(1)理论深度提升:将研究重点从宏观区域调度转移到了微观桥梁结构对水流的影响。推演了基于能量方程的桥梁缩窄断面局部水头损失及水位壅高计算公式,阐明了壅水高度与流量动态相关的物理机制。

(2)精准定标实现:通过在MIKE11模型中耦合精细化的桥梁水力学计算模块,成功实现了在复杂非恒定流(潮汐+洪水)条件下对桥前壅水水位的动态精确模拟。定量分析显示,典型桥梁壅水可达0.15 m以上,忽略此效应将带来显著风险。

(3)应用闭环构建:将包含精确壅水成分的理论

特征水位转化为预警系统的核心阈值,实现了从水力学理论推演到工程实战预警的科学跨越,显著提升了上海市公路基础设施应对极端洪涝灾害的主动防御能力。

参考文献:

- [1] 王寒梅,焦珣.海平面上升影响下的上海地面沉降防治策略[J].气候变化研究进展,2015,11(4):256-262.
- [2] FANG J, SHI P, HU Y, et al. Subsidence control to reduce coastal flooding risks in Shanghai[J]. Nature Communications, 2022, 13: 1-12.
- [3] 龚士良,李采,杨世伦.上海地面沉降与城市防汛安全[J].水文地质工程地质,2008,35(4):96-101.
- [4] 夏丽丽,吴敦银.平原河道桥墩阻水比与壅水特性关系[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):406-411.
- [5] MELVILLE B W, COLEMAN S E. Bridge scour[M]. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 2000.
- [6] 上海市规划和自然资源局.上海市地面沉降防治2020年度工作总结和2021年度工作计划[R].上海:上海市地面沉降防治联席会议办公室,2021.
- [7] DG/T J08-2305—2019 防汛墙工程设计标准[S].
- [8] CHOW V T. Open-channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [9] YARNELL D L. Bridge piers as channel obstructions: Technical Bulletin No. 442[R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Agriculture, 1934.
- [10] Texas Department of Transportation. Hydraulic design manual[M]. Austin: TxDOT, 2019.
- [11] 许朋琮,陆健,吴松林.基于MIKE11的感潮河网区设计洪水位计算研究[J].水文,2019,39(2):67-71.
- [12] 槐文信,张宇,杨中华.包含大型闸坝调度的河网非恒定流数值模拟[J].水科学进展,2008,19(3):374-380.
- [13] 周青松,秦明霞.毫米波雷达在桥梁智慧化监测中的应用研究[J].建筑施工,2024(4):556-559.