

崔广永, 杨勇, 马成城, 等. 基于水文不确定性的桥梁全寿命周期冲刷易损性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 184-198. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.016

CUI Guangyong, YANG Yong, MA Chencheng, et al. Analysis of scour vulnerability for bridge lifetime based on hydrological uncertainty [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 184-198. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.016

基于水文不确定性的桥梁全寿命周期冲刷易损性分析

崔广永¹, 杨勇², 马成城¹, 朱志鹏², 熊文³, 张大牛³

(1. 安徽省蚌明高速公路开发有限公司, 安徽 蚌埠 233000; 2. 安徽省交控建设管理有限公司, 安徽 合肥 230000; 3. 东南大学交通学院桥梁工程系, 江苏 南京 211189)

摘要:【目的】冲刷坑形成是桥梁在洪水作用下水毁的主要原因。水文信息不确定性与多层土冲刷对冲刷深度预测的影响较大, 需要评估桥梁全寿命周期内在洪水冲刷下的安全性能。【方法】以某实际桥梁工程为例, 基于不完全的水文记录信息, 采用季节性自回归积分滑动平均(SARIMA)模型对桥梁桩基全寿命周期内的冲刷深度进行统计分析。依据 AASHTO 规范, 考虑桥梁桩基在洪水作用下的四种失效模式, 构建了基于概率冲刷深度的时变安全性能评估模型, 并获得全寿命周期内的时变易损性曲线。【结果】结果表明, 所提出的方法能够有效预测桥梁基础冲刷深度与服役时间之间的关系, 冲刷深度随时间先快速增长, 后逐渐趋缓, 前 25 a 增长较明显, 之后减慢。【结论】桩基冲刷深度预测值随服役时间延长而增加, 且其失效概率与埋深成负相关, 但受土层参数的影响。该方法可为桥梁全寿命周期内的冲刷评估和设计提供理论依据, 提升桥梁在洪水作用下的安全性。

关键词: 桥梁基础; 风险评估; 水文信息; 冲刷深度; 易损性; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.016

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0184-15



Analysis of scour vulnerability for bridge lifetime based on hydrological uncertainty

CUI Guangyong¹, YANG Yong², MA Chencheng¹, ZHU Zhipeng², XIONG Wen³, ZHANG Daniu³

(1. Anhui Province Bengming Expressway Development Co., Ltd., Bengbu 233000, Anhui, China; 2. Anhui Traffic Control Construction Management Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China; 3. Department of Bridge Engineering, College of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] The formation of scour holes is a primary cause of bridge failure under flood conditions. Uncertainty in hydrological data and multi-layer soil erosion significantly impact the accuracy of scour depth predictions. Evaluating the safety performance of bridges over their entire lifecycle under flood-induced scour is essential. [Methods] Using a real bridge project as

收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-09-01; 录用日期: 2024-10-09; 网络出版日期: 2025-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378135, 52022021, 51978160)

作者简介: 崔广永(1971—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事公路工程管理、养护管理方面的研究。E-mail: 591453111@qq.com

通信作者: 熊文(1982—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事桥梁抗水、桥梁分析与设计理论、智慧桥梁研究。E-mail: wxiong@seu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

a case study, the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) model was applied to conduct a statistical analysis of scour depth over the bridge's lifecycle, based on incomplete hydrological data. Following AASHTO guidelines, four failure modes of bridge pile foundations under flood conditions were considered, and a time-dependent safety performance evaluation model based on probabilistic scour depth was developed. The time-dependent vulnerability curves for the bridge's lifecycle were also obtained. [Results] The result demonstrated that the proposed method effectively predicts the relationship between bridge foundation scour depth and service time, with scour depth initially increasing rapidly before gradually slowing down, particularly over the first 25 years. [Conclusion] The predicted pile foundation scour depth increases with extended service time, and its failure probability is negatively correlated with embedment depth, but is influenced by soil layer parameters. This method provides a theoretical basis for assessing and designing bridge scour over its lifecycle, improving bridge safety under flood conditions.

Keywords: bridge foundation; risk assessment; hydrological information; scour depth; vulnerability; influencing factor

0 引言

桥梁是国家的重要基础设施系统。由于气候变化和全球变暖,洪水事件变得更加频繁且难以预测。最近发生的洪水事件表明,即使是拥有完善基础设施的发达国家也容易遭受严重损害。由于桥梁的倒塌会对经济造成重大损失,因此对桥梁因洪水造成的结构损害进行评估对所有利益相关者来说都是必要的。洪水对结构施加的物理作用通常由三种载荷效应引起:静水压力、动水压力和冲击力。洪水引起的冲刷通常发生在基础土壤中,这也会加剧结构的损害。在实际情况下,洪水会产生快速水流,伴随着碎屑堆积,其大小取决于洪水的速度和结构的形状。这种洪水和碎屑堆积的综合冲击可能导致结构损坏,在极端情况下甚至导致结构倒塌。高流速下洪水还会冲刷支撑基础的土壤,降低整个桥梁基础系统的横向承载能力。KIM等^[1]通过结合可靠性分析和有限元分析,为桥梁的洪水载荷开发了易损性曲线。GENTILE等^[2]研究了基于位移方法对连续钢筋混凝土桥梁抗震性能评估的有效性。NETTIS等^[3]评估了云谱法在抗震易损性分析中的适用性。GHOSH等^[4]开发了桥梁的抗震易损性曲线。WANG等^[5]利用人工神经网络生成了核电站结构的抗震易损性曲线。CHEN等^[6]开发了一种方法来评估地震作用下桥梁网络的易损性。通过考虑冲刷和地震特性的不确定性,TORRES等^[7]完成了地震和冲刷联合作用下桥梁的易损性评估。DECO等^[8]评估了交通载荷、环境侵蚀、冲刷和地震等各种载荷对公路桥梁的影响,重点在于失效概率的评估。许多先前的研究^[9-11]侧重于开发地震和洪水引起的冲刷共同作用下的钢筋混凝土桥梁易损性曲线。使用易损性曲线进行桥梁洪水损害评估的研究较为有限。

易损性曲线是在基于性能的工程框架中评估结构

在任何灾害中损害和损失的便捷表示方式。如公式(1)所示,基于性能的工程框架通过决策变量(DV)以概率术语表示结构风险,其定义为所有利益相关者的成本和收益^[12]。任何灾害的易损性曲线的开发都是这一性能工程框架的一部分,其中结构损害表示为强度测度(IM)的函数。易损性函数描述了灾害强度与结构损害状态超过特定水平的概率之间的关系^[13]。开发洪水灾害的易损性曲线需要模拟桥梁在所有洪水相关载荷情景下的行为。相关计算公式为

$$G(DV) = \iint G(DV|DM) |dG(DM|EDP) |dG(EDP|IM) |dG(IM) \quad (1)$$

式中, $G(\cdot)$ 为补充累积分布函数,表示事件超过某个阈值的概率,它与累积分布函数是相对应概念,换言之,补充累积分布函数描述的是事件超过某个特定值的概率,与累积分布函数表示的“事件不超过某个值的概率”是互补的; $G(\cdot|\cdot)$ 为条件补充累积分布函数; DV 为工程决策变量; DM 为结构损伤测度; EDP 为工程需求参数; IM 为灾害强度测度; $G(EDP|IM)$ 表示在给定强度测度(IM)下,工程需求参数(EDP)超过某一水平的概率; $G(DV|DM)$ 表示在给定结构损伤测度(DM)情况下,决策变量(DV)超过某个值的概率,它描述了在某种损伤程度下,结构在决策过程中可能带来的风险; $G(DM|EDP)$ 表示在给定工程需求参数(EDP)的条件下,结构损伤测度(DM)超过某个阈值的概率,它描述了工程需求和结构损伤之间的关系。

冲刷需求(D)在该情景下成为工程需求参数 EDP ,冲刷需求(D)超过的概率可以根据以下表达式计算

$$P(C \leq D | V_m) = P(g_x(x) \leq 0) \quad (2)$$

式中, C 为冲刷承载力; V_m 为引发冲刷的洪水流速; $g_X(x) = (C - D|V_m)$ 是依赖于所有随机参数的极限状态函数。

冲刷需求 (D) 超过冲刷承载力 (C) 的概率可以用所有考虑的随机变量的联合概率密度函数 $f_X(x)$ 表示为

$$P(C \leq D | V_m) = \int_{g_X(x) \leq 0} f_X(x) dx \quad (3)$$

本文首先基于 SRICOS 方程^[14] 构建了基于水文不确定性的黏性土河床桩基冲刷深度预测方法, 以某实际桥梁工程为例, 基于不完全的水文记录信息采用 SARIMA 模型对桥梁全寿命周期内桩基冲刷深度预测的分布进行统计分析。根据 AASHTO 规范考虑桥梁桩基在洪水冲刷下的四种失效模式, 构建了基于概率冲刷深度的桥梁桩基础时变安全性能评估函数, 最终获得桥梁桩基全寿命周期内时变易损性曲线。

1 桥梁基础时变冲刷分析方法

1.1 桥梁基础时变冲刷深度预测 SRICOS 方法

位于黏土河床上的桥梁结构, 在运营期间的基础冲刷可以表示为随服役时间逐步增长并最终达到最大冲刷深度的过程, BRIAUD 等^[14] 提出的“SRICOS 方法”被广泛用于分析该类桥墩基础冲刷深度与桥梁服役时间之间的关系, 其公式为

$$z(t) = \frac{t}{\frac{1}{\dot{z}_i} + \frac{t}{z_{\max}}} \quad (4)$$

式中, $z(t)$ 为 t 时刻对应的冲刷深度; \dot{z}_i 为初始侵蚀率; z_{\max} 为最大冲刷深度。

初始侵蚀率 \dot{z}_i 可通过测试土壤样本的剪切应力-侵蚀率曲线来得到, 剪切应力与流速具有如下关系

$$\tau = 0.094\rho V^2 \left(\frac{1}{\log(VD/\nu)} - \frac{1}{10} \right) \quad (5)$$

式中, τ 为剪切应力 (MPa); V 为流速 (m/s); D 为桥墩/桩基直径 (m); ν 为水的黏度 (m^2/s)。

根据式(5)的计算结果, 可通过查询剪切应力-侵蚀率曲线得到指定流速下的侵蚀率值。当无法通过测试获得侵蚀率值时, 可直接通过查询相关文献^[15] 得到不同流速条件下的土层初始侵蚀率。结合一系列的水槽试验并考虑实际桥墩基础形状及水流攻角等因素的影响, 最大冲刷深度 z_{\max} 可表示为^[16]

$$z_{\max} = 0.18K_{sh}K_wK_{sp} \left(\frac{D'V}{\nu} \right)^{0.035} \quad (6)$$

式中, K_{sh} 为桥墩或基础的形状影响因子; K_w 为水深

影响因子, K_{sp} 为桥墩间距影响因子, D' 为桥墩垂直于水流的投影宽度 (m), 计算公式分别为

$$D' = D \left(\cos\theta + \frac{L \cdot \sin\theta}{D} \right) \quad (7)$$

$$K_w = \begin{cases} 0.85 \left(\frac{H}{B} \right)^{0.34} & H/B < 1.62 \\ 1.0 & H/B \geq 1.62 \end{cases} \quad (8)$$

$$K_{sp} = \frac{W_1}{W_1 - nB} \quad (9)$$

式中, L 为桥墩长度 (m); H 为水流深度 (m); B 为桥墩宽度 (m); θ 为水流方向和桥段主方向之间的夹角; W_1 为无桥墩河道宽度 (m); n 为河道中桥墩的个数。

1.2 复杂情况下的时变冲刷深度预测

方程(4)主要适用于计算均匀且恒定水流条件下的冲刷现象。然而, 实际情况中, 水流量和流速均呈随机状态, 导致实际河流流速-时间过程与恒定流速-时间过程显著不同。下文以两种不同恒定流速水流的基础冲刷计算为例, 分为两种情况进行阐述^[17]。

情况(a): 首先发生小流量洪水事件 1, 随后发生大流量洪水事件 2。此时, 洪水事件 1 的流速和持续时间分别为 V_1 和 t_1 , 洪水事件 2 的流速和持续时间分别为 V_2 和 t_2 。在对应的持续时间段内, 冲刷计算表达式分别为

$$z_1 = \frac{t_1}{\frac{1}{\dot{z}_{i1}} + \frac{t_1}{z_{\max 1}}} \quad (10)$$

$$z_2 = \frac{t_2}{\frac{1}{\dot{z}_{i2}} + \frac{t_2}{z_{\max 2}}} \quad (11)$$

洪水事件 1 在时间 t_1 后导致的冲刷深度 z_1 可由式(10)获得(图 1(b)中 A 点), 接着洪水事件 2 在时间 t_2 后导致的冲刷深度 z_2 可由方程(11)获得(图 1(c)中 C 点)。同时, 由于 V_2 大于 V_1 , z_i 也可由洪水事件 2 在等效时间 t^* 内的冲刷得到(图 1(c)中 B 点), 这里的等效时间 t^* 可表示为

$$t^* = \frac{t_1}{\frac{\dot{z}_{i2}}{\dot{z}_{i1}} + t_1 \dot{z}_{i2} \left(\frac{1}{z_{\max 1}} - \frac{1}{z_{\max 2}} \right)} \quad (12)$$

当洪水事件 2 开始时, 尽管深度 z_1 是由洪水事件 1 在时间 t_1 内冲刷产生的, 但与洪水事件 2 在等效时间 t^* 内产生的冲刷量是一样的。因此, 当洪水事件 2 开始时, 冲刷深度-时间曲线从图 1(c)中的 B 点

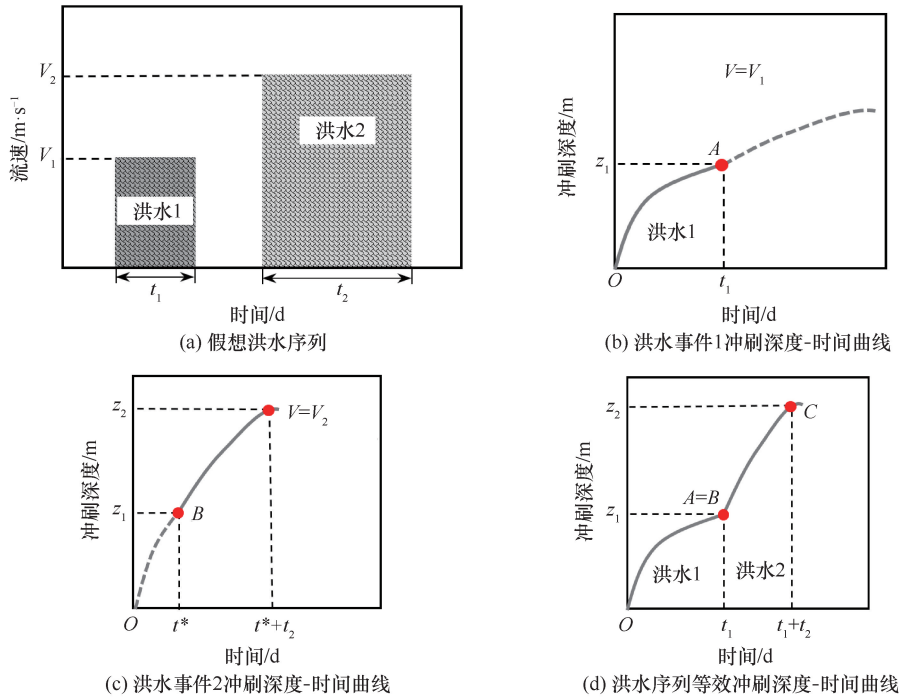


图1 随机水流冲刷深度计算示意

Fig. 1 Schematic diagram of the calculation of scour depth for random water flow

开始,直到经过时间 t_2 后的 C 点。如图1(d)所示,“洪水事件1→洪水事件2”序列的冲刷深度-时间关系遵循路径 $O-A-C$ 。

情况(b):首先发生大流量洪水事件1,随后发生小流量洪水事件2。两次洪水事件单独作用下的冲刷深度仍可用式(10)和式(11)计算。随后将 z_1 与 $z_{\max 2}$ 进行比较。若 z_1 大于 $z_{\max 2}$,则洪水事件2不产生冲刷增量,洪水事件2持续期间的总冲刷深度保持不变;若 z_1 小于 $z_{\max 2}$,则采用与前一种情况相同的方法计算累积冲刷深度。

式(4)主要适用于计算均匀土壤(单一类型土层)条件下的冲刷,然而,实际河床上可能存在不同类型的多层土壤层。下面仅以两层土壤(硬土层覆盖在软土层上)的冲刷计算为例进行说明。如图2所示, S_1 土层厚度为 ΔZ_1 , S_2 土层厚度为 ΔZ_2 。可采用式(10)和式(11)分别计算 S_1 土层条件和 S_2 土层条件下的全过程冲刷深度-时间曲线。当 S_1 土层的厚度 ΔZ_1 大于该土层的最大冲刷深度 $z_{\max 1}$ 时,基础冲刷不会发展到 S_2 土层,只按单一土层计算即可;当 S_1 土层的厚度 ΔZ_1 小于该土层的最大冲刷深度 $z_{\max 1}$ 时, S_1 土层中的实际冲刷深度超过 ΔZ_1 后, S_2 土层开始发生冲刷。如图2(a)所示,尽管冲刷深度 $h=\Delta Z_1$ 是在 S_1 土层中经历时间 t_1 形成 A 点,但其效果与 S_2 土层在等效时间 t^* 内冲刷深度相同(图2(b) B 点)。如图

2(c)所示, S_2 土层实际开始发生冲刷的过程(冲刷深度-时间曲线)可以认为是从图2(b)中的 B 点逐渐延伸到 C 点的,两层土壤的累积冲刷深度-时间关系曲线为 $O-A-C$ 。当软土层覆盖在硬土层之上时,冲刷原理与上述过程类似,不再赘述。

1.3 基于 SARIMA 模型的冲刷风险评估框架

有效预测桥址处未来的洪水流速是进行时变冲刷分析的前提条件。多种因素的组合可能导致桥址处出现四种特征的时间流量数据:趋势性、一体化、周期性和随机性。因此,采用季节性自回归积分滑动平均(SARIMA)模型^[18]来预测桥址处的未来流量数据。ARIMA(p, d, q)模型反映了数据序列的趋势和内在周期性,包括自回

归(AR)、积分(I)和移动平均(MA)成分。式中, p 表示自回归阶数, d 代表差分阶数, q 表示移动平均阶数。ARIMA模型的构建由以下方程表示

$$\begin{aligned} \overleftarrow{Y}_t - \omega_1 x_{t-1} - \omega_2 x_{t-2} - \cdots - \omega_p x_{t-p} - \\ \varepsilon_1 \beta_{t-1} - \varepsilon_2 \beta_{t-2} - \cdots - \varepsilon_q \beta_{t-q} = \delta \end{aligned} \quad (13)$$

式中, t 为时间索引, \overleftarrow{Y}_t 为数据序列的 d 阶差分; $\{x_{t-1}, x_{t-2}, \cdots, x_{t-p}\}$ 为原始数据序列; $\{\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_p\}$ 为自回归参数; $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_q\}$ 为移动平均模型参数; $\{\beta_{t-1}, \beta_{t-2}, \cdots, \beta_{t-q}\}$ 为噪声扰动; δ 为常数项。

为了处理桥址处流量数据的非平稳性,采用差分方法来改变序列的非平稳趋势,同时保持数据同质性。

为了描述数据序列的非平稳性,引入滞后算子 L ,如下式所示

$$x_{t-p} = L^p x_t, \quad \forall p \geq 1 \quad (14)$$

式中, x_t 为非平稳数据序列。

对序列进行差分处理后,引入差分算子 ∇ 。平稳时间序列的关系式可表示为

$$\nabla^2 x_t = \nabla(x_t - x_{t-1}) = x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2} \quad (15)$$

通过联立方程(13)和(14),时间序列满足下列方程

$$\nabla^d x_t = \sum_{i=0}^d (-1)^i C_d^i x_{t-i} \quad (16)$$

式中, $\nabla^d x_t$ 表示 d 阶差分序列。

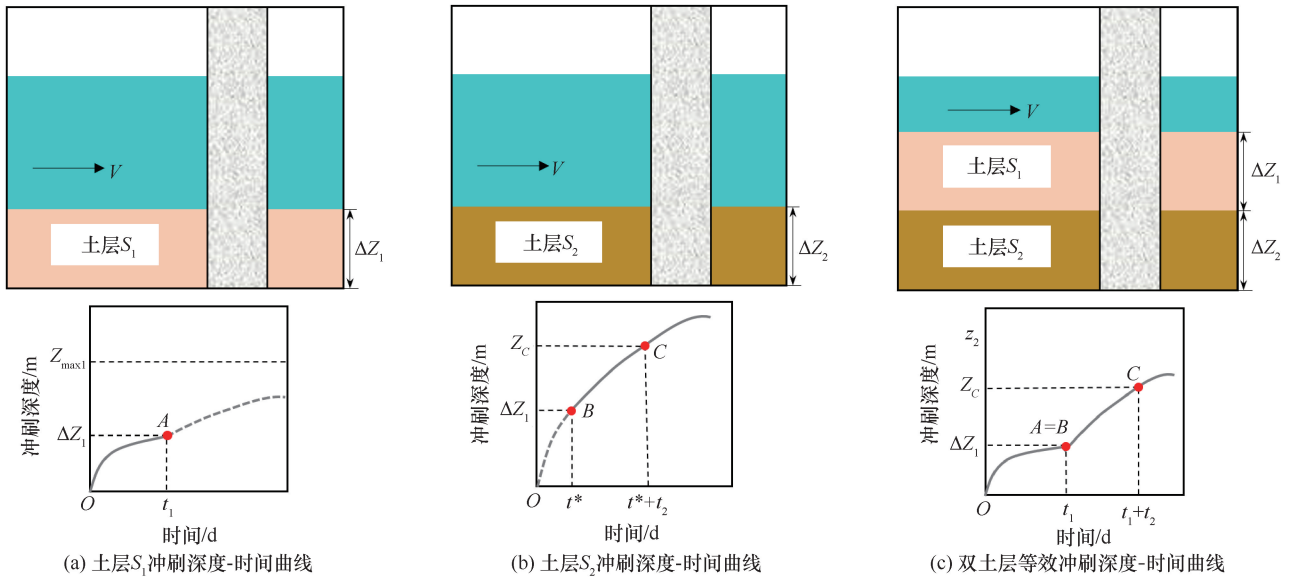


图2 多层冲刷深度计算示意

Fig. 2 Schematic diagram of scour depth calculation for multiple soil layers

如果原始数据序列在差分后不再表现出明显的趋势性, 则符合 ARIMA (p, d, q) 模型, 其方程如下所示

$$\eta(L)(\nabla^d x_t) = \mu(L)\gamma_t \quad (17)$$

$$\eta(L) = 1 - \eta_1 L - \eta_2 L^2 - \dots - \eta_p L^p \quad (18)$$

$$\mu(L) = 1 - \mu_1 L - \mu_2 L^2 - \dots - \mu_q L^q \quad (19)$$

式中, $\eta(L)$ 为自回归多项式; $\mu(L)$ 为移动平均多项式; $\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p\}$ 为自回归参数; $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_q\}$ 为移动平均参数; γ_t 为白噪声序列。

在长期稳定的时间区间内, 桥址处的流量会表现出显著的周期性, 表现出季节性序列特征。为了增强数据序列的季节非平稳性, 引入季节差分算子 ∇_s 。季节性差分关系表达式如下

$$\nabla_s^D x_t = (1 - L^S)^D x_t = \nabla_s^{D-1} x_t - \nabla_s^{D-1} x_{t-S} \quad (20)$$

如果数据序列在季节性差分后变为平稳序列, 则满足季节性 SARIMA (p, d, q) (P, D, Q)_S 模型, 其中 P 为季节性自回归阶数, D 为时间序列在季节性频率上的差分次数, Q 为季节性移动平均阶数, S 为时间序列的季节性周期长度, 表示如下

$$\eta_p(L)\varphi_p(L^S)\nabla^d \nabla_s^D x_t = \mu_q(L)\psi_q(L^S)\gamma_t \quad (21)$$

$$\varphi_p(L^S) = 1 - \varphi_1 L^S - \varphi_2 L^{2S} - \dots - \varphi_p L^{pS} \quad (22)$$

$$\psi_q(L^S) = 1 - \psi_1 L^S - \psi_2 L^{2S} - \dots - \psi_q L^{qS} \quad (23)$$

式中, $\varphi(L^S)$ 为季节性自回归多项式; $\psi(L^S)$ 为季节性移动平均多项式; $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p\}$ 为季节性自回归参数; $\{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_q\}$ 为季节性移动平均参数。

虽然 SARIMA 模型在建模和预测流量数据方面非

常有效, 但其本身并不能直接处理数据的缺失。SARIMA 模型假设输入的数据序列是完整且没有缺失的, 因此在面对缺失数据时, 通常需要在应用 SARIMA 模型之前对数据进行插补处理。需要注意的是, 除了预测未来值外, ARIMA 模型也可以用于对缺失数据进行插补^[19]。这是因为 ARIMA 模型可以利用时间序列中的自相关性来生成缺失值的合理估计, 具体步骤如下: 首先进行数据预处理, 将时间序列中的缺失值标记出来, 对于非平稳序列, 需要通过差分操作使其平稳, 如式(13)一式(16); 其次需要使用时间序列中已知的观测值来拟合 ARIMA 模型, 模型会根据已知数据计算自回归参数 $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p\}$ 和移动平均模型参数 $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_q\}$, 并利用这些参数来建立预测模型, 如式(13); 最后通过拟合完成的 ARIMA 模型生成的预测值填补缺失的数据点, 对于存在多个缺失点的序列, 可以分段插补。即先插补某一缺失点, 然后将其视为已知数据, 再对剩余的缺失点进行插补。这一过程可以反复进行, 直到所有缺失点被填补。

在建立桥址流量预测模型之后, 可以使用以下公式, 根据给定的流量和河流横截面(本文假设为矩形横截面), 计算相应的水深和流速, 相关公式为

$$V_0 = \frac{Q}{W y_0} \quad (24)$$

$$y_0 = \left(\frac{nQ}{W S^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (25)$$

式中, Q 表示河流流量 (m³/s); W 表示河宽 (m); y₀

表示上游水深; n 表示曼宁系数, 通常取 0.035; s 表示河道纵坡坡度。综上所述, 本文提出了一种基于水文不确定性的复杂条件(随机流量、多层土壤)下桥梁基础时变冲刷深度预测方法和分析过程: 通过获取桥梁结构参数、河床土壤参数和相关历史水文参数等信息, 利用式(1)~式(25)即可预测出桥梁结构在指定服役年限内的时间-冲刷深度时变曲线^[20]。需要指出的是, 本文中冲刷深度时效分析选用的时间步长为 1 d, 因此, 采用的洪水流量为日流量。整个分析流

程图如图 3 所示。

2 桥梁基础全寿命周期冲刷易损性评估

2.1 算例桥梁简介

背景桥梁是一座横跨淮河支流的高速公路桥梁, 跨度为 150 m。桥梁跨度布置为 5 个 30 m 的小跨, 采用预应力简支 T 梁结构, 梁高 2 m, 使用 C50 混凝土施工。桥墩为圆柱形, 直径为 2.0 m, 高度为 8 m, 采用 C40 混凝土施工。基础为直径为 2.2 m 的钻孔灌

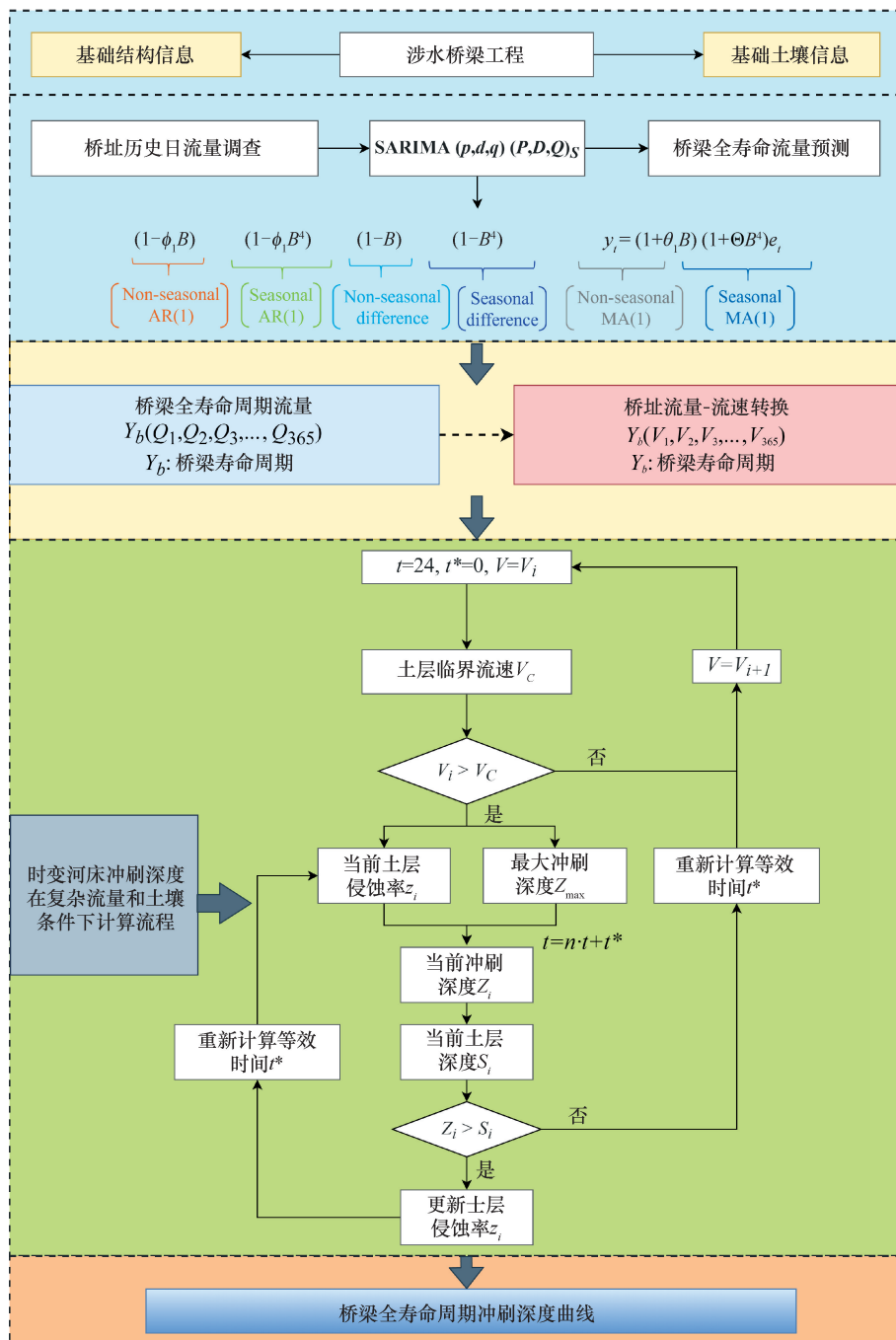


图 3 基于 SARIMA 模型的基础时变冲刷深度预测流程

Fig. 3 Flow of base time-varying scour depth prediction based on the SARIMA model

注桩。桥墩 1 号和 4 号的桩长为 10 m, 桥墩 2 号和 3 号的桩长为 12 m, 全部采用 C30 混凝土施工, 如图 4 所示。如图 4(b) 所示, 背景桥梁基础为带有横梁的圆柱形双桩基础, 本文参考相关文献^[13] 将其等效为单桩基础, 其冲刷计算与后续有限元分析均按照等效的单桩基础进行计算。

通过查阅背景桥梁的地质勘探数据文件, 得到了 1[#] 与 2[#] 墩位的土层分层及特征参数, 以及每个土层的临界流速, 如表 1 所列。为了准确建立流速与侵蚀率之间的关系, 基于表 1 中的数据, 参考相关文献^[15] 获取了不同土层的测试参数。由于文献数据库中存在

多组相似土壤的测试数据, 因此采用了可比较的土壤特性参数, 以推导出类似范围内的计算结果。对多组测试数据的平均值进行拟合, 得到了不同土层的流速-侵蚀率曲线。土层 1—3 的流速-侵蚀率曲线如图 5 所示。

2.2 SARIMA 模型构建及验证

查阅相关资料仅得到算例桥梁附近水文站近 25 a 日流量记录数据(2000 年 1 月 1 日至 2024 年 3 月 1 日间日平均流量值), 其中数据不完整, 缺失部分低于 5%, 根据 1.3 节中 ARIMA 模型进行插补, 插补后的流量数据如图 6(a) 所示。如图 6(b)—图 6(d) 所示,

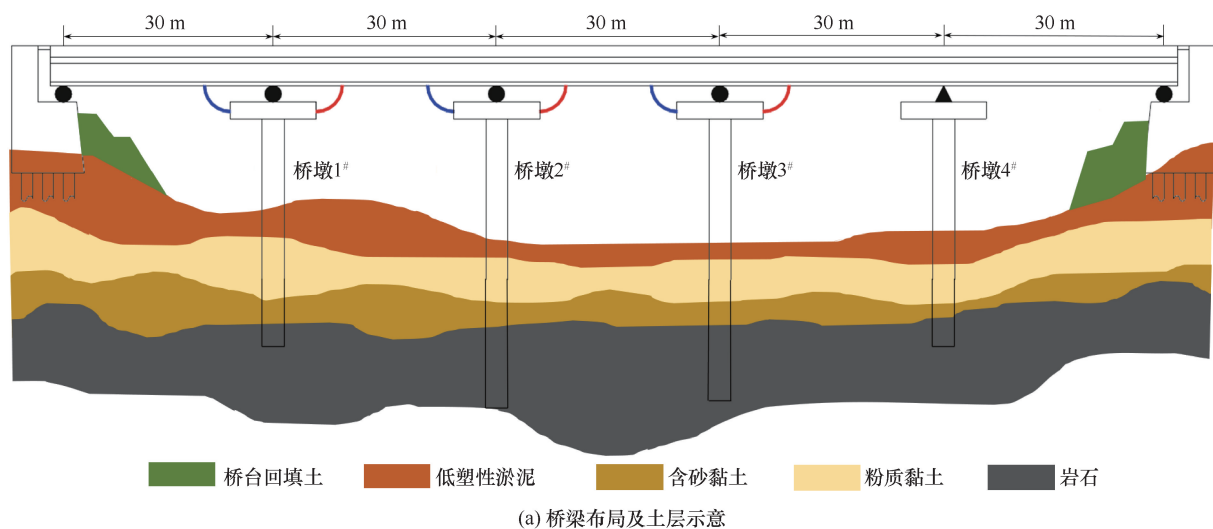


图 4 桥梁结构土层信息

Fig. 4 Soil layer information of bridge structure

表 1 桩基础埋深范围内土壤参数

Table 1 Soil parameters within the buried depth range of pile foundation

土 层	土层类型	土层深度/m		液限/%	塑限/%	塑性指数/%	容重 γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	含水率 /%	所属类别	V_c / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
		1 [#] 桥墩	2 [#] 桥墩							
1	低塑性淤泥	1~5.1	1.6~3.89	45	39	6	10.9	43.6	ML	1.2
2	含砂黏土	5.1~7.4	3.89~5.81	37	20	17	19.6	20	SC	1.5
3	粉质黏土	7.4~9.42	5.81~7.39	21	12	9	20.7	18.4	CH	1.5
4	岩 石	9.42~11.0	7.39~13.6	—	—	—	—	—	—	—

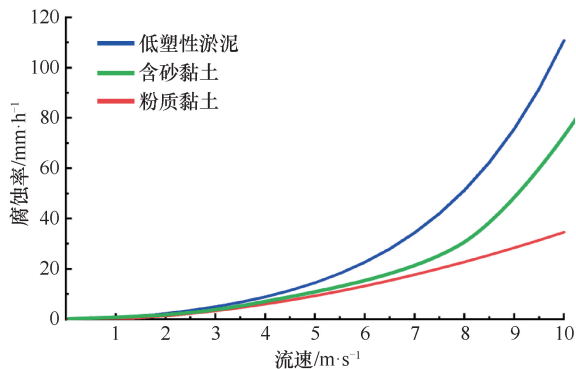


图5 各土层流速-土壤侵蚀率关系曲线

Fig. 5 Flow velocity-soil erosion rate relationship curves for each soil layer

利用季节分解时间序列方法对该日流量数据进行分解, 将其分解为趋势项、季节项和残差项, 观察其变化趋势。从分解后的趋势项来看, 桥址日流量在2010年与2019年处出现了明显的波动, 其余年份整体趋势较为平稳, 同时图6(c)中分解后的季节性明显, 残差也基本符合随机性特征。本文进一步使用ADF单位根检验来判定时间序列的平稳性, 检验的零假设为时间序列是非平稳序列, 通过对比不同显著性水平下的检验统计量和临界值判断时间序列的平稳性, 检验结果如表2所列。表2中桥址日流量的ADF检验统计量小于1%, 5%, 10%的显著水平临界值, 同时其接受单位根检验原假设的概率近乎为0, 不接受存在单位根的原假设, 表明经插补的桥址日流量时间序列数据为平稳时间序列, 可利用SARIMA模型对其进行建模。

表2 ADF平稳性检验结果

Table 2 Results of ADF smoothness test

ADF 检验 统计量	对应显著水平临界值			显著性 P 值	结 论
	1%	5%	10%		
-9.625	3.440 4	-2.865 9	-2.569 1	0.000 001	平 稳

SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s 模型共包含7个参数, 由图6(c)可知桥址日平均流量以1a为周期呈现季节性波动, 因此取 $S=365$ 。ADF检验显示执行一阶普通差分与一阶季节性差分后序列满足平稳性要求, 故取 $d=D=1$ 。如图7所示, 绘制一阶差分序列的自相关函数(ACF)和偏自相关函数(PACF)。根据图7预估滞后阶数 p, q, P 和 Q 的取值范围为 $\{0, 1, 2, 3\}$ 。使用网格搜索法根据最小赤池信息准则(AIC)和贝叶斯信息准则(BIC)确定最优候选模型参数。最终确定最优模型为SARIMA(0, 1, 1)(1, 1, 3)₃₆₅, 其AIC值和BIC值分别为79.624和

93.561。依据最终确定的SARIMA模型进行未来桥址日平均流量预测前, 需对SARIMA模型进行有效性检验。判断SARIMA(0, 1, 1)(1, 1, 3)₃₆₅模型的残差是否接近于正态分布, 同时也需要判断残差是否自相关。当残差序列接近正态分布且不存在自相关时, 证明现有模型可以有效的拟合数据, 模型检验结果如图8所示。

图8(a)为模型的标准化残差, 图8(b)为标准化残差分布直方图和其核密度曲线, 表明模型的标准化残差基本符合正态分布特征。图8(c)为残差Q-Q分布图, 残差的有序分布也说明残差服从正态分布。图8(d)是残差的自相关图, 表明残差不存在自相关, 残差序列为白噪声序列, 模型拟合效果良好。进一步将2000—2020年桥址流量数据作为训练集, 2020—2024年桥址流量数据作为测试集, 使用均方根误差(RMSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)评价模型预测结果的准确性, 计算公式如下

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{Y_i}} \quad (26)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{Y}_i - Y_i|}{Y_i} \times 100\% \quad (27)$$

式中, \hat{Y}_i 和 Y_i 分别为桥址日流量时间序列数据中第 i 个预测流量和真实流量。

RMSE 和 MAPE 值越小, 则表明预测结果越精确。如图9所示, 在使用SARIMA(0, 1, 1)(1, 1, 3)₃₆₅模型预测未来4a的桥址日流量时, MAPE值为7.67%, RMSE值为1 043.53, 表明模型预测精度较高, 可用于预测桥址全寿命周期内日流量。

2.3 算例分析

为了评估背景桥梁在水平和垂直载荷下的时变可靠性, 考虑了若干强度和适用性极限状态。使用OpenSees有限元软件模拟等效单桩在施加载荷下的响应。桩被建模为一系列基于位移的梁-柱单元和非线性弹簧。除了上述单元, 还定义了桩节点、固定弹簧节点和从属弹簧节点。梁-柱单元用于建模桩单元, 而通过水平和垂直方向的零长度单元创建的弹簧则用于模拟土壤行为。横向土壤行为使用 $p-y$ 弹簧^[21]模拟, 桩身和桩端行为则分别使用 $t-z$ 和 $Q-z$ 弹簧^[22-23]建模。多个参数, 包括土壤的内摩擦角(ϕ)、单位重量(γ)和剪切模量(G), 用于定义这些弹簧。所有节点都是三维的, 具有六个平移和旋转自由度。桩单元、固定弹簧和从属节点在桩的嵌入长度上垂直分布。桩的嵌入长度根据冲刷深度预测进行

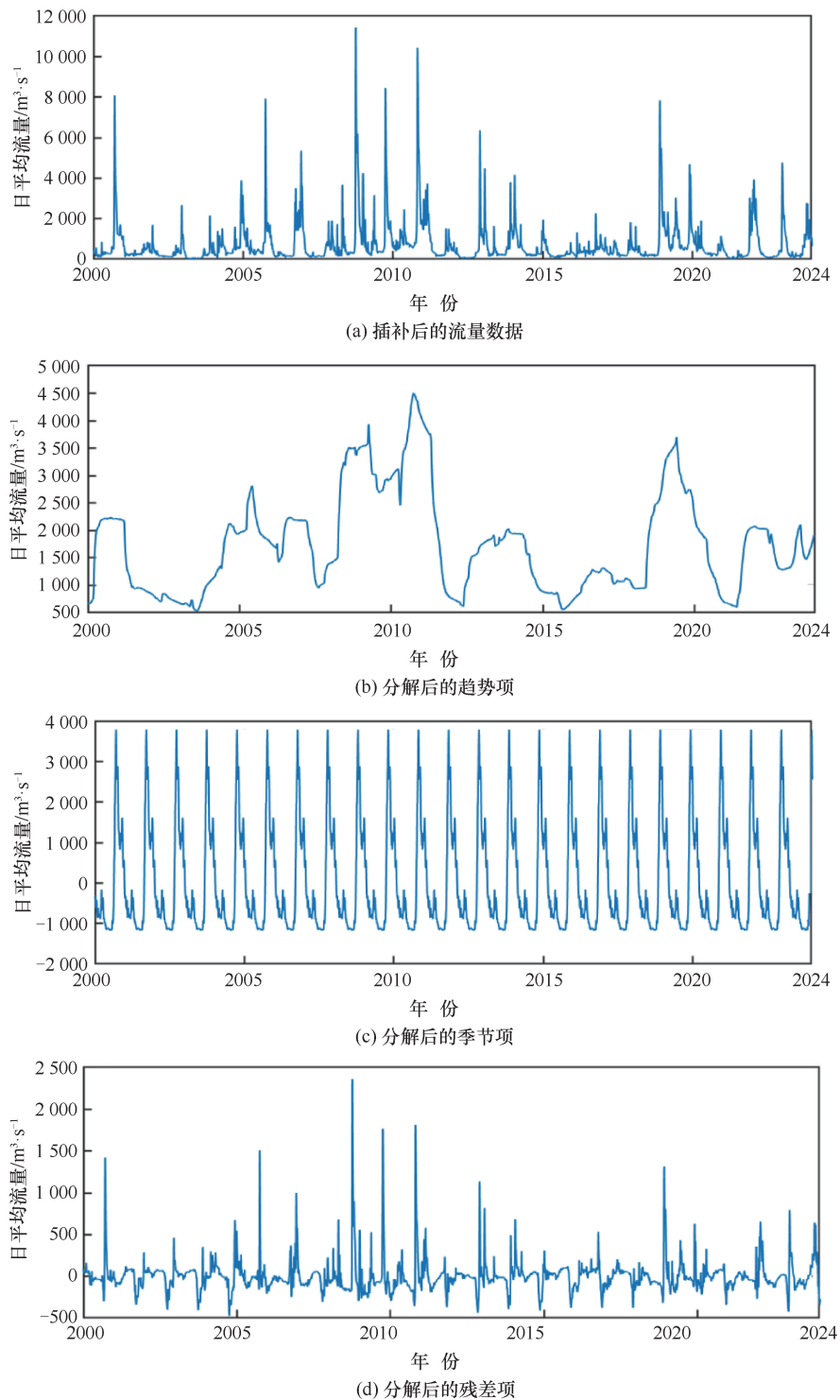


图6 桥址平均日流量时序分解(2000—2024年)

Fig.6 Chronological decomposition of average daily flows at the bridge site (2000—2024)

调整(即桩的嵌入长度=总桩长-冲刷深度)。使用的有限元模型示意如图10所示。桥梁上的恒载和交通活载是基于AASHTO规范^[24]定义的。采用HL-93活载模型计算作用于桥梁基础上的最大轴向载荷效应。基于FEMA 55规范^[25], 计算洪水引起的水

动力载荷

$$F_{dyn} = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 A \quad (28)$$

式中, C_d 为阻力系数; ρ 为水的密度; A 为结构在水流方向上的投影面积; V 为水流速度。

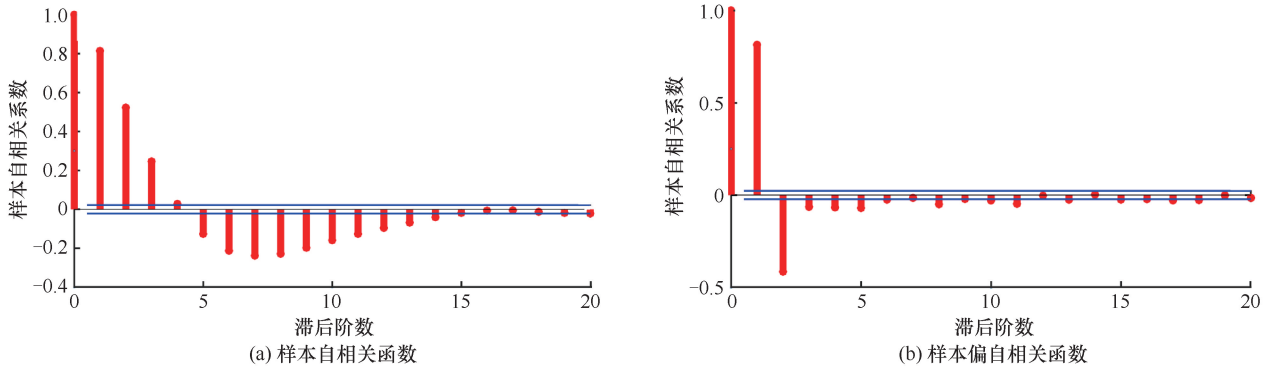


图7 一阶差分序列的样本自相关函数和偏自相关函数

Fig.7 ACF and PACF drawings of the first order difference sequences

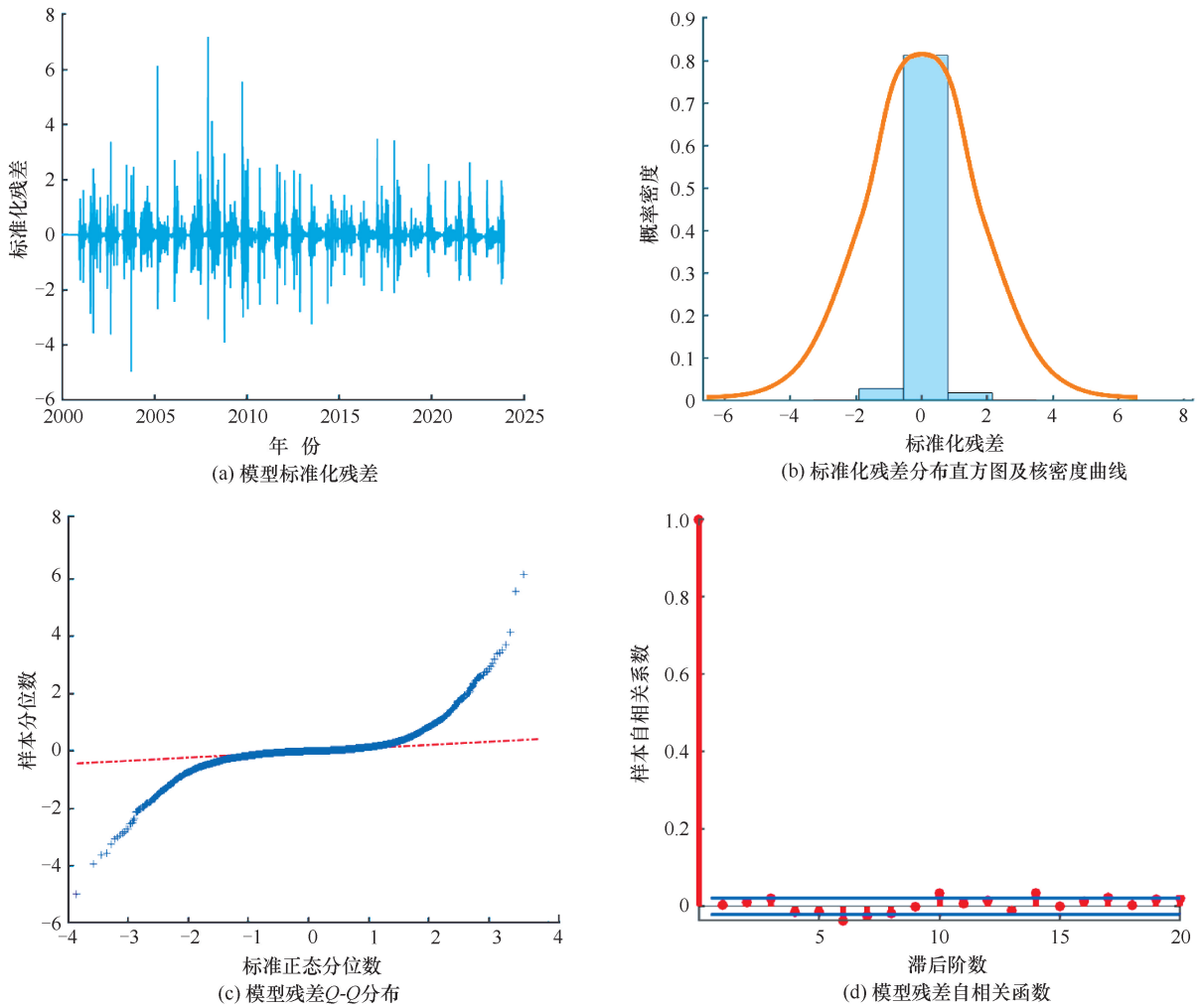


图8 SARIMA(0, 1, 1)(1, 1, 3)₃₆₅ 模型检验结果

Fig.8 SARIMA(0, 1, 1)(1, 1, 3)₃₆₅ model test results

载荷效应和基础承载力用于定义性能函数

$$G_i(X) = R_i(X) - LE_i(X) \quad (29)$$

式中, $G_i(X)$ 为与第 i 个极限状态及相应的随机变量集 i 相关的性能函数; $LE_i(X)$ 和 $R_i(X)$ 分别为载荷效

应和基础承载力。

本文定义了四个性能函数以包含桩在轴向和弯曲载荷组合效应下的失效、横向载荷下的剪切失效、横向变形以及角变形 (A_d) 超过允许限值的情况^[26]。交

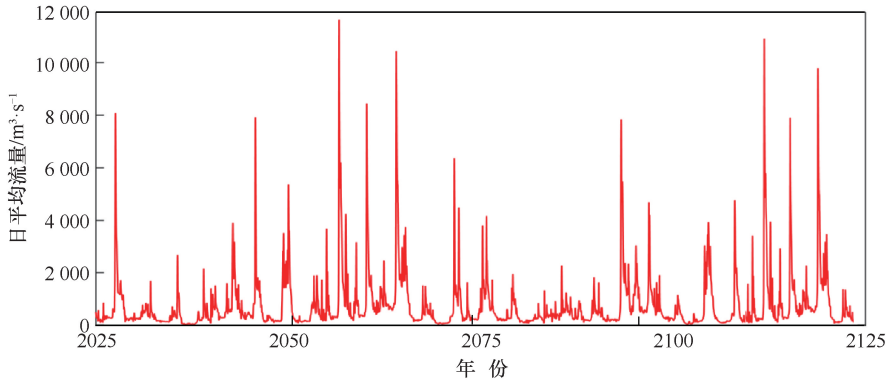


图9 SARIMA(0, 1, 1)(1, 1, 3)₃₆₅模型某次100a日流量序列预测结果

Fig. 9 SARIMA(0, 1, 1)(1, 1, 3)₃₆₅ model predictions for a particular 100-year daily flow series

互轴向-弯曲极限状态考虑桩的屈曲承载力, 同时考虑由于冲刷效应导致的无支撑长度增加, 而弯曲极限状态基于圆形等效桩截面的弹性和塑性性质考虑桩的名义弯曲承载力。剪切极限状态考虑名义塑性剪切承载力^[24]。下面分别对这四个性能函数及其对应的失效模式进行介绍。

剪切性能函数 $G_3(\mathbf{X})$ 定义为

$$G_3(\mathbf{X}) = 0.58\lambda_2CF_yd_w t_w - V(\mathbf{X}) \quad (32)$$

式中, λ_2 为考虑建模不确定性的系数; C 为剪切屈曲抗力与剪切屈服强度的比值; F_y 为钢材的屈服强度; d_w 和 t_w 分别为桩截面的腹板深度和厚度; $V(\mathbf{X})$ 为施加荷载 F_{dyn} 下的剪切荷载效应。

剪切荷载效应还取决于土壤摩擦角、腐蚀速率和冲刷深度。细长截面的组合轴向和弯曲性能函数可以表示为

$$G_4(\mathbf{X}) = \lambda_3\lambda_4 - \left(\frac{P(\mathbf{X})}{P_n} + \frac{M_x(\mathbf{X})}{M_{nx}} + \frac{M_y(\mathbf{X})}{M_{ny}} \right) \quad (33)$$

式中, λ_3 和 λ_4 为考虑组合轴向和弯曲承载力建模不确定性的系数; $P(\mathbf{X})$ 、 $M_x(\mathbf{X})$ 和 $M_y(\mathbf{X})$ 分别为轴向荷载和绕 x 轴及 y 轴的弯矩; P_n 为名义压缩承载力; M_{nx} 和 M_{ny} 分别为绕 x 轴(即强轴)和 y 轴(即弱轴)的名义弯曲承载力。名义轴向荷载承载力 P_n 和弯矩承载力可根据 AASHTO 规范^[24]确定。

本文假设每个桩基的四个性能函数任意一个失效都会导致整个桩基系统的失效。换言之, 这些极限状态被定义为一个串联系统。蒙特卡罗模拟被用于计算桥梁基础的失效概率 P_f

$$P_f = \int \dots \int I[\] f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (34)$$

式中, $I[\]$ 为指示函数, 表示系统的状态

$$I\left[\bigcup_{i=1}^m G_i(\mathbf{X}) \leq 0\right] = \begin{cases} 1, & [\] \text{ 为真} \\ 0, & [\] \text{ 为假} \end{cases} \quad (35)$$

式中, m 为考虑的性能函数数量(本文中为四个); $G_i(\mathbf{X})$ 为与随机变量向量 \mathbf{X} 相关的第 i 个性能函数。

2.4 结果分析

得到未来 100 a 桥梁服役寿命期间每日水流流

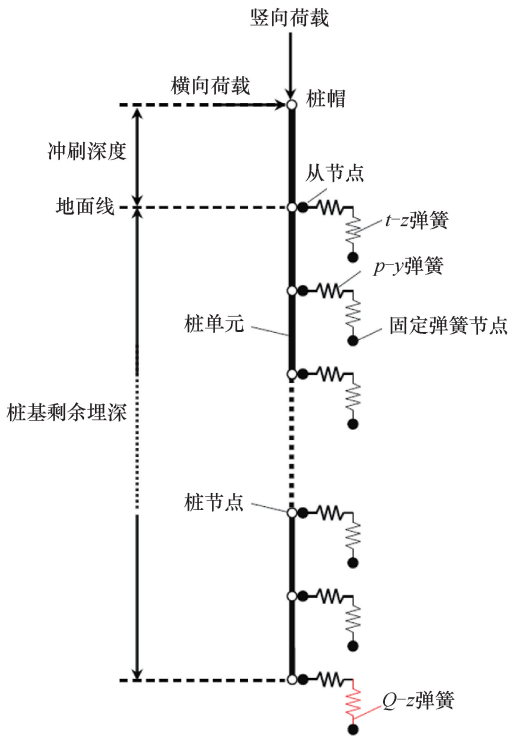


图10 Opensees 模型示意

Fig. 10 Schematic diagram of Opensees model

与横向变形和角变形对应的性能函数分别定义为

$$G_1(\mathbf{X}) = \Delta_{limi}(\mathbf{X}) - \Delta_{LE}(\mathbf{X}) \quad (30)$$

$$G_2(\mathbf{X}) = A_{d, limi}(\mathbf{X}) - A_{d, LE}(\mathbf{X}) \quad (31)$$

式中, Δ_{limi} 和 Δ_{LE} 分别为位移限值和荷载效应; $A_{d, limi}$ 和 $A_{d, LE}$ 分别为对应定义限值和荷载效应的角变形。

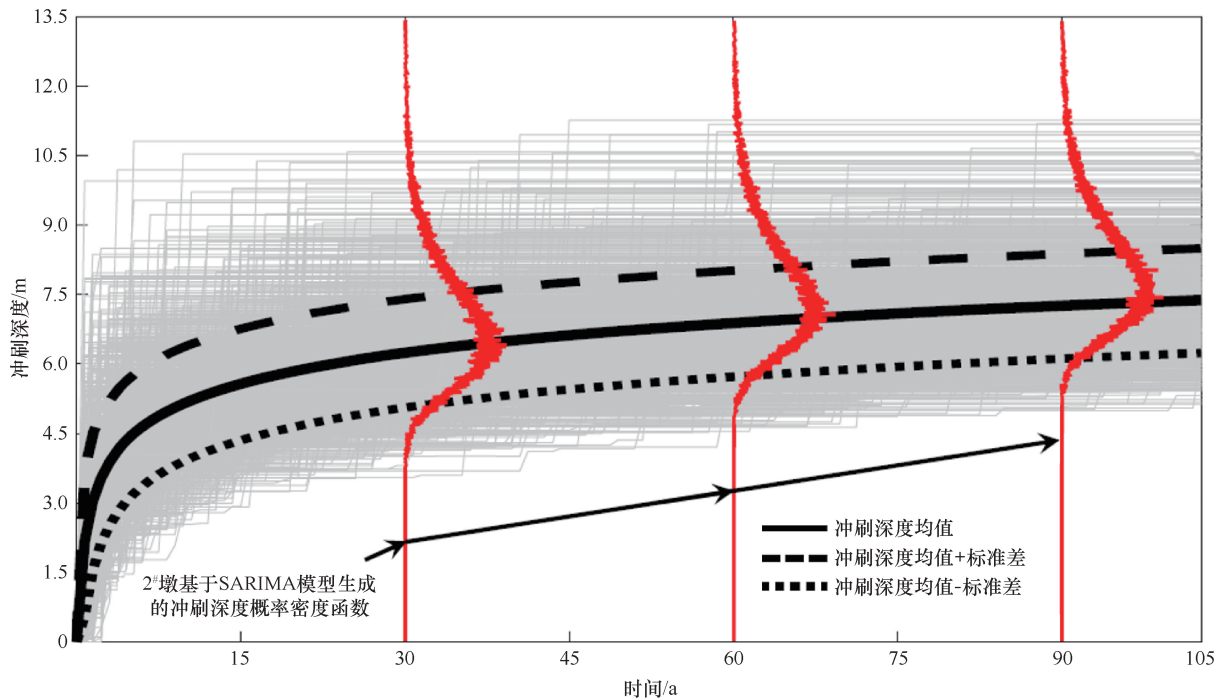


图 11 基于 Monte-Carlo 的 2#桩基础冲刷深度随服役时间变化曲线统计

Fig. 11 Statistical plot of Monte-Carlo based scour depth versus service time curve for 2# pile foundation

速的预测值后,可基于图 3 中的概率分析框架,计算桩基础的预测冲刷深度与服役时间之间的关系曲线。本文采用 Monte-Carlo 技术基于 SARIMA 模型生成了 10 000 组设计服役寿命 100 a 的日流量数据,并转换为流速过程线。如图 11 所示,基于图 3 中分析框架计算每一组流速过程线的背景桥梁 2#墩最终冲刷深度,得到 10 000 条冲刷深度与桥梁服役时间之间的曲线。

由图 11 可知,当设计寿命年限结束时,算例桥梁 2#桩基础可能达到的最终冲刷深度均值为 7.02 m。图 11 中还给出了不同服役阶段冲刷深度一个标准差值内的波动范围,由图可知,考虑水文信息的不确定性以后,分析结果的离散性很大。总体来说,2#桩基预测冲刷深度均值随着服役时间增加均呈现先快后慢的增加趋势,冲刷深度主要集中于第 1 层的低塑性淤泥和第 2 层的含砂黏土之中。统计图 11 中不同年份或桥梁服役时间点对应离散冲刷深度超过给定深度值的数量,然后除以总的模拟次数,可以得到给定冲刷深度值处的冲刷超越概率,从而得到桥梁在不同服役年份的冲刷深度风险评估曲线,如图 12 所示,分别给出了算例桥梁在 25 a、50 a、75 a 和 100 a 时,2#桩基础的冲刷深度风险评估曲线。这些易损性曲线从物理意义上反映了桥梁在不同时间点上,受到冲刷作用的风险水平。随着时间推移,桥梁的基础可能会因持续的冲刷而逐渐削弱,从而增加结构损伤的概率。

时变易损性曲线描述了这一概率随时间变化的趋势。从实际工程角度出发,易损性曲线的变化可以作为桥梁维护和管理决策的依据。例如,在易损性较高的时期,可以安排更加频繁的检查 and 监测,或提前进行修复工作。这有助于延长桥梁的使用寿命,避免灾难性失效事件的发生。

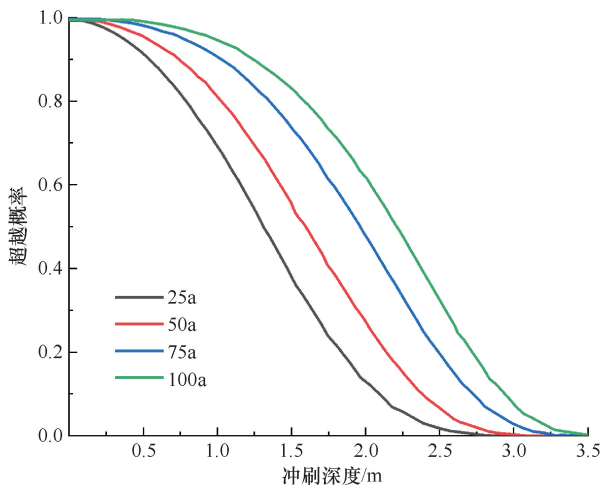


图 12 桥梁 2#基础冲刷深度风险评估曲线

Fig. 12 Risk assessment curve for scour depth of bridge 2# foundation

由图 12 可知,不同服役年份的冲刷超越概率均随冲刷深度的增加而减小,前 25 a 内冲刷深度增加

较明显,之后冲刷深度的增加开始减慢。图 13 给出了算例桥梁 1#—4# 桩基础的失效概率曲线,由图 13 可知各桩基失效概率均随时间而增大,其中 2# 桩基础失效概率最低,1# 桩基础失效概率最高,这是由各个桩基础地质条件所决定的。各桩基失效概率与其埋深成负相关,但仍视其所在土层参数综合决定。

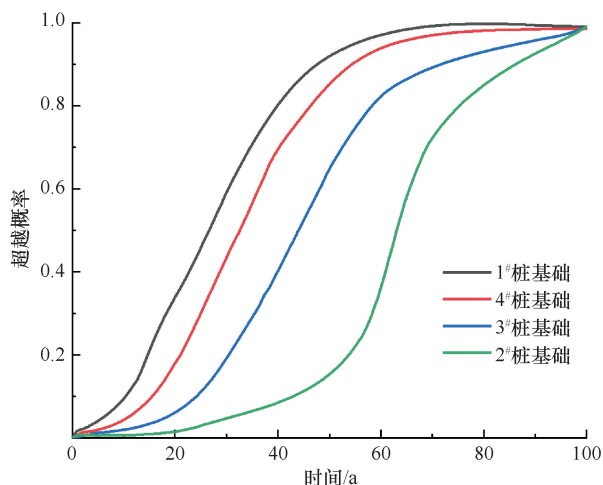


图 13 桥梁 1#—4# 基础失效风险评估曲线

Fig. 13 Risk assessment curve of bridge 1#—4# foundation failure

2.5 结果讨论

在桥梁结构的易损性计算领域,大部分研究集中于抗震易损性或以地震为主的多灾害易损性,例如 BIAZAR 等^[27]以位于加拿大魁北克省的典型桥梁 Chemin des Dalles 桥为例,提出了一种针对浅基础桥梁在地震、冲刷及车辆荷载作用下的概率性多灾害损伤评估框架。PINTO 等^[28]以位于智利的一个实际五跨桥梁作为应用示例,考虑了该桥的实测水文数据及地震危险性,基于非线性动力模型和多条带分析(MSA)对各桥梁构件及整体系统进行了易损性分析。针对桥梁的冲刷易损性,目前只有 ZHANG 等^[29]建立了包含桩基和周围土壤的三维有限元模型,用于评估各种洪水冲刷情景下的失效模式,采用拉丁超立方采样法(LHS)对案例桩基础桥梁进行了概率易损性分析。同时 ZHANG 等^[30]通过开发一种能够处理水动力-土壤-结构相互作用并利用边界转换和实时更新不同物理场的参数耦合模拟的数值求解器,采用拉丁超立方抽样法(LHS),在考虑水力、结构和地质参数不确定性的情况下,对浅基础桥梁进行了冲刷易损性分析。部分学者对冲刷下桥梁的承载特性进行研究^[31-33],但对冲刷易损性以及桥梁全寿命周期的考虑较少。

本文所建立的基于水文不确定性的桥梁桩基冲刷深度预测方法及易损性分析框架能够在桥梁设计与维护中起到重要指导作用:在桥梁设计阶段,基于模型预测的冲刷深度,优化桥墩基础的设计深度和防护措施,确保桥梁在全寿命周期内的安全性;在桥梁运营阶段^[34],利用模型预测的冲刷深度随时间的变化,制定桥梁的长期维护计划,提前安排桥墩基础的检查和维护,避免因冲刷导致的结构失效。同时可将模型结果纳入桥梁管理系统中,作为决策支持工具,帮助管理者进行科学的风险决策^[35-37]。

3 结论

本文建立了基于水文不确定性的复杂条件下桥梁桩基冲刷深度预测方法及分析框架,该分析方法不仅能计算桥梁基础的最大冲刷深度值,还能够预测桥梁基础全寿命周期冲刷深度与桥梁服役时间之间的关系,同时能够对桥梁桩基础的冲刷失效概率做出相应预测。本研究主要结论如下。

(1) 算例桥梁桩基冲刷深度预测值会随服役时间增加呈现先快后慢的增长趋势,具体表现为前 25a 冲刷深度增加较明显,之后增加开始减慢。

(2) 基于 SARIMA 模型的桥梁基础冲刷深度预测结果的离散性较大,尤其是当涉及多层土壤冲刷的情况时。桩基础承载能力均值和标准差的时变规律与预测冲刷深度的时变规律基本一致。

(3) 桩基失效概率均随冲刷时间而增大同时其埋深成负相关,但仍视其所在土层参数综合决定。

值得指出的是,本文的研究存在一定的局限性,例如缺少大规模、多样化桥梁实例的广泛应用和验证,后续研究旨在扩展验证的范围,纳入更多类型、不同地理和气候条件下的桥梁实例,从而提高其在各种实际工程环境中的应用价值。

参考文献(References):

- [1] KIM H, SIM S H, LEE J, et al. Flood fragility analysis for bridges with multiple failure modes [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(3): 1687814017696415.
- [2] GENTILE R, NETTIS A, RAFFAELE D. Effectiveness of the displacement-based seismic performance assessment for continuous RC bridges and proposed extensions [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 110910.
- [3] NETTIS A, GENTILE R, RAFFAELE D, et al. Cloud Capacity Spectrum Method: Accounting for record-to-record variability in fragility analysis using nonlinear static procedures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 150: 106829.

- [4] GHOSH J, PADGETT J E. Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(12): 1497-1511.
- [5] WANG Z Y, PEDRONI N, ZENTNER I, et al. Seismic fragility analysis with artificial neural networks: Application to nuclear power plant equipment[J]. *Engineering Structures*, 2018, 162: 213-225.
- [6] CHEN M D, MANGALATHU S, JEON J S. Bridge fragilities to network fragilities in seismic scenarios: An integrated approach[J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 112212.
- [7] TORRES E, SEO J, ROGERS L. Probabilistic structural performance evaluation of concrete slab bridge system subjected to scour and earthquake[J]. *American Concrete Institute Symposium Publication*, 2017, 316: 73-94.
- [8] DECÒ A, FRANGOPOL D M. Risk assessment of highway bridges under multiple hazards[J]. *Journal of Risk Research*, 2011, 14(9): 1057-1089.
- [9] GANESH PRASAD G, BANERJEE S. The impact of flood-induced scour on seismic fragility characteristics of bridges[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, 17(6): 803-828.
- [10] YILMAZ T, BANERJEE S, JOHNSON P A. Performance of two real-life California bridges under regional natural hazards[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(3): 04015063.
- [11] DONG Y, FRANGOPOL D M, SAYDAM D. Time-variant sustainability assessment of seismically vulnerable bridges subjected to multiple hazards [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(10): 1451-1467.
- [12] UNNIKRISHNAN V U, BARBATO M. Multihazard interaction effects on the performance of low-rise wood-frame housing in hurricane-prone regions[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(8): 04017076.
- [13] PAN Y, AGRAWAL A K, GHOSH M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York State [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007, 12(6): 689-699.
- [14] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(4): 237-246.
- [15] GOVINDASAMY A V, BRIAUD J L, KIM D, et al. Observation method for estimating future scour depth at existing bridges [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(7): 1165-1175.
- [16] BRIAUD J L. Scour depth at bridges: Method including soil properties. I: Maximum scour depth prediction [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(2): 04014104.
- [17] BRIAUD J L, CHEN H C, KWAK K W, et al. Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(2): 114-125.
- [18] VALIPOUR M. Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States: Runoff forecasting using SARIMA[J]. *Meteorological Applications*, 2015, 22(3): 592-598.
- [19] KOHN R, ANSLEY C F. Estimation, prediction, and interpolation for ARIMA models with missing data [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1986, 81(395): 751-761.
- [20] 吴文朋, 徐浪, 张超, 等. 基于概率水文信息的桥梁基础冲刷风险及时变易损性分析[J]. *自然灾害学报*, 2024, 33(6): 151-161.
- WU Wenpeng, XU Lang, ZHANG Chao, et al. Time-dependent vulnerability analysis and scour risk of the bridge foundation based on probabilistic hydrological information [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(6): 151-161.
- [21] EL HMADI K, O'ROURKE M J. Soil springs for buried pipeline axial motion [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(11): 1335-1339.
- [22] MATSUBARA K, HOSHIYA M. Soil spring constants of buried pipelines for seismic design [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(1): 76-83.
- [23] KAUSEL E, WHITMAN R V, MORRAY J P, et al. The spring method for embedded foundations [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1978, 48(2/3): 377-392.
- [24] ZOKAIE T. AASHTO-LRFD live load distribution specifications [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2000, 5(2): 131-138.
- [25] ROSE A, PORTER K, DASH N, et al. Benefit-cost analysis of FEMA hazard mitigation grants [J]. *Natural Hazards Review*, 2007, 8(4): 97-111.
- [26] WALTON P A, BORG S L. Using dynamic pile testing to evaluate quality and verify capacity of driven piles [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 1633(1): 117-119.
- [27] BIAZAR S, KAMESHWAR S, BALOMENOS G P. Multi-hazard fragility modeling framework for bridges with shallow foundations subjected to earthquake, scour, and vehicular loading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 178: 108482.
- [28] AHMED B F, DASGUPTA K. Critical assessment of the seismic fragility of bridges as a system [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2025: 1-31.
- [29] ZHANG D N, XIONG W, MA X L, et al. Fragility evaluation of bridge pile foundation considering scour development under floods [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2024, 29(8): 04024052.
- [30] ZHANG D N, XIONG W, MA X L, et al. Fragility evaluation of bridge shallow foundation piers under floods by coupling simulation in structural and hydraulic fields [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311: 118952.
- [31] 纠永志, 薛营, 高海权, 等. 冲刷条件下桩基础水平承载特性非

- 线性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 84-94.
- JIU Y Z, XUE Y, GAO H Q, et al. Nonlinear analysis of horizontal bearing characteristics of pile foundation under scouring condition [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 84-94.
- [32] 祝彦知, 赵雅纯, 田光辉, 等. 考虑冲刷和材料劣化耦合作用的钢筋混凝土桥梁桩基承载性能研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(3): 116-125.
- ZHU Yanzhi, ZHAO Yachun, TIAN Guanghui, et al. Coupling effect of scouring and material deterioration-considered study on bearing performance of reinforced concrete bridge pile foundation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(3): 116-125.
- [33] LU X L, WEI K, DENG K L, et al. Lifetime seismic resilience assessment of a sea-crossing cable-stayed bridge exposed to long-term scour and corrosion[J]. Ocean Engineering, 2024, 295: 116990.
- [34] ABDEL-MOITY M N, SASIDHARAN M, HERRERA M, et al. Strategic assessment of bridge susceptibility to scour[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 251: 110334.
- [35] TOTANI F, ALOISIO A, ANGIOLILLI M, et al. Risk-based probabilistic assessment of a bridge collapse due to abutments scour: A case study[J]. Transportation Geotechnics, 2024, 49: 101369.
- [36] PREGNOLATO M, GIORDANO P F, PANICI D, et al. A comparison of the UK and Italian national risk-based guidelines for assessing hydraulic actions on bridges[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(1): 117-130.
- [37] MEI H, GUO A X. Probabilistic hazard assessment of bridges under multihazard actions during the life-cycle period[J]. Natural Hazards Review, 2024, 25(2): 04024001.

(责任编辑 王 璐)