

PS-InSAR技术在桥梁形变监测的应用及降雨影响分析

胡月雯¹, 梁 峰², 孟凡鹏², 赵 鑫², 李华东²

¹华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

²中国电建集团港航建设有限公司, 天津

收稿日期: 2026年7月25日; 录用日期: 2026年8月16日; 发布日期: 2026年8月26日

摘 要

针对传统桥梁监测方法难以实现大范围、长时序形变获取的问题, 本文采用PS-InSAR技术, 利用2023年12月至2025年8月的20景Sentinel-1A卫星数据, 对彩虹桥开展时序形变监测与分析。通过选取桥梁两端及跨中共4个典型PS点, 分析其累计沉降特征, 并结合降雨数据探讨环境因素对桥梁形变的影响机制。结果表明: 监测期内桥梁整体形变幅度较小, 累计形变控制在 ± 10 mm范围内, 未出现显著不均匀沉降, 结构运行状态良好; 不同部位形变存在明显空间差异, 桥台及引桥区域波动较大, 对外界扰动更为敏感, 而跨中区域形变相对平缓; 降雨作为重要外部因素, 在降雨集中时段会引起桥梁形变波动增强, 且桥台区域响应最为显著, 同时形变变化相较降雨存在一定滞后性, 总体来看, 降雨对桥梁形变的影响主要表现为短期扰动, 未引发持续性累积沉降。研究结果表明, PS-InSAR技术可有效获取桥梁长时序形变信息, 可为桥梁健康监测及环境荷载作用分析提供技术支撑。

关键词

PS-InSAR, 桥梁形变监测, 时序沉降, 降雨影响, 结构健康监测

Application of PS-InSAR Technology to Bridge Deformation Monitoring and Analysis of Rainfall Impacts

Yuewen Hu¹, Feng Liang², Fanpeng Meng², Xin Zhao², Huadong Li²

¹School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Powerchina Harbour Co., Ltd., Tianjin

Received: July 25, 2026; accepted: August 16, 2026; published: August 26, 2026

文章引用: 胡月雯, 梁峰, 孟凡鹏, 赵鑫, 李华东. PS-InSAR 技术在桥梁形变监测的应用及降雨影响分析[J]. 土木工程, 2026, 15(8): 191-199. DOI: 10.12677/hjce.2026.158215

Abstract

To address the difficulty of acquiring large-area and long-term deformation information using conventional bridge monitoring methods, this study applies persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) technology to conduct time-series deformation monitoring and analysis of Caihong Bridge using 20 Sentinel-1A satellite scenes acquired from December 2023 to August 2025. Four representative persistent scatterer (PS) points, located at both bridge ends and at the mid-span, were selected to analyze cumulative settlement characteristics. Rainfall data were further incorporated to investigate the mechanisms by which environmental factors influence bridge deformation. The results show that the overall deformation of the bridge during the monitoring period was relatively small, with cumulative deformation controlled within ± 10 mm. No significant differential settlement was observed, indicating that the structure remained in a favorable operational state. Clear spatial differences were observed among the bridge components: the abutment and approach-bridge areas exhibited greater fluctuations and were more sensitive to external disturbances, whereas the mid-span area showed relatively gentle deformation. As an important external factor, rainfall intensified short-term deformation fluctuations during concentrated rainfall periods, with the most pronounced response occurring in the abutment area. Meanwhile, bridge deformation showed a certain lag relative to rainfall. Overall, rainfall's influence on bridge deformation was mainly manifested as short-term disturbances and did not induce cumulative settlement. The findings indicate that PS-InSAR technology can effectively acquire long-term bridge deformation information and provide technical support for bridge health monitoring and analysis of environmental loading effects.

Keywords

PS-InSAR, Bridge Deformation Monitoring, Time-Series Settlement, Rainfall Effect, Structural Health Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,伴随我国经济水平的持续提升,交通基础设施建设规模不断扩大,桥梁工程数量与技术水平实现了跨越式发展。桥梁作为交通路网的关键控制性结构,是保障线路畅通与行车安全的核心荷载,对区域经济发展与社会民生保障具有重要支撑作用。在长期服役过程中,桥梁易受材料老化、环境侵蚀等因素影响,引发结构损伤甚至垮塌风险,会直接造成经济损失与安全隐患[1]。

在桥梁健康监测发展的早期阶段,通常以人工周期性检测作为主要手段。然而,该方法存在检测周期较长、存在覆盖范围小、监测周期长、成本高、需封闭交通、难以实现长时序全域观测等局限,无法满足大规模在役桥梁高效监测需求[2]。随着科学技术的不断发展,桥梁监测领域也涌现了新的形变监测技术,如传感器技术[3][4]、GNSS技术[5]-[7]、近景摄像测量技术和航空摄像测量技术[8][9]。永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)技术具备大范围、全天候、非接触、毫米级精度等优势,能够克服时空失相干、大气延迟等问题,稳定提取人工构筑物长时序形变信息,已广泛应用于城市道路网、地铁沿线、大型桥梁等基础设施的沉降监测与安全评估。

因 SAR 影像覆盖范围大、获取成本低,所以,与已有桥梁形变监测技术相比,PS-InSAR 技术具有监

测桥梁多, 监测成本低的独特优势, 特别适用于分析无形变监测系统的、中小桥梁的健康状况[10]。2012年 Elena Nikolaeva 等[11]分别运用 PS-InSAR 和 D-InSAR 技术对某山体滑坡进行研究, 发现 PS-InSAR 技术在监测毫米级别的地面形变时具有更好的效果。2012年, 刘国祥等[12]提出基于多平台 PS-InSAR 提取三维地表形变速度场的模型与算法, 用于天津市西北部地表三维形变监测。2017年, 赵婧文等[13]利用 COSMO-SkyMed 数据, 通过 PS-InSAR 技术提取了上海卢浦大桥上 PS 点的线性形变速率和季节性形变信息, 表明该桥总体上是稳定的。黄其欢等[14]采用了 PS-InSAR 技术对 21 景时间跨度为 1 年 Sentinel-1A 数据进行处理, 建立了适合于大跨度桥梁纵向形变监测的 InSAR 时序分析方法, 获取了京沪高铁南京大胜关大桥纵向变形。2016年, 赵一恒等[15]利用 11 景 TerraSAR-X 数据, 通过 PS-InSAR 技术获得了天津南疆公路大桥高分辨率的形变速率图, 并对 PS 点形变数据进行分析, 获得了桥梁的安全等级。2018年, 朱茂等[16]以 30 景 COSMO-SkyMed 数据为数据源, 采用 PS-InSAR 技术反演青岛胶州湾跨海大桥 2014 年 1 月到 2016 年 3 月的形变信息, 结果表明该桥以季节性周期形变为主, 监测精度可达毫米级。吴星乐等[17]采用 PS-InSAR 技术处理 89 景 Sentinel-1A 数据, 实现连盐高铁灌河特大桥的形变监测分析, 结果显示该桥梁结构状态稳定, 验证了 C 波段中分辨率 SAR 数据在大跨度拱桥监测中的可行性。周云等[18]以国内某高速铁路钢桁架拱桥为研究对象, 采用 PS-InSAR 技术处理 2017~2018 年 59 幅 Sentinel-1 卫星影像, 解算桥梁支座纵向位移并开展温度变形监测, 验证了 PS-InSAR 技术监测桥梁位移的可行性。

综上所述, PS-InSAR 凭借毫米级精度、长时序连续观测与非接触优势, 已成为大跨度桥梁结构健康监测的重要技术手段。本文以郑州市彩虹桥为研究对象, 利用 Sentinel-1 时序 SAR 影像, 采用 PS-InSAR 方法反演桥梁长时间序列形变场, 分析关键部位的形变时空规律与环境响应特征。

2. PS-InSAR 技术原理和流程

2.1. 技术原理

PS-InSAR 技术以同一区域的多期 SAR 单视复数影像为基础, 首先选取一景影像作为主影像, 并将其余影像精确配准到主影像坐标系中, 生成多幅干涉图。利用外部数字高程模型去除相位和主要地形相位后, 获得包含形变、残余地形、大气延迟、轨道误差及噪声等信息的差分干涉相位。然后, 根据多时相影像中像元的幅度稳定性和相位稳定性筛选永久散射体点。利用形变相位与时间基线之间的相关关系, 以及残余地形相位与垂直基线之间的相关关系, 联合估计永久散射体点的平均形变速率和高程误差。同时, 依据大气相位在空间上相关、时间上随机的特征, 对大气延迟和轨道误差进行分离。最后, 通过相位解缠获得连续相位, 并将提取出的形变相位转换为雷达视线方向位移。经过地理编码后, 可得到研究区域永久散射体点的平均形变速率分布及形变时间序列。

在考虑地表形变、高程误差、大气影响的情况下, 每个 PS 点在每幅差分干涉图上的差分干涉相位模型为: $\varphi_{diff} = \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{orb} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise}$, 式中: φ_{topo} 为残余地形相位; φ_{def} 为形变相位; φ_{orb} 为轨道误差相位; φ_{atm} 和 φ_{noise} 分别为大气和噪声引入的相位。

根据 PS 点相位中各分量的空间相关性, 通过建立邻域差分相位模型间接求解高程误差和线性形变速率的函数模型, 设有两个 PS 点 P_r 和 P_s , P_r 为参考点, 则 PS 邻域差分相位模型为:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \varphi_{diff}(x_r, t_k) - \varphi_{diff}(x_s, t_k) \\ &= \Delta C_\varepsilon B_k + \Delta C_v t_k + \varphi_{res}\end{aligned}$$

式中: C_ε 为高程误差相关项; C_v 为线性形变速率相关项; $\varphi_{res} = w(x_r, t_k) - w(x_s, t_k)$, 为线性残余相位, w 为信号的角频率; x 为 SAR 影像某一空间位置坐标; t_k 为第 k 时刻的时间基线; B_k 为空间基线。

通过建立 PS 点邻域差分相位模型, 间接解算高程误差与线性形变速率, 结合时空滤波分离大气相

位与非线性形变，最终得到雷达视线向(LOS)年平均形变速率与累计形变时间序列。在此基础上，依据卫星观测几何，并在假定水平位移分量可忽略的条件下，对 LOS 形变进行竖直方向转换。本文后续采用转换后的竖直位移时间序列分析桥梁形变特征。由于本文仅采用单一升轨数据，该结果属于估算竖直位移。

2.2. 技术流程

PS-InSAR 技术主要针对离散的、相干性较强的、稳定散射特性的 PS 点进行处理，从而获得这些 PS 点的形变信息。PS-InSAR 技术数据处理流程如图 1 所示。

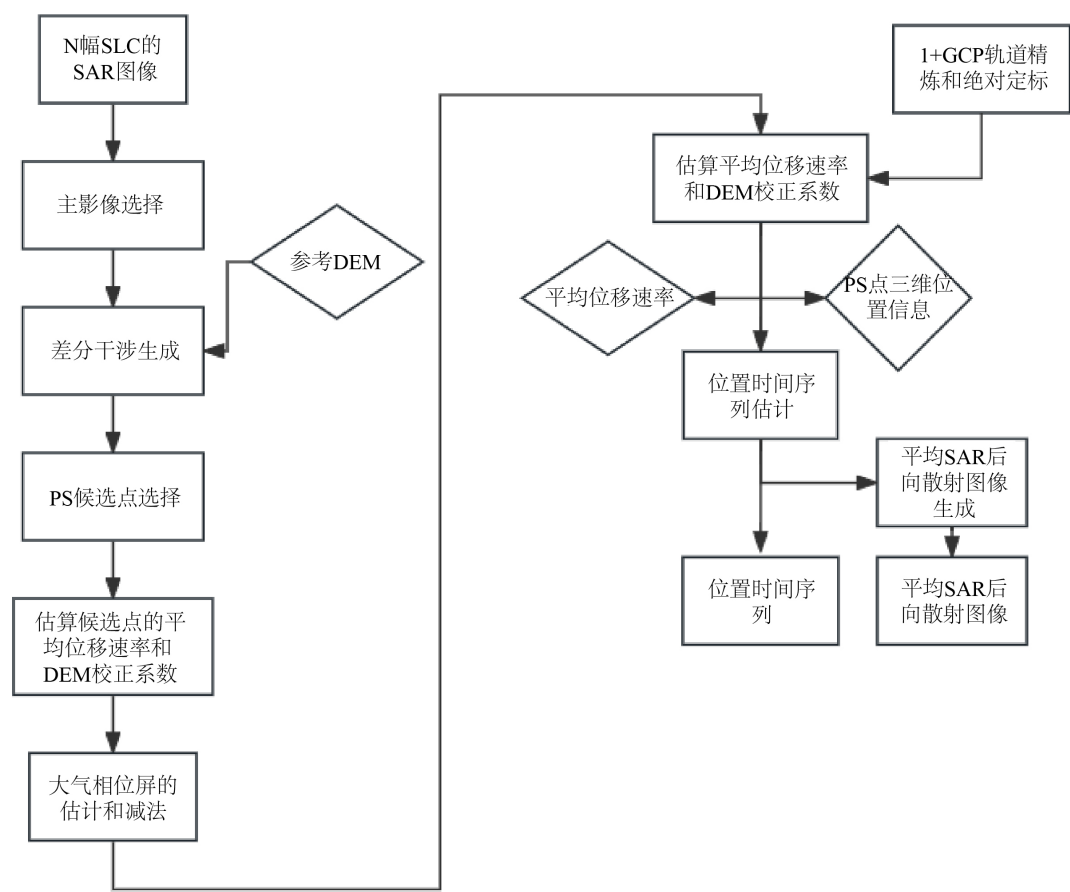


Figure 1. Data processing workflow of PS-InSAR
图 1. PS-InSAR 技术数据处理流程

3. 研究区和数据

3.1. 研究区

郑州市彩虹桥位于郑州市惠济区，西起西三环立交，东至南阳路立交，全长约 1939 m。该桥横跨既有铁路干线且临近地铁线路，地处铁路与地铁叠加影响的沉降敏感区域，桥址区地层以松散黏性土、砂砾层为主，下部泥岩、粉砂岩易受地下水与施工扰动影响，长期交通荷载与地表形变共同作用，使桥梁结构存在潜在沉降风险。

彩虹桥影像如图 2 所示。

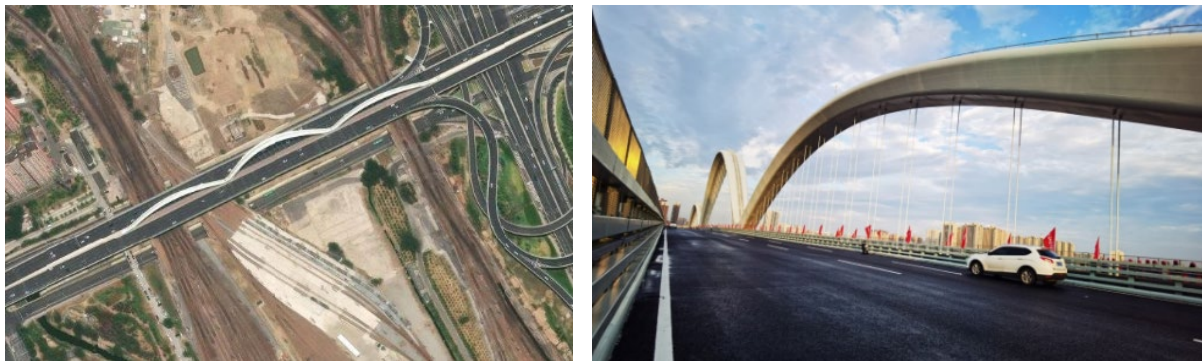


Figure 2. Image of Caihong Bridge

图 2. 彩虹桥影像

3.2. SAR 数据

对彩虹桥进行形变监测,得到大桥的整体形变信息,获取了 2023 年 12 月至 2025 年 8 月期间、覆盖彩虹桥的 20 景干涉宽幅模式 Sentinel-1A 升轨卫星数据。数据入射角为 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$,极化方式为 VV 极化,整幅影像覆盖范围约为 $(250 \times 150) \text{ km}^2$,距离向分辨率为 5 m,方位向分辨率为 20 m。

3.3. 辅助数据

为提高 PS-InSAR 处理精度,本文采用数字高程模型、精密轨道数据和降雨数据作为辅助数据。数字高程模型选用空间分辨率为 30m 的 Copernicus DEM GLO-30 数据,主要用于地形相位去除、地理编码及空间定位;精密轨道数据采用与各期 Sentinel-1 影像相对应的 AUX_POEORB 轨道星历文件,用于修正卫星轨道参数并减小轨道误差对干涉处理结果的影响。降雨数据来源于研究区附近的地面气象观测站。为增强降雨过程与 SAR 形变观测之间的时间对应,本文依据各期 SAR 影像采集日期,计算至上期采集日期之间的降雨量。

4. 数据处理与结果分析

根据影像的时间基线、空间基线选取 2024 年 9 月 2 日获取的影像作为主影像,其他影像为副影像,配准并重采样到主影像空间。其影像干涉对时空基线数据见表 1,时空基线图如图 3 所示,最小时间基线 24 d,最大时间基线 348 d,最小绝对垂直基线 18.25 m,最大绝对垂直基线 364.70 m。

Table 1. Image information

表 1. 影像信息

日期	空间基线/m	时间基线/d
2023/12/1	-95.9208	276
2024/1/6	-98.5299	240
2024/2/11	-88.6121	204
2024/3/6	-136.521	180
2024/4/11	313.4	144
2024/5/5	-90.5226	120
2024/6/10	117.63	84

续表

2024/7/16	77.4143	48
2024/8/9	35.9454	24
2024/9/2	0	0
2024/10/8	-364.697	36
2024/11/1	-62.8777	60
2024/12/7	-18.2482	96
2025/1/12	52.5726	132
2025/2/5	-99.3273	156
2025/3/1	-62.6524	180
2025/4/6	-128.764	216
2025/5/12	32.6661	252
2025/7/23	133.314	324
2025/8/16	-66.4537	348

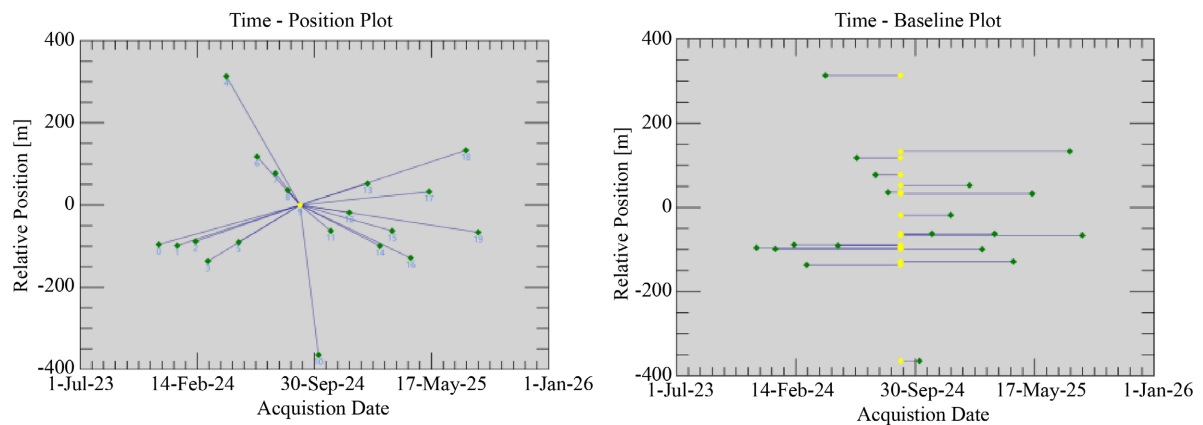


Figure 3. Spatio-temporal baseline diagram of PS-InSAR

图 3. PS-InSAR 时空基线图

采用 30 m 分辨率 SrtmV1 DEM 去除地形相位, 采用欧空局(ESA)精确轨道数据提高影像配准、地形相位和平地相位去除精度, 利用谱偏移滤波消除视角变化影响, 利用振幅离差指数和时序相干系数选取 PS 点, 获取大桥上 PS 点 29 个, PS 点选点结果及桥梁 PS 点位分布如图 4 所示。

由 PS 点分布可知, 桥梁本体上的有效 PS 点较少, 主要受结构尺度较小、影像分辨率有限、混合像元、周围水体低后向散射及车辆扰动等因素影响。降低的 PS 点密度会削弱形变结果的空间连续性和局部代表性, 因此, 本文主要基于有效 PS 点分析桥梁整体形变趋势, 不对 PS 点确实区域的局部变形进行过度推断。

基于线性形变速率模型, 采用二维频谱分析估计线性形变速率和高程误差, 最终获得 2023 年 12 月至 2025 年 8 月彩虹桥平均形变速率, 结果如图 5 所示。图中地面点远离 SAR 传感器时符号为负, 反之为正。

为了分析监测区地表形变时序特征, 在图上分别选择 4 个监测点 P1~P4, 并绘制其累计形变量曲线, 如图 6 所示。



Figure 4. Distribution of PS points near Caihong Bridge
图 4. 彩虹桥附近 PS 点分布情况

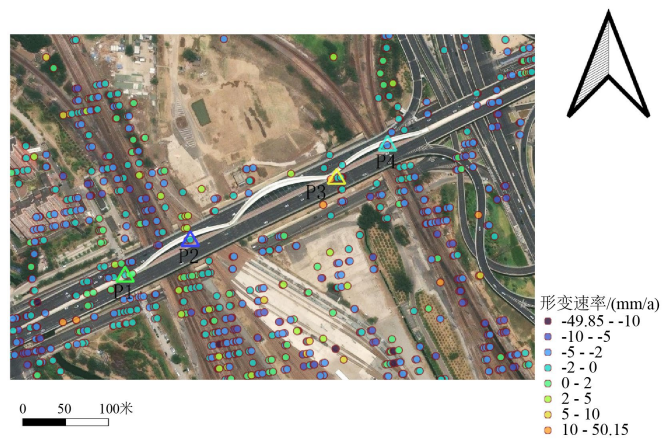


Figure 5. Annual average deformation rate of Caihong Bridge
图 5. 彩虹桥年平均形变速率

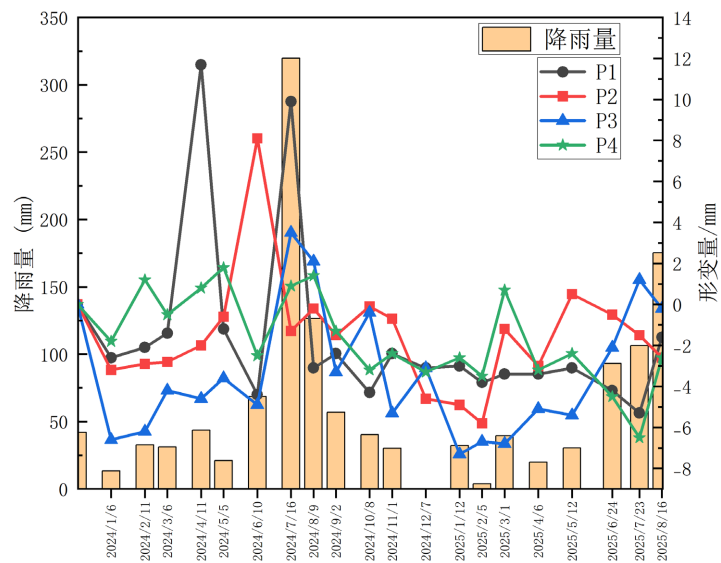


Figure 6. Time-series cumulative deformation curves of monitoring points P1~P4 and antecedent cumulative rainfall
图 6. 监测点 P1~P4 的时序累计形变曲线及前期累积降雨量

基于 PS-InSAR 获取的时序形变结果,对 4 个典型 PS 点的累计沉降曲线进行分析可知:

(1) 4 个 PS 点的累计形变均呈现小幅波动特征,整体变化范围控制在 $\pm 10\text{ mm}$ 以内,未出现持续的单向发展的沉降趋势,证明研究时段内桥梁结构整体处于稳定状态,未发生显著长期累积沉降。

(2) P1、P4 累积形变曲线波动幅度较大,呈现出明显的阶段性起伏特征。在 3 月、7 月前后出现短时间内快速抬升或沉降,随后趋于平稳,这表明桥台区域形变明显受外界环境因素影响。

(3) P3、P4 累积沉降曲线整体比较平缓,变化幅度明显小于两端区域,多数时间维持在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内,无明显突变。证明跨中区域形变受结构刚度较好的稳定性和连续性。

(4) 桥梁两端形变呈现“幅值大、波动强”的特征,而跨中区域表现为“幅值小、变化平缓”。这种差异表现为桥梁形变主要受地基条件控制,两端区域对外界扰动更为敏感,跨中区域受上部结构约束作用更强。

降雨量与桥梁形变时序对比分析:

(1) 在降雨量较大的月份,4 个 PS 点均出现不同程度的形变波动增强现象。桥梁两端波动最明显,表现为沉降或抬升幅度显著增大,跨中区域变化幅度相对较小。说明降雨是引发桥梁短期形变的重要外部因素。

(2) 降雨量增加时,沉降变化更为剧烈,部分时段出现由沉降转为抬升的现象,说明降雨量通过改变土体含水率与孔隙水压力,直接影响桥台基础变形;在跨中区域沉降变化与降雨量之间的对应关系较弱,说明其受整体刚度控制更为显著。

(3) 通过对比,部分沉降峰值出现在降雨峰值之后,说明桥梁形变对降雨的响应存在一定的滞后性。这主要是由于降雨渗入至地基土需要一定的时间,同时孔隙水压力的累积与消散过程具有渐进性,从而导致沉降变化滞后于降雨变化。

(4) 整体分析,降雨量与沉降量之间呈现出一定的正相关趋势,即降雨增强时形变波动加剧,但该相关性在不同位置表现不同,两端相关性较强,跨中相关性较弱。

5. 结论

(1) 监测期内彩虹桥整体形变稳定,年平均形变速率处于安全范围,无显著不均匀沉降与异常突变,桥梁运营状态良好。

(2) 桥梁形变具有明显的空间差异性,桥台及引桥区域形变幅度略大于跨中区域,对外界环境扰动更为敏感,应作为重点监测部位。

(3) 降雨是影响桥梁形变的重要外部因素,其作用主要集中于桥台区域。在降雨集中时段,桥梁形变波动明显增强,但整体表现为短期扰动,未形成持续性累积沉降。

(4) 桥梁形变呈现一定季节性特征,3 月为年度形变敏感阶段,各关键部位均表现出不同程度响应,应加强该时段的监测和预警。

尽管 PS-InSAR 技术在桥梁长时序形变监测中具有显著优势,但存在一定局限性:受桥面材料特性及交通扰动影响,局部区域相干性较低,易导致 PS 点分布不均;受空间分辨率限制,难以反映桥梁局部构件的微小变形;同时,大气延迟及 SAR 侧视成像引起的几何畸变会对监测精度产生影响。此外,受单一升轨观测几何的限制,该技术仅获取沿视线(LOS)方向的形变信息,难以直接反映真实三维形变,且结果对参考点选取具有一定依赖性;受卫星重访周期限制,对短期动态响应的捕捉能力亦存在不足。因此,在实际应用中,应结合地面监测手段开展多源数据融合分析,也可结合升轨和降轨 SAR 数据,对东西向和竖直向形变进行联合结算,以进一步提高形变监测结果的可靠性与完整性。

6. 结语

基于 PS-InSAR 技术,对研究桥梁 2023 年 12 月~2025 年 8 月时序形变进行了系统分析,并选取桥梁两端与跨中 4 个典型 PS 点开展对比研究。结果表明,桥梁整体形变幅度较小,结构运行稳定;不同部位形变响应存在明显差异,其中桥台区域对降雨作用更为敏感,而跨中区域受结构刚度控制,形变相对平缓。降雨主要通过改变地基土体水文条件,引起桥梁短期形变波动,但未对结构安全产生显著积累影响。研究成果可为桥梁长期健康监测、关键部位识别及环境作用机制分析提供参考。

参考文献

- [1] 王凌波,王秋玲,朱钊,等.桥梁健康监测技术研究现状及展望[J].中国公路学报,2021,34(12): 25-45.
- [2] 孙利民,尚志强,夏烨.大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J].中国公路学报,2019,32(11): 1-20.
- [3] 魏洋,卢海鹏,刘小明,等.基于长标距光纤光栅传感器的连续梁桥监测技术[J].铁道科学与工程学报,2017,14(10): 2231-2238.
- [4] 覃荷瑛,林勇,姜涌,等.光纤光栅传感器在斜拉桥索力监测中的应用[J].铁道建筑,2020,60(10): 51-55.
- [5] 李雷.GPS 桥梁监测系统的构建及其在某大桥中的应用研究[J].公路工程,2019,44(1): 222-226.
- [6] 梅秀道,钟继卫,史晶.GNSS-RTK 在大跨斜拉桥施工期位移监测中的应用[J].桥梁建设,2020,50(4): 36-41.
- [7] 马俊,曹成度,周吕.顾及有色噪声的铁路大跨度桥梁 BDS 变形分析[J].测绘通报,2020(S1): 80-86+106.
- [8] 石雪飞,许琪,马海英.桥梁施工线形无人机测量方法与参数优化[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(1): 32-41.
- [9] 袁磊,苏永华,张斌,等.无人机摄影测量技术在铁路桥梁巡检中的应用[J].铁道建筑,2022,62(3): 83-87.
- [10] 甘俊.融合星载/地基 InSAR 的铁路施工滑移监测分析研究[J].铁道工程学报,2021,38(4): 11-15+78.
- [11] Nikolaeva, E. and Walter, T.R. (2012) Comparison of InSAR Two-Pass and Time Series Methods for Analysing Landslides in Central Georgia, Caucasus. 2012 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich, 22-27 July 2012, 7573-7576. <https://doi.org/10.1109/igarss.2012.6351909>
- [12] 刘国祥,张瑞,李陶,等.基于多卫星平台永久散射体雷达干涉提取三维地表形变速度场[J].地球物理学报,2012,55(8): 2598-2610.
- [13] Zhao, J., Wu, J., Ding, X. and Wang, M. (2017) Elevation Extraction and Deformation Monitoring by Multitemporal InSAR of Lupu Bridge in Shanghai. *Remote Sensing*, 9, Article No. 897. <https://doi.org/10.3390/rs9090897>
- [14] 黄其欢,丁幼亮,王心安,等.基于 InSAR 的南京大胜关大桥纵向位移监测与分析[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(3): 584-589.
- [15] 赵一恒,王利东,柳宇刚,等.基于遥感数据与 PS-InSAR 的城市桥梁形变量的监测研究[J].建设科技,2016(4): 55-58.
- [16] 朱茂,沈体雁,吕凤华,等.青岛胶州湾跨海大桥 InSAR 形变数据分解和信息提取[J].遥感学报,2020,24(7): 883-893.
- [17] 吴星乐,罗海滨.基于 PS-InSAR 技术的连盐高铁灌河特大桥形变监测与分析[J].铁道标准设计,2023,67(11): 100-105+133.
- [18] 周云,危俊杰,李剑,等.基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(3): 39-50.