

衛星 SAR 画像と気温データを活用した橋梁の異常変位検知 — 修繕工事を対象とする分析事例 —

日本電気株式会社 正会員 ○木下 耕介 日本電気株式会社 正会員 久村 孝寛
日本電気株式会社 非会員 山口 裕貴 日本電気株式会社 非会員 田中 大地

1. はじめに

1950年代から高度経済成長期にかけて集中的に整備された多くの橋梁が、一般に寿命とされる供用開始 50 年を迎え始めており、計画的な維持管理の取り組みが始まっている¹⁾。平成 26 年には、道路法施行規則の改正により、2m 以上の道路橋を 5 年に 1 回の頻度で近接目視点検することが義務化され、平成 30 年には 1 巡目が終了し 2 巡目が始まった。一方で、全国で約 70 万橋という数の多さと、点検を担当する専門家の数が限られることから、点検の効率化が求められている。点検効率化に向け、客観的に橋梁の状態を知る手段として、変位に関するモニタリングシステムが提案されているものの、ふたつの課題があると考えられる。ひとつは、対象とする橋梁に変位センサを常設するシステムでは変位センサの設置と維持に労力が必要であること、ひとつは、システムで取得された変位データだけでは異常性を見分けにくいこと、である。後者では、橋梁は周囲の環境要因（気温/日射量等）により、上部構造内の温度分布が変化し、特定部位に周期的な変位変動が生じる性質²⁾が確認されており、取得した変位が熱と関連する正常なものか、異常により生じたものかを判別しにくいと考えられる。そこで、本稿では合成開口レーダ（Synthetic aperture radar; SAR）³⁾の利用により、効率的に取得した橋梁の変位と、気温との相関性に着目し、損傷・修繕工事に起因する異常な変位の検知手法を提案する。

2. 衛星 SAR 画像による変位データの取得

SAR は、人工衛星、航空機等の飛行体に搭載されたアンテナからマイクロ波を地上に向けて照射し、対象構造物からの反射波を用いて、反射強度や位相情報等を含む SAR 画像を生成する。また、異なる時期に撮像された SAR 画像ペアに対し、干渉解析を行うことで、片方の画像を基準とした相対的な位相差を算出するこ

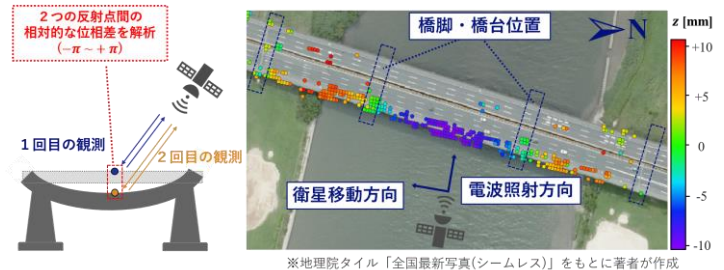


図 1. SAR の干渉解析 (荒川 X 橋)

とが可能である。これにより、画像ペア間で発生した、構造物の相対変位量を数 mm オーダーで取得可能である。図 1 に、荒川に架かる X 橋を対象とした干渉解析の例を示す。 z は構造物から衛星方向の相対変位量を表し、構造物が衛星に近づくと正、遠ざかると負の値をとる。図のように SAR では、地上に複数のセンサを設置する必要なく、構造物全体に渡るわずかな変位を取得可能である。

3. 気温との相関性に基づく異常変位検知

既存研究において、気温変化と上部構造の変位量との関係性は、正常状態では強い相関で安定しているが、損傷・修繕工事といったイベントが発生すると、一定期間、その相関が崩れ、経過に伴い安定するという性質が確認されている⁴⁾。本稿では、当性質を参考に、橋の径間ごとの変位を数理モデルにより表現し、その数理モデルにおいて径間全体の変位の振幅を調整する係数（以下、振幅調整係数と表記）の“いつもの状態”からの外れ具合で“いつもと違う状態”を検知する手法を提案する。また、この手法を支承の機能劣化や補強工事、支持部材の破断などに起因する変位の状態変化の検知に応用できると考えている。

提案法では、観測誤差等の雑音成分を含む変位データを定量的に扱うため、変位の数理モデル化を行う。本稿では、式 (1) で示される 4 次多項式で定式化し、変位に対し曲線近似を行った。

キーワード 橋梁, 維持管理, 環境要因, 合成開口レーダ (SAR), リモートセンシング, 異常変位検知

連絡先 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753 日本電気株式会社 玉川事業場 E-mail : kosuke-kinoshita@nec.com

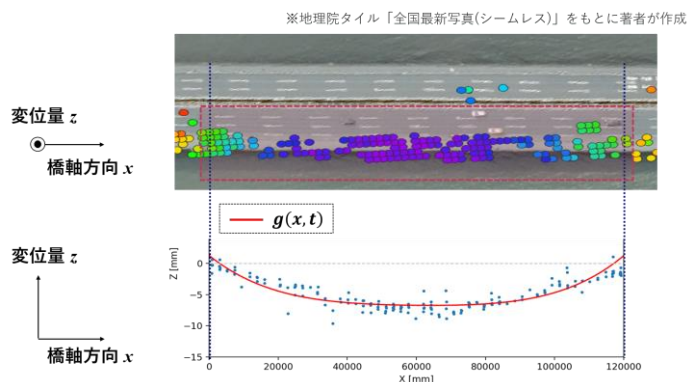


図2. 雑音を含む変位を曲線近似で表現

$$g(x, t) = \alpha_t \sum_{i=0 \sim 4} C_i x^i + \varepsilon \quad (1)$$

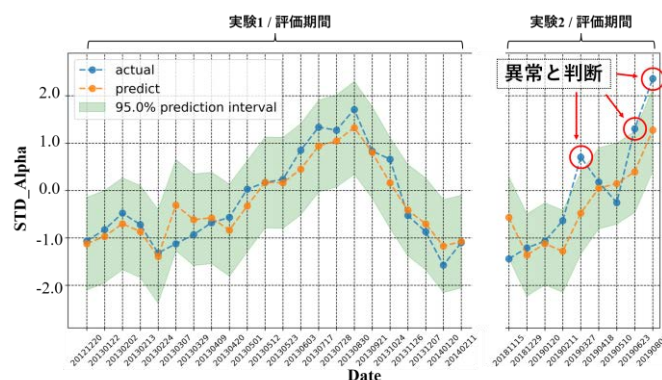
ここで、 x は橋軸長手方向の距離[mm]、 t は時刻、 i は多項式の次数、 C_i は多項式の各未定係数、 α_t は振幅調整係数、 ε は雑音成分である。図2は、中央径間の変位(赤枠内)に対し、橋脚間の距離を x 軸、変位量を z 軸として、曲線近似を適用した例である。また、近似により得られた α_t を各撮像日の変位の代表値として定義し、気温を説明変数とした α_t の予測モデルを構築する。そして、予測モデルの予測区間に α_t が収まるケースをいつもの状態(正常)とみなし、区間から外れるケースをいつもと違う状態(異常)とみなすことで異常を検知する。

4. 評価実験

X橋中央径間内のデータを対象に提案法の評価実験を行った。実験条件を表1に示す。公開情報をもとに、学習・評価期間内に損傷や修繕工事が確認されなかったデータの評価を**実験1**で、評価期間内のみで支承の補強工事が行われていたデータの評価を**実験2**で、それぞれ実施した。図3に実験結果を示す。**実験1**では、全ての観測値が予測区間内に収まったことから、提案法が正常なデータを正常と判断可能であることが確認できた。また、**実験2**では、2019年3月27日において異常と判断され、その後も予測値との乖離が複数回確認された。以上より、提案法が修繕工事の様なイベントを起因とした、異常な変位の検知に有効であると考えられ、現状の点検作業の代替となることに期待が出来る。尚、X橋での支承補強工事の詳細な日程・施工内容は論文執筆時点では不明であるが、Googleマップ

表1. 実験条件

対象橋梁	荒川X橋(中央径間)
衛星データ	TerraSAR-Xで撮像された2010~2019年のSAR画像(2012/10/26の画像を基準に他全ての画像と干渉解析)
実験1	実験内容: “工事なし期間”に対する異常性判断 学習期間: 2010/6~2012/12 (計49枚/工事なし) 評価期間: 2012/12~2014/2 (計22枚/工事なし)
実験2	実験内容: “工事あり期間”に対する異常性判断 学習期間: 2010/6~2014/2 (計71枚/工事なし) 評価期間: 2018/11~2019/8 (計9枚/工事あり)
説明変数	撮像日の最低気温(東京気象台)
目的変数	振幅調整係数 α_t
予測モデル	単回帰分析
判断基準	信頼係数95%の予測区間

図3. 変位幅調整係数 α_t の予測値および予測区間、観測値

ストリートビューの2019年3月の撮影で、X橋の橋脚に足場が組み立てられている様子が確認された。

5. おわりに

本稿では、遠隔から橋梁の健全性を診断可能な手法として、衛星SAR画像を利用して効率的に取得した橋梁の変位と、気温データとの相関性に着目した異常変位検知手法を提案した。今後は、他の橋梁も評価対象に加え、本提案手法の有効性検証を行う。

参考文献

- 1) 国土交通省, 令和3年版国土交通白書 2021.
- 2) 小林裕介ら, 鉦床版箱桁橋梁の温度変形挙動を利用した健全度評価モニタリング, 土木学会論文集A, 62巻4号, pp.794-807, 2006.
- 3) 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 第2版, 2009.
- 4) 土木学会 技術推進機構, 垂井高架橋モニタリング評価委員会 最終報告書, 2017.