

京都大学工学部 学生員 ○北内 壮太郎
 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 京都大学大学院 学生員 伊勢本 遼

1. はじめに

高度経済成長期を中心に建設された日本の橋梁の 50% 以上が、20 年後には建設後 50 年を経過すると報告されており、近い将来、大量の橋梁点検により補修・補強などの意思決定を行う必要が生じる。そのため経済的かつ効率的に橋梁の維持管理を行う必要があり、その一助となる技術が振動ヘルスマonitoring である。一般に土木構造物においては、損傷・劣化は緩やかに進行するため、長期の振動モニタリングも有用である。構造物の部材の損傷・劣化は振動特性の変化として現れるため、従来の関連研究では構造物の振動特性を推定し、その変化に着目してきた。振動特性の推定には AR モデルのような線形システムモデルの利用も数多く報告されている¹⁾。しかし AR モデルによる供用中の中小スパン橋梁の振動特性推定には、「最適モデル次数まで考慮できない場合がある」、「推定される振動数帯がばらつく」等の、解決すべき問題もある。そこで本研究では、システムの振動特性と関連がある AR 係数により定義される損傷指標 DI²⁾に着目する。ただし、DI は損傷・劣化によって変化するだけでなく、温度や通過車両等の外的影響によっても変化するため、高精度のヘルスマonitoring のためには外的影響を考慮する必要がある。そのため本研究では、DI を指標とした振動モニタリングの実用化に向け、まず外的影響として温度を考慮する。また、温度の影響を減らすためにベイズ回帰を適用し、橋梁の異常検知のための管理基準の設定を検討する。

2. 損傷指標

AR(Auto Regressive)モデルは式(1)で表される。y(k)は離散時間の時刻 k におけるシステムの出力を表す。

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + a_3 y(k-3) + \dots + e(k) \quad (e(k): \text{誤差}, a_i: \text{AR係数}) \quad (1)$$

AR 係数は AR モデルの性質を決める。この 1~3 次の AR 係数を用い、損傷指標 DI は式(2)で定義される²⁾。

$$DI = |a_1| / \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \quad (2)$$

DI は最適モデル次数まで考慮した AR モデルの AR 係数で定義できるため、最良線形予測子となる。また、AR 係数はシステムパラメータであることから、損傷により変化するため、DI も変化することになる。

3. 実橋長期モニタリングの概要

モニタリングの対象橋梁は供用中の中小スパン橋梁で、橋長 187m、幅員 8m の 7 径間ゲルバー鋼板桁橋である。センサの配置を Fig.1 に示す。モニタリングには、約 10 ヶ月間で、加速度計 UA1,UA2,DA1,DA2 と温度計 T5,T6 で計測された結果を用いる。サンプリング周波数は 200Hz である。これらのデータは全て、橋梁が健全時のデータである。本研究では外的影響として温度のみを考慮するため、交通の影響を小さくする必要がある。計測曜日と時刻を絞れば交通の影響を低減出来るとの報告³⁾から、交通量が少ない午前 7 時に計測されたデータに着目する。DI の推定にはタイムウィンドウを適用し、1 ブロックを 16384 個、タイムステップ 200 個、推定回数を 100 回とする。

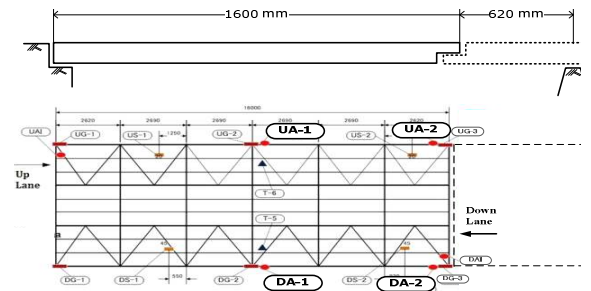


Fig.1 Plan views of the monitoring span and sensor deployment.

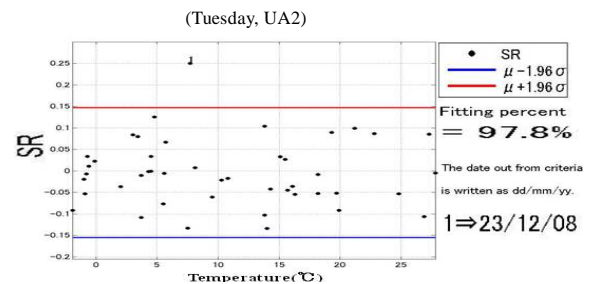


Fig.2 Scalred Residual of observed DI and estimated DI.

4. ベイズ回帰と管理基準の提案

本研究では橋梁の異常検知のための管理基準の利用に着目する。長期モニタリングの実現のためには、外的影響を考慮し、橋梁の異常検知が可能な管理基準を設定する必要がある。そこで本研究では管理基準の設定にベイズ回帰を用いる手法を提案する。従来は最小二乗法による線形回帰を用いた管理基準を提案してきたが、「管理基準の自動更新が出来ない」、「新たな観測結果を得ても推定精度が上がらない」等の問題があった。これらの問題を解決するために、ベイズ回帰を用いる。また、複数の外的影響を考慮することができ、拡張性が高い⁴⁾。

ベイズ回帰により、温度 $t(k)$ における DI の推定値 $DI_k(es)$ が求まる。そこで、AR 係数から求まる DI を観測値とし、温度 $t(k)$ における観測値の平均値を $DI_k(ob)$ と名付け、 $DI_k(es)$ との残差率 SR (Scaled Residual) の分布を見る。その結果を Fig.2 に示す (μ : SR の平均, σ : SR の標準偏差)。なお、SR は式(3)で表される。

$$SR_k = (DI_k(ob) - DI_k(es)) / DI_k(es) \quad (3)$$

全曜日および観測点で、SR が 95% 信頼区間である $\mu \pm 1.96\sigma$ の中に入る割合が 95% 近くになっている。また、UA1 における 10 ヶ月の SR が $\mu \pm 1.96\sigma$ に収まるかを判定した結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より、3 日連続で「異常」と判定された結果が見られる。ただし、全観測点で「異常」と判定された日はなく、また、いずれの観測点においても、4 日連続で $\mu \pm 1.96\sigma$ より外に出ることはないことを確認している。以上より、「本研究で検討する橋梁が健全である」と判定するための条件として「条件 1: SR が 4 日連続で $\mu \pm 1.96\sigma$ より外に出ない」、「条件 2: SR が $\mu \pm 1.96\sigma$ の中に収まる割合が 95% 以上」、「条件 3: 全観測点で異常と判定されないことがない」の 3 条件を提案する。なお、対象橋梁では大型トラックがガードレールに追突する事故が発生しているため、その時のデータを用い、提案した管理基準による判定を試みる。その結果を Fig.4 に示す。健全時においては全観測点で「異常」と判定されることはなかったことに対し、事故時のデータは全観測点において「異常」と判定されている。

5. 結論

本研究では外的影響として温度を考慮し、長期モニタリングにおける外的影響低減のためにベイズ回帰を用いている。その上で、観測値とベイズ回帰による推定値の残差率 (SR) の 95% 信頼区間を管理基準とし、橋梁の異常検知を行う。ベイズ回帰により、管理基準を自動的に更新できること、観測データが増える度に回帰の推定精度が上がることを確認できている。SR が管理基準に収まるかどうかを全曜日および観測点について調べた結果、ほとんどのケースで収まる割合が 95% 近くになっている。また、観測点毎に 10 ヶ月間橋梁の状態を判定し、これらの結果から、着目橋梁の異常診断のための 3 条件を提案した。事故時のデータを用いた検討の結果、提案した条件で異常診断が可能であることがわかった。今後は、約 10 ヶ月分の SR が 95% 信頼区間に収まる割合が 95% を下回ったいくつかのケースをどのように扱うかを検討する必要がある。さらに、各観測点で橋梁の状態について異なる診断がなされるケースをどのように扱うかを検討する必要がある。また、外的影響として温度以外についても検討を行う予定である。

【参考文献】

- 岡林隆敏, 奥松俊博, 中宮義貴, 常時微動に基づく AR モデルによる構造物振動数の高精度自動推定, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.271-282, 2004.4.
- 金哲佑, 伊勢本遼, 川谷充郎, 杉浦邦征, 模型桁車両走行実験における異常診断の可能性の検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67, No.2(応用力学論文集), pp.I.833-I.842, 2011.
- 金哲佑, 榊原稔基, 伊勢本遼, Heng Salpisoth, 大島義信, 杉浦邦征, 長期振動モニタリングによる中小スパン橋梁の異常検知の試み, JCOSSAR2011 論文集, 日本学術会議, pp.365-370, 2011.
- C.M.ピショップ著, 元田浩, 栗田多喜夫, 樋口知之, 松本裕治, 村田昇 監訳, パターン認識と機械学習 上 ベイズ理論による統計的予測, 2007.

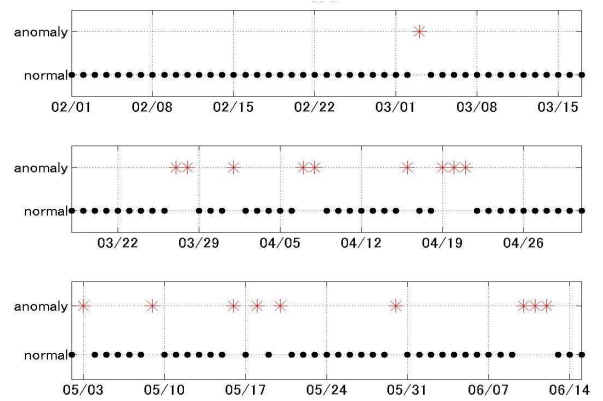


Fig.3 Result of long-term monitoring (UA1).

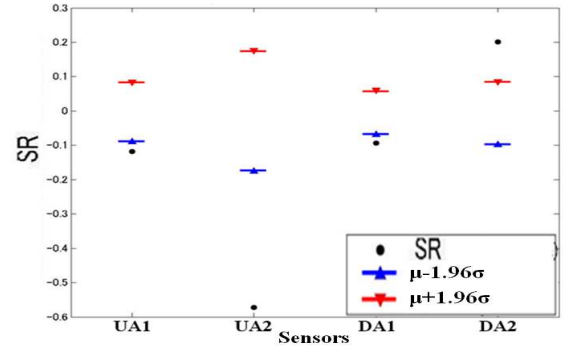


Fig.4 Fitting of accident data to criteria.