

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

1. はじめに

近年，社会基盤施設の劣化・老朽化が問題となっており，多くの構造物の維持管理を行う必要性が高まっている．橋梁においても，いかに異常を検知し，適切に維持管理を行うかが重要な課題であり，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と考える．構造物の損傷・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．しかし，構造物の振動特性は，温度や通過車両等の外的作用によって変化するため，振動ヘルスマonitoringを行うためには外的影響を考慮する必要がある．特に，中小スパン橋梁の長期振動モニタリングでは，温度に加えて，走行車両の影響を考慮する必要がある．

既往の研究¹⁾²⁾では，回帰分析を行い，温度を考慮したヘルスマonitoringを検討している．このとき，通過車両特性には周期性があるとの観測結果³⁾より，時間帯を限定したモニタリングデータを用いることで，走行車両の影響を減らす工夫をしている．

本研究では，既往の研究²⁾で検討されているベイズ回帰モデルを改良することで，温度と走行車両の影響を考慮できるベイズ回帰モデルの提案を目指す．

2. 着目指標

線形システムダイナミックは，式(1)に示す AR (Auto-regressive)モデルでモデル化できる．

$$y(k) - \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) = e(k) \tag{1}$$

ただし， $y(k)$ は離散時間の時刻 k におけるシステム の出力， $e(k)$ は残差， a_i は AR 係数である．

本研究では，システムの振動特性と関連がある AR 係数で定義される損傷指標 DI^A を着目指標として用いる．損傷指標 DI は，

$$DI = \frac{|a_1|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \tag{2}$$

で定義される．

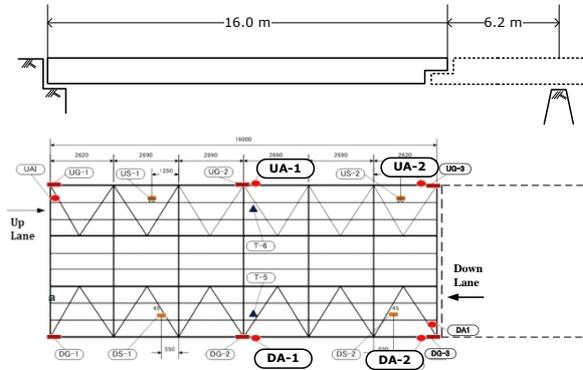


Fig. 1. Elevation and plan views with sensor deployment of the observation bridge.

3. 実橋長期モニタリング

対象スパンは，橋長 187m，幅員 8m の 7 径間ゲルバ一鋼板桁橋における上り線の第 1 スパンである．センサの配置を Fig.1 に示す．約 1 年間の計測期間のうち，通行車両特性の変動が現れるように，水曜日の 7 時，13 時，19 時，および日曜日の 7 時，13 時，19 時のデータを抽出し用いる．加速度計 UA1,UA2,DA1,DA2 で計測した加速度データ，温度計 T5,T6 で計測した温度データ，BWIM(Bridge Weigh-in-Motion)システムにより推定した車両重量データを用いる．本研究の車両重量とは， DI の推定に用いる 181.92 秒間に走行した車両の重量の総和である．また，モニタリング期間中に，橋梁の異常は報告されていないため，全てのデータを健全時のデータとみなす．

4. ベイズ回帰によるヘルスマonitoring

ベイズ回帰を用いると，長期モニタリングにおいて観測されるパラメータの自動更新による回帰精度の向上が期待できる．さらに多因子の外的影響の考慮も可能であるため⁵⁾，本研究ではベイズ回帰分析に着目する．また，損傷指標として DI を用い，回帰分析において観測値と回帰モデルによる推定値の残差 E を (式(3)参照) を評価し，長期ヘルスマonitoringの意思決定をするための検討を行う．

$$E = DI_{ob} - DI_{pr} \tag{3}$$

ここで， DI_{ob} は，式(2)より求まる DI であり，外的影響を受けている指標である． DI_{pr} は，ベイズ回帰

により推定される DI であり、外的影響の除去を図った指標を表す。長期モニタリングにおける意思決定のための閾値設定には、健全時の残差の信頼区間を利用する。

5. モニタリングデータの適用結果

温度と車両重量を外部因子とし、上り線の計測データのベイズ回帰分析を行った結果を Fig.2 に示す。Fig.2 の数値は、残差の 90%, 95%, 99% の信頼区間の閾値内に収まる割合である。Fig.2 より、閾値内に収まる割合が、信頼区間の値に近い値であることから、閾値設定の妥当性が確認できる。ただし、温度が上がるにつれて、残差のばらつきも増加することがわかる。これは、温度の上昇により DI_{ob} のばらつきも増加しており、ばらつきの変化を精度よく回帰できていないことが原因であると考えられる。

多因子回帰の有効性を検討するため、Fig.2 の検討に利用したデータを用いて、車両重量を考慮せず温度のみを外部因子として考慮したベイズ回帰分析結果を、Fig.2 の 99% 信頼区間の閾値と共に Fig.3 に示す。Fig.3 より、閾値内に収まる割合が、温度と重量を考慮する場合の 97.8% よりも小さい 94.9% になっており、温度と重量を考慮する場合より回帰の精度が劣ることがわかる。また、紙面の制約で省略するが、既往の研究²⁾で検討されている車両の重量特性の変化が少ない時間帯に着目し温度のみを考慮する場合の閾値内に収まる割合は、Fig.2 の閾値内に収まる割合と近い値である。したがって、重量特性の変化が少ない時間帯に着目し温度のみを考慮した既往の研究の妥当性が確認できる。

下り線の計測データについては、温度と重量を考慮する場合と温度のみを考慮する場合の、回帰精度には大きな差は見られなかった。これは、上り線第 1 スパンである着目スパンでは車両進入による衝撃的な影響を受けるが、下り線ではその衝撃的な影響が相対的に少ないためであると考えられる。

6. 結論

本研究では、多因子外的影響を考慮できるベイズ回帰モデルを提案し、橋梁長期振動ヘルスマニタリングにおける温度や車両の計測結果への影響の低減を図る。以下にその結果をまとめる。

- ① 車両の衝撃的な影響を受ける上り線の計測データの回帰結果から、温度と重量を考慮する場合は温度のみを考慮する場合より回帰の精度が向上することがわかる。
- ② 車両の重量特性の変化が少ない時間帯に着目し温度のみを考慮する場合の回帰の精度は、温度と重量を考慮する場合に近いことを確認できる。
- ③ 温度が上がるにつれて、残差のばらつきも増加する結果となっており、これは、温度の上昇により DI_{ob} のばらつきも増加し、ばらつきの変化を精度よく回帰できていないことが原因であると考えられる。

また、BWIM システムの導入は一般的ではないことから、BWIM システムを導入せず走行車両の影響を考慮できるアプローチの検討を行う予定である。

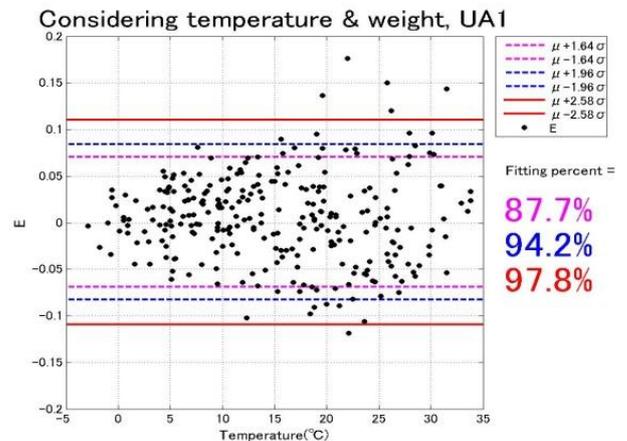


Fig.2 Residual (E) between observed DI and predicted DI considering temperature and weight as in-service environmental factors.

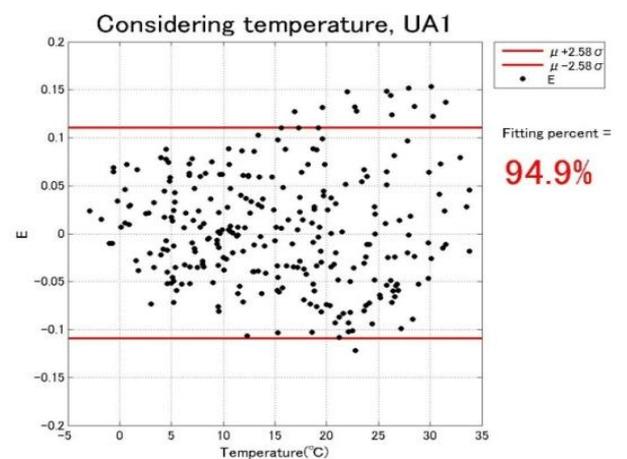


Fig.3 Residual (E) between observed DI and predicted DI considering temperature as an in-service environmental factor.

【参考文献】 1) 金 哲佑・その他：長期モニタリングによる中小スパン橋梁の異常検知の試み，構造物の安全性および信頼性，JCOSSAR2011 論文集，A 論文，Vol.7, pp.365-370, 2011. 2) 北内 壮太郎・その他：外的影響を考慮した橋梁異常検知のためのベイズ回帰の適用，平成 24 年度土木学会関西支部年次学術講演会，1-78, 2012. 3) Heng Salpisoth: 橋梁振動と通行車両の年間観測データに基づく道路橋の固有振動数推定結果の変動に関する研究，京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士論文，2011. 4) 金 哲佑・その他：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.14, pp. I_833-I_842, 2011. 5) C.M. ビショップ著，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.