

# 加速度センサを用いた模擬橋梁における気温変動を考慮した支承と主桁の損傷検知

能美防災（株）  
群馬大学  
植野インフラマネジメントオフィス

正会員 ○井関晃広 辻本圭亮 遠藤義英 山岸貴俊  
正会員 岩崎篤  
正会員 植野芳彦

## 1. はじめに

橋梁の老朽化問題に対処するにあたり、モニタリング技術の開発は急務となっている。著者らは、橋梁のモニタリング技術の確立を目指し、加速度センサを用いて様々な実橋梁の計測実験や模擬橋梁を用いた実験を進めている<sup>1)</sup>。橋梁では、その環境や構造や気温変動によって、物理量の現れ方や損傷の現れ方も異なる為、異常検知を試みる時にその影響を考慮することは重要である。

そこで本稿では、その一方策の実証実験として、橋梁の支承と主桁損傷に着目し、模擬橋梁を用いて、温度が変動する環境下でも、異常検知が可能かを検証する事を目的とする。屋内に9mの模擬橋梁を制作し、温度の変化および損傷を加え、計測した加速度値から各種の物理量を算出し、異常検知アルゴリズムを適用し、性能を評価した。

## 2. 実験概要

### (1) 模擬橋梁の概略

1~1.5mのH形鋼(200×200×8×12mm, 55kg/m)を7本つなげて9mの模擬橋梁を製作し(図1)、当社屋内施設(室内温度調節設備付帯)内に設置した。支承部は回転機能と水平移動機能を設け、片側は常時水平固定支承とし、もう片側は水平可動支承とした。

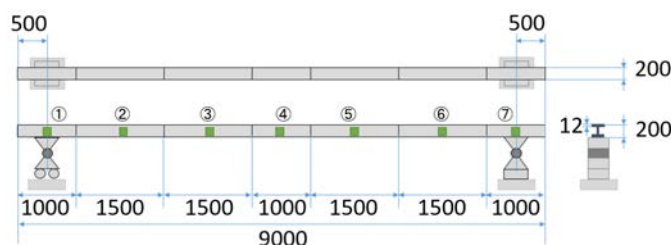


図1 模擬橋梁の概略図

### (2) 実験条件

加える温度変化として、約-10~40°Cの間で室内温度を制御した。常時、模擬橋梁の表面温度および鉛直方向の振動(加速度)を計測した。加速度の計測は、橋梁中央、四分位点等、計7箇所を設置した当社製3軸加速度センサ(PDAJ002-RP, 周波数範囲: DC~20Hz, 分解能: 0.06μG)を用いて行った。計測のサンプリング周波数は100Hzとした。

模擬橋梁に加える損傷モードは、以下3種類とした。

- 1: 支承の水平移動機能の損傷(固着)
- 2: 支承の回転機能の損傷(固着)
- 3: 主桁の四分位点の損傷(H鋼接合部のボルト弛緩)

支承損傷について、回転および水平移動機能を有する機構をプレートで固定することで完全な固着を、機能を制限するプランジャーの数で軽~重度の損傷を模擬した。主桁損傷は弛緩させるボルト数で模擬した。支承損傷は左右の支承の外側のプランジャーだけの固定、外側&内側共固定するなど、いくつかパターンを分けている。但し、主桁損傷は実験の安全性を考慮し、支承の水平機能を固定した上で模擬した。損傷付与は、気温をすべて20°Cに設定した状態で行った。

### (3) 異常検知アルゴリズム

損傷検知に用いる異常検知アルゴリズムとして、ベイズ推定を用いたノンパラメトリックな回帰モデルである、ガウス過程回帰(Gaussian process regression, 以下GPR)<sup>2)</sup>を用いた。GPRは、カーネル関数により柔軟にモデル選択が可能であり、例えば、凍結等の影響による低温域の非線形な物理量の変化に対応できる。また、予測値だけでなくその分散が計算可能なため、例えば気温と物理量の関係性と同時に分散も表示することで異常な状態が管理者にとって直感的に理解しやすい。また、過去の状態からの変化に着目するため、例えば学習データが健全な状態のものでなくとも、変化検出による異常検知に利用可能である。

$N$ 組の学習データとして、入力を  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  および、出力  $\mathbf{y} = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_N)]$ 、学習データを  $\mathbf{D} = (\mathbf{x}, \mathbf{y})$  とする。任意の座標  $x$  における応答曲面の出力を  $f(x)$  とし、 $f(x)$  の分布があるデータ  $\mathbf{D}$  から  $p(f(x)|\mathbf{D})$  が得られていれば、 $\sigma^2$  を観測ノイズの分散として、予測分布は式1で表現される。

$$p(y|\mathbf{D}) = \mathcal{N}(f(x)|\mu_f(x), \sigma_f^2(x)) \quad (1)$$

$$\mu_f(x) = \mathbf{k}^T (\mathbf{K} + \sigma^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{y}_N$$

$$\sigma_f(x) = \mathbf{K}_0 - \mathbf{k}^T (\mathbf{K} + \sigma^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{k}$$

なお、 $\mu_f(x)$  は期待値、 $\sigma_f^2(x)$  は分散である。また、カーネル関数  $K$  を用いて、 $K$  はその  $(i, j)$  成分が  $K(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})$  で与えられる行列、 $\mathbf{k} \equiv (K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(1)}), \dots, K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(N)}))^T$ 、 $\mathbf{K}_0 = K(\mathbf{x}, \mathbf{x})$ 、 $\mathbf{I}_N$  は  $N$  次元単位行列として定義される。そして、異常度  $a(\mathbf{x}')$  は式2を用いて計算する。

$$\begin{aligned} a(y', \mathbf{x}') &= -\ln p(y'|\mathbf{x}', \mathbf{D}, \sigma^2) \\ &= \frac{1}{2} \ln \{2\pi\sigma_y^2(\mathbf{x}')\} + \frac{1}{2\pi\sigma_y^2(\mathbf{x}')} \{y' - \mu_y(\mathbf{x}')\}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

本稿では、GPRの学習データセットとして、屋内気温変化時の橋梁表面温度(入力)と固有振動数(出力)から、ランダムに500組を抽出して用いた。

### 3. 実験結果

GPR の適用結果として、模擬橋梁の無損傷時における橋梁表面温度を入力（横軸），その温度時の鉛直方向1次の固有振動数を出力（縦軸）として学習データを与え、予測分布を算出した結果を図2に示す。また、図3は、図2に各損傷時の固有振動数を与えた場合の分布を示す。各図の薄青の帯は、分散（ $3\sigma$ ）を示している。

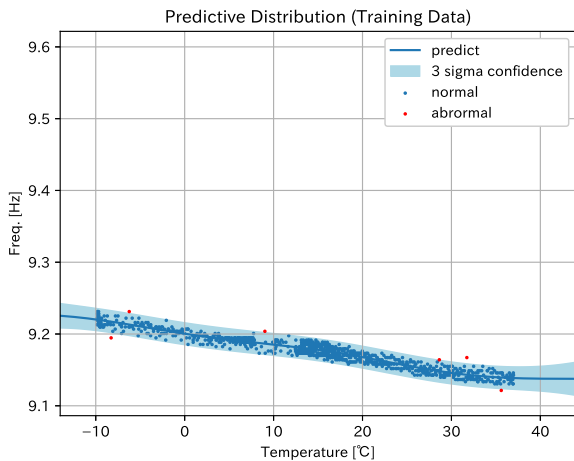


図2 温度と固有振動数による GPR の予測分布

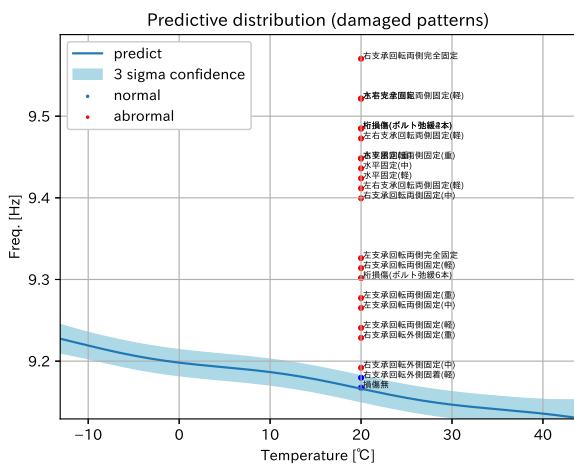


図3 予測分布における損傷ケースの固有振動数

図4には、横軸を各損傷名称、縦軸を式2から算出した異常度として示した。オレンジの線は閾値であり、固有振動数が信頼区間（ $\mu \pm 3\sigma$ ）内かどうかを示す。

### 4. 考察

#### (1) 気温の影響

図2を見ると、固有振動数は、温度影響で9.14~9.22 Hz間の変動がある。もし、気温を考慮せず長期的な変動データからの検出を行った場合、その範囲内の変動をすべて許容してしまい、検出が低感度になることが予想される。また、同様に気温を考慮せず、固有振動数の短期的な変化だけに着目した場合は、感度はあるものの急峻な気温変動による変化を異常として誤検知してしまう可能性も考えられる。今回のように、温度を考慮し季節性変動を取り込みながら、中長期的な物理量の変化で異常を捉えることが必要である。

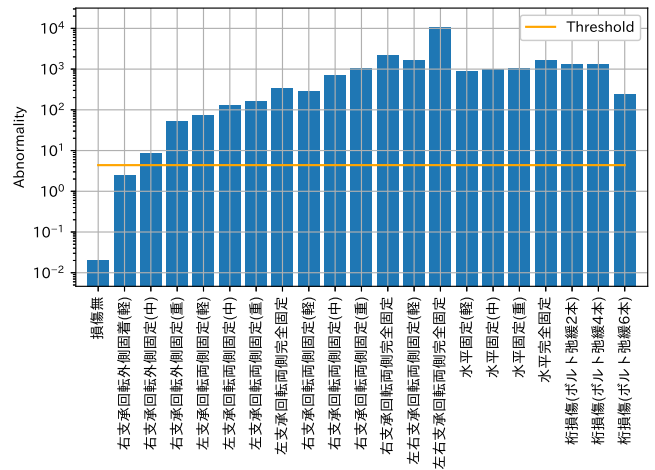


図4 各損傷ケースの固有振動数から算出した異常度

#### (2) 異常度

図4を見ると、桁損傷および支承損傷、どちらも期待値からの外れが発生し、最も軽度な損傷条件以外は異常度が閾値を超え、異常を検出できている。支承損傷は固有振動数に顕著に影響を与える為、検出が容易と考えられる。一方、桁損傷が桁端付近で発生した場合、固有振動数への影響が小さい場合も考えられる。その場合は、固有振動数だけでなく、例えば加速度値から傾きを算出し、その変化を捉えることで、検出できる可能性がある。本稿では、傾きの結果は割愛しているが、傾きも温度に対して変化するため、GPRが有効であることを確認している。

#### (3) 実橋梁への適用

本稿では、模擬橋梁実験での異常検知結果を述べたが、実橋梁での検証も併せて行っている。実橋梁の場合、橋梁によっては、固有振動数のバラつきが生じたり、物理量が温度に対し非線形な変化をする場合があるが、GPRに用いるカーネル関数の設計次第で対応可能であると考えられる。一方、気温の影響を考慮した場合、場所毎の日射量差の影響、特に鋼橋では日向/日陰でバラつきが大きくなることが予想される。今後の現場検証が必要であるが、前述の通り、固有振動数や気温だけでなく、各センサ間の傾き等もデータに含めることで、複数の加速度センサおよび複数の物理量によるロバストな異常検知が可能になると考える。

### 5. おわりに

本稿では、模擬橋梁に支承損傷および桁損傷を施し、温度と、加速度センサから得られる物理量である固有振動数等を学習データとして、異常検知アルゴリズムの検証を行った。その結果、損傷時の固有振動数の小さな変化でも、異常度が大きく現れたことを確認した。今後は、実橋梁での検証も進めながら、実用的な異常検知手法の確立を目指す。

#### 参考文献

- 井関ら：加速度センサを用いた模擬橋梁の固有振動数と傾斜角における損傷位置の影響評価，土木学会第76回年次学術講演会概要集，CS9-03，2021。
- 井出剛，杉山将：異常検知と変化検知，講談社，2015。