

京都大学工学部 学生員 ○榊原 稔基 京都大学大学院 学生員 伊勢本 遼  
 京都大学大学院 正会員 金 哲佑 京都大学大学院 正会員 大島 義信  
 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

## 1. はじめに

高度経済成長期に建設された橋梁の劣化・老朽化が進んでおり、近い将来に膨大な大規模補修、更新需要が発生することが懸念されている<sup>1)</sup>。これらの橋梁を、予算制約の下で効率的に維持管理していくための一助となる技術として振動モニタリングがあげられる。通常、構造物においては、部材の損傷や劣化は振動特性の変化として現れる。一方、気温や交通などの外的作用によっても振動特性が変化すると報告されており<sup>2)</sup>、より精度の高いヘルスマニタリングを行うためには、損傷や劣化による振動特性の変化と外的作用による振動特性の変化を区別する必要がある。そこで本研究では、実測データを用い、様々な外的作用の中でも橋体温度と車両総重量が供用中の橋梁において振動特性の変化にどのような影響を及ぼすのかを検討する。また、長期振動モニタリングの実用化に向け、外的作用を考慮した橋梁の異常検知方法についての提案も行う。本研究では、観測時系列モデルとして自己回帰モデル (AR モデル) を用いる<sup>3)</sup>。

## 2. モニタリングシステム

対象橋梁の平面図とひずみ計、加速度計、熱電対の設置箇所を Fig. 1 に示す。ここに、US と DS はそれぞれ上りおよび下り線の床版に設置したひずみ計を、UG と DG はそれぞれ上りおよび下り線の桁に設置したひずみ計を表す。また、UA および DA はそれぞれ上りおよび下り線の桁に設置した加速度計を、T は温度計測用の熱電対を表す。また、対象橋梁の諸元を Table 1 に示す。今回検討するデータは、2008 年 8 月 6 日から 2009 年 6 月 24 日までの約 1 年間の計測データの内、水曜日と日曜日のそれぞれ 7 時と 16 時の上り線中央の UA-1 と下り線中央の DA-1 で計測された加速度データである。本研究では、この約 1 年間のデータを健全時のデータとする。また、対象橋梁は大型トラックがガードレールに追突し、ガードレールとその根元部や地覆部を損壊する事故が発生しており、事故時のデータを異常データとする。ただし、この事故による主桁のような重要構造部材への影響はない。

## 3. 温度と走行車両による影響

AR モデルにより計測加速度の時系列をモデル化し、振動数および減衰定数を推定する。例として、水曜日 7 時の UA-1 で計測された加速度波形から推定された振動数および減衰定数の 1 年間の変動をそれぞれ Fig. 2 と Fig. 3 に示す。図の右端には事故時のデータを用いた推定結果を示す。追突による主桁への影響はほとんどなかったことから推定振動数や減衰定数とも、健全時における推定結果と車両事故のデータを含む異常時における推定結果とでは明確な差がなく、異常検知が容易ではないことが分かる。また、AR 次数の決定については、AIC (Akaike Information Criterion) などによって最適な AR 次数を決定する方法が考えられるが、今回 AIC を用いると、高次までの AR 係数を考慮することになり、推定結果には橋梁の振動特性

Table 1 Geometry and properties of observation bridge

|                   |                  |            |                                        |
|-------------------|------------------|------------|----------------------------------------|
| Construction year |                  | March 1960 |                                        |
| Bridge length     |                  | L=187.00m  |                                        |
| Span length       | Hanging girder   |            | L1= 16.00m                             |
|                   | Anchorage girder |            | L2= 6.2m+28.4m+6.2m                    |
| width             |                  | W= 8.00m   |                                        |
| Structural type   | Superstructure   |            | Steel plate girder bridge with 7 spans |
|                   | Substructure     | Abutment   | Wall type abutment                     |
|                   |                  | Pier       | Elliptical wall type pier              |
|                   | Foundation       |            | Caisson                                |
| Design load       |                  | TL-20      |                                        |

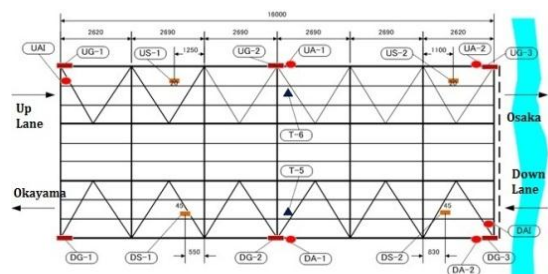


Fig. 1 Plan view of observation bridge and sensor deployment

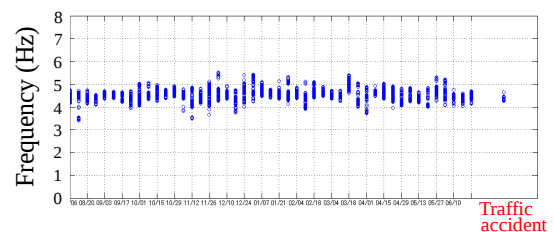


Fig. 2 Estimated frequencies

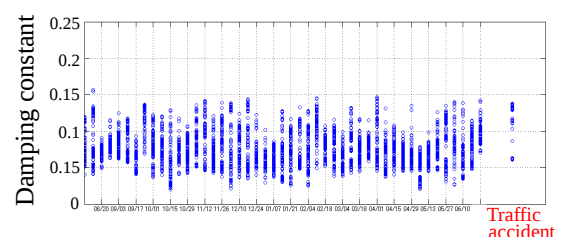


Fig. 3 Estimated damping constants

と無関係な数値解も数多く含まれる。その結果、長期モニタリングの対象となる橋梁の振動特性の選別に手間がかかる。そのため、Fig.2 および Fig.3 に示す推定には事前検討によりばらつきが小さくなる AR 次数を採用しており、最良線形予測子<sup>4)</sup>ではない。これらの問題を解決するために、式(1)に示すパラメータを用いて検討を行う<sup>5)</sup>。

$$DSF = \frac{|a_1|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \quad (1)$$

ここで、DSF は Damage Sensitive Feature の略語である。 $a_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は AR 係数の 1 番目から 3 番目の係数である。式(1)の DSF は、システムの振動特性と関係する AR 係数に影響しており、当然ながら構造物の損傷により変化する。橋体温度と車両総重量による DSF への影響を検討するため、橋体温度と DSF の関係および車両総重量と DSF の関係を調べる。一例として上り線での水曜日 16 時における結果を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。また、無相関検定の結果、橋体温度と DSF の間には有意な相関がある結果となり、車両総重量と DSF の間には有意な相関はない結果となった。特に、橋体温度が上がるにつれて DSF の値は減少する傾向があり (Fig.4 参照)、DSF を指標とする長期振動モニタリングでは橋体温度の影響を考慮する必要があると考える。

#### 4. 管理基準の試案

長期振動モニタリングの実用化に向け、橋体温度による影響を考慮した健全時における DSF の管理基準の提案を行う。橋体温度と DSF の線形回帰式、橋体温度と DSF の標準偏差の線形回帰式に基づいて、健全時における橋体温度による影響を考慮した DSF の許容変動幅 (95%信頼区間) を設定し管理基準とする。したがって、その管理基準から外れたものを異常値として判定することができる。例として上り線、下り線での水曜日 16 時における温度影響を考慮した DSF の推定結果の 1 年間の変動とその管理基準をそれぞれ Fig. 6 と Fig. 7 に示す。上下の実線が管理基準であり、右端に事故時のデータを含む推定結果を示す。事故時のデータを含む結果は管理基準から外れており、異常検知の可能性を示している。

#### 5. まとめ

橋体温度、車両総重量による DSF の変化についての検討を行った。橋体温度と DSF の関係に関して、無相関検定より有意な相関があり、橋体温度が上がるにつれて DSF の値は減少する傾向となった。また、橋体温度によって DSF の値のばらつきも変化することを確認した。車両総重量と DSF の関係に関して、無相関検定より有意な相関はない結果となった。橋体温度による影響を考慮した健全時における DSF の管理基準を設定し、また事故時のデータを異常時のデータとし、検討を行った。その結果、事故時のデータを含む結果は管理基準から明らかに外れており、異常検知の可能性を確認できる。しかしながら、健全時にも関わらず管理基準から大きく外れる結果も見られ、より精度の高いヘルスマニタリングを行うためには、原因を解明し、必要ならば他の外的作用も考慮する必要があると考える。また、交通の影響については、検討時系列の時間帯に通過する車両の総重量を考慮しており、走行速度、車種などの詳細な検討が課題として残っている。他の計測点や時間帯のデータを用いた詳細の検討も含め、今後の検討課題である。

#### 【参考文献】

- 1) 小林潔司：予防保全型管理の重要性，土木学会誌，Vol.95，No.12，pp.14-17，2010；
- 2) G. Peeters and G. De Roeck: One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events, Earthquake Engng Strcut. Dyn., Vol.30, pp.149-171, 2001.
- 3) Kim et. Al: Modal parameter identification of short span bridges under a moving vehicle by means of multivariate AR model, Structure and Infrastructure Engineering, DOI:10.1080/15732479.2010.539061.
- 4) 北川源四朗：時系列解析入門，岩波書店，2006；
- 5) Nair, et.al : Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure, J. of Sound and Vibration, Vol.291, pp.349-368, 2006.

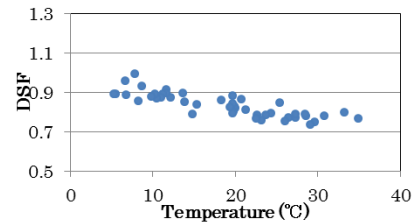


Fig. 4 Variation of mean value of DSF according to temperature

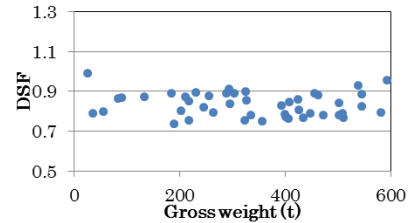


Fig. 5 Variation of mean value of DSF according to gross weight of traffic

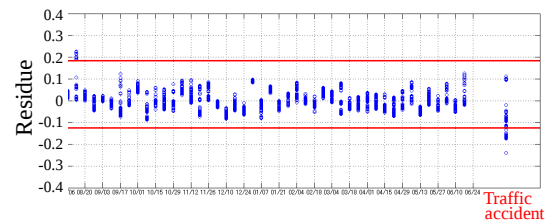


Fig. 6 Variation of residue of DSF with confidence interval (16:00, Wednesday@ UA1)

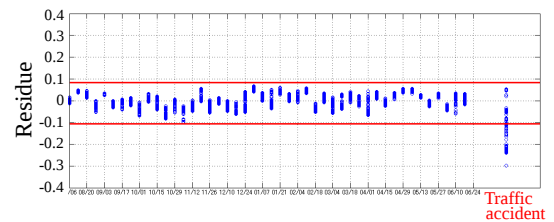


Fig. 7 Variation of residue of DSF with confidence interval (16:00, Wednesday@ DA1)