

交通振動を用いた多径間連続鋼トラス橋の損傷位置推定

京都大学大学院 学生会員 ○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

2012 年 12 月に山梨県笹子トンネルで発生した天井崩落事故に例示されるように、近年インフラの劣化・老朽化が急速に進展している。全国に 15 万以上ある橋梁についても同様であり、維持管理のための効率的かつ経済的な損傷検知手法の開発が喫緊の課題である。橋梁ストックの大半が中小スパン橋梁であること、また、中小スパン橋梁では交通振動が卓越することから、筆者らは交通振動を用いた損傷検知手法の検討を行っている^{1), 2)}。当該検討においては、着目指標として自己回帰モデル(AR モデル)の AR 係数で定義される損傷検知指標 DI(Damage Indicator)と、統計的分析手法である MTS (Mahalanobis-Taguchi System)^{3), 4)}を用い、多径間連続鋼トラス橋の損傷検知を試みている¹⁾。具体的には、斜材の 1 つを人工的に切断し、損傷前後の橋梁振動データの統計的性質の違いを調査している。その結果、損傷および損傷位置推定の可能性は確認したものの、損傷位置推定については損傷導入箇所付近にセンサを密に配置した上での検討に留まっている。一方、実際の橋梁では損傷発生位置が未知であるため、損傷導入箇所付近にセンサを密に配置することはできない。したがって、損傷導入箇所付近で密に配置されるセンサを用いずに損傷位置推定を可能にすることは実用上重要である。

そこで本研究では、推定精度と起振力との関係、また、推定精度と観測数の関係について調査を行い、格点部のみに配置されるセンサを用いた損傷位置推定の可能性を検討する。

2. 実験概要

Fig.1 に示す 9 径間連続鋼ゲルバートラス橋を対象に、車両走行による振動計測を行う。計測対象径間、損傷導入箇所の写真およびセンサ配置を Fig.2 に示す。サンプリング周波数は 200Hz、車両重量は約 245kN である。車両走行シナリオを Table1 に示す。

3. 損傷検知指標 DI への MTS 適用による損傷検知

損傷検知指標 DI は AR 係数を用いて式(1)で定義される。なお $a_i (i = 1, 2, 3)$ は i 次 AR 係数である。

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

筆者らは、DI が振動特性と密接な関わりを持ち、損傷前後で値が変化し、特に損傷位置付近でその傾向が相対的に強いことを確認している^{1), 2)}。

DI のパターン変化を分析するため、MTS を適用する。MTS は既知のデータと未知のデータの統計学的距離 MD(Mahalanobis Distance)を求めることでデータの類似性を明らかにするパターン分析手法である^{3), 4)}。Table2 に本研究で考慮するセンサ組合せを示す。MTS の適用による損傷位置推定までを目的とする本研究では、1 つの組合せに用いるセンサ数を、MTS 適用の最小項目数

Table 1 Scenarios of moving vehicle test and for MTS.

Scenarios	Speed	Number of observation	
		Intact	Damage
SCN1	20km/h	7	6
SCN2	40km/h	7	6

Table 2 Patterns of sensor's grouping.

Patterns	Sensor Group(sensor No., sensor No.)
P1	A(1,2), B(2,3), C(3,4), D(4,5), ..., J(10,11), K(12,13), L(13,14)
P2	A(1,2), BC(2,4), DE(4,6), ..., J(10,11), K(12,13), L(13,14)

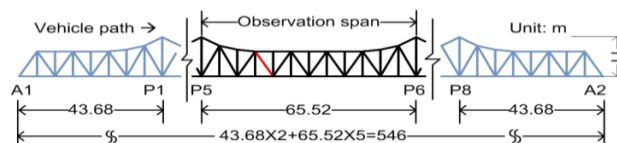


Fig.1 Elevation view of the bridge.

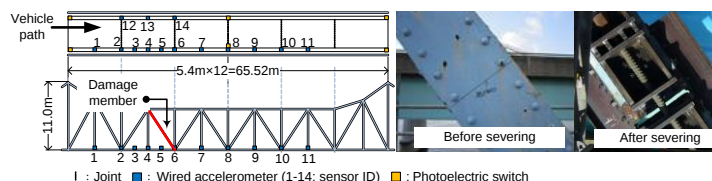


Fig.2 Observation span, sensor deployment map and photos of damage member.

キーワード 損傷位置推定, 交通振動, Mahalanobis-Taguchi System, センサ配置

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3421

である2つに限定している．なおセンサ組合せ D, E が損傷位置付近のセンサ組合せである．交通振動データを用い，センサ組合せパターン P1 における MTS 適用結果を Fig.3 に示す．車両走行シナリオ SCN1 に比べ，相対的に高速な SCN2 における損傷位置推定精度が高いことから，推定精度は起振力の影響を受ける可能性が考えられる．そこで，センサ組合せパターン P1，車両走行シナリオ SCN2 の自由振動データから推定した DI に MTS を適用した結果を Fig.4 に示す．Fig.4 より，交通振動データを用いる場合に比べて損傷位置推定精度が著しく低下することがわかる．

続いて，損傷位置推定精度と観測数(Fig.5 の n)の関係を調べる．センサ組合せパターン P1，車両走行シナリオ SCN2 において，観測数を減らして MTS を適用した結果を Fig.5 に示す．Fig.5 より，観測数の低下に伴い推定精度が低下していくことがわかる．以上より，観測数を増やすと損傷位置推定精度が高くなる傾向が確認できる．

Fig.6 に，車両走行シナリオ SCN2 のすべての観測を用いた，センサ組合せパターン P2 における MTS 適用結果を示す．起振力が大きい多くのデータを用いることで，格点部のみに配置されるセンサによる損傷位置推定が可能であることがわかる．実際のモニタリングにおいては十分な観測数を確保することが可能であるため，本研究で得られた結論は実用化の可能性を示唆している．

Fig.7 は車両走行シナリオ SCN1 と SCN2 のデータ双方を用いて MTS を適用した結果であるが，損傷位置付近の DE ではなく，スパン中央付近である G や H の MD が卓越している．この結果から，MTS による損傷位置推定手法の実用化のためには，ランダムな車両走行下での適用可能性についての検討が必要であると考えられる．

4. 結論 と 課題

本研究では交通振動に着目し，損傷検知指標 DI と MTS の適用による多径間連続鋼トラス橋の損傷位置推定の可能性および，位置推定精度に影響を与える条件について検討を行った．検討の結果，起振力の大きなデータに基づき，観測数を増やせば損傷位置推定精度が上がる可能性を確認した．なお実用化に向けては，多様な走行条件を考慮した検討が必要である．また，センサの最適配置等についても検討を行う予定である．

【参考文献】1) 北内壮太郎，伊勢本遼，金哲佑，杉浦邦征，甲斐正義：交通振動を用いた鋼ゲルバートラス橋の異常検知，土木学会平成 24 年度全国大会第 67 回年次学術講演会，I-094，2012．2) Kim, C.W., Isemoto, R., Sugiura, K. and Kawatani, M.: Structural Fault Detection of Bridge based on Linear System Parameter and MTS Method, *J. of JSCE*, Vol.1, No.1, pp.32-43, 2013．3) Taguchi, G. and Jugulum, R.: New trends in multivariate diagnosis, *Indian J. of Statistics*, 62, Series B, pp.233-248, 2000．4) Bishop, C. M.: *Pattern Recognition and Machine Learning*, pp.32-33, springer, 2008．

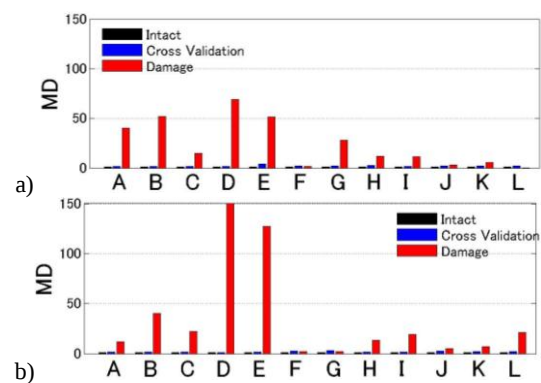


Fig.3 MD of DI from forced vibration data under grouping pattern P1: a) SCN1; and b) SCN2.

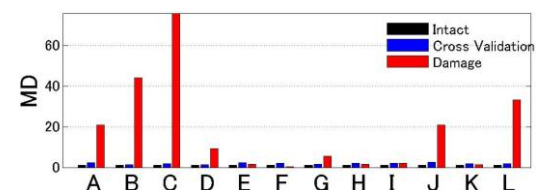


Fig.4 MD of DI from free vibration data of SCN2 under grouping pattern P1.

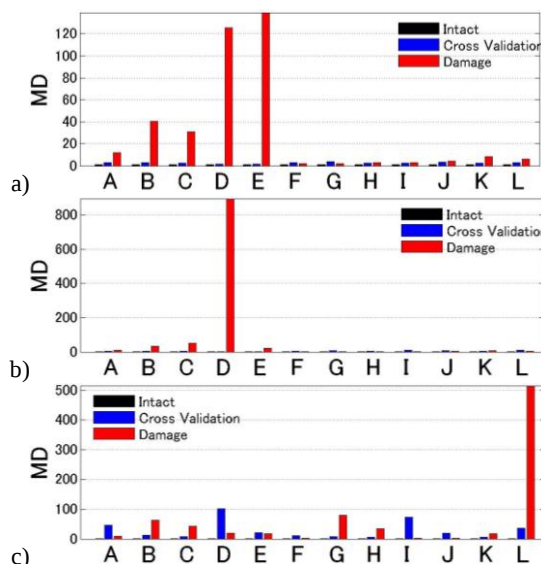


Fig.5 MD of DI from forced vibration data under grouping pattern P1: a) n=6; b) n=5; and c) n=4.

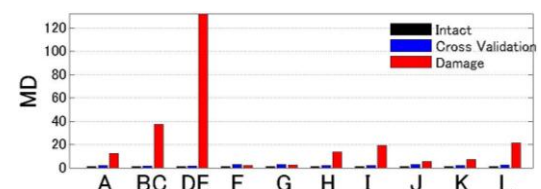


Fig.6 MD of DI from forced vibration data of SCN2 under grouping pattern P2.

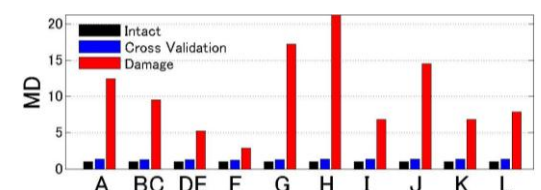


Fig.7 MD of DI from forced vibration data considering both SCN1 and SCN2 under grouping pattern P2.