

## 有限要素モデルを用いた局所的な損傷による振動数変化に関する考察

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○廣岡 拓海  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 林 巖  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 金 哲佑

## 1. はじめに

橋梁の振動モニタリングに関する研究が多く行われている中、対象橋梁における振動特性の変化と、その変化のメカニズムを定量的に把握することが重要である。既往の研究<sup>1)</sup>において、鋼桁橋を対象として損傷と振動実験を行った結果、局所的な損傷導入後、橋梁の曲げ1次振動数の上昇が確認された(2次と3次の曲げ振動数は減少)。これは、損傷による橋梁変形に伴う支承部の拘束条件の変化が一つの原因であると考えられる。本論文では、有限要素(Finite Element: FE)モデルを用いて実現象を再現し、局所的な損傷と支承部の性状の変化が、橋梁の固有振動数に及ぼす影響について検討する。また、橋梁の表面温度の変化を考慮した検討を行い、支承性状の変化要因について考察する。

## 2. 損傷実験概要と実験結果

損傷実験を行った対象橋梁は、Fig.1に示すような、橋長40.5m、有効幅員4.0m、桁高2.0mの単純鋼桁橋である。模擬損傷は、上流側のAb1側支承部付近に2段階に分けて導入し、損傷シナリオを次のように設定する。INTを桁の損傷前、DMG1を下フランジの貫通き裂、DMG2をウェブへのき裂進展とする。対象橋梁の振動特性を推定するために実施した車両走行実験では、車両速度20km/h、サンプリング周波数200Hz、データ長15秒として、各シナリオで30回行った。静的載荷実験では、橋梁点検作業車(前軸重約22kN、後軸重約54kN)を用いて、後輪が橋長に対して等間隔になるよう5点でそれぞれ影響線載荷を行う。計測機器については、車両走行実験では加速度計を、静的載荷実験では変位計と熱電対をFig.1に示すようにそれぞれ設置した。

車両走行実験で得られた加速度に対し、確率部分空間法<sup>2)</sup>を用いて同定された橋梁の各振動数をTable 1に示す。損傷の進行に伴い、各振動数の変化することがわかる。また、静的載荷実験では、Ab1側の支承部は固着し、Ab2側の支承部は載荷時に橋軸方向へのたわみが確認され、このたわみ量は損傷の進行に伴い変化した。この要因の一つに、損傷シナリオごとに支承部の性状が変化していると考えられ、局所的な損傷のみならずこの支承部の性状変化が、振動数の変化に影響を及ぼした可能性がある。また、各シナリオ間では温度変化が確認されており、次章では、支承部の性状の変化や損傷の進行レベル、温度変化が橋梁の挙動に及ぼす影響について、FE解析を用いて検討を行う。

## 3. FE解析

橋梁に導入した損傷と各シナリオにおける支承部の性状の変化を再現するために、FEモデルを作成する。境界条件は、静的載荷実験の結果をもとにAb1を固定、Ab2を可動とする。加えて、橋軸方向に抵抗するばねをAb2に導入した

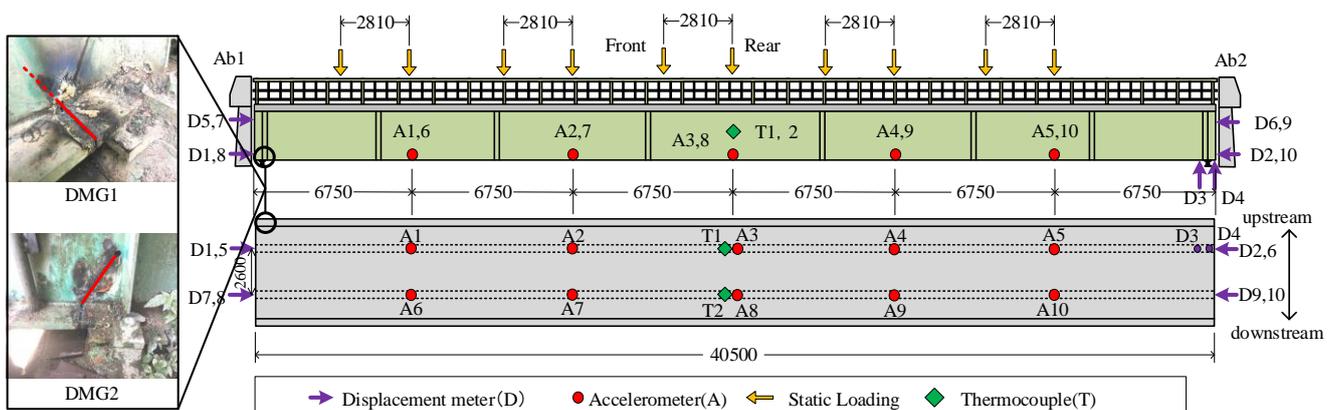


Fig. 1 Sensor arrangement and damage location of the target bridge. [Unit: mm]

キーワード 振動モニタリング, 有限要素解析, 局所的損傷, 温度変化, 支承部性状  
 連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-183 TEL 81-75-383-3421

モデルも作成した。ばね定数は、静的載荷実験から得られた変位データを用いて Cross Entropy 法<sup>3)</sup>により最適化し同定した。また、各材料特性は、撤去した橋梁から採取した材料の試験結果<sup>4)</sup>を用いる。桁の表面温度は、各シナリオで熱電対により計測された実験中の温度 (INT で 28°C, DMG1 で 38°C, DMG2 で 43°C) をモデルに与え桁端の挙動変化を検討する。

#### 4. FE 解析結果と考察

ばね定数の同定結果と各シナリオの固有値解析結果を Table 1 にまとめる。ばね定数は、損傷の進行に伴い増加することが確認できる。ばねの無いモデルでは、損傷が進行しても曲げ 1 次振動数にほとんど変化がないが、曲げ 2 次振動数と曲げ 3 次振動数の低下が確認できる。一方、橋軸方向ばねを考慮すると、曲げ 1 次振動数は、ばね定数の増加に伴い増加が確認できる。以上より、曲げ 1 次振動数は、桁端部の損傷にあまり影響されないが、境界条件の変化には大きく影響を受けると考えられる。また、曲げ 2 次振動数と曲げ 3 次振動数は、境界条件の影響が小さく、損傷の影響を大きく受けることがわかる。これらの振動数の変化について、桁端の損傷レベルと境界条件の変化が、振動特性の変化に及ぼす影響を検討するため、各振動モードに対する感度解析を別途行った結果、曲げ 1 次振動数はばね定数値が高い場合に、曲げ 2 次振動数はばね定数値が低い場合に、損傷の影響を受けることがわかった。実験で同定したばね定数は、曲げ 2 次振動数が損傷の影響を受けやすい範囲であったため、Table 1 のように損傷に対して感度が高い結果となったと考えられる。一方、曲げ 3 次振動数は、境界条件にかかわらず、損傷に対して影響を受けやすく、損傷検知を行う上で有効であると考えられ、今後も検討を行う予定である。実験中の各シナリオ間で確認された挙動について、損傷導入後、Fig. 2 のような橋軸方向のたわみが確認された。Fig. 2 には挙動の一例として、DMG1 を導入した際の桁端の挙動を示す。一般的に、自重により桁の上側よりも下側が橋軸方向にたわむと予想されるが、本実験ではその逆の挙動が多く確認されたため、この要因について検討を行う。温度変化を考慮したモデルを作成し FE 解析を行った結果、静的な挙動については、Fig. 3 に示すように、各シナリオ間で、局所的な損傷による橋軸方向のたわみに比べて、温度変化の影響が顕著となり、実挙動で確認された傾向と同様の結果となった。そのため、振動特性に影響を与える支承性状の変化に対して、温度変化が大きく影響している可能性があると考えられる。

#### 5. 結論

FE 解析による感度解析の結果、損傷に対する感度は振動モード、境界条件ごとに異なることがわかった。また、損傷実験結果における各モード振動数の損傷に対する感度の違いは、曲げ 1 次振動数は損傷による影響を受けにくく、曲げ 2 次振動数は損傷による影響を受けやすいことに起因すると考えられる。曲げ 3 次振動数は損傷にのみ大きく影響されることから、損傷検知の面で有効であると考えられる。温度変化については、支承性状の変化に対して、局所的な損傷以上に振動特性に影響を及ぼすと考えられるため、今後の検討にも無視できないパラメータであると考えられる。

【参考文献】 1) 三増拓也, その他 3 人: 実鋼桁橋の損傷前後における振動特性に関する考察, 土木学会論文集 A2, Vol. 74, No.2, pp. I\_513-I\_522, 2018. 2) Van Overschee, P., & De Moor, B.: Subspace identification for Linear Systems. Kluwer Academic Publishers, 1996. 3) McGettrick その他 3 人: Experimental validation of a drive-by stiffness identification method for damage monitoring, Structural Health Monitoring, Vol.14, No.4, pp. 317-331, 2015. 4) 林蔵, その他 5 人: Particle Filter を用いた既設鋼桁 2 主桁橋の FE モデルアップデート, 土木学会論文集 A2, Vol74, No2, pp. I\_705-I714, 2018.

	Spring	INT	DMG1	DMG2
	Spring stiffness	$5.05 \times 10^7 \text{N/m}$	$7.45 \times 10^7 \text{N/m}$	$7.67 \times 10^7 \text{N/m}$
1st bending freq.	Without	2.86Hz (-9.2%)	2.86Hz (-12.0%)	2.86Hz (-13.3%)
	With	3.19Hz (1.3%)	3.29Hz (0.9%)	3.29Hz (-0.3%)
	Measurement	3.15Hz (NA)	3.25Hz (NA)	3.28Hz (NA)
2nd bending freq.	Without	9.63Hz (1.2%)	9.58Hz (3.6%)	9.43Hz (6.7%)
	With	9.68Hz (1.8%)	9.66Hz (4.5%)	9.57Hz (8.4%)
	Measurement	9.54Hz (NA)	9.24Hz (NA)	8.85Hz (NA)
3rd bending freq.	Without	22.47Hz (2.7%)	22.25Hz (1.7%)	21.77Hz (0.8%)
	With	22.47Hz (2.7%)	22.25Hz (1.7%)	21.77Hz (0.8%)
	Measurement	21.87Hz (NA)	21.87Hz (NA)	21.60Hz (NA)

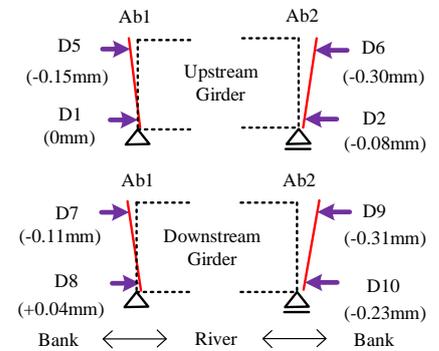


Fig. 2 Structural behavior from INT to DMG1.

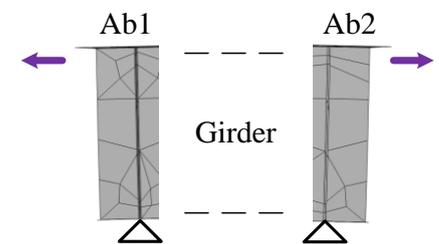


Fig. 3 Results of the FE analysis after damaged.