

## 第 I 部門

## 局所的な損傷と境界条件の変化が鋼桁橋の固有振動数に及ぼす影響

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. 序論

老朽化構造物が急増している現在、構造物の劣化予測や損傷検知を行う一つの手法として、振動ヘルスマモニタリング手法がある。既往の研究<sup>1)</sup>において、鋼桁橋を対象として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。その要因の一つに、支承部の性状の変化が考えられる。本論文では、実験結果を整理した後有限要素(Finite Element: FE)モデルを用いて実現象を再現し、局所的な損傷と境界条件の変化が橋梁の固有振動数に及ぼす影響について、FE 解析と感度解析を行い検討する。

## 2. 実橋梁モニタリング

本実験では、Fig.1 に示すような、橋長 40.5m、有効幅員 4.0m、桁高 2.0m の単純鋼桁橋に対して損傷実験を行った。模擬損傷は、各シナリオを次のように設定し、上流側の A1 側支承部付近に 2 段階に分けて導入する。き裂導入前を INT、下フランジの貫通亀き裂を DMG1、ウェブまでのき裂進展を DMG2 とする。車両走行試験では、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 回の計測を行った。静的載荷試験では、橋梁点検作業車(前軸重約 22kN、後軸重約 54kN)を用いて、橋長に対して等間隔になるよう 5 点でそれぞれ載荷を行う。なお、Fig.1 に示すように、走行車両試験では加速度計を 10 点、静的載荷試験では変位計を 10 点、熱電対を 2 点それぞれ設置した。

車両走行試験の各シナリオで得られた加速度に対して、確率部分空間法<sup>2)</sup>を用いて、橋梁の固有振動数を同定した結果を Table 1 に示す。損傷の進行に伴い、曲げ 1 次振動数の上昇、曲げ 2 次振動数と曲げ 3 次振動数の低下が確認された。一般に、桁に損傷が生じると桁の剛性低下の影響で、振動数は低下することが予想されるが、本実験では振動数の上昇が確認された。そのため、橋梁には損傷以外の原因が働いていると考えられる。また、静的載荷試験の各シナリオにおいて、Ab1 側の支承部は固着、Ab2 側の支承部は載荷時に橋軸方向にたわむことが確認された。損傷シナリオに着目すると、損傷の進行に伴い、橋軸方向の相対的なたわみ量が変化していることが確認された。そのため、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、これが、振動数の変化に影響を及ぼした可能性がある。そこで次章では、支承部の性状の変化や損傷の進行レベルが橋梁の振動特性に及ぼす影響について、FE 解析を用いて検討を行った。

## 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、Abaqus6.14 を用いて FE モデルを作成する。境界条件は、静的載荷試験の結果をもとに Ab1 を固定、Ab2 を可動とし、加えて、橋軸方向に抵抗するばねを導入したモデルも作成した。ばね定数は、静的載荷試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

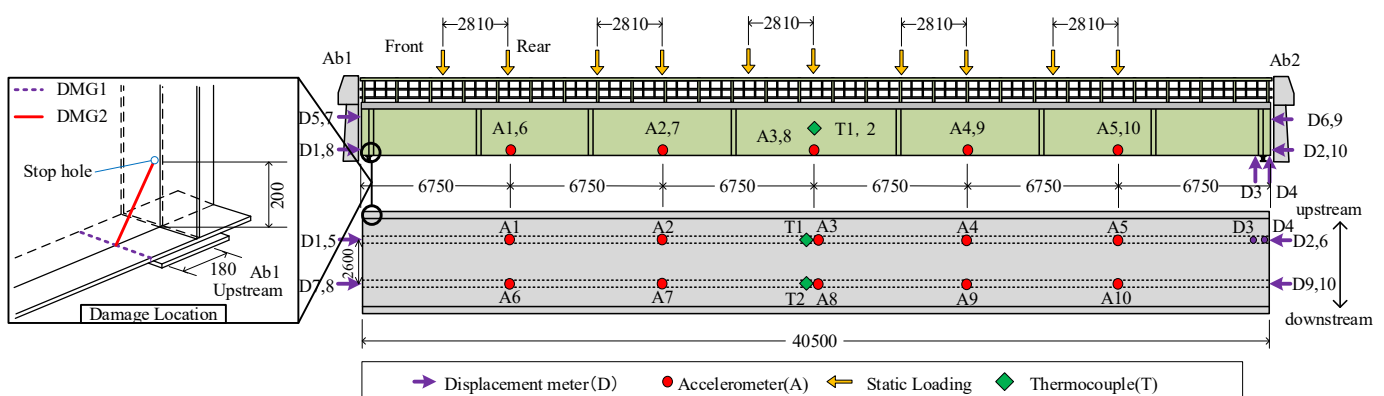


Fig. 1 Sensor deployment and damage location of the target bridge. [Unit: mm]

Table 1 Identified frequencies and longitudinal spring stiffness, and eigenvalue frequencies.

|                   | 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 (-)                     | 3.25Hz (-)                     | 3.28Hz (-)                     |
| 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 (-)                     | 9.24Hz (-)                     | 8.85Hz (-)                     |
| 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 (-)                    | 21.87Hz (-)                    | 21.60Hz (-)                    |

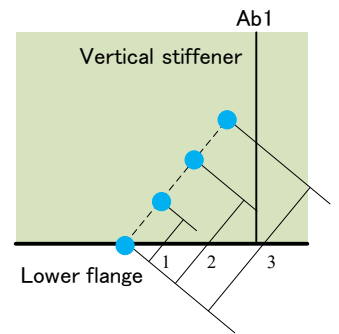


Fig. 2 Assumed each damage level.

た橋梁から採取した材料の試験結果<sup>4)</sup>を用いる。

#### 4. 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。

次に、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行う。損傷レベルを Fig.2 に示すように段階的に設定し、それぞれの損傷レベルに対して Ab2 に導入した橋軸方向ばねを変化させ、固有値解析を行う。その結果、Fig.3 に示すように、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る。ここで特記すべき点は、実験で同定したばね定数は、Fig.3 から分かるように曲げ 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 のように損傷に敏感な結果となったと考えられる。一方、曲げ 3 次振動数は、境界条件が固定される方向に変化する場合、固有振動数が検出されないが、損傷に対して影響を受けやすいため、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。

#### 5. 結論

本研究では、FE モデルを用いて感度解析を行った結果、

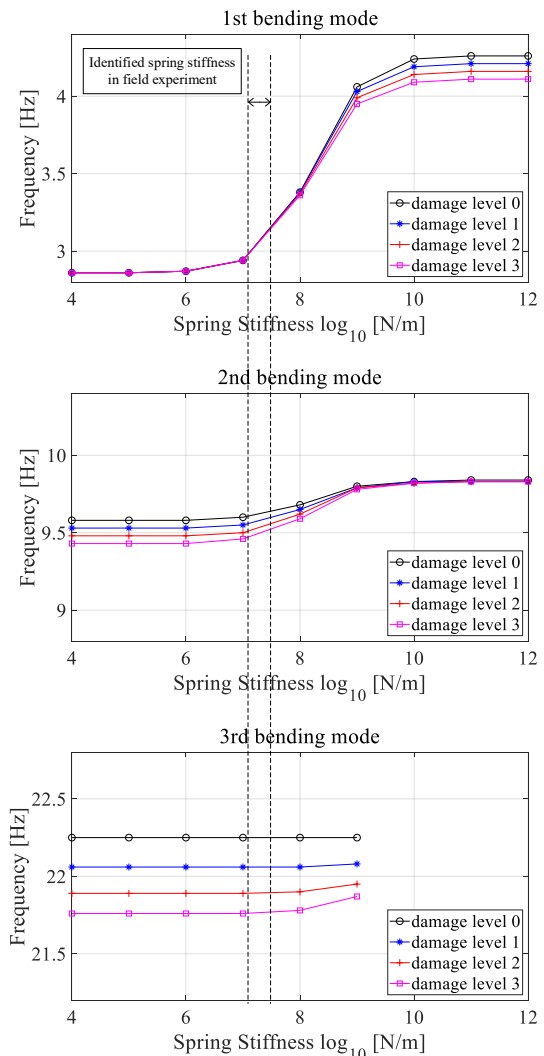


Fig. 3 Sensitivity analysis under each damage level.

損傷に対する感度は振動モードごとに異なることがわかった。また、損傷実験では、損傷に対して、曲げ 1 次振動数は影響を受けにくく、曲げ 2 次振動数は損傷による影響を受けやすい結果であったと考えられる。さらに、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。

【参考文献】1) 三増拓也, その他 3 人: 実鋼鉄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-I522, 2018. 2) Van Overschee, P., & De Moor, B.: Subspace identification for Linear Systems. Kluwer Academic Publishers, 1996. 3) McGretick, P.J., 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 徹, その他 5 人: Particle Filter を用いた既設鋼鉄 2 主桁橋の FE モデルアップデート, 土木学会論文集 A2, Vol.74, No.2, pp. I\_705-I714, 2018.