

有限要素解析による振動特性を利用した橋梁の損傷評価法の提案

愛媛大学 学生会員 ○青野愛梨 愛媛大学 正会員 全邦釘
愛媛大学 正会員 森伸一郎 愛媛大学 正会員 大賀水田生

1. はじめに

わが国で高度経済成長に伴い架設された多くの橋梁は老朽化が進んでいる。そのため、既存橋梁の早急な維持管理が求められており、定量性が高く客観的に評価できる損傷評価が必要となっている。その手法の1つとして、橋梁の振動特性を利用した評価法が注目されつつある¹⁾。橋梁は質量及び構造的剛性による振動系であり、その劣化によって固有振動数が減少することを利用して、固有振動数の減少率から橋梁の劣化度が評価されている。さらに、各振動モードの固有振動数の減少率から損傷の位置を予測できるのではないかと考えられており、それに対する実験等の試みも行われているが、損傷箇所の同定方法が確立されていない、あるいは劣化に伴う支持条件の変化があまり考慮されていないという問題点があり、現段階で実用は困難とされている。

本研究では、まず建設初期の固有振動数が計測されている橋梁の有限要素(FEM)モデルを作成し、固有値解析を行い妥当性の検討を行う。さらにFEMモデルに様々な損傷を与え、劣化による固有振動数の減少率を振動モードごとに明らかにし、損傷箇所及び程度、支持条件の評価を行う方法の提案を行う。

2. 橋梁の有限要素モデルの構築

FEMによって構造物の挙動が実際に再現できているのか確認するため、建設初期の固有振動数が計測されている吉田橋のFEMモデルを作成し、固有振動数を求め、実測値と比較検討を行った。

解析対象とした吉田橋は、愛媛県今治市に位置する道路橋である。また、モデル作成及び解析には商用有限要素パッケージSAP2000を使用した。作成した吉田橋の有限要素モデルの全体像を図1に示す。

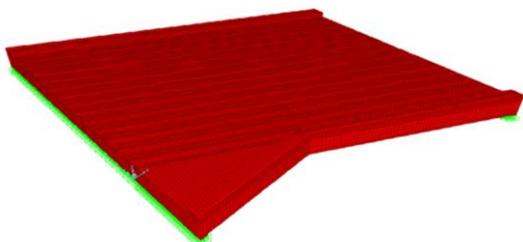


図1 吉田橋の有限要素モデル

解析に用いたヤング率 E 及び単位体積重量 w は、コンクリート： $E=33\text{GPa}$ ， $w=23.56\text{kN/m}^3$ ，アスファルト： $E=8\text{GPa}$ ， $w=22.5\text{kN/m}^3$ であり、コンクリートのヤング率は材令が28日を経過した状態で計測されたものである。各建設過程の固有振動数の計測の際、打設されて28日経過していないコンクリートがあり、それらのヤング率は港湾技研資料²⁾に示されている式より求めた。

吉田橋は、(I)桁1本、(II)シェアキー導入後、(III)張出し部設置後、(IV)地覆設置後、(V)アスファルト舗装後の5段階の建設過程において固有振動数が計測されており、解析も同様に5つのモデルを作成し、解析を行い実験値と比較を行った(図2)。各建設過程における実験値と解析値の誤差は2%以内であり、FEMを用いた固有値解析は妥当であり、実際の構造物の挙動が再現できていることが確認できた。

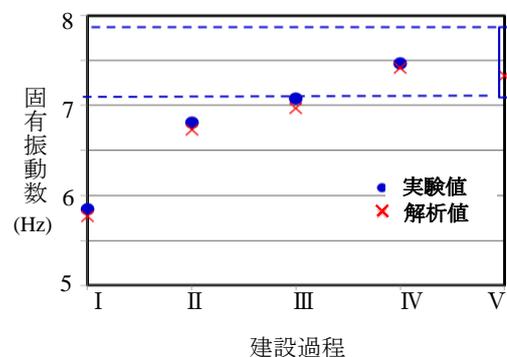


図2 実験値と解析値の比較

3. 損傷箇所が固有振動数に及ぼす影響

作成したFEMモデルに損傷を導入し、損傷箇所が固有振動数に及ぼす影響を検討した。その際、損傷を与えたい箇所の曲げ剛性 EI を低下させることによりモデルに損傷を導入した。モデルを図3のように張出し部を除いて6分割して考え、③と④に損傷を与えた場合と②と⑤に損傷を与えた場合の固有振動数の減少率を比較

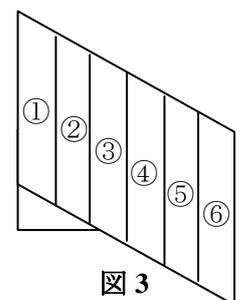


図3 モデルの分割と位置番号

した。健全時では、曲げ1次モードは7.33Hz、曲げ2次モードは26.88Hzであるのに対して、③と④に損傷を与えた場合、曲げ1次モードは6.80Hz、曲げ2次モードは26.01 Hzとなり、②と⑤に損傷を与えた場合、曲げ1次モードは7.11Hz、曲げ2次モードは25.55Hzとなった。よって③と④に損傷を与えた場合は曲げ1次モード、②と⑤に損傷を与えた場合は曲げ2次モードで固有振動数が大きく減少していることがわかる。また、各振動モードの振動変形の等高線図(図4)より、損傷箇所と振動変位の腹の部分と一致している振動モードで固有振動数が大きく減少することがわかる。以上のことから、損傷箇所によって各振動モードの固有振動数の減少率の傾向が異なることがわかり、逆に各振動モードにおける固有振動数の減少率から損傷箇所の同定が可能であると考えられる。

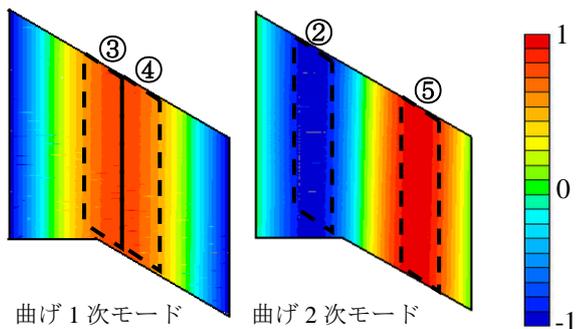


図4 振動変位の等高線図

4. 振動モードを利用した損傷箇所の同定法の提案

各振動モードにおける固有振動数の減少率から損傷箇所を同定する評価法の提案及び、その妥当性の検討を行う。

FEMモデルを図5のように10分割して考え、⑤と⑦にそれぞれEIの40%、20%の損傷を与えた場合、損傷を同定できるか検討を行う。損傷後に計測して得られた固有振動数を式(1)に代入して損傷度合い a_i を求めると、各位置の損傷率が求まる。

このとき、 j : 振動モード(1~ m)、 i : 橋梁を分割した各部位(1~ n)、 v_{ij} : 個々の位置における健全度が100%から $V\%$ に低下した場合の固有振動数の減少率、 x_j : 個々の位置における健全度が100%から計測した固有振動数に低下した場合の減少率、 a_i : $v_{ij}=1$ としたときの x_j である。

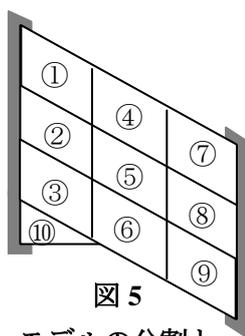


図5 モデルの分割と位置番号

$$\sum_{j=1}^m \left\{ \left(1 - \prod_{i=1}^n a_i v_{ij} \right) - x_j \right\}^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

求めた損傷率は⑤で39%、⑦で19%、それ以外の位置では2%~3%であり⑤と⑦では損傷率が高く、それ以外の位置で損傷が発生していないことがわかる。さらに、実際に与えた40%、20%という損傷率と近似的な値となっており、確かに同定できていることがわかる。また、固有振動数を用いて橋梁の損傷評価を行う際に1つの問題点が挙げられる。多くの場合、支持条件が劣化しないと仮定されているが、固有振動数は支持条件の変化に敏感であり、支持条件の評価なしでは実用化は困難であると考えられる。そこで式(1)に支持条件の変化を変数として加え、式(2)と変更した。このとき、 T は支承のヤング率の倍率である。

$$\sum_{j=1}^m \left\{ \left(1 - \prod_{i=1}^n a_i (1 - v_{ij}(\log T)) \right) - x_j \right\}^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

図5の⑤と⑦にそれぞれEIの40%、20%の損傷を与え、さらに支承のヤング率が100倍としたとき、損傷を同定できるか検討を行う。損傷後に計測して得られた固有振動数を式(2)に代入し、損傷度合い a_i と支持条件の変化 T を求めると、各位置の損傷率と支承のヤング率の倍率が求まる。求めた損傷率は⑤で39%、⑦で19%、さらに支承のヤング率の倍率は97倍であった。これは実際に与えた40%、20%という損傷率及び100倍という支承のヤング率の倍率と近似的な値となり、支持条件が変化した場合でも、損傷箇所及び程度、また支持条件の評価が可能であると言える。

5. 本研究で得られた成果

損傷箇所と振動変形の腹となる部分が一致している振動モードで固有振動数が大きく減少することが明らかとなった。また、本研究で提案した評価式により、支持条件が変化した場合においても損傷箇所及び程度の同定、支持条件の評価を行うことができた。

6. 参考文献

- 1) 宮本文穂, 森川英典, 山本昌孝: 既存コンクリート橋の損傷に対応する動的挙動の感度特性と損傷評価への適用, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.61-70, 1992.
- 2) 小野寺幸夫, 関博: 初期材令におけるコンクリートのヤング係数に関する2,3の考察, 港湾技研資料, No.143, 1972.