

1次モード特性を用いた単純梁の剛性評価ならびに損傷同定手法に関する研究

徳島大学大学院 学生員 ○金田 泰明

徳島大学大学院 フェロー 成行 義文

四国建設コンサルタント 正会員 豊崎 裕司

徳島大学大学院 正会員 井上 貴文

1. はじめに 現在，我国には橋長 2m 以上の道路橋が約 70 万橋存在しており，これらを安全に使用していくために点検・診断・補修工事等のメンテナンスを実施していく必要がある．現在行われている目視・打音検査が有する問題点を補う一手法として，損傷前後におけるモード特性の変化を利用した道路橋の損傷同定手法が注目されている．本研究では，単純梁のモード特性から剛性分布を求める手法を提案し，その手法により得られた損傷前後の剛性分布を比較することにより，損傷位置および損傷程度を推定することを試みた．

2. 解析モデル 本研究では支間長 1m の二次元梁要素からなる単純梁を解析モデルとして使用する．要素数は 100 要素として等間隔に分割し，汎用解析ソフト TDAPⅢを用いて固有値解析および静解析を行う．また，損傷は剛性の低下と定義し，要素内の剛性は一様に低下するものとした．

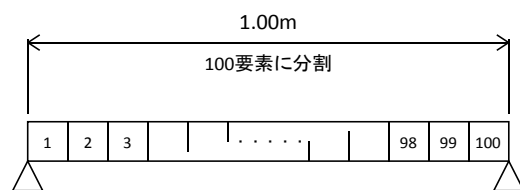


図1 解析モデル

3. 剛性評価手法 剛性評価の基礎式として式(1)に示す曲率と曲げの関係式を用い，曲げモーメント M を曲率 κ で除することにより曲げ剛性 EI を求める．ここで曲率はたわみの二階微分により求めることができる．しかし，曲げモーメントを求めるにはその時の载荷荷重の状態を知る必要がある．既設橋の剛性評価を行うことを考えれば，既設橋上を通過する車両重量を測定し，かつその時のたわみを測定することは非常に困難である．そこで，直線梁の固有値問題を表す式¹⁾(2)にダランベールの原理を適用し，静的な問題として置き換えることにより，荷重と変形の関係式と見なせると考えた．

表1 損傷シナリオ

損傷位置	損傷程度
要素 1～10	40%
要素 11～20	30%
要素 21～30	20%
要素 31～40	10%
要素 41～50	5%
	1%

式(2)の左辺の慣性項 $-\omega^2[M]\{\phi\}$ を移項すると式(3)のように動的問題の式は静的問題の式と見ることができ．即ち，剛性 $[K]$ の構造物に力 $\omega^2[M]\{\phi\}$ が作用するとき，変位 $\{\phi\}$ が生じていると考えることができ，単純梁に荷重 $\omega^2[M]\{\phi\}$ を作用させたときに生じる曲げモーメントとその時に生じるたわみから求めた曲率から剛性を算定することが可能になる．

$$\kappa = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

$$-\omega^2[M]\{\phi\} + [K]\{\phi\} = \{0\} \quad (2)$$

$$[K]\{\phi\} = \omega^2[M]\{\phi\} \quad (3)$$

ここに
 ω : 固有円振動数
 κ : 曲率
 M : 曲げモーメント
 EI : 曲げ剛性
 $[M]$: 質量行列
 $[K]$: 剛性行列
 $\{\phi\}$: 変位ベクトル

4. 剛性評価手法の検証 剛性評価手法のプロセスを図1に示す．本研究では，固有値解析により求めたモード特性を動的試験から同定できたものと見なすものとする．解析モデルに対して，表1に示す損傷位置 5 パターン，損傷程度 6 パターンの計 30 シナリオを主とし，その他 2 つ以上の損傷があるシナリオ等を含め，計 42 シナリオに対してモード解析を行い，得られたモード特性から剛性分布を求める．なお，既設橋の動的試験から得られるモード特性は低次の鉛直成分である²⁾ことを考慮して，使用するモード特性は 1 次モードのみとした．剛性推定精度 α は式(4)により求める．

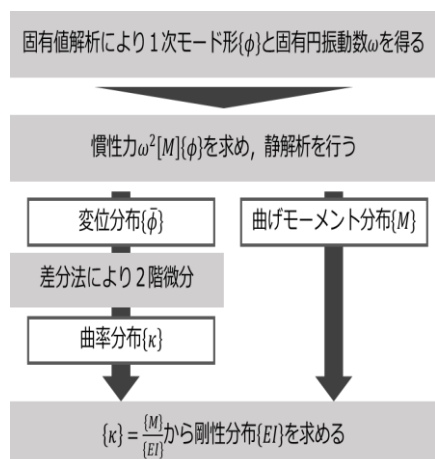


図2 剛性評価法フローチャート

$$\text{剛性推定精度 } \alpha = \frac{\text{設定値の剛性} - \text{剛性評価法で求めた剛性}}{\text{設定値の剛性}} (\%) \quad (4)$$

5. 剛性評価結果 検証結果のうち、剛性を低下させていないケースを図 3 に示す。結果は設定値に対して 0.1%程度の誤差であり、精度良く推定できている。また、その他のシナリオに対しても同様の精度を有することが確認できたことから、提案手法の妥当性が検証できたと判断した。

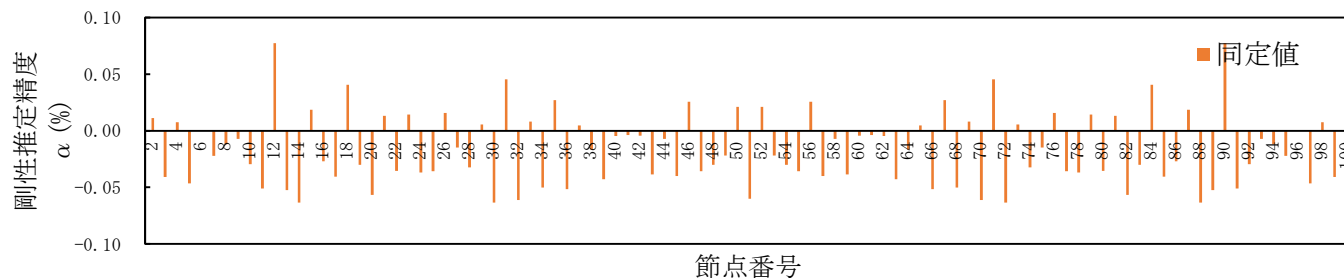
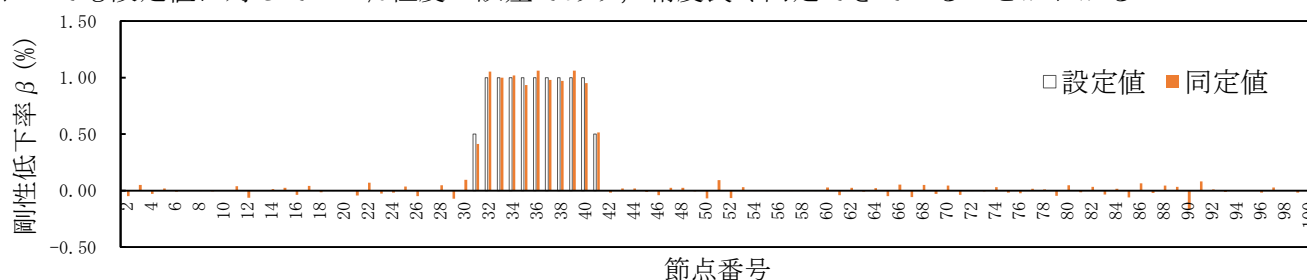


図 3 剛性評価法の検証結果

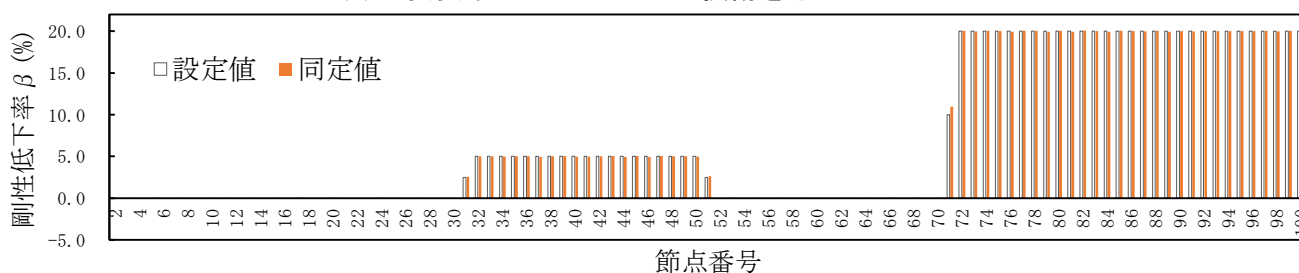
6. 損傷同定 提案した剛性評価手法を用いて損傷同定を行う。つまり、ある損傷シナリオに対して、無損傷時の剛性と損傷時の剛性を剛性評価手法によって求め、式(5)から剛性低下率 β を求める。ここで得られた損傷同定結果である剛性低下率 β を設定値と比較することにより同定精度を検証する。

$$\text{剛性低下率 } \beta = \frac{\text{無損傷時の剛性} - \text{損傷時の剛性}}{\text{無損傷時の剛性}} (\%) \quad \text{式(5)}$$

7. 損傷同定結果 損傷同定結果のうち、要素 31～40 に 1%の損傷を与えたケースを図 4(a)、要素 31～50 に 5%と要素 71～100 に 20%の損傷を与えたケースを図 4(b)に示す。剛性評価法と同様に、その他のシナリオにおいても設定値に対して 0.1%程度の誤差であり、精度良く同定できていることがわかる。



(a) 要素 31～40 に 1%の損傷を与えたケース



(b) 要素 31～50 に 5%, 要素 71～100 に 20%の損傷を与えたケース

図 4 損傷同定の解析結果

8. おわりに 本研究では 1 次モード特性から単純梁の剛性評価手法を導き、その手法を用いた損傷同定精度について、解析的に検証した。この剛性評価手法は梁において剛性を精度良く推定する方法として有効な手段であり、これを応用した損傷同定においても、全体的に同定誤差が 0.1%程度であったことから、精度良く同定することができたとと言える。なお、既設橋から振動特性を得るときの計測ノイズに対して、どの程度の同定精度を有するかについては、今後の検討課題としたい。

参考文献 1) モード解析ハンドブック編集委員会：モード解析ハンドブック，コロナ社，2000 年。
2) 土木学会応用力学委員会逆問題小委員会：土木工学における逆問題入門，丸善出版，2000 年。