

モード解析による梁構造物の損傷同定法に関する研究

徳島大学大学院 学生員 ○源 貴志 鉄建建設株式会社 非会員 三矢 草
徳島大学大学院 正会員 成行 義文 徳島大学大学院 非会員 佐藤 弘美

1. はじめに 高度経済成長期を中心にして大量に建設された我が国の道路橋は、近々建設後 40 年～50 年が経過し、劣化損傷が多発する危険性が高まっている．このため、道路橋の経年劣化の現状を早急に把握し、対策を講じる必要がある．近年、構造物の損傷同定法としてモード解析を利用した方法が注目されている．本研究では、モード解析による梁構造物の損傷同定法の精度と実用性について比較・検討する．

2. 研究の前提条件 次の 4 つのことを前提とした．1) 損傷は剛性の低下と定義する．つまり、構造物の損傷同定とは、構造物の剛性低下位置と剛性低下率の両方を同定することを意味する．2) 構造物の損傷同定は、モード特性と剛性行列の損傷による変化を関係づける連立一次方程式（損傷方程式）を解き、各要素の剛性低下率を求めることにより行う．3) 損傷前の質量・剛性およびモード特性等のデータは既知とする．4) 損傷後の低次モード特性データから如何に精度の良い同定結果が得られるかにより損傷同定法の実用性を評価する．これは、一般に高次モードになるほど動的試験によるモード特性の抽出が難しいためである．

3. 検討内容とその背景 本研究では、次の 2 つの内容について検討した．① 損傷後のモード形の回転方向成分のデータが入手できない場合の同定手法と精度、② 付加質量を用いた場合の同定精度．①の検討理由は、損傷方程式への入力データとしてモード形の全成分が必要であるのに対し、一般に動的試験から抽出できるモード形は並進方向成分のデータのみであるため、梁構造物のような自由度が並進方向と回転方向の成分から成る構造物の損傷同定を行う場合に問題となるためである．②の検討理由は、損傷後の構造物に付加質量を載せて損傷同定を行うと、「動的試験における構造物への入力小さくて済む」、「損傷しているものの亀裂が閉じたままの状態になっているプレストレストコンクリート梁の損傷同定に利用できる」等の利点があるため、付加質量を使用した場合の損傷同定精度を確認しておく必要があるためである．

4. 解析モデルと損傷シナリオ 本研究では、図. 1 に示す要素長 0.5m に均一に分割した断面が 0.22×0.32m の 10 個の 2 次元梁要素から成る単純支持梁を解析モデルとして使用した．

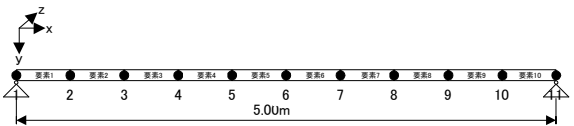


図. 1 解析モデル

無損傷状態での物質特性は各要素一様で、曲げ剛性 $EI=1.35 \times 10^7 \text{Nm}^2$ 、単位体積質量 $\rho=2300 \text{kg/m}^3$ と設定した．ただし、減衰は考慮しない．また、図. 1 内の座標において、y 軸方向成分が並進方向成分、また、z 軸回り成分が回転方向成分を表している．損傷同定の対象となる損傷シナリオは解析モデルの要素剛性を低下させることによりシミュレーションした．本研究で設定した損傷シナリオを表. 1 に示す．ただし、全ての損傷シナリオにおいて、損傷による質量変化はないと仮定した．

表. 1 損傷シナリオ

損傷シナリオ	損傷要素	剛性低下率(%)
D1	要素2	20.0%
	要素5	40.0%
	要素8	10.0%
D2	要素1	20.0%
	要素5	40.0%
	要素8	10.0%
D3	要素2	20.0%
	要素3	30.0%
	要素4	40.0%
	要素5	40.0%
	要素6	40.0%
	要素7	20.0%
	要素8	10.0%

5. 損傷方程式と擬似逆行列 本研究では、式 (1) の團らの損傷方程式と式 (2) の Ren らの損傷方程式を使用した．ここに、 Ω は固有円振動数、 Φ はモード形、 K は剛性行列、添字 D は損傷後の量であること、また r および l はモード次数、 e は行列またはベクトル内の要素 e の成分、 $\Delta\alpha_e$ は要素 e の剛性低下率を表す．ただし、両式と

$$\{\Phi_{Dre}\}^T [K_e] \{\Phi_{Dre}\} \Delta\alpha_e = \{\{\Phi_{Dr}\}^T [K] \{\Phi_{Dr}\} - \Omega_{Dr}^2\}$$
 (1)

もその誘導過程において、質量は損傷により変化しないと仮定している．次に、損傷方程式を解く際に必要な擬似逆行列について述べる． N_e を要素の総数、

$$\{\Phi_{Dre}\}^T [K_e] \{\Phi_{le}\} \Delta\alpha_e = \left\{ \left(1 - \frac{\Omega_{Dr}^2}{\Omega_l^2} \right) \{\Phi_{Dr}\}^T [K] \{\Phi_l\} \right\}$$
 (2)

m を使用可能な損傷後のモード次数、 N を使用する損傷前のモード次数とすると、團らの損傷方程式の係数

行列は m 行 N_e 列, $\mathbf{Ren}$ らの損傷方程式の係数行列は $(m \times N)$ 行 N_e 列となる. これらは常に正方行列になるとは限らず, 逆行列が存在しないことがある. このような場合に, 逆行列の代替的なものとして, 最小二乗法によって導かれた擬似逆行列があり, 長方形行列 $[A]$ の擬似逆行列 $[A]^+$ は式 (3) で定義される. 本研究では, この擬似逆行列を用いて, 損傷方程式から各要素の剛性低下率を求めた.

$$[A]^+ = ([A]^T [A])^{-1} [A]^T \quad (3)$$

6. 損傷同定結果 検討内容①, ②に対する損傷方程式の解法および損傷同定結果を図. 2～図. 5 に示す.

6.1 損傷後のモード形の回転方向成分のデータが

入手できない場合の損傷同定法

本研究では Guyan の静縮小を利用し, モード形の並進方向成分を基に回転方向成分を求め, 損傷方程式を解いた. 本研究では, これを「Guyan の静縮小に基づく損傷同定アルゴリズム」と呼ぶ. この損傷同定アルゴリズムを用いた場合の損傷シナリオ D1～D3 に対する損傷同定結果を図. 2～図. 4 に示す.

なお, すべての場合で $N=9$ としている. 図. 2 よりわかるように, 損傷シナリオ D1 に対しては, $\mathbf{Ren}$ らの損傷方程式を使用すると 2 次モードまで採用すると精度良く損傷同定が行えているが, 團らの損傷方程式を使用すると 5 次モードまで採用しないと損傷同定が精度良く行えていない. 図. 3 より, 損傷シナリオ D2 に対しては, $\mathbf{Ren}$ らの損傷方程式を使用すると 2 次モードまで採用すると精度良く損傷同定が行えているが, 團らの損傷方程式を使用すると 5 次モードまで採用しても損傷同定が精度良く行えていないことがわかる. 損傷シナリオ D3 に対して, 2 次モードまで採用した場合を比較すると, 図. 4 よりわかるように, $\mathbf{Ren}$ らの損傷方程式を使用した方が損傷同定精度が良好である.

6.2 付加質量を用いた場合の同定精度

付加質量は図. 1 の解析モデルの節点 6 (張中央) に 100kg 取り付け, 損傷同定には付加質量の影響を表わす項を追加した $\mathbf{Ren}$ らの損傷方程式を使用した. この場合の損傷シナリオ D1 に対する損傷同定結果を図. 5 に示す. 図. 5 より, 低次モードから精度よく損傷同定が行えていることが分かる.

7. おわりに 本研究で得られた主な知見を以下に列挙する. 1) 損傷後のモード形の回転方向成分のデータが入手できない場合でも, Guyan の静縮小に基づく損傷同定アルゴリズムを使用することにより精度良く損傷同定が行える. 2) 團らの損傷方程式よりも $\mathbf{Ren}$ らの損傷方程式の方が優れている. 3) 付加質量を用いた場合でも精度良く損傷同定が行える.

8. 参考文献 1) Ren W・De Roeck G : Structural damage identification using modal data. I : Simulation verification, J Struct Eng, ASCE, Vol.128, No.1, pp.87-95 2) 團博成・平尾潔・成行義文・酒部義宏 : モード解析による構造物の剛性劣化の一算定法, 徳島大学工学部研究報告, 第 42 号 3) Perera R・Huerta C・Juan Manuel Orquín : Identification of damage in RC beams using indexes based on local modal stiffness, Construction and Building Materials, Vol.22, No.8, pp.1656-1667

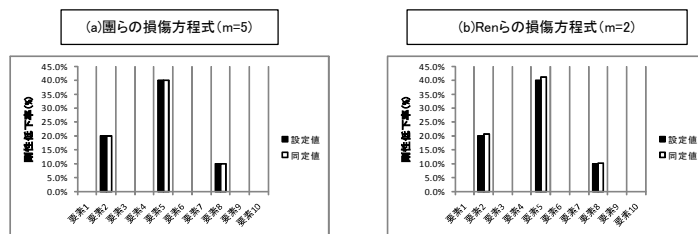


図. 2 損傷同定結果 (損傷シナリオ D1)

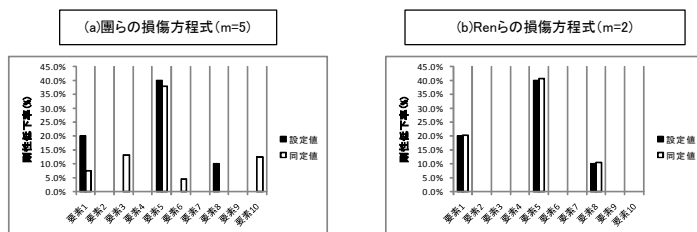


図. 3 損傷同定結果 (損傷シナリオ D2)

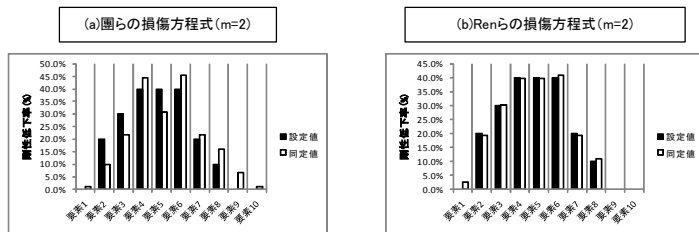


図. 4 損傷同定結果 (損傷シナリオ D3)

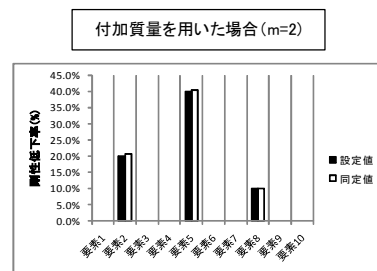


図. 5 損傷同定結果
(損傷シナリオ D1)