

各種構造物の損傷同定における Ren らの損傷方程式の適用性に関する研究

四国建設コンサルタント株式会社 正会員 ○豊崎裕司 日本交通技術株式会社 正会員 小西利弘
徳島大学大学院 正会員 成行義文 徳島大学大学院 正会員 佐藤弘美

1. はじめに 高度経済成長期に建設された構造物や道路橋は現在、建設から 40~50 年が経過し、この間に構造物や道路橋には、劣化による微小な損傷が蓄積していると考えられ、構造物の崩壊に繋がる危険性が高まっている。このことから、構造物や道路橋各部の現状を把握する必要があるが、近年では、「モード解析による構造物の損傷同定法」が注目されている。本研究では、モード解析による損傷同定法の性能を解析的に明らかにすることを目的に、各種構造物を対象として損傷同定を行い、Ren らの損傷方程式¹⁾の適用性について検証を行った。また、構造物の実断面が設計断面と異なる場合を想定して損傷同定を行ったときに、断面寸法の違いによって同定結果にどの程度の誤差が生じるのかについて比較検討を行った。

2. 構造物特性と解析モデル 本研究では、4 種類の構造物を解析モデルとして使用する。図 1 に解析モデルを、表 1 に各種構造物の構造物特性と拘束条件を示す。なお、いずれのモデルにおいても減衰は考慮しないものとした。せん断多質点型モデルは、床の質量に対して柱の質量は無視できるものとして、床の質量は一律 $1.5 \times 10^5 \text{ kg}$ とした。無損傷状態における各層の剛性値は図中に示すようである。梁モデルは、要素長を 0.5 m の均一に分割し、横断面が $0.22 \text{ m} \times 0.32 \text{ m}$ の 10 個の 2 次元梁要素から成る両端回転支持梁とした。ラーメンモデルは、横断面が $0.40 \text{ m} \times 0.40 \text{ m}$ の 2 次元要素から成る両端固定 2 層ラーメンとした。またトラスモデルは、要素長 6.0 m の 7 個の 2 次元要素から成る単純支持ワーレントラスとした。無損傷状態での物質特性は、各種構造物に対して各要素一様とした。

3. Ren らの損傷方程式 本研究では、損傷を要素剛性の低下と定義し、式(1)に示す Ren らの損傷方程式の適用性について検証した。

$$\sum_{e=1}^{N_e} \{\phi_{Dle}\}^T [k_e] \{\phi_{re}\} \Delta \alpha_e = \{1 - (\Omega_{DI}^2 / \Omega_r^2)\} \{\Phi_{DI}\}^T [K] \{\Phi_r\} \quad (1)$$

ここに、 N_e は要素数、 ϕ は要素 e に対応するモードの成分ベクトル、 k_e は要素 e の要素剛性行列、 Ω は固有円振動数、 Φ は全自由度に関するモード形、 K は損傷前剛性行列、 r は損傷前モード次数、 DI は損傷後モード次数、 $\Delta \alpha_e$ は要素 e の剛性低下量を表す。また、式(1)

の中の損傷前後のモード特性(Ω, Φ)は、それぞれの構造物の質量行列、剛性行列から成る固有値問題を解くことで作成した。特に、損傷後のモード特性は、動的試験により得られたデータとみなして使用する。本研究では、式(1)に損傷前後のモード特性や剛性行列を入力して損傷方程式を解いたときに、未知数である剛性低下量 $\Delta \alpha_e$ が予め損傷を設定した箇所に現れるかを検証した。

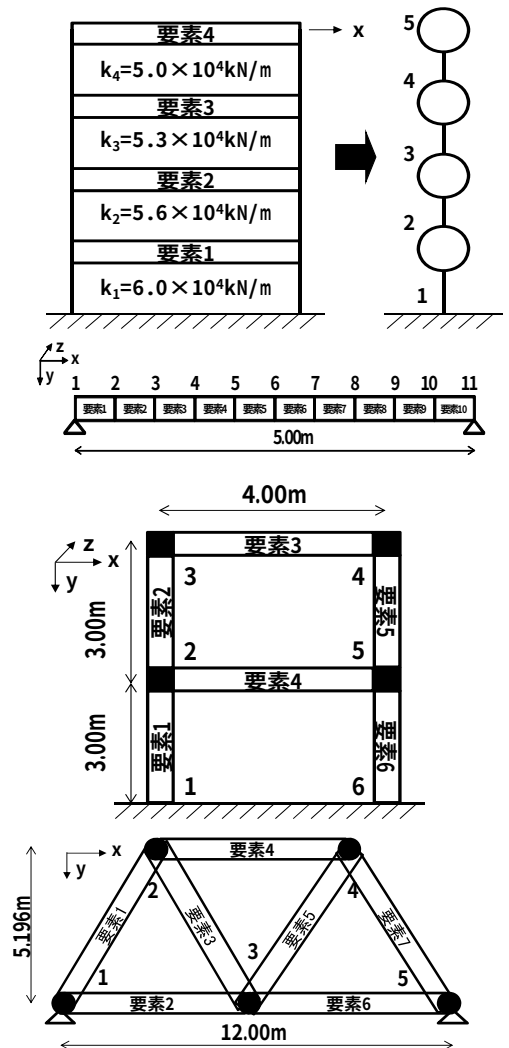


図 1 各種構造物の解析モデル

表 1 各種構造物の構造物特性と拘束条件

	無損傷状態での物質特性	単位体積質量	自由度数	考慮する成分	拘束する節点
せん断多質点型	—	—	4	x軸方向	・ x軸: 節点1
梁	$EI=1.35 \times 10^7 \text{ Nm}^2$	2300 kg/m^3	20	y軸方向 z軸回転	・ y軸: 節点1, 11
ラーメン	$EI=6.08 \times 10^7 \text{ Nm}^2$	2300 kg/m^3	8	x軸方向 z軸回転	・ x軸: 節点1, 6 ・ z軸: 節点1, 6
トラス	$EA=6.00 \times 10^5 \text{ kN}$	7800 kg/m^3	7	x軸方向 y軸方向	・ x軸: 節点1 ・ y軸: 節点1, 5

4. モードの補完 一般に、動的試験により測定されるのは並進方向(x,y)成分である。しかしながら、Ren らの損傷方程式では全ての自由度に関するモードが必要となる。そこで本研究では、各種構造物において、固有値解析により得られた所定の一方向モードを用いて、他の一方向のモードを補完することで入力データを作成した。なお、トラスにおいてはx軸モードを補完モードとした。

表2に各種構造物における同定モードと補完モードを示す。

表2 補完モード

	同定モード	補完モード
梁	y軸方向	z軸回転
ラーメン	x軸方向	z軸回転
トラス	y軸方向	x軸方向

表3 損傷シナリオ

	損傷要素	$\Delta \alpha_e$	m	N
せん断多質点型	第1層	20.00%	4	4
	第2層	40.00%		
	要素4	30.00%	5	9
	要素5	40.00%		
ラーメン	要素1	20.00%	2	4
	要素5	20.00%		
トラス	要素2	20.00%	2	3

5. 損傷シナリオと損傷同定結果 本研究では、要素の剛性を低下させることで、表3に示す損傷シナリオを作成した。表中のmは、採用できる損傷後のモード次数、Nは採用した損傷前のモード次数を表す。次に、各種構造物の損傷シナリオに対する損傷同定結果を図2に示す。図より、せん断多質点型構造物や梁構造物の場合、損傷後のモード次数が少なくても、精度よく同定が行えることが分かる。一方、ラーメン構造物やトラス構造物の場合、採用できる全てのモードを用いても、設定していない要素に損傷がある、損傷箇所は同定できても損傷量までは同定できていない、といった結果が得られた。

6. 構造物の実断面が設計断面と異なる場合の損傷同定

施工者の技術力等の要因で、実際の構造物が設計どおりに造られているとは限らない。そこで、本研究で用いた梁構造物を解析対象として、損傷前の断面を設計断面、損傷後の断面を実断面とみなし、実断面が設計断面よりも大きいと想定したときの損傷同定を行い、断面の違いが同定結果にどの程度影響するのかを調べた。具体的には損傷後の全ての要素の断面2次モーメントIが損傷前よりも増加していると仮定した上で、損傷要素を設定し解析を行った。図3に実断面(細線)と設計断面(太線)を示す。表4に実断面の違いによる損傷シナリオを示す。なお、表4においては、負値が剛性低下、正値が剛性増加を表す。図4にm=4,N=5に対する損傷同定結果を示す。図4を見ると、tが大きくなるにつれ同定結果に誤差が生じていることが分かる。

7. おわりに せん断多質点型や梁の損傷同定では精度の良い結果が得られたが、ラーメンやトラスの場合、損傷箇所は検出できても損傷度までは同定できなかった。原因として、入力データの誤差、収束計算の方法が考えられ、計算方法の改良が今後の課題である。また、損傷前後で構造物の断面が異なるとして損傷同定を行うと、同定結果の誤差に大きな影響を及ぼすことが分かった。よって、Ren らの損傷方程式において、損傷前後で断面が異なるデータを用いるのは適当でないと考えられる。

8. 参考文献

1) Wei-Xin Ren・Guido De Roeck :
Structural damage identification using modal data ,
I :Simulation verification, Journal of Structural Engineering,
ASCE, Vol.128, No.1, pp.87-95, 2002.

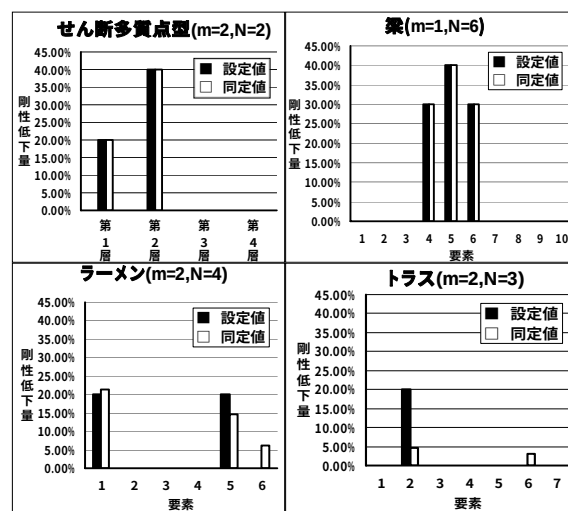


図2 各種構造物の損傷同定結果

表4 損傷シナリオ

t(m)	要素4の $\Delta \alpha_e$	要素4以外の 要素の $\Delta \alpha_e$
0	-40.00%	
0.001	-38.31%	2.81%
0.002	-36.59%	5.68%
0.003	-34.83%	8.61%

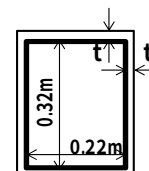


図3 実断面と設計断面

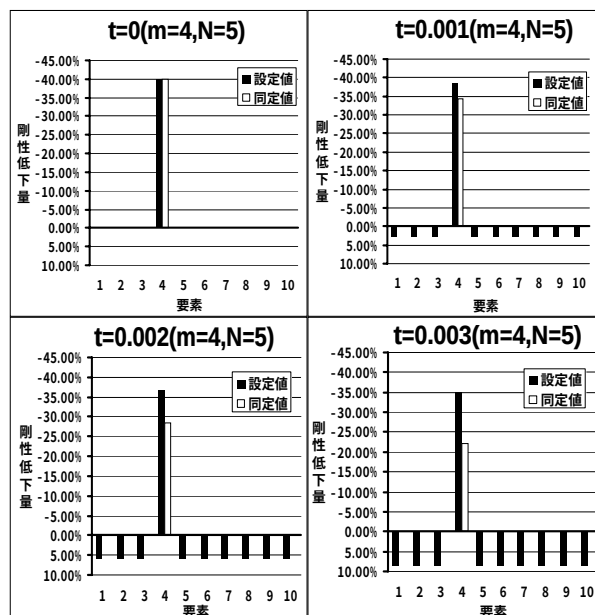


図4 各種構造物の損傷同定結果