

1 次モード特性に基づく単純合成 H 型鋼橋の損傷同定法に関する解析的研究

徳島大学大学院 学生会員 ○角田 豊土 (株) 福井組 正会員 浅川 和也
 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 成行 義文

1. はじめに 高度経済成長期に建設された道路橋は現在、建設から約 50 年が経過している。この間に道路橋には、劣化等による微小な損傷が蓄積し、構造物の崩壊に繋がる危険性が高まっていると考えられる。このことから、道路橋各部の現状を把握する必要がある、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、モード解析に基づく道路橋の損傷同定法を確立するための基礎的な研究として、中小橋梁で最も一般的な桁橋を対象とし、実測により比較的に入手が容易な 1 次モードの固有振動数及びモード形の損傷前後における変化状態から、損傷位置及び損傷を同定する手法を提案するとともに、適用例によりその妥当性を示した。

2. 対象橋梁と解析モデル 対象橋梁は図 1 に示す様な、全幅 6.7m、支間長 10.8m の単純合成 H 型鋼橋¹⁾とした。損傷によるモード特性の基本的な変化を探るのが主目的であるため、構造はできるだけシンプルなものとした。主桁は橋軸方向の断面変化の無い H 型鋼とし、また、支間中央に H 型鋼の横桁を配置するとともに、骨組み構造は直線直橋、断面形状は左右対称とした。解析モデルは床版剛性が考慮できる 3 次元 FEM モデルとし、ほぼ全ての要素をシェル要素とした。なお、モード解析には汎用解析ソフト「T-DAP III」を用いた。

3. 損傷シナリオ 本研究では、橋梁の損傷を主桁剛性(EI)の低下と定義した。ここで、解析における剛性低下は便宜的に損傷個所の弾性係数(E)を低減することにより表現した。損傷シナリオは表 1 に示すように、「損傷桁の組合せ」(A1~A5)、「損傷位置」(B1~B3)ならびに「損傷度(剛性低下率)」(C1~C4)の組合せによる 60 パターンを考慮した。これらの 60 パターンの損傷シナリオに無損傷の 1 ケースを加えた合計 61 パターンに対してモード解析を行った。

4. モード形変化率 α 本研究では、実橋梁での測定の容易さを考慮し、図 1 に示すような 10 点(左から W1,W2,G1-S, ..., W4)に注目し、各点を通る橋軸方向の水平線の 1 次モード変形時の鉛直成分を便宜上、各注目点でのモード形と呼ぶ。なお、損傷前後における各注目点のモード形の変化を評価するために、式(1)のような 2 つのモード間の相関を表す評価基準 MAC を用いた「モード形の変化率 α 」を式(2)のように定義した。損傷前後のモード形の差が小さいほど、MAC の値は 1.0 に近づき、結果として α は 0 に近くなる。表 1 に示す「1/4 点付近が損傷(B2)」における G1,G2 桁が損傷(A2)した場合の注目ライン毎の変化率を比較した結果を図 2(a)に示す。なお、図 2(b)は図 2(a)の各ラインの変化率 α を剛性低下率毎にそれらの最大値(全ての場合 G1-S の α)で規準化したものである。図 2(b)より明らかなように損傷主桁付近のモード形が損傷度によらず相対的に大きく変化していることがわかる。これらの傾向は、他の位置が損傷したケース(B1,B3)においても同様であった。このことは、損傷前後の各注目ラインにおけるモード形を測定し、その変化率より、剛性低下している主桁を特定できることを示唆している。

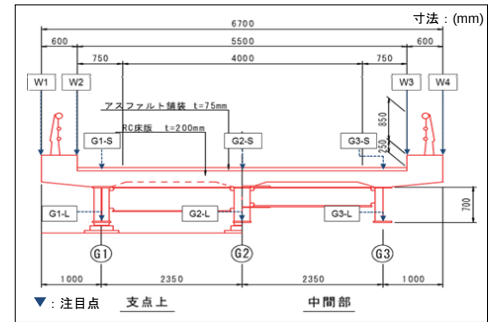


図 1 解析対象橋梁

表 1 損傷シナリオ

損傷桁の組合せ(A)	損傷位置(B)	損傷度(C)
A1 G1,G2,G3	B1 支間1/2点付近	C1 5%
A2 G1,G2	B2 支間1/4点付近	C2 10%
A3 G1,G3	B3 支点付近	C3 20%
A4 G1		C4 40%
A5 G2		

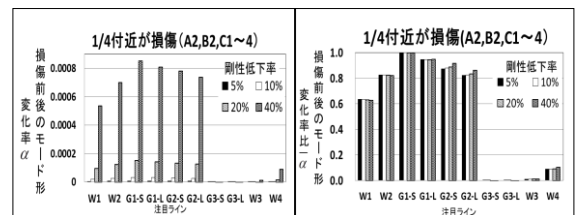
例えば、損傷シナリオが「G1, G2, G3 が損傷」& 「支間 1/2 点付近」& 「5% の損傷度」の場合は、「case A1, B1, C1」と表示する。

$$MAC(\phi_a, \phi_b) = \frac{|\{\phi_a\}^T \{\phi_b\}|^2}{(\{\phi_a\}^T \{\phi_a\})(\{\phi_b\}^T \{\phi_b\})} \quad (1)$$

$$\alpha = 1.0 - MAC(\phi_a, \phi_b) \quad (2)$$

ϕ_a : 損傷前のモードベクトル

ϕ_b : 損傷後のモードベクトル



(a) 損傷桁: G1, G2

(b) 損傷桁: G1, G2

図 2 G1, G2 が損傷した場合の変化率

5. 注目ライン毎のモード振幅変化量の橋軸方向分布

本研究では、損傷前後のモード形の相対的な位置関係を評価するために、モード振幅変化量 $\Delta\phi$ を式(3)のように定義した。図3は caseA2,B2,C4 について式(3)よりモード振幅変化量 $\Delta\phi$ を示したものである。1/2 点付近が損傷したケースについては、モード振幅変化量の橋軸方向分布のピーク位置を調べることで、損傷位置の同定が可能であることを示唆している。なお、損傷後のモードベクトル ϕ_a , ϕ_b は式(4)のように正規化した。図3より、剛性低下した主桁における注目ラインのモード振幅変化量が、剛性低下部付近で正の極大値を持つことがわかる。図4(a),(b)は、caseA2,B2,C1~4 および caseA2,B3,C1~4 について、注目ライン

$$\Delta\phi = \phi_b - \phi_a \quad (3)$$

$\Delta\phi$: モード振幅変化量

$$(\phi_r)^T [M] (\phi_r) = 1 \quad (4)$$

$[M]$: 質量行列 (ϕ_r) : r 次モード

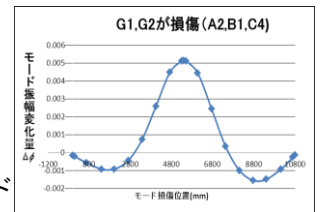
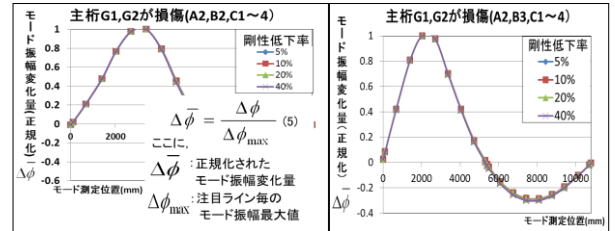


図3 モード振幅変化量 $\Delta\phi$ (G2-S)



(a)注目ライン(G2-S) (b)注目ライン(G2-S)

図4 注目ラインのモード振幅変化量 $\Delta\phi$

(G2-S)のモード振幅変化量 $\Delta\phi$ を、それぞれの損傷(剛性低下)率におけるモード振幅変化量の最大値で正規化した変化量(式(5))を示したものである。図4より1/4 点付近が損傷したケースと支点付近が損傷したケースについてはピーク位置の明確な差が認められないため、損傷位置を推定することは困難と考えられる。

6. 支点付近の剛性低下によるモード振幅の変化 前述のようにモード振幅変化量の最大値が1/4 点付近に現れた場合には、1/4 点付近の損傷か、支点付近の損傷かを見極める必要がある。1/4 点付近の損傷および支点付近の損傷で地覆ライン(W1)の支点位置の $\Delta\phi$ を比較すると両者で大きく異なることがわかった。そこで、この点でのモード振幅変化量に着目して整理した。図5は、1/4 点付近損傷と支点付近損傷の地覆ライン(W1)の支点位置での正規化されたモード振幅変化量(式(5))を示したものである。これより、全ての損傷桁の組合せにおいて、支点付近が損傷したケースの方が、正規化されたモード振幅変化量は大きな値を示しているのがわかる。その値は損傷程度にあまり依存しない。したがって、地覆ラインの支点位置におけるモード振幅の変化状態から、損傷位置を推定することが可能であると思われる。

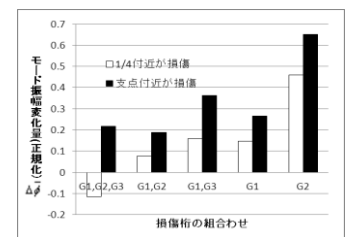


図5 支点位置(W1)でのモード振幅変化量 $\Delta\phi$ (5%損傷)

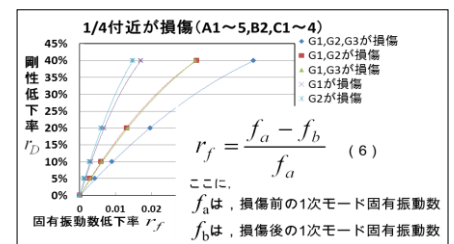


図6 剛性低下率 r_D と固有振動数低下率 r_f との関係

7. 剛性低下による1次モード固有振動数の変化 固有振動数低下率を式(6)のように定義する。図6は、1/4 点付近が損傷したケースにおける主桁の剛性低下率と1次モード固有振動数低下率との関係を各損傷桁の組合せ毎に回帰曲線とともに示したものである。損傷位置及び損傷桁に対応する回帰式を用いて、固有振動数の低下率から剛性低下率を推定することが可能である。

8. 提案手法および適用例 提案手法の流れを説明する。なお、本研究で提案する手法はあらかじめ対象とする橋梁の損傷前後におけるモード特性をモード解析等によって把握しておく必要がある。まず始めに、損傷前後のモード形の変化状態(モード形変化率 α)から損傷桁を推定する。次に、モード形の変化形状から橋軸方向における損傷位置を推定し、最後に損傷桁及び損傷位置に対応する1次固有振動数の低下率と剛性低下率との回帰式を用いて、固有振動数の低下率から剛性低下率を推定する。この手法により G1 桁の支点付近に15%の剛性低下を与え、提案手法により損傷同定を行った結果、損傷主桁ならびに損傷位置の推定が可能であることがわかった。また、剛性低下率(損傷度)の同定結果は14.96%となり、推定精度は良好であると思われる。

9. おわりに 今後、モード特性に含まれる計測ノイズが同定精度に及ぼす影響等についても検討を進めるとともに、室内実験等により手法の妥当性の検証を進めていく予定である。

10. 参考文献 1) 浅川和也：単純鋼桁橋の部分損傷がモード特性に及ぼす影響に関する解析的検討：H25年度土木学会四国支部