

論文

[2154] 既存コンクリート橋の損傷評価に対する動的感度解析の適用

正会員 宮本文穂 (神戸大学土木工学科)

正会員 森川英典 (神戸大学土木工学科)

正会員○久保田裕二 (神戸大学大学院)

1. はじめに

橋梁の損傷を評価する手法の一つとして、振動特性の変化を利用する手法が検討されつつあり、筆者ら<sup>1)</sup>はRC単純T桁橋において、損傷と振動特性との関係を調べ、これを利用したSystem Identification Method (以下SI法)による損傷評価を試みた。本手法を実橋に適用する上で最も重要なことは、各損傷毎に最も感度の高い振動パラメータを抽出することであり、また、この感度特性は橋梁形式によって異なるため、形式毎の評価が必要となる。

そこで、本研究では、3径間連続RC-T桁橋を対象に、振動パラメータとして固有振動数、振動モード、減衰、位相差を考慮し、複素固有値解析により主桁各部の損傷に対する振動特性の感度を評価した。また、この感度特性を改善させることを目的とし、静的載荷することにより橋梁の構造系(質量/剛性パラメータ)を変化させた状態での実橋振動試験を行い、その有効性を検討した。

2. 橋梁の損傷評価のための解析手法

2.1 橋梁のモデル化

本研究で対象とする兵庫県「旧青木橋」は昭和12年架設の3主桁を有する3径間連続RC-T桁橋である。昭和44年に上流側に2主桁が増設されたが、本研究ではこの増設桁を縁切りし、架設当初の3主桁のみを対象とした。図-1に本橋の概要を示す。

振動特性を評価するための複素固有値解析を行うにあたり、旧青木橋を図-2に示すように、曲げ、せん断、ねじりを考慮したはり要素を用いた集中質点系にモデル化した。実際の橋梁に近い剛性の分布を考慮するため床版もはりモデルに置き換えている。断面諸量、配筋等の詳細なデータがないため、橋梁断面の寸法は実測により得、鉄筋量は全断面の1%と仮定した。これを基に健全時の橋梁のモデルとして、各節点において質量、全断面有効時の剛性を求めた。

2.2 損傷のモデル化

本研究では損傷評価のための振動パラメータとして、固有振動数、振動モード、減衰、位相差に着目し、主桁の曲げひびわれによる損傷程度を表わすパラメータとして損傷部の曲げ剛性低下および減衰定数変化を考慮した。従来、実橋の破壊試験時における振動特性の測定結果<sup>2)</sup>から、橋梁の剛性が低下するとともに、減衰定数が増加することがわかっており、これらの相関関係が橋梁形式あるいは規模毎に評価されれば、減衰定数が損傷評価の有効なパラメータとして利用できる。本研究では、局部

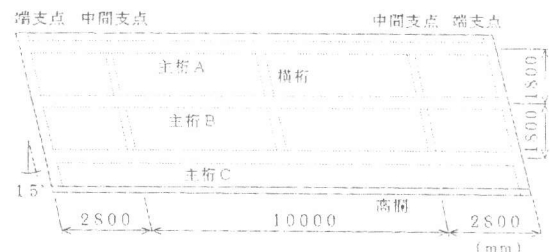


図-1 旧青木橋の概略図

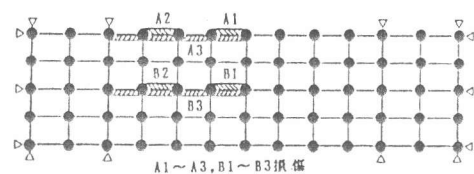


図-2 旧青木橋の解析モデル

損傷を考慮して一般粘性減衰を用いるため、減衰マトリクス  $C$  は各主桁毎に剛性マトリクス  $K$  に比例するものと仮定して  $C = \alpha K$  ( $\alpha$ : 内部粘性係数) と表わし、減衰比  $\zeta = \alpha \omega / 2$  ( $\omega$ : 不減衰固有円振動数) の関係から  $\alpha$  の値を求めた。したがって、各モードにおける減衰特性を評価する場合、各モード毎にそれぞれ対応する内部粘性係数  $\alpha$  を設定し直した。また、端支承部の拘束不良等の損傷に対しては、支点鉛直拘束バネによる弾性支承モデルを取り入れた。

### 2.3 複素固有値解析<sup>3)</sup>

多自由度系の減衰自由振動は、一般的に次式で与えられる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここに、 $M$ ,  $C$ ,  $K$ : 質量, 減衰, 剛性マトリクス,  $u$ : 変位ベクトル。

式(1)の解を

$$u(t) = z \exp(\mu t) = (x + iy) \exp(\mu t) \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここに、 $x = r \cos \varphi$ ,  $y = r \sin \varphi$ ,  $\varphi$ : 位相差。

とおくと、振動数方程式は次式のように表わされる。

$$|\mu^2 M + \mu C + K| = 0 \quad \text{-----} \quad (3)$$

式(3)の解として、複素固有値  $\mu$ 、実固有モード  $u$ 、位相差  $\varphi$  は次のように表わされる。

$$\mu = -\alpha + i\beta \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$u = 2 \exp(-\alpha t) r \cos(\beta t + \varphi) \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(y/x) \quad \text{-----} \quad (6)$$

ここに、 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\alpha$ : 減衰率 ( $= \omega \zeta$ ),  $\beta$ : 減衰固有振動数 ( $= \omega \sqrt{1 - \zeta^2}$ )

$\omega$ : 不減衰固有振動数,  $\zeta$ : 減衰定数

本研究では、Fossの方法を用いて、式(3)を次式に変形して解析を行った。

$$|\mu A + B| = 0 \quad \text{-----} \quad (7)$$

ここに、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}$$

### 2.4 動的感度係数を利用したSI法<sup>1)</sup>

橋梁の振動特性から橋梁各部の損傷状態を把握するため、振動特性の各損傷に対する感度係数を用いたSI法により、構造パラメータを同定する手法を用いた。

同定のための目的関数としては、振動特性の解析値と測定値との差を最小にするよう、次式のように定義した。

$$F = W_1 (\mu_p / \mu_p^m - 1)^2 + W_2 \sum_{k=1}^n (z_{p^k} / z_{p^k}^m - 1)^2 \rightarrow \min \quad \text{-----} \quad (8)$$

ここで、 $p$  は振動次数、 $n$  はモードの誤差評価を行う測点数、 $\mu$ ,  $\mu^m$  は固有値の解析値および測定値、 $z$ ,  $z^m$  は振動モードの解析値および測定値、 $W_1$ ,  $W_2$  は固有振動数と振動モードについての重みで、 $W_1 = 1.0$ ,  $W_2 = 1.0/n$  とした。

同定は、式(8)の目的関数に対する各同定変数の一次感度を求めた上で、SLP(逐次線形計画)法を用いて行った。

## 3. 橋梁の損傷に対応する振動特性の感度解析

3径間連続RC-T桁橋の各部の損傷と振動特性との関係を把握するため、旧青木橋の解析モデルを

用いて、各種損傷パラメータを変化させて複素固有値解析を行った。

### 3.1 損傷導入位置

解析に考慮した損傷は図-2に示した旧青木橋の解析モデルにおいて、従来の実験結果<sup>2)</sup>を基にして、外桁損傷A1, A2、中桁損傷B1, B2における剛性低下率0~30%、外桁損傷A3、中桁損傷B3における減衰定数増加率0~30%とした。ただし、端支承端部の鉛直変位は完全拘束条件とした。また、本研究で対象とした振動モードを図-3に示す。

### 3.2 剛性低下による損傷の感度解析

図-4 a)~d)に剛性低下率と固有振動数低下率との関係を示す。外桁損傷については、損傷A1の場合、2-1次、1-1次モード、損傷A2の場合、2-2次、2-1次モードの変化が大きくなり、それぞれの損傷位置が振動の腹に近いモードに大きな変化が生じている。中桁損傷については、損傷B1の場合1-1次モード、損傷B2の場合2-1次モードの変化が大きくなり、中桁に振幅の生じない1-2次、2-1次モードには振動特性の影響は表われない。すなわち、外桁と中桁の損傷位置を区別するためには、2-1次、1-2次の固有振動数に着目すればよく、また同一桁内での損傷位置を区別するためには、外桁で1-1次、1-2次モード、中桁で1-1次モードの固有振動数に着目すればよい。

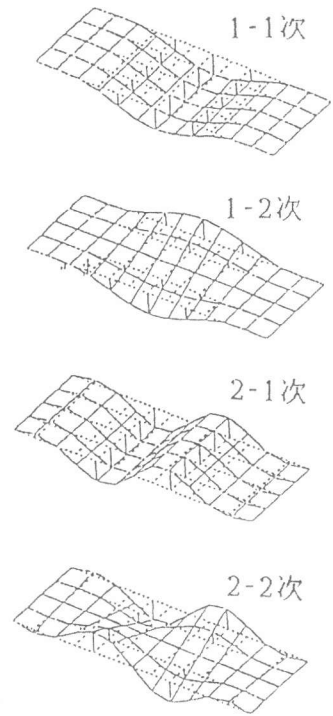


図-3 対象とした振動次数と振動モード

### 3.3 減衰増加による損傷の感度解析

#### (1) 減衰定数

図-5 a)~c)に各損傷部の減衰定数の変化と橋梁全体系の減衰定数との関係を示す。この結果より、損傷を減衰定数の増加30%程度以内として考えた場合、損傷部の減衰定数と橋梁全体系の減衰定数との関係は線形であり、複数の損傷に対しては個々の感度の線形和として表わすことが可能である。また、外桁損傷A3については1-1次、1-2次、2-1次、2-2次モード全てに変化が表われているが、中桁損傷B3については、モードの節となる1-2次、2-2次モードについては全体系の減衰定数には影響を及ぼさないため、外桁と中桁の損傷位置を確かめるためには1-2次、2-2次の減衰特性に着目すればよい。

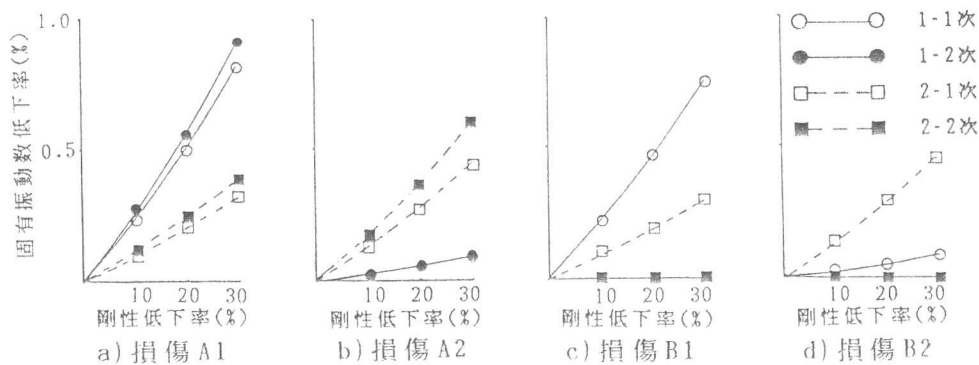


図-4 損傷部の剛性低下と橋梁の固有振動数との関係

(2) 位相差

各振動モードにおける主桁の主要点での位相差に注目した。ここでは、各主桁の中央径間におけるL/4点、L/2点、3L/4点(ただし、L:中央スパン長)の位相について調べた。図-6 a)~c)に減衰定数と位相差との関係を示す。ただし、位相差に関しては、1-1次モードについては主桁BのL/2点を基準とした各主要点の値、1-2次モードについては主桁Aと主桁Cの各点の差、2-1次モードについては主桁A、主桁Cの各点とそれに対応する主桁Bの各点との差をとった。この結果より、損傷を減衰定数の増加30%程度以内として考えた場合、損傷部の減衰定数と位相差との関係は線形となっていることがわかり、複数の損傷に対しては個々の感度の線形和として表わすことが可能である。また、外桁の損傷A3については1-1次、2-1次モードの変化が大きく、中桁損傷B3については全てのモードに大きな変化は表われないために、外桁と中桁の損傷位置を確かめるためには、1-1次、2-1次の位相差に着目すればよい。

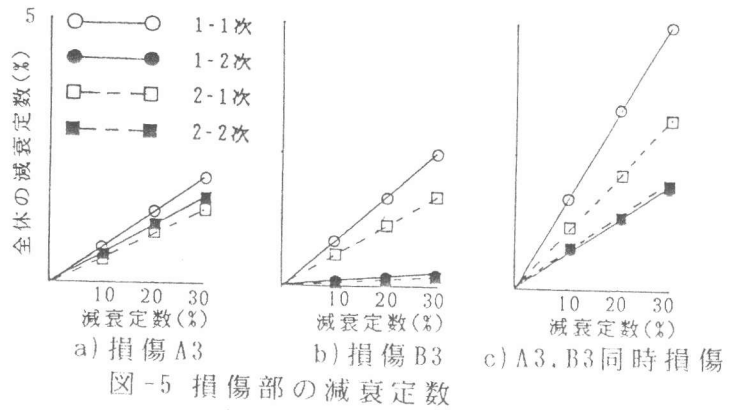


図-5 損傷部の減衰定数と橋梁全体の減衰定数との関係

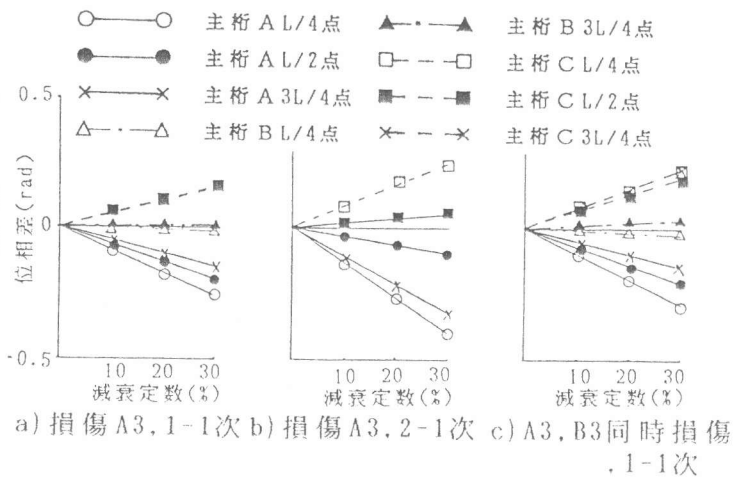


図-6 損傷部の減衰定数と橋梁の位相差との関係

4. 実橋振動試験に基づく損傷位置推定に関する検討

3径間連続RC-T桁橋である旧青木橋において現場振動試験を行い、振動特性変化に基づく損傷評価法の有効性を検討した。

4.1 試験の概要

(1) 現場振動試験

現場振動試験としては、重量300kgfの重錘をクレーン車により約70cmの高さから所定の位置に落下させ、重錘に設置した加速度計から入力加速度を、各主桁の下面に設置した加速度計から応答加速度を測定し、モード解析により振動特性を同定した。図-7に重錘落下位置と応答加速度測定位置を示す。また、主桁Cの剛性低下による損傷導入を想定して高欄の有無による振動特性の変化を調べた。

(2) 载荷を伴う現場振動試験

局部損傷をより正確に評価するための実験方法として载荷を伴う重錘落下試験を行った。すなわち、橋梁に静的载荷し、強制的に橋梁の構造系つまり質量/剛性バランスを変えた場合の振動特性を調べ、橋梁

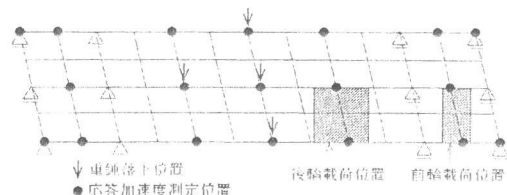


図-7 実橋振動試験の概要

の損傷に対する感度を調べた。なお载荷としてトラック荷重(20tf)を用いた。

#### 4.2 载荷による振動特性の影響解析

载荷を伴う振動試験を行うにあたり、損傷に対して最も感度の高い振動特性を得るため、旧青木橋をモデル化し、载荷位置をパラメータとした固有値解析を行った。ただし、解析モデルは図-2に示したものに斜角を考慮し、端支承端部の鉛直変位は完全拘束条件とした。表-1に固有振動数、表-2に振動モードの解析結果を示す。この結果から、载荷した場合、固有振動数はあまり変化しないが、振動モードについては1-1次における主桁AのL/2点で非常に感度が高くなることが確認された。

#### 4.3 実橋試験結果

##### (1) 重錘落下試験

実橋試験で得られた結果として表-3に固有振動数と減衰定数、図-8に振動モードの一例を示す。旧青木橋は3径間連続橋として設計されていたが、振動モードからわかるように、端支承部が浮き、連続ばりと張出ばりの中間的な挙動を示していることがわかった。次に、これらの振動特性を用いてSI法により主桁各部の剛性を推定した。ただし、解析モデルの端支承部鉛直拘束ばね定数についても同定変数とした。表-4に高欄を除去した場合の同定結果を示す。この結果から、各主桁の剛性とも、健全時の剛性に比べてかなり低下しており、特に、主桁Cの損傷程度が大きくなっている。また、主桁の断面力が最小になると思われる主桁L/4点の中立軸以上から採取したコンクリートコアによる材料試験によって、圧縮強度(69.1kgf/cm<sup>2</sup>)、弾性係数(78000kgf/cm<sup>2</sup>)ともに設計基準値(各々、240kgf/cm<sup>2</sup>、210000kgf/cm<sup>2</sup>)の半分以下に低下していることが確認され、同定結果が裏付けられた。

##### (2) 载荷を伴う重錘落下振動試験

载荷を伴う振動試験結果として、表-5に振動モードの感度を示す。この結果から、主桁Cの高欄を除去した場合、主桁Aの振動モードの変化が非常に大きくなっている。また、主桁Cに载荷しない場合の方がむしろ振動モードの損傷に対する感度が大きくなっている。これは、表-4に示したSI法による主桁剛性の同定結果からわかるように、主桁Cの損傷による剛性低下が非常に大きく、質量/剛

表-3 固有振動数と減衰定数の実験結果

载荷	高欄	固有振動数(Hz)		減衰定数(%)	
		1-1次	1-2次	1-1次	1-2次
無	無	10.09	17.60	4.73	6.82
	有	11.61	17.78	4.50	5.25
	有/無	1.15	1.01	-	-
有	無	10.32	17.33	4.45	4.61
	有	11.71	17.96	4.56	6.02
	有/無	1.13	1.04	-	-

表-1 固有振動数の解析結果

载荷	高欄	固有振動数(Hz)	
		1-1次	1-2次
無	無	18.50	21.14
	有	19.10	22.05
	有/無	1.03	1.04
有	無	16.80	20.26
	有	17.69	20.73
	有/無	1.05	1.03

表-2 振動モードの解析結果

载荷	高欄	振動モード(主桁L/2点, 1-1次)		
		主桁A	主桁B	主桁C
無	無	0.756	0.888	1.000
	有	1.000	0.851	0.653
	有/無	1.32	0.95	0.65
有	無	0.410	0.715	1.000
	有	0.773	0.923	1.000
	有/無	1.89	1.29	1.00

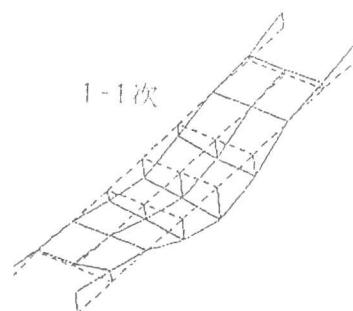


図-8 旧青木橋の振動モード図

表-4 SI法の同定結果

載荷無高欄無		理論値	実験値	
剛性 (E I)	主桁 A	9.98	5.74	
	主桁 B	10.87	4.48	
	主桁 C	18.50	3.21	
	床版	17.39	13.31	
	端横桁①	1.36	1.52	
	端横桁②	15.53	11.94	
	横桁	2.71	3.37	
支点鉛直 方向ばね 定数	智頭側	主桁 A	—	6.79
		主桁 B	—	6.78
		主桁 C	—	6.77
	佐用側	主桁 A	—	6.81
		主桁 B	—	6.77
		主桁 C	—	6.75

端横桁①：両端スパンの端横桁

端横桁②：中央スパンの端横桁

単位：剛性 (E I) :  $10^{11}$  kgfcm<sup>2</sup>

支点鉛直方向ばね定数 :  $10^4$  kgf/cm

表-5 振動モードの実験結果

載荷	高欄	桁	振動モード			
			智頭側 支承	中央 L/2	佐用側 支承	
無	無	主桁 A	0.4836	0.5617	0.2734	
		主桁 B	—	0.7580	—	
		主桁 C	0.4727	1.0000	0.6578	
	有	主桁 A	0.3678	0.9850	—	
		主桁 B	—	0.6778	—	
		主桁 C	—	1.0000	—	
	有/無	主桁 A	0.76	1.75	—	
		主桁 B	—	0.89	—	
		主桁 C	—	1.00	—	
	有	無	主桁 A	0.5123	0.6718	0.3398
			主桁 B	—	0.8677	—
			主桁 C	0.5513	1.0000	0.5753
有		主桁 A	0.6204	1.0000	—	
		主桁 B	—	0.8616	—	
		主桁 C	—	0.8611	—	
有/無		主桁 A	1.21	1.49	—	
		主桁 B	—	0.99	—	
		主桁 C	—	0.86	—	

性の比が健全時に比べて2倍以上大きくなっているため、載荷しない状態であっても、解析結果で得られた載荷による影響と同等のものが得られているものと考えられる。このことから、外桁の質量/剛性バランスを変えることにより、損傷に対する振動モードの感度特性を大きく変化させることができ、振動モードが損傷評価のためのパラメータとしてより有効になり得るものと考えられる。

### 5. まとめ

本研究においては、既存橋梁の動的挙動を利用して損傷を評価することを目的とし、3径間連続RC-T桁橋における損傷と振動特性との関係とその感度特性について検討を行った。以下に、本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 3径間連続RC桁橋を対象として、複素固有値解析により損傷と振動特性との関係を調べた結果、固有振動数の他に、減衰、位相差が損傷評価のためのパラメータとして有効であることが確認された。
- (2) 載荷を伴う振動試験について検討した結果、外桁の質量/剛性バランスを変化させることにより、振動モードの感度特性を改善することが可能であることを確認した。
- (3) 本研究で示した損傷評価手法を用いることにより、橋梁の損傷位置、損傷程度をある程度推定することが可能であるが、補修・補強の必要性を定量的に判断できる基準を確立することが今後の課題として挙げられる。

なお、実橋試験の実施にあたり多大なご協力を頂いた兵庫県土木部、(株)栗本鐵工所、川崎重工業(株)の熊谷稔氏に深く感謝いたします。

参考文献 1)宮本, 森川, 山本, 桜井: コンクリート橋の振動特性変化に基づく損傷評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集第12巻, 1990., 2) 森川, 宮本, 山本, 桜井: 橋梁損傷と振動特性の変化に関する解析的検討, 土木学会第45回年次学術講演会概要集, 1990., 3) 戸川: 有限要素法による振動解析, 1975.