

非比例減衰を考慮した振動特性に基づく 既存コンクリート橋の損傷評価

宮本文穂*・森川英典**・久保田裕二***

既存コンクリート橋の損傷劣化部を、非比例減衰を考慮した剛性低下、減衰増加としてモデル化し、動的載荷試験から得られる振動特性として固有振動数、振動モードの他に減衰定数、位相差を利用してSI（構造同定）を行う手法を検討した。また、SI法における同定変数の初期値推定において、静的載荷試験、材料試験を用いる手法を検討し、SI法と合わせて多段階的な損傷評価フローを作成した。

Key Words: concrete bridge, non-proportional damping, damage detection, modal parameter, system identification

1. ま え が き

近年、コンクリート橋の損傷・劣化が問題化し、早急な対策が求められている。このような状況に対応して、土木学会コンクリート標準示方書にも維持管理を取り入れるべく検討が行われつつあり、その構想、試案が公表されている¹⁾。この中で、維持管理に必要とされる基本技術として、劣化予測、点検、モニタリング、評価・判定、補修・補強等が挙げられている。特に、現状で最も一般的に行われている目視検査は、非常に簡便であるが、客観的評価としては問題があり、今後さらに増加すると考えられる劣化橋梁に対して合理的に対応していけるとは言い難い。構造物の重要度、損傷程度にもよるが、損傷状態の正確な評価・判定法を確立することが必要であると考えられる。

コンクリート橋の点検法としては、主にコンクリート材料特性の観点から見た損傷（強度低下、ひびわれ、空隙等）の位置と程度を把握することを目的とした各種非破壊検査法と、構造部材特性の観点から見た損傷（材料劣化とひびわれ進展による剛性低下等）を評価することを目的とした載荷（静的および動的）試験による方法がある。橋梁全体系としての安全性は、これら両手法によって断面力と耐荷力を評価することによって、照査することが可能となる²⁾。このうち、後者の損傷評価法で特に動的載荷試験による方法については、最近、かなり研究が行われているが、いくつかの問題点があり、完全に実用化のレベルにあるとは言い難い。Douglasら³⁾、Fleschら⁴⁾はRC連続箱桁橋に対して動的試験を行って固有振動数を求め、2次元はりモデルを用いた固有値解

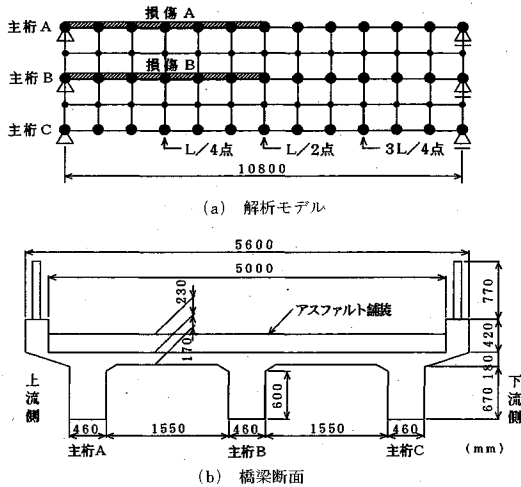
析により求めた振動数の解析値との比較に基づく System Identification method（構造同定法、以下SI法と略記）の適用を行った。モデルを用いた同様の検討がNatkeら⁵⁾、Agbabianら⁶⁾によっても行われている。しかし、対象橋梁の構造形式によっては評価の精度上かなり問題が生じることが考えられ、例えば、損傷橋梁として現在最も多いRC単純T桁橋に関しては、主桁の剛性低下に対する固有振動数の低下率はあまり大きくないことが著者らの研究⁷⁾により確認されている。また、通常SI法において、目的関数に対して与えられるモーダルパラメータ数は解析モデルの自由度よりもかなり少なく、同定結果については、解の唯一性が成立しない⁸⁾ため、目的関数、同定変数等の条件によっては、実際の損傷状態と異なる評価結果を示す場合がある。つまり、実験により評価されるモーダルパラメータに比べて評価すべき同定変数が多すぎると、正確な同定が行えなくなる。したがって、SI法を実用化するためには、いかに目的に合う解を合理的に探索するかということが課題となる。これに対してOretaら⁹⁾は構造物をサブシステムに分割し、ある特定のサブシステムを対象に、時間領域の振動応答特性を用いて同定を行っている。実際の劣化構造物に対して、最初に全体系に関する概略の推定を行ったうえで、この手法を適用すると、かなり効果的な評価が行えると考えられる。この場合、最初に行うべき全体系の推定をいかに精度良く行うかが問題となる。この問題において最も重要なことは、各損傷ごとに最も感度の高いパラメータを抽出し、SI法における目的関数に導入することである。

そこで、本研究では、損傷評価のためのモーダルパラメータとして、固有振動数のほかに減衰特性および位相差を考慮し、損傷パラメータとして剛性のほかに非比例（一般粘性）減衰を考慮することにより、両パラメータ間の関係における感度特性を向上させるとともに、過去

* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

** 正会員 工修 神戸大学助手 工学部建設学科

*** 正会員 工修 神戸市土木局



図一 RC 単純 T 桁橋「旧中井橋」の解析モデル

の実験データを利用して主桁剛性と減衰特性との関係をモデル化することにより、同定変数の数を減少させて、効率的に同定を行うことを考え、その感度解析手法および同定解析手法の定式化を行い、精度の検証を行った。また、各部の損傷に対する各モードパラメータの感度特性を評価し、感度に応じた簡易損傷評価フローを作成し、SI法を適用する前に、解析作業を伴わずに損傷の概略判定を行うことを検討するとともに、動的載荷試験によって得られるモードパラメータの他に静的載荷試験によって得られるたわみ分布や材料試験によって得られる各主桁ごとのコンクリート材料特性、目視検査によるひびわれ状況等の結果を合わせてSI法における同定パラメータの初期値を推定する手法を検討し、SI法を合わせた多段階的な損傷評価フローを作成した。

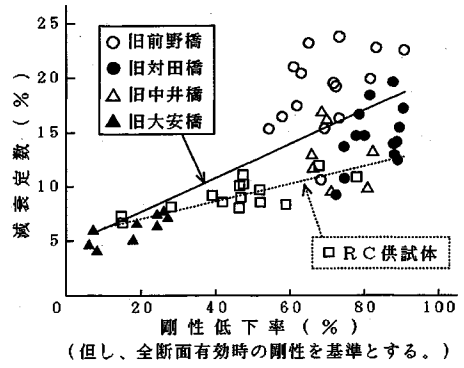
さらに、本手法を実橋に適用して損傷評価を行い、その妥当性を検討した。

2. 非比例減衰を考慮した振動特性に基づく損傷評価法

(1) 非比例減衰を考慮した損傷のモデル化

本研究では、RC単純T桁橋を対象とし、橋梁および損傷のモデル化を考えた。兵庫県「旧中井橋」を例とした解析モデルを図一に示す。損傷を表すパラメータとして剛性低下と減衰定数を取り上げ、損傷パラメータと各種振動特性との関係を調べるため、以下のようなモデル化を行った。

- ① 主桁および床版を曲げ、せん断、ねじり剛性および減衰を考慮したはり要素による格子モデルを作成し、主桁各部の損傷や材料劣化をこれら各要素の剛性および減衰の変化として考えた。
- ② 質量および回転慣性は各部材の節点に集中させる。



図二 剛性低下と減衰定数との関係

③ 支点には回転拘束パネを設け、支承部の摩擦による拘束条件を考慮した。

また、SI法における同定変数は、各主桁剛性、床版配筋方向剛性、荷重分配横桁剛性および支点回転拘束パネ定数である。

また、局部損傷を考慮するため非比例減衰を用いる必要があるが、実際の構造物の一般粘性減衰を評価するのは非常に困難である。そこで、ここでは便宜的に、減衰(係数)マトリックス C は各要素ごとに剛性マトリックス K に比例するものと仮定して、

$$C = \beta K \quad (\beta: \text{内部粘性係数}) \dots \dots \dots (1)$$

と表し、減衰比(減衰定数)

$$\zeta = \frac{1}{2} \beta \omega \quad (\omega: \text{不減衰固有振動数}) \dots \dots \dots (2)$$

の関係から各要素ごとに β の値を求めた。つまり、損傷を受けた部分は剛性が他の部分よりも小さくなるとともに減衰係数 C が大きくなるため、 β の値が異なり、橋梁全体としての比例減衰がもはや成立しない。また、各モードにおける減衰特性を評価する場合、各モードごとにそれぞれ対応する内部粘性係数 β を設定し直す必要がある。式(1)を用いることにより、減衰係数 C は剛性 K の従属変数(あるいはその逆)となり、これを設計変数としたSI法を適用することにより主桁各部における C と K が減衰定数 ζ を介して評価できる。次に、主桁破壊試験²⁾および人工損傷を有するRC試験体¹⁰⁾において測定された剛性低下率と減衰定数との関係を図二に示す。この結果によると、データのばらつきは大きいものの、剛性低下率が大きくなるほど減衰定数が増大する傾向にあり、剛性および減衰係数 C を評価するパラメータとして減衰定数 ζ の測定が、損傷評価において非常に有効となるものと考えられる。

(2) 非比例減衰を考慮したSI法

コンクリート橋に損傷が生じると、剛性低下とともに減衰係数 C が増加する傾向にあり、その状態における橋梁全体系のモードパラメータを評価するためには、

一般粘性減衰を考慮した複素固有値解析が必要となる。また、構造パラメータを同定する基準として、感度係数を利用したSI法があるが、ここでは、複素固有値解析を考慮した感度解析の同定手法について示す。

多自由度系の自由振動に関する運動方程式は一般に、

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

M : 質量マトリックス, C : 減衰係数マトリックス,
 K : 剛性マトリックス, u : 変位ベクトル

となる。その解を、

$$u = \bar{u} \cdot \exp(\mu t) = (x + iy) \exp(\mu t) \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

$$x = r \cdot \cos \phi, \quad y = r \cdot \sin \phi, \quad \phi: \text{位相差}$$

とすると、式(3)は次式に変形される。

$$(\mu^2 M + \mu C + K) \bar{u} \cdot \exp(\mu t) = 0 \dots\dots\dots(5)$$

これが $u \neq 0$ の解を持つためには、次式が成立する必要がある。

$$|\mu^2 M + \mu C + K| = 0 \dots\dots\dots(6)$$

式(6)の解として、複素固有値、実固有モード、位相差は次のように表される。

$$\mu = -\alpha + i\beta \dots\dots\dots(7)$$

$$u = 2 \cdot \exp(-\alpha t) r \cdot \cos(\beta t + \phi) \dots\dots\dots(8)$$

$$\phi = \tan^{-1}(y/x) \dots\dots\dots(9)$$

ここで、

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \alpha: \text{減衰率} (= \omega \zeta),$$

$$\beta: \text{減衰固有振動数} (= \omega \sqrt{1 - \zeta^2})$$

ω : 不減衰固有振動数, ζ : 減衰定数

式(6)から、 $2n$ 個の複素固有値が得られ、それを式(4)に代入することにより、 $2n$ 個の複素固有モードが求まる。ここでは、式(6)の解法として、Fossの方法⁷⁾を用いる。すなわち恒等式、

$$M\dot{u} - M\dot{u} = 0 \dots\dots\dots(10)$$

と式(3)を用いると、式(6)は、

$$\begin{bmatrix} 0 & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(11)$$

と書き直すことができる。また、簡単に表示するために、

$$Az + Bz = 0 \dots\dots\dots(12)$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ u \end{bmatrix} \dots\dots\dots(13)$$

とする。ここで、もとの運動方程式、式(3)の自由度を n とすると、 A, B は $2n \times 2n$ の実対称マトリックス、 z は $2n$ 次元ベクトルである。

次に、式(12)の解を、

$$z = \bar{z} \cdot \exp(\lambda t) \dots\dots\dots(14)$$

とすると、次式が得られる。

$$[\lambda A + B]z = 0 \dots\dots\dots(15)$$

これが、 $z \neq 0$ の解を持つための条件として、次式が得られる。

$$|\lambda A + B| = 0 \dots\dots\dots(16)$$

この解は、 $2n$ 個の固有値となり、 n 個の複素固有値とその複素共役からなっている。

ここで、複素固有値解析による解を、

$$\lambda = \alpha + i\beta \dots\dots\dots(17)$$

$$z = \alpha' + i\beta' \dots\dots\dots(18)$$

とすると、減衰定数 ζ および位相差 ϕ は、

$$\zeta = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \dots\dots\dots(19)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta'}{\alpha'}\right) \dots\dots\dots(20)$$

と表される。

SI法は、一般的に構造物の現況を定量的に把握する目的で、実験から得られる力学的挙動が解析結果と一致するように各種構造パラメータを同定する、いわゆる逆解析手法の一つである。SI法には種々の方法があるが、本研究では、感度解析により構造パラメータと応答との関係における動的感度係数を求め、SLP(逐次線形計画法)¹¹⁾による最小値探索を行う手法を用いた。まず、目的関数は、応答の解析値と測定値との差の2乗和を最小にするよう定義し、複数の種類の応答パラメータを同一目的関数内で取り扱うため、応答の測定値で無次元化を行い、次式のように表した。

$$F = \sum_p \left(W_1 \left(\frac{\zeta_p}{\zeta_p^m} - 1 \right)^2 + \sum_{k=1}^n W_2 \left(\frac{\phi_{pk}}{\phi_{pk}^m} - 1 \right)^2 \right) \rightarrow \min \dots\dots\dots(21)$$

ここで、 ζ_p, ζ_p^m : 減衰定数の解析値と実測値、

ϕ_{pk}, ϕ_{pk}^m : 位相差の解析値と実測値、 p : 振動次数、

n : モードの誤差評価に用いる測点数、 W_1, W_2 は減衰定数と位相差についての重みであり、ここでは、両方の項の相対比が同一となるよう、 $W_1 = 1.0, W_2 = 1/n$ とした。

式(21)を設計変数 $k_i (i = 1, 2, 3, \dots, l)$ で偏微分すると、

$$\frac{\partial F}{\partial k_i} = 2 \sum_p \left\{ W_1 \left(\frac{\zeta_p}{\zeta_p^m} - 1 \right) \frac{1}{\zeta_p^m} \frac{\partial \zeta_p}{\partial k_i} + \sum_{k=1}^n W_2 \left(\frac{\phi_{pk}}{\phi_{pk}^m} - 1 \right) \frac{1}{\phi_{pk}^m} \frac{\partial \phi_{pk}}{\partial k_i} \right\} \dots\dots\dots(22)$$

一方、Fossの方法によって変形された運動方程式、

$$Bz = \lambda Az \dots\dots\dots(23)$$

において、設計変数ベクトル k_i が δk_i だけ変化するとき、固有値、固有ベクトルはそれぞれ $\delta \lambda, \delta z$ だけ変化

するものとし、高次項を無視して整理すると、

$$\frac{\partial B}{\partial k_i} z \delta k_i + B \delta z = \delta \lambda A z + \lambda \frac{\partial A}{\partial k_i} z \delta k_i + \lambda A \delta z \dots (24)$$

$$(B - \lambda A) \delta z = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial k_i} - \lambda \frac{\partial A}{\partial k_i} \right\} z \delta k_i + \delta \lambda A z \dots (25)$$

を得る。上式に左より z^T をかけ、

$$z^T A z = 1 \dots (26)$$

となるように z を定め、整理すると、

$$\delta \lambda = z^T \left\{ \frac{\partial B}{\partial k_i} - \lambda \frac{\partial A}{\partial k_i} \right\} z \delta k_i \dots (27)$$

となる。また、式 (26) より、

$$2z^T A \delta z + z^T \frac{\partial A}{\partial k_i} z \delta k_i = 0 \dots (28)$$

の関係が得られる。

いま、 p 番目のベクトルを z_p 、その変化量を δz_p とすると、

$$\delta z_p = \sum_j a_{pj} z_j \dots (29)$$

ここで、 p, j : 対象とする振動次数

と書くことができる。式 (29) と式 (27) を式 (25) に代入し、左より z_q^T ($q \neq p$) を乗じて整理すると、

$$z_q^T (B - \lambda_p A) (\sum_j a_{pj} z_j) = - z_q^T \left\{ \frac{\partial B}{\partial k_i} - \lambda_p \frac{\partial A}{\partial k_i} \right\} z_p \delta k_i \dots (30)$$

$$a_{pq} = - \frac{1}{\lambda_q - \lambda_p} z_q^T \left\{ \frac{\partial B}{\partial k_i} - \lambda_p \frac{\partial A}{\partial k_i} \right\} z_p \delta k_i \dots (31)$$

また、 $q=p$ のときは式 (27) を用いて、

$$a_{pp} = - \frac{1}{2} z_p^T \frac{\partial A}{\partial k_i} z_p \delta k_i \dots (32)$$

を得る。式 (31)、式 (32) より a_{pq} と a_{pp} が求められると、式 (25) より z_p の変動 δz_p を求めることができる。よって、これらを式 (27)、式 (31) に代入すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \lambda_p}{\partial k_i} = z_q^T \left\{ \frac{\partial B}{\partial k_i} - \lambda_p \frac{\partial A}{\partial k_i} \right\} z_p \dots (33)$$

$$\frac{\partial z_p}{\partial k_i} = \sum_q \left\{ - \frac{1}{\lambda_q - \lambda_p} z_q^T \left(\frac{\partial B}{\partial k_i} - \lambda_p \frac{\partial A}{\partial k_i} \right) z_p \right\} z_q \dots (34)$$

ここで、

$$\frac{\partial \lambda_p}{\partial k_i} = \alpha_{xi} + \beta_{xi} i \dots (35)$$

$$\frac{\partial z_p}{\partial k_i} = \alpha_{zi} + \beta_{zi} i \dots (36)$$

とすると、 ζ_p, ϕ_p の一次感度は、

$$\frac{\partial \zeta_p}{\partial k_i} = \frac{\alpha_{xi}}{\sqrt{\alpha_{xi}^2 + \beta_{xi}^2}} \dots (37)$$

$$\frac{\partial \phi_p}{\partial k_i} = \tan^{-1} \left(\frac{\beta_{xi}}{\alpha_{xi}} \right) \dots (38)$$

が得られる。ただし、 $q=p$ のときは0としている。

ここで、 A, B は式 (13) のように表されるので、これらの一次感度は、

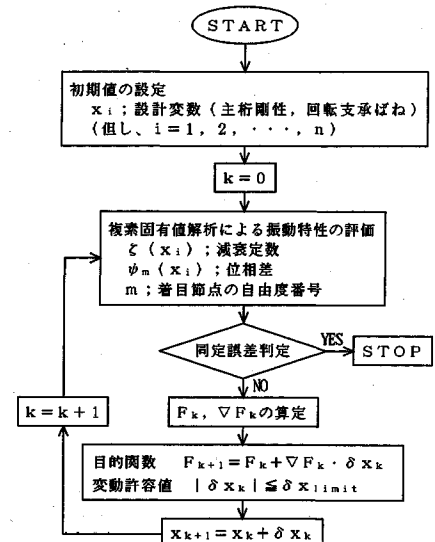


図-3 SLP のフロー

$$\frac{\partial A}{\partial k_i} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial M}{\partial k_i} \\ \frac{\partial M}{\partial k_i} & \frac{\partial C}{\partial k_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial C}{\partial k_i} \end{bmatrix} \dots (39)$$

$$\frac{\partial B}{\partial k_i} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial M}{\partial k_i} & 0 \\ 0 & \frac{\partial K}{\partial k_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial K}{\partial k_i} \end{bmatrix} \dots (40)$$

ただし、

$$\frac{\partial C}{\partial k_i} = \frac{\partial \beta}{\partial k_i} K + \beta \frac{\partial K}{\partial k_i} \dots (41)$$

ここで、構造パラメータ (K) の変動許容値 (μ -ブリミット) 内で β = 一定とすると、次式が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial k_i} = \beta \frac{\partial K}{\partial k_i} \dots (42)$$

また、式 (1) より減衰係数 C は剛性 K の従属変数であることから、結局 λ_p, ϕ_p の一次感度は剛性 K の関数として表すことが可能となる。

以上の関係式を用いて、図-3 に示した SLP のフローにしたがって構造パラメータの同定を行う。まず、各構造パラメータの初期値を設定し、複素固有値解析によりモーダルパラメータを求め、式 (33)、式 (34) を用いて目的関数の線形近似を行い、最小値に近づけていく。

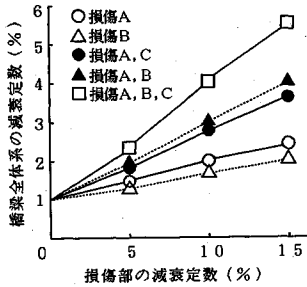
ただし、この線形近似は実際の目的関数値からの誤差が大きくなるように、構造パラメータの変動に制限(変動許容値もしくは μ -ブリミットと称する)を設け、その範囲内において行う。変動許容値を超えた場合、改めて複素固有値解析を行い、感度を求め直して探索を続行する。以上の繰り返し探索を行った後、目的関数の真値が許容誤差範囲内になった時点で同定を終了する。

ここで、減衰係数マトリックス C は、(1) 節に示し

表一 SI法の解析精度(主桁剛性の同定)

	理論値	初期値	同定値
主桁A	1.50	1.80	1.60 (1.07)
主桁B	1.50	1.80	1.60 (1.07)
主桁C	1.00	1.35	1.00 (1.00)

単位: ($\times 10^9 \text{N}\cdot\text{m}^2$)
()内数値は同定値/理論値



図一四 損傷部の減衰定数と橋梁全体系の減衰定数との関係

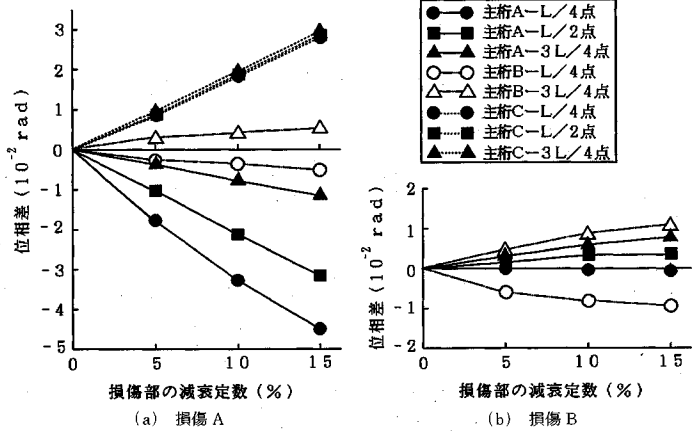
たように、各要素ごとに比例減衰を仮定しているが、SLPを行う場合、比例係数 β の変化量があり大きくなり程度の変動許容値を設定する必要がある。つまり、 β は変動許容値の範囲内では一定値とみなす。

(3) 解析精度に関する検討

図一に示す「旧中井橋」の解析モデルにSI法を適用し、解析精度の検討を行った。損傷としては、図一2の関係を利用して、主桁A、主桁Bの剛性低下率15% (減衰定数7%)、主桁Cの剛性低下率45% (減衰定数11%)とし、複素固有値解析により曲げ1次、ねじれ1次モードの減衰定数、位相差を求め、同定計算を行った。表一に各主桁の曲げ剛性の同定結果を示す。この結果より、同定の誤差は0~7%と小さくなっていることがわかる。しかし、初期値誤差を3割よりも大きくすると、同定解が異なる極値に停留することが確認されたので、初期値を少なくとも3割程度以内の誤差で設定する必要があるといえる。

3. 非比例減衰を考慮した動的感度解析の有効性

前述したように、モーダルパラメータを利用してコンクリート橋の損傷を評価する場合、最も重要なことは、各損傷ごとに最も感度の高いモーダルパラメータを抽出することである。そこで、ここでは、損傷パラメータとして剛性低下の他に減衰定数の変化、モーダルパラメータとして減衰定数、位相差を取り上げ、複素固有値解析によるRC橋のパラメータ計算を実施し、両パラメータ間の感度を調べ、損傷パラメータとしての有効性を検討した。



図一五 損傷部の減衰定数と位相差との関係

(1) 解析モデル

解析の対象は、図一に示した「旧中井橋」とし、部分的な損傷を仮定し、損傷パラメータを変化させて複素固有値解析を行った。損傷パラメータとしては、破壊試験より得られた剛性低下と減衰定数の関係(図一2参照)を利用して、損傷A、損傷Bにおける剛性低下率0~65%とそれに対応する減衰定数5~15%の範囲内での変化として考慮した。

(2) 減衰定数

図一四は各損傷部の減衰定数と橋梁全体系の曲げ1次モードの減衰特性との関係を示したものである。この結果から、損傷部A、損傷部Bの減衰定数の変化は橋梁全体系の減衰定数の変化に対してほぼ同一の感度を有し、さらにこれらの感度は線形であり、複数の損傷が生じた場合には、個々の感度の線形和として表すことが可能である。これに対して、ねじれ1次モードに関する結果では、モードの節となる損傷部Bの減衰定数の変化は、橋梁全体系の減衰特性にほとんど影響を及ぼさないため、曲げ1次、ねじれ1次の両方の振動特性を用いると、各主桁ごとの損傷位置を推定することが可能である。

(3) 位相差

図一五は各損傷部の減衰定数と橋梁各部の位相差との関係を示したものである。ここでの位相差は、曲げ1次モードについては主桁BのL/2点の位相を基準として求めたもの、ねじれ1次モードについては主桁BのL/4、L/2、3L/4点のそれぞれの点を基準としたものである。これらの結果から、損傷を与えた主桁の位相差が最も大きく変化していることがわかる。さらに、これらの損傷部の感度はほぼ線形であり、複数の損傷に対して、個々の感度の線形和として表すことができることがわかる。

(4) モーダルパラメータの感度特性における有効性 動的載荷試験結果にモーダル解析¹²⁾を適用することに

よりモーダルパラメータとして、各次モードに対する固有振動数、振動モード、減衰定数、位相差が求められる。これらのうち、固有振動数、減衰定数は損傷の程度と位置の両方の推定に対して有効であり、振動モードと位相差は損傷位置の推定に対して有効なパラメータである。しかし、固有振動数は損傷に対して感度が低い⁷⁾ため、損傷程度が大きく、かなり高精度で測定が行える場合にのみ有効であると考えられる。これに対して、振動モードの変化は損傷位置に対して敏感であり^{13),14)}、橋梁全体として、損傷状態がアンバランスである場合、損傷位置の推定にかなり有効であるといえる。したがって、非比例減衰を考慮しない従来のSI法では、損傷位置の推定については比較的精度が高いと考えられるが、損傷程度の推定については精度上問題があるといえる。一方、減衰定数 ζ は、一般に、

$$\zeta = aC/\sqrt{K}, \quad a: \text{比例定数} \dots \dots \dots (43)$$

のように、減衰係数 C と剛性 K の関数として表され、損傷に対応した剛性低下と減衰係数増加の両方の影響により、増加の傾向を示すため、剛性低下の影響のみに依存する固有振動数よりも損傷に対する感度が高いといえる。また、これに対し、損傷位置推定のための位相差は、振動モードに比べて、感度が高いとは言えないため、損傷位置を正確に推定するためには、位相差、振動モードの両方を用いることが望ましいといえる。

以上のことから、SI法で対象とするモーダルパラメータは、固有振動数、振動モード、減衰定数、位相差のうち、対象橋梁ごとに感度の高いモード次数のパラメータを抽出して、目的関数を作成する必要がある。全てのパラメータを包含した目的関数の一般式は次式で表される。

$$F = \sum_p \left\{ W_1 \left(\frac{\mu_p}{\mu_p^m} - 1 \right)^2 + \sum_{k=1}^n W_2 \left(\frac{z_{pk}}{z_{pk}^m} - 1 \right)^2 + W_1 \left(\frac{\zeta_p}{\zeta_p^m} - 1 \right)^2 + \sum_{k=1}^n W_2 \left(\frac{\phi_{pk}}{\phi_{pk}^m} - 1 \right)^2 \right\} \dots \dots \dots (44)$$

ここで、 p : 振動次数、 n : 誤差評価を行う測点数、 μ_p, μ_p^m : 固有値の解析値および実験値、 z_p, z_p^m : 振動モードの解析値および実験値、 ζ_p, ζ_p^m : 減衰定数の解析値および実験値、 ϕ_p, ϕ_p^m : 位相差の解析値および実験値、 W_1, W_2 : 重み、ここでは $W_1=1.0, W_2=1/n$ とする。ただし、固有値、振動モードの感度については、従来の手法⁷⁾により求めることができる。

(5) 動的感度解析を利用した損傷評価フロー

以上で検討した各種モーダルパラメータの損傷に対する感度特性を利用して、図-6に示すフローにしたがって、損傷位置と損傷程度を推定することができる。

まず、対象橋梁に対して、動的載荷試験を行い、モー

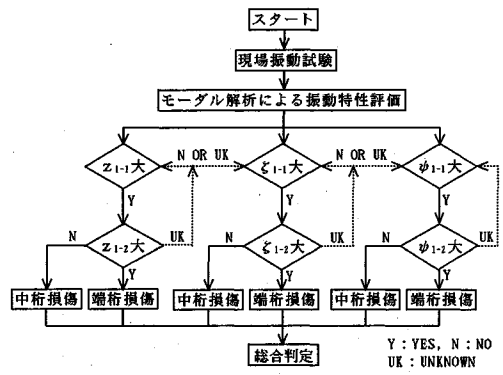


図-6 振動特性を利用した損傷の簡易評価フロー

ダル解析を適用してモーダルパラメータを求める。モーダルパラメータとしては、固有値解析で得られる固有振動モード z_{1-1} (曲げ1次モード)、 z_{1-2} (ねじれ1次モード)、および複素固有値解析で得られる減衰定数 ζ_{1-1} 、 ζ_{1-2} 、位相差 ϕ_{1-1} 、 ϕ_{1-2} とし、一次レベルの判定として z_{1-1} 、 ζ_{1-1} 、 ϕ_{1-1} のそれぞれの大小で損傷程度を調べる。次に二次レベルの判定として、 z_{1-2} 、 ζ_{1-2} 、 ϕ_{1-2} の大小で外桁の損傷か中桁の損傷かを特定できる。これらの判定は、各種モーダルパラメータごとに独立して行うことができ、最終的には個々の判定結果を比較検討して総合的に判断する必要がある。さらに、損傷の詳細調査として、これらのモーダルパラメータを利用したSI法を適用し、損傷パラメータとしての各桁の剛性および減衰定数を同定することにより、複数の損傷の位置と程度を推定することができる。

(6) 多段階アプローチによる損傷評価フロー

SI法は、前述したように、一般的に解の唯一性が保証されないため、正確な評価を行うためには、予め同定解にできるだけ近い初期値を推定することが必要条件となる。そのためには、SI法に直接必要な動的載荷試験の他に、目視検査、静的載荷試験、材料試験等を行い、それらの測定結果を利用することが有効であると考えられる。つまり、SI法はそれ自体では、適用性に問題が生じる場合があるが、種々の試験による評価と結合させて、多段階的に処理を行い、総合的に判断することにより、かなり高精度で合理的な評価を行うことができる。図-7に初期値設定を含んだ多段階損傷評価フローを示す。まず対象橋梁に対して、目視検査によるジャンカ等の施工不良やひびわれ、遊離石灰、コンクリート剝離等の損傷状態、コア供試体採取による材料試験によって、コンクリート強度、弾性係数、中性化深さ等の材料特性を評価するとともに、非破壊載荷試験として、静的、動的載荷試験を行い、橋梁全体系としての構造応答特性を評価する。これらの結果を利用して、例えば目視検査から各主桁の有効断面二次モーメントを推定し、非破壊試

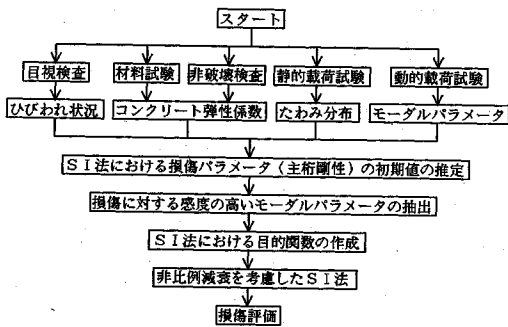


図-7 各種試験を併用した多段階損傷評価フロー

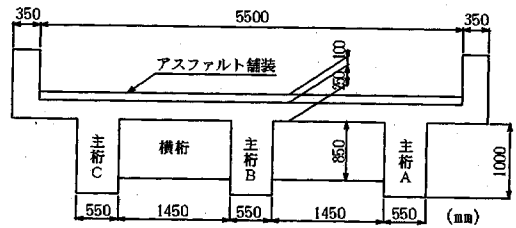


図-8 「旧桜谷橋」の断面図

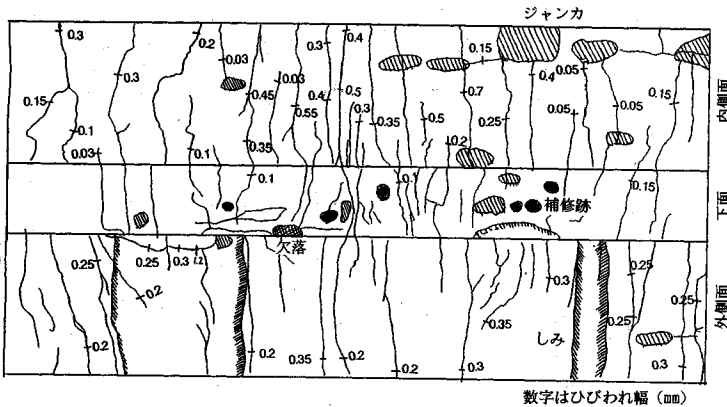


図-9 目視検査によるひびわれ状況の結果の一例(主桁C)

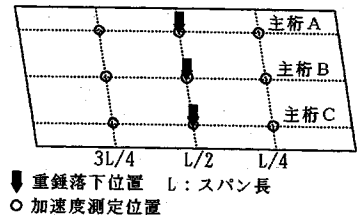


図-10 動的載荷試験の概要

験, 材料試験から評価される各主桁コンクリートの弾性係数の両者から各主桁剛性の推定を行う。一方, 静的載荷試験によって得られたたわみ分布については, 支承の摩擦による回転拘束条件や舗装, 高欄, 地覆等の剛性に及ぼす影響が含まれるため, その結果から直接, 各主桁ごとの損傷を評価することは困難であるが, 主桁間の相対的な比較により損傷の場所の推定が可能であると思われる。また, 動的載荷試験からは, モーダル解析により評価された減衰定数から橋梁の全体的な剛性低下の程度を推定することが可能であると思われる。以上の種々の試験による測定結果より総合的に判断して初期値を設定できる。

4. 実橋に対する損傷評価法の適用

(1) 試験対象橋梁の概要

試験対象とした「旧桜谷橋」¹⁵⁾は, 試験時橋齢 41 年(昭和 26 年度架設), 3 径間 3 主桁で荷重分配横桁を有する RC 単純 T 桁橋 (1 スパンの橋長 13.1 m, 幅員 5.5 m) である。本橋の断面図を図-8 に示す。本橋は河川改修にともない新橋への架け替えが決定しているため, 取り壊しが予定されていた。試験は左岸側のスパンについて行った。図-9 に目視検査による主桁のひびわれ状況の代表例を示す。本橋の損傷状態については, 主桁全体に

かなり多くの曲げひびわれが見られ, ひびわれ幅は最大 1.2 mm 程度であった。また, せん断ひびわれ, 鉄筋の腐食によるひびわれも所々見られた。また, 排水管が閉塞していたため, 両端桁の外側の面に広範囲に漏水跡(しみ)が見られた。また, 全体的に施工不良によるジャンカ, 空洞が見られ, 特に主桁下面のコンクリートの回り込み不良が見られた。

(2) 試験の概要

まず, 静的載荷試験¹⁶⁾として, 軸重既知の試験車 (20 tf トラック) を各主桁に最も不利になるよう, 試験車後車軸の中心が各主桁中心線にくるように載荷し, 各主桁の $L/4$, $L/2$, $3L/4$ 点 (L : スパン長) でのたわみを測定した。載荷回数は 3 回とし, 各測定値の平均を求めた。また, 動的載荷試験¹⁷⁾として, 重量 2942.0 N の重錘をクレーン車を用いて約 0.7 m の高さからゴム板を介して路面上に落下させ, 重錘に設置した加速度計から入力加速度を, 各主桁の $L/4$, $L/2$, $3L/4$ 点に設置した加速度計から応答加速度を測定し, 伝達関数を求めた後, 実験モーダル解析の手法¹²⁾により, モーダルパラメータを同定した。図-10 に重錘落下位置と応答加速度測定位置を示す。基本的には一点加振法(加振点が 1 点で応答加速度測定点が多点)¹²⁾を用いたが, 加振点を数カ所移動させて試験を行うことにより曲げ, ねじれの振動

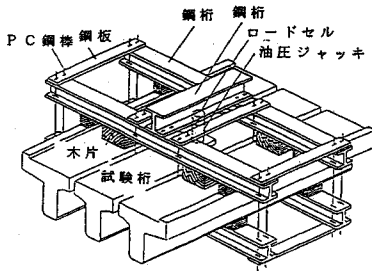


図-11 主桁破壊試験の概要

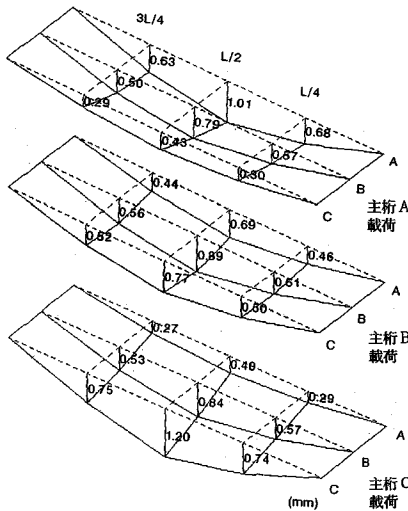


図-12 たわみ分布

表-2 振動数および減衰定数の測定結果

モード次数	振動数(Hz)	減衰定数(%)
曲げ1次	10.33(7.31)	9.56
ねじれ1次	15.14(11.98)	6.76

()内数値は全断面有効とした場合の理論値

表-3 振動モードと位相の測定結果

モード次数	主桁	振動モード L/2点	位相(rad) L/2点
曲げ1次	主桁A	0.802	-0.772
	主桁B	0.898	-0.783
	主桁C	1.000	-0.794
ねじれ1次	主桁A	0.956	-0.758
	主桁B	0.002	—
	主桁C	1.000	-0.941

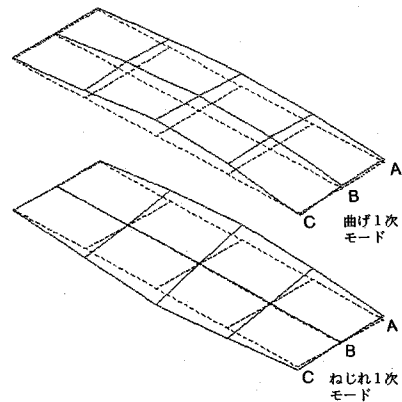


図-13 振動モード図

モードを卓越させた。次に、中桁の破壊試験として、図-11に示すように試験対象桁(中桁)を床版部で縁切りして単独桁として独立させ、載荷桁を用いて油圧ジャッキにより中央集中載荷することにより行った。また、破壊の進行過程における振動特性の変化を調べるため、適当な荷重段階ごとに載荷・除荷を繰り返し、各ステップごとに振動試験を行った。さらに、主桁各部位のウェブコンクリート上部で、ひびわれやジャンカ等が無い箇所からコンクリートコア供試体採取し、材料強度試験を行った。

(3) 試験結果

図-12に静的載荷試験によって得られたたわみ分布の測定結果を示す。この結果によると、主桁C載荷時のたわみが主桁A載荷時のたわみよりも大きく、また、主桁B載荷時の主桁Cのたわみが主桁Aのたわみよりも大きくなっていることから、明らかに主桁Cの損傷劣化の程度が主桁Aよりも大きいということが判定できる。表-2に動的載荷試験における測定結果にモデル解析を適用して同定された固有振動数および減衰定数の結果を、表-3に振動モードおよび位相の結果を、また、図-13に対象とした振動モード図を示す。固有振動数の結果をみると、全断面有効とした場合の理論値に

比べて、実験値は大きくなっていることがわかる。通常、損傷による剛性低下が生じた場合、固有振動数の低下が起こるが、本橋の場合には、支承の回転拘束の影響や舗装、地覆の主桁剛性に及ぼす影響等により、これらの影響を考慮しない理論値よりもむしろ大きくなっているものと考えられる。曲げ1次モードの減衰定数をみると、9.56%とやや大きくなっており、図-2に示した実橋においてこれまでに測定された減衰定数の値と比較して、かなり大きな剛性低下が生じていることが考えられる。また、固有振動モードの結果によると、主桁Cのモード振幅が主桁Aよりも大きく、また、位相のずれが生じていることから、相対的に主桁Cの方が主桁Aよりも損傷劣化の程度が大きくなっていると考えられる。

表-4に主桁のウェブコンクリート上部から採取したコア供試体の材料試験結果を示す。橋梁全体の平均値を見ると、コンクリート圧縮強度が15.42 MPa、弾性係数が15.49 GPaとかなり低くなっていることがわかる。したがって、主桁剛性もこの影響によりかなり小さくなっていることが考えられる。また、主桁間で比較してみると、主桁Aのコンクリートの品質が主桁B、Cに比べて高くなっている。一方、目視検査の結果から、ひ

表-4 コンクリートの材料試験結果

		主桁A	主桁B	主桁C	橋梁全体
圧縮強度 (MPa)	平均値	16.72	14.17	15.26	15.42
	標準偏差	3.28	2.67	2.44	2.99
弾性係数 (GPa)	平均値	17.95	14.02	14.22	15.49
	標準偏差	2.06	2.06	2.45	2.84

びわれ状況については各主桁間で大きな相違は認められなかったため、有効断面二次モーメントはほぼ同程度と考えられ、主桁間での剛性の相違に及ぼす因子としては、コンクリートの弾性係数が支配的であると考えられる。

次に、主桁破壊試験時の各荷重ステップで行った動的載荷試験の結果にモーダル解析を適用して得られた固有振動数、減衰定数の測定結果にSI法を適用し、主桁の曲げ剛性、支点の回転拘束バネ定数を変数として同定し、全断面有効とした剛性からの低下率を求め、これと減衰定数との関係を整理して図-14に示す。この結果から、「旧榎谷橋」の値は他の橋梁と比較して定性的に傾向が一致しているといえる。しかし、減衰定数が大きい領域におけるばらつきが大きくなっており、今後、支点の回転摩擦減衰や舗装の減衰に及ぼす影響等を考慮してばらつきを減少させる必要があるとともに、ばらつきを考慮した損傷評価を行う必要があるといえる。

(4) 減衰を考慮した損傷パラメータの同定

次に、動的載荷試験から得られたモーダルパラメータにSI法を適用し、「旧榎谷橋」の解析モデルにおける損傷パラメータを同定する。同定パラメータとしては、各主桁剛性、床版配力筋方向剛性、端横桁剛性、支間中央横桁剛性と支点回転拘束バネ定数とし、モーダルパラメータとして曲げ1次の固有振動数と振動モード、曲げ1次、ねじれ1次の減衰定数と位相差を用いた。表-5に同定結果を示す。主桁の曲げ剛性の初期値としては、(3)節で示した各種試験結果をもとに決定した。また、設計値については、コンクリート全断面有効とし、弾性係数を20.58 GPaとした場合のものである。表-5の同定結果によると、主桁Aの剛性が他の主桁に比べて大きくなっていることがわかる。これは材料試験、静的載荷試験結果から推定される主桁剛性の初期値と定性的な傾向が合う方向への同定値の探索が行われていることを示しており、SI法を各種試験結果に基づく初期値推定と結びつけることにより、妥当な解が比較的容易に求められるということがいえる。また、解の妥当性の確認のため、以上の同定結果(表中の減衰を考慮した同定値)を初期値として、曲げ1次の固有振動数、振動モードのみを用いたSIを再度行った結果、表-5に同定値(減衰無視)として併記するように、同程度の値で解が停留し、全ての試験データに関して矛盾のない評価となっており、本手法の妥当性が認められた。

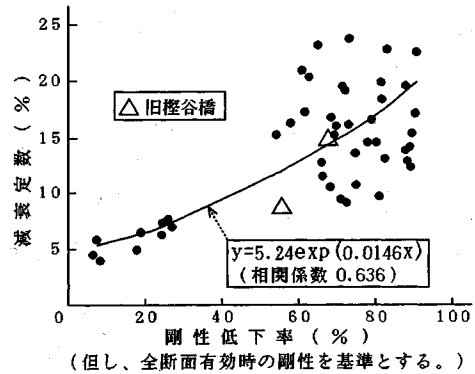


図-14 主桁破壊試験時の減衰特性

表-5 SI法による主桁剛性の同定結果

同定パラメータ	設計値	初期値	同定値 (減衰考慮)	同定値 (減衰無視)
主桁A剛性	3.39	2.55	2.39(10.0)	2.38
主桁B剛性	3.20	1.96	1.88(11.7)	1.86
主桁C剛性	3.39	2.06	1.92(12.0)	1.88
端横桁剛性	1.08	0.65	0.60	—
横桁剛性	1.26	0.76	0.78	—

単位: $\times 10^9 \text{N}\cdot\text{m}^2$, ただし、()内数値は減衰定数(%)

5. あとがき

本研究は、コンクリート橋の損傷劣化部を非比例減衰を考慮してモデル化し、動的載荷試験から得られるモーダルパラメータを利用したSI法の検討を行い、より高精度な損傷評価法の確立を目指したものである。得られた結論を以下にまとめる。

(1) 損傷評価のためのモーダルパラメータとして固有振動数、振動モードの他に減衰定数、位相差を考慮し、損傷パラメータとして、主桁の曲げ剛性の他に減衰定数を取り上げて同定するSI法の検討を行い、解析の妥当性を確認した。これにより、従来よりも多いパラメータの中からより感度の高いパラメータを抽出することによる高精度で効率的な損傷評価が可能であると考えられる。

(2) 非比例減衰を考慮した動的感度解析を行った結果、曲げ1次とねじれ1次の減衰定数を用いることにより、損傷の位置と程度を、曲げ1次の位相差を用いることにより、損傷位置を推定することが可能であることを確認した。また、各モーダルパラメータの感度特性の相違を利用することにより、損傷位置の簡易推定フローを作成し、SI法を適用する前に、解析作業を伴わず損傷の概略判定を行うことが可能となった。

(3) 動的載荷試験によって得られるモーダルパラメータの他に静的載荷試験によって得られるたわみ分布や非破壊検査、材料試験によって得られる各主桁ごとのコンクリート材料特性の結果を合わせてSI法における

損傷パラメータの初期値の推定を行うことにより、SI法における収束性、精度の向上を図れることを明らかにした。

(4) 本研究で検討した損傷評価法の実橋への適用を試みた結果、たわみ分布、コンクリート材料特性、ひびわれ状況等を用いてSI法における損傷パラメータの初期値を比較的容易に推定することができること、また、その初期値を用いて最終的に同定された損傷パラメータの特性は初期値の特性と定性的に一致しており、本手法によると、一般に解の唯一性が保証されないSI法が効率的かつ高精度で行えることを確認した。

謝辞：本研究を行うにあたって貴重なご助言を頂きました神戸大学高田至郎教授、実験および解析を行うにあたって多大なるご協力を頂きました兵庫県土木部の方々、神戸大学小林秀憲技官、(株)栗本鐵工所の串田守可氏、(株)ニチゾウテックの白倉篤志氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書改訂小委員会：コンクリート標準示方書（平成3年版）改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向，コンクリートライブラリー70，1991.7.
- 2) 宮本文穂・森川英典・石田宗弘：統計データに基づく不確定性を考慮した既存コンクリート橋の安全性評価，土木学会論文集，No.472/V-20，pp.49～58，1993.8.
- 3) Douglas, B.M. and Reid, W.H. : Dynamic Tests and System Identification of Bridges, Proc. of ASCE, Vol.108, No.ST 10, pp.2295～2312, 1982.10.
- 4) Flesch, R.G. and Kernbichler, K. : Bridge Inspection by Dynamic Tests and Calculations Dynamic Investigations of Lavant Bridge, Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches, Friedr. Vieweg &

- Sohn, pp.433～459, 1988.
 - 5) Natka, H.G. and Yao, J.T.P. : System Identification Approaches in Structural Safety Evaluation, Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches, Friedr. Vieweg & Sohn, pp.460～473, 1988.
 - 6) Agbajian, M.S., Masri, S.F., Traina, M.I. and Waqfi, O. : Detection of Structural Changes in a Bridge Model, Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, pp.133～143, 1990.
 - 7) 宮本文穂・森川英典・山本昌孝：既存コンクリート橋の損傷に対応する動的挙動の感度特性と損傷評価への適用，土木学会論文集，No.442/V-16，pp.61～70，1992.2.
 - 8) 中桐 滋・鈴木敏子：実固有値問題の有限要素法によるシフト・シンセシス，日本機械学会論文誌（C編），Vol.53, No.496, 1987.12.
 - 9) Oreta, W.C. and Tanabe, T. : Localized Identification of Structures by Kalman Filter, Proc. of JSCE, No.459/I-22, 1993.1.
 - 10) 宮本文穂：道路橋鉄筋コンクリート床版の力学的特性とその耐用性判定に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1984.9.
 - 11) 土木学会：構造システムの最適化—理論と応用，構造工学シリーズ1，1988.
 - 12) Ewins, D.J. : Modal Testing—Theory and Practice, Research Studies Press, 1984.
 - 13) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性，土木学会論文報告集，第380号，pp.355～364，1987.4.
 - 14) 宮本文穂・森川英典・久保田裕二：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13, No.2, 1991.6.
 - 15) (財)建設工学研究所：県道411号線「旧壱谷橋」耐用性診断試験報告書，1993.3.
 - 16) 宮本文穂・西村 昭・堀 浩之・山本恭義：コンクリート橋の安全性評価とその検証法の開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.3, 1988.6.
- (1993.6.28 受付)

DAMAGE EVALUATION OF CONCRETE BRIDGES BASED ON MODAL PARAMETERS CONSIDERING NON-PROPORTIONAL DAMPING

Ayaho MIYAMOTO, Hidenori MORIKAWA and Yuji KUBOTA

This paper describes an application of the System Identification (SI) method to damage detection for deteriorated concrete bridges based on modal parameters estimated from dynamic loading tests. In this method, a new idea for a damage model considering the non-proportional damping as a parameter of the damping ratio which can be coupled with the decrease of stiffness by a statistical analysis of accumulated data for existing bridges, was studied. Furthermore, a method for estimation of initial values for variables to be identified in the SI method is proposed and the feasibility of this method is verified based on an actual bridge data.