

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

宮本文穂*・森川英典**・山本昌孝***

既存コンクリート橋の動的挙動の変化を利用した損傷評価法に着目し、減衰を含む振動特性の損傷パラメータに対する感度特性を評価する手法として区分モード合成法を利用した複素固有値解析法、また、振動特性から損傷パラメータを固定するSI(構造固定)法について検討を行い、人工損傷を導入した実橋への適用を試みた。さらに、各振動特性の感度の相違を利用した簡易法を含む多段階的な損傷評価法の手順を示した。

Keywords: sensitivity analysis, dynamic behavior, damage detection, modal analysis, system identification, component mode synthesis

1. まえがき

近年、道路網の整備に伴い、自動車交通量の増大、車両の大型化等、当初予測し得なかった環境の変化が生じ、道路施設の一層の整備拡充が要求されるとともに、既存施設の維持管理の問題が注目されつつある。特に、道路網の根幹となる橋梁については、これらの過酷な環境下で、架設後数十年を経て老朽化が進行しつつあることや、近年、問題化したアルカリ骨材反応や塩害によるコンクリートの早期劣化により、早急な維持・管理対策が求められている。

このような状況に対し、橋梁の維持・管理の核となる損傷評価に基づく耐用性診断、余寿命評価および補修・補強等の処置の策定にいたるプロセスについては、目視検査等の結果を基に、主として橋梁技術者の判断で行われる場合が多く、高度な専門知識や豊富な経験を要するとともに、主観的な不確定性による影響の入る余地が大きい。今後、さらに増加する劣化橋梁を合理的に維持・管理していくためには橋梁の損傷をできるだけ客観的に評価する手法を確立し、耐用性診断のための基準を設けることが必要である。そのための一手法として、橋梁の振動特性変化を利用した損傷評価法が注目されつつある^{1)~7)}。Agbalianら³⁾はアルミニウム製の格子桁模型を用い、種々の位置に損傷を導入することによる固有振動数の変化を測定し、2次以上の振動モードにおいてかなり大きな固有振動数の変化を確認した。また、Biswasら⁴⁾は合成桁の模型および実橋において、鋼桁部の損傷導入による振動特性の変化を調べた。その結果、模型においては3次モードの固有振動数と振動モードに大きな

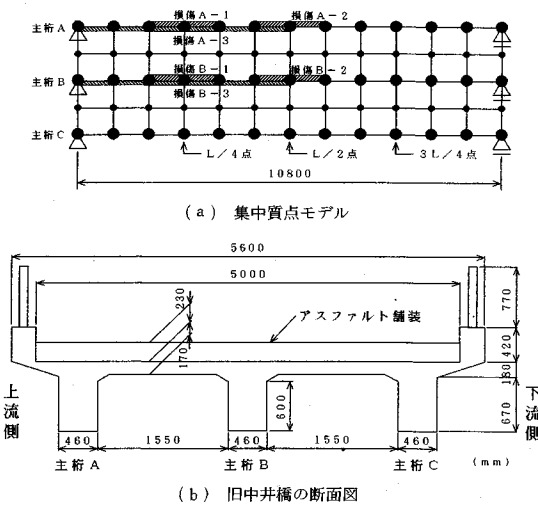
変化が認められたが、実橋においては、顕著な変化は見られなかったことを報告している。Katoら⁵⁾はPC橋で破壊試験時の振動特性を測定し、PC鋼線が塑性域に達したのちに、特徴的な変化を示すことを明らかにした。Fleschら⁶⁾はPC連続桁橋において重量載荷による損傷進行が振動特性に及ぼす影響を調べ、System Identification (SI)法により剛性低下を評価した。しかし、振動特性の変化が小さく、評価結果の妥当性の確認には至っていない。このように、固有振動数および振動モードの損傷評価における有効性は供試体レベルでは認められているものの、実橋については、橋梁形式により結果が異なること、また、人工損傷導入による試験例が少ないことから、現状での損傷評価への適用は難しい。また、固有振動数、振動モード以外の振動特性として減衰特性があり、従来、模型桁や実橋における評価^{6)~8)}において損傷が大きい場合の有効性が認められているものの、測定データのばらつきが大きいことにより、その特性は明確化されていない。

そこで、本研究では、損傷評価のための振動パラメータとして、固有振動数の他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他に一般粘性減衰を考慮した複素固有値解析を区分モード合成法を適用して効率的に行い、橋梁各部の損傷による各振動特性の変化を解析的に検討した。また、より詳細な損傷評価を行うため、固有振動数および振動モードに関する動的感度を利用したSI法を適用して損傷パラメータを同定する手法を検討し、既存RC橋において人工損傷導入による振動特性変化を測定することにより本手法の適用を試みた。さらに、橋梁各部の損傷に対する各振動特性の感度を実橋モデルのパラメータ解析により評価し、感度に応じた効率的な損傷評価フローの作成を試み、SI法と併用することによる多面的かつ多段階的な損傷評価法を検討した。

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

** 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 阪神高速道路公団神戸建設部



図一1 RC単純T桁橋(実橋)の解析モデル

2. 橋梁の損傷評価のための解析手法

(1) 損傷を有する橋梁のモデル化

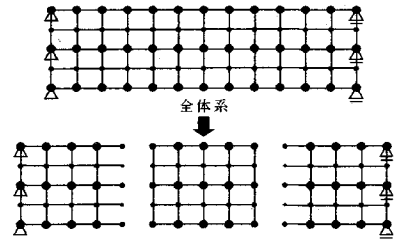
本研究では、対象橋梁としてRC単純T桁橋を考えた。RC単純T桁橋については、これまで、実橋試験や材料試験等により、コンクリートの強度、ヤング係数の低下およびそれらと曲げびわれ等との相乗効果による主桁剛性の大きな低下が報告されており^{9),10)}、これらが橋梁の安全性に及ぼす影響が問題となる。そこで、損傷を表わすためのパラメータとして剛性低下、および剛性低下との相関が考えられる減衰定数^{1),2),7),8)}を取り上げ、これらと各種振動特性との関係を簡単かつ高精度で行うため、以下のようなモデル化を行った。

- ① 主桁および床版には曲げ、せん断、ねじり剛性および減衰を考慮したはりモデルを用い、格子状に分割し、主桁各部の曲げびわれや材料劣化等の損傷をこれらの各要素の剛性および減衰の変化として取扱う^{1),2)}ものとする。
- ② 質量および回転慣性質量は各部材の節点に集中させる。
- ③ 支点には回転拘束バネを設け、支承部の損傷等による拘束条件の変化を考慮する。

図一1に3主桁RC単純T桁橋の兵庫県「旧中井橋」(昭和3年架設)¹⁰⁾に関する解析モデルを示す。

(2) 区分モード合成法を用いた複素固有値解析

橋梁が局部的に損傷を受けた場合や損傷程度が桁あるいは部材毎に異なる場合、橋梁の減衰を比例減衰と仮定することはできず、特に減衰定数や位相差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。複素固有値解析は減衰を考慮しない通常の固有値解析に比べて運動方程式のマトリックスサイズが4倍と



図二 区分モード合成法における解析モデルの分割

なり、計算規模が大きく、損傷を評価するための繰り返し計算をする上で実用的でない。特に、局部的な損傷を評価する場合、繰り返し計算を構造物全体について行うのは不合理である。そこで、本研究では、部分構造合成法の一つである区分モード合成法¹¹⁾を複素固有値解析に適用することを検討した。区分モード合成法は、図二に示すように、構造物の全系をいくつかの分系に分割し、結合部を拘束した分系毎の拘束モードと結合部のみ自由度に縮合した全体系のモードを合成してこれらのモード座標系で固有値解析を行った後、得られた一般化モードを物理座標上の変位モードに変換する手法であり、各分系の採用モード数を適切に設定することにより、大型構造物に対しても小さな自由度の解析で振動特性を得ることができる効果的な方法である。

本研究では、この手法に一般粘性減衰を考慮して以下のように定式化した。

a) 結合領域の固有振動特性

解析モデルの全系を n 個の分系に分割し、 i 番目の分系について、非結合領域を a 、結合領域を b とすると、運動方程式は次式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} M_{aa}^i & M_{ab}^i \\ M_{ba}^i & M_{bb}^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{ia} \\ \delta_{ib} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa}^i & C_{ab}^i \\ C_{ba}^i & C_{bb}^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_{ia} \\ \dot{\delta}_{ib} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa}^i & K_{ab}^i \\ K_{ba}^i & K_{bb}^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{ia} \\ \delta_{ib} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 δ は変位、 $\dot{\delta}$ は時間微分を表わしている。

式(1)の非結合領域 a に関する部分式において慣性項、減衰項を無視すると、次式が得られる。

$$\{\delta_{ia}\} = -[K_{aa}^i]^{-1}[K_{ab}^i]\{\delta_{ib}\} = [T_i]\{\delta_{ib}\} \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \delta_{ia} \\ \delta_{ib} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_i \\ I \end{bmatrix} \{\delta_{ib}\} \dots \dots \dots (3)$$

Lagrange の運動方程式における各項、つまり、運動エネルギー K_i 、ひずみエネルギー V_i および散逸関数 F_i に対して Guyan の静縮小を行うと、次式となる。

$$K_{ib} = \{\delta_{ib}\}^T [T_i^T I] [M] \begin{bmatrix} T_i \\ I \end{bmatrix} \{\delta_{ib}\} / 2$$

$$= \{\delta_{ib}\}^T [\bar{M}_i] \{\delta_{ib}\} / 2 \dots \dots \dots (4)$$

同様に,

$$V_{ib} = \{\delta_{ib}\}^T [\bar{K}_i] \{\delta_{ib}\} / 2 \dots \dots \dots (5)$$

$$F_{ib} = \{\delta_{ib}\}^T [\bar{C}_i] \{\delta_{ib}\} / 2 \dots \dots \dots (6)$$

ここで,

$$\{\delta_i\} = \{\delta_{ia} \delta_{ib}\} \dots \dots \dots (7)$$

$$[\bar{M}_i] = [T_i^T I] [M_i] \begin{bmatrix} T_i \\ I \end{bmatrix} \\ = [T_i^T M_{aa}^i T_i + T_i^T M_{ab}^i + M_{ba}^i T_i + M_{bb}^i] \dots \dots \dots (8)$$

$$[\bar{K}_i] = [T_i^T K_{aa}^i T_i + T_i^T K_{ab}^i + K_{ba}^i T_i + K_{bb}^i] \dots \dots \dots (9)$$

$$[\bar{C}_i] = [T_i^T C_{aa}^i T_i + T_i^T C_{ab}^i + C_{ba}^i T_i + C_{bb}^i] \dots \dots \dots (10)$$

各分系毎に以上の Guyan 静縮小を行い, 結合条件を考慮して合成し, 全ての結合領域 b (分系 $i=1 \sim n$) の自由度に縮合された運動方程式が次式のように得られる.

$$[\bar{M}] \{\delta_b\} + [\bar{C}] \{\delta_b\} + [\bar{K}] \{\delta_b\} = \{f\} \dots \dots \dots (11)$$

ここで, $\{f\} = \{0\}$ とおき, 減衰を考慮した固有値問題に変形すると, 次式が得られる.

$$[\lambda_b A + B] \{x_b\} = \{0\} \dots \dots \dots (12)$$

ただし,

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & \bar{M} \\ \bar{M} & \bar{C} \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} -\bar{M} & 0 \\ 0 & \bar{K} \end{bmatrix} \\ \{y_b\} = \{x_b\} \exp(\lambda_b t) \\ \{\dot{y}_b\} = \begin{bmatrix} \dot{\delta}_b \\ \delta_b \end{bmatrix}, \{y_b\} = \begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_b \end{bmatrix} \dots \dots \dots (13)$$

次に,

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} -\bar{M}^{-1} \bar{C} & \bar{M}^{-1} \bar{M} \\ \bar{M}^{-1} & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (14)$$

を式 (12) の両辺の左から乗じて, 変形すると,

$$[D] \{x_b\} = \lambda_b \{x_b\} \dots \dots \dots (15)$$

ここに,

$$[D] = -[A]^{-1} [B] \dots \dots \dots (16)$$

式 (15) より求められる固有モードのうち, 1 次~ l 次までの固有モード (共役モードを含めると, モード数は $2l$) を採用した場合の固有モードマトリックスを次のように表わす.

$$[\phi_b] = [\phi_{b1} \bar{\phi}_{b1} \phi_{b2} \bar{\phi}_{b2} \dots \phi_{bl} \bar{\phi}_{bl}] \dots \dots \dots (17)$$

ここで, $[\phi_b]$ は複素マトリックスであり, $\{\phi_{br}\}$ と $\{\bar{\phi}_{br}\}$ (ただし, $r=1 \sim l$) は互いに共役な複素ベクトルである.

結合領域の変位は各モードの線形結合として,

$$\{y_b\} = [\phi_b] \{\xi_b\} \dots \dots \dots (18)$$

ここで,

$$\{\xi_b\} = \{\xi_{b1} \xi_{b2} \dots \xi_{nb}\} \dots \dots \dots (19)$$

ξ : モード座標

で表わされる.

b) 非結合領域の固有振動特性

分系 i において結合領域 b を完全に固定した場合の振動特性を考える. この場合の運動方程式は次式となる.

$$[M_{aa}^i] \{\dot{\gamma}_{ia}\} + [C_{aa}^i] \{\dot{\gamma}_{ia}\} + [K_{aa}^i] \{\gamma_{ia}\} = \{f\} \dots \dots (20)$$

ここで, γ : 変位

結合領域の場合の式 (12)~(16) と同様の手順で, 複素固有値解析を行って求められる固有モードのうち, 1 ~ m 次 (共役モードを含めると, モード数は $2m$) までを採用した場合, 固有モードマトリックスは次式となる.

$$[\phi_{ia}] = [\phi_{ia1} \bar{\phi}_{ia1} \phi_{ia2} \bar{\phi}_{ia2} \dots \phi_{iam} \bar{\phi}_{iam}] \dots \dots \dots (21)$$

非結合領域の変位は, 結合領域の変位と結合領域を固定した場合の非結合領域の変位を用いて, 次式のように表わされる.

$$\{y_{ia}\} = [T_i' \phi_{ib} \phi_{ia}] \begin{Bmatrix} \xi_{ib} \\ \xi_{ia} \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (22)$$

ここで,

$$[T_i'] = \begin{bmatrix} T_i & 0 \\ 0 & T_i \end{bmatrix} \dots \dots \dots (23)$$

c) 全系の固有振動特性

全系の変位は, 結合領域の変位式 (18) と非結合領域の変位式 (22) を用いて, 次式のように表わされる.

$$\begin{Bmatrix} y_b \\ y_a \end{Bmatrix} = [X] \begin{Bmatrix} \xi_b \\ \xi_a \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (24)$$

ここで,

$$\{y_b\} = \{\delta_b \dot{\delta}_b\}^T \dots \dots \dots (25)$$

$$\{y_a\} = \{y_{1a} y_{2a} \dots y_{na}\}^T \dots \dots \dots (26)$$

$$\{\xi_a\} = \{\xi_{1a} \xi_{2a} \dots \xi_{na}\}^T \dots \dots \dots (27)$$

$$[\phi_a] = \begin{bmatrix} \phi_{1a} & & 0 \\ & \phi_{2a} & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \phi_{na} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (28)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1' & & 0 \\ & T_2' & \\ & & \ddots \\ 0 & & & T_n' \end{bmatrix} \dots \dots \dots (29)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \phi_b & 0 \\ T \phi_b & \phi_a \end{bmatrix} \dots \dots \dots (30)$$

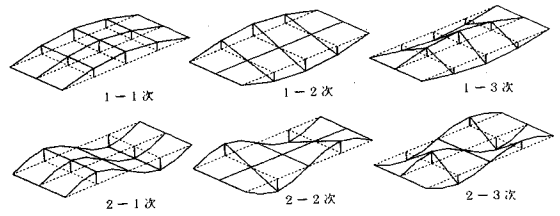
一方, 全系の運動方程式,

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & M_{ba} \\ M_{ab} & M_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_b \\ \dot{\delta}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{ba} \\ C_{ab} & C_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_b \\ \delta_a \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{ba} \\ K_{ab} & K_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_b \\ \delta_a \end{Bmatrix} = \{0\} \dots \dots \dots (31)$$

表一 区分モード合成法の解析精度

振動モード	通常の複素固有値解析 (全モード数 175)		区分モード合成法による複素固有値解析					
			採用モード数156		採用モード数 80		採用モード数 40	
	実部	虚部	実部	虚部	実部	虚部	実部	虚部
1-1次	-2.542	9.129	-2.524	9.122	-2.521	9.121	-2.518	9.121
1-2次	-7.937	17.35	-7.765	17.35	-7.733	17.34	-7.714	17.34
2-1次	-10.62	36.43	-10.54	36.46	-10.48	36.48	-10.46	36.48
2-2次	-19.96	45.45	-19.98	45.63	-20.00	45.70	-20.04	45.73
1-3次	-22.26	47.42	-22.97	47.48	-23.39	47.51	-23.63	47.58
2-3次	-27.08	70.22	-27.52	70.43	-27.79	70.53	-29.30	68.53

実部：減衰率 虚部：減衰固有振動数 (Hz)



図一 対象とした振動次数とモード

を式 (24) を用いて、減衰を考慮した固有値問題に変形し、さらに $[X]^T$ を各項の左から乗ずると、最終的に次式が得られる。

$$[X]^T [P] [X] \{\xi\} + [X]^T [Q] [X] \{\xi\} = \{0\} \dots \dots \dots (32)$$

ここで、

$$\{\xi\} = (\xi_{ib} \xi_{ia})^T \dots \dots \dots (33)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} 0 & M_{bb} & 0 & M_{ba} \\ 0 & M_{ab} & 0 & M_{aa} \\ M_{bb} & C_{bb} & M_{ba} & C_{ba} \\ M_{ab} & C_{ab} & M_{aa} & C_{aa} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (34)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} -M_{bb} & 0 & -M_{ba} & 0 \\ -M_{ab} & 0 & -M_{aa} & 0 \\ 0 & K_{bb} & 0 & K_{ba} \\ 0 & K_{ab} & 0 & K_{aa} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (35)$$

したがって、式 (32) について固有値解析を行うことにより全系の固有値およびモード座標系での固有モードが得られ、これを式 (24) に代入し、物理座標系での固有モードを求める。解析の自由度は、結合領域の採用モード数 (2l) と各分系の採用モード数 ($2 \sum_{i=1}^n m_i$, 但し, n : 分系の数) の和となり、物理座標系において全系の自由度で解くよりもかなり小さな自由度で解析が行える。

(3) 区分モード合成法の解析精度に関する検討

区分モード合成法の採用モード数は解析精度と関連しており、その設定に際しては、予め解析精度を確認しておく必要がある。そこで、図一に示した3主桁RC単純T桁橋モデルで損傷部A-3の減衰定数を30%、それ以外の箇所の減衰定数を1%とした場合について、通常複素固有値解析および採用モード数をパラメータとした区分モード合成法による複素固有値解析を行い、解析結果を比較することにより解析精度の検討を行った。表一は両解析方法によって得られた複素固有値の結果を比較したものである。ただし、精度検討の対象とした振動形は、図一に示すように、1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2, 2-3 次の6つのモードとした。表一における複素固有

値 λ は以下のように表わされる。

$$\lambda = -\zeta \omega \pm j \omega \sqrt{1 - \zeta^2} \dots \dots \dots (36)$$

ここで、 ζ : 減衰比, ω : 不減衰固有振動数。

また、区分モード合成法の採用モード数の総和を、全モード数175に対して、156, 80, 40と3段階に変化させた。表一の結果から、減衰固有振動数(複素固有値の虚部)があまり大きくない1-1, 1-2, 2-1, 2-2次モードについては、いずれの採用モード数でも、区分モード合成法による解析結果は通常複素固有値解析の結果の97~100%と高精度で得られていることがわかる。しかし、固有振動数が大きくなる2-3次モードについては、採用モード数の減少による解析精度の低下が見られ、解析の効率化の観点から見て、区分モード合成法を用いることの利点は少ないといえる。

本研究では、実験における測定精度を考慮し、主に比較的低位の1-1, 1-2, 2-1, 2-2次モードを対象とするため、この範囲内では、区分モード合成法を用いて十分な精度で振動特性の解析が行えることが確認できた。

(4) 動的感度係数を利用したSI法

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。

Douglasら¹²⁾は、構造パラメータと振動特性との関係を2次関数で近似する簡易解析モデルを用いたSI法をRC橋の振動試験に適用し、各部の剛性を同定している。しかし、解析モデルの精度上および構造パラメータと応答との関係における感度のばらつきによる解析精度上からの問題から、構造パラメータの概略推定には適している⁹⁾が、厳密な同定は困難であり、同定結果を初期値とした再探索が必要となる。

そこで、本研究では、解析モデルの近似化をせず、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)¹³⁾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に定義し、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

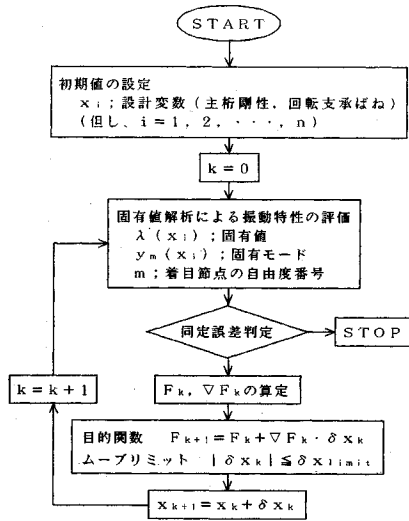


図-4 SLPのフロー

ように表わした。

$$F = W_1(\mu_p/\mu_p^m - 1)^2 + W_2 \sum_{k=1}^n (Z_{pk}/Z_{pk}^m - 1)^2 \rightarrow \min \quad (37)$$

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、 μ, μ^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、 $W_1=1.00, W_2=1/n$ とした。

次に、同定変数 $x_i (i=1 \sim l, l: \text{設計変数の総数})$ の目的関数に対する一次感度を求める。同定変数を各部の剛性 $k_i (i=1 \sim l)$ とした場合の一次感度は次式で表わされる。

$$\frac{\partial F}{\partial k_i} = 2W_1(\mu_p/\mu_p^m - 1)/\mu_p^m \frac{\partial \mu_i}{\partial k_i} + 2W_2 \sum_{k=1}^n (Z_{pk}/Z_{pk}^m - 1)/Z_{pk}^m \frac{\partial Z_i}{\partial k_i} \quad (38)$$

ここで、

$$\frac{\partial \mu_p}{\partial k_i} = Z_p^T \frac{\partial K}{\partial k_i} Z_p \quad (39)$$

$$\frac{\partial Z_p}{\partial k_i} = \sum_{j=1}^n \left(-\frac{1}{\mu_j - \mu_p} Z_j^T \frac{\partial K}{\partial k_i} Z_p \right) Z_j \quad (40)$$

ここに、 K : 全体剛性マトリクス。

また、 $j=p$ のときは、式(40)は0とする。

以上の関係式を用いて、図-4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、固有値解析により固有値 $\mu_p(x_i)$ および固有振動モード $Z_{pk}(x_i)$ を求め、式(38)~(40)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

表-2 SI法の解析精度

	主桁の剛性 ($\times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$)			横桁の剛性 ($\times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$)		支点の回転拘束ばね定数 ($\times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{cm/rad}$)		
	主桁A	主桁B	主桁C	端横桁	中横桁	主桁A	主桁B	主桁C
理論値	2.305	2.368	-2.305	6.144	9.870	1.000	1.000	1.000
初期値	3.120	3.120	3.120	0.799	1.280	1.100	1.100	1.100
同定値	2.316	2.323	2.316	0.799	9.369	1.015	1.016	1.015
誤差(%)	0.45	1.86	0.45	—	5.06	1.52	1.60	1.52

タの変動に制限(ムープリミット)を設け、その範囲内において行う。したがって、ムープリミットを超えた場合、改めて固有値解析を行い、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。

(5) SI法の解析精度に関する検討

SI法の解析精度を検討するため、図-1に示した3主桁RC単純T桁橋の解析モデルを用いて、まず、通常の固有値解析により固有振動特性を求めておき、SI法において解析モデル各部の剛性に初期値を仮定し、両解析の固有振動特性の相違が0に近づくように各部の剛性を同定した。ここでは、目的関数に考慮する振動パラメータとしては1-1次、1-2次の固有振動数と振動モードとした。表-2に各部材の設定値とSI法における初期値および同定値を示す。この結果から、端横桁の剛性に関しては振動特性に対する感度が低いため、同定できないが、感度の高い主桁剛性については98%以上の精度で、中横桁については95%程度の精度で同定結果が得られていることが確認された。このように、感度の相違により同定精度が異なり、同定しようとする部材剛性についての感度により同定の精度あるいは妥当性を評価することができる。

3. 人工損傷を導入したRC橋への適用

橋梁の損傷と振動特性との関係を把握し、振動特性の変化から損傷を評価しようとする試みは、主として人工損傷を導入したRCはり供試体⁸⁾、および鋼部材格子桁模型^{7),14)}を用いて行われてきた。また、RC橋における振動特性の測定により損傷を評価する試み^{10),15)}もなされているが、初期値(健全時の値)のない状態でのものであり、RC橋で感度把握は行われておらず、評価の有効性判定が難しい。

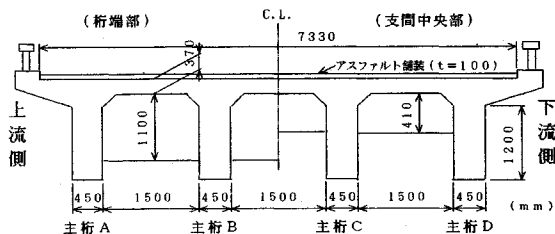
そこで、本研究では、既存のRC橋を対象として、人工損傷を導入することにより橋梁の振動特性の損傷導入前後での変化を調べ、感度特性を把握するとともに、振動特性を利用した損傷評価の有効性を検討した。

(1) 試験対象橋梁の概要

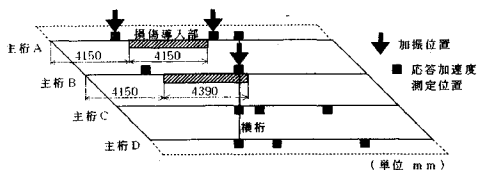
試験対象とした兵庫県「旧大安橋」¹⁵⁾は供用年数27年と比較的新しい、斜角46度を有する4主桁RC単純T桁の3スパン橋梁である。本試験はこのうち比較的損傷

表—3 旧大安橋の損傷評価結果

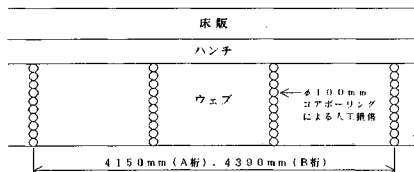
	主桁の剛性 ($\times 10^{12} \text{kg}\cdot\text{cm}^2$)				支点の回転拘束ばね定数 ($\times 10^9 \text{kg}\cdot\text{cm}/\text{rad}$)								1次振動数 (Hz)
	主桁A	主桁B	主桁C	主桁D	主桁A		主桁B		主桁C		主桁D		
理論値	7.198	6.755	6.755	7.255									
現状の同定値	8.242	7.701	7.160	6.346	1.310	1.310	1.100	1.100	0.900	0.900	0.690	0.690	12.69
損傷時の損傷部 (同定値)	5.496	5.671	—	—	0.0203	0.0122	0.0100	0.0089	0.0075	0.0073	0.0046	0.0044	11.71 (損傷時)
現状に対する低下率	33%	26%	—	—									8%



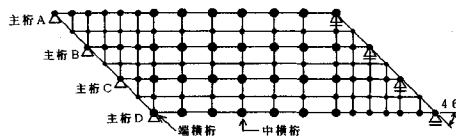
図—5 旧大安橋の断面図



図—6 実橋振動試験の概要



図—7 人工損傷の導入方法



図—8 旧大安橋の解析モデル

の少ない中央スパン (スパン長 14.7 m) を対象に実施した。旧大安橋の断面図を図—5 に示す。

(2) 人工損傷の導入

本試験で設定した人工損傷は、主桁のコンクリート引張領域の曲げひびわれを想定し、図—6 に示すように、主桁 A, B に部分的に導入した。ひびわれの導入方法は図—7 に示すように、径 10 cm コアボーリングを鉛直方向ひびわれ状に中立軸位置 (ウェブ上端付近) まで行い、損傷導入後に桁の質量変化を生じさせないため、コアコンクリートを元のコア孔に再設置した。

(3) 試験方法

まず、本橋を図—8 に示す集中質点系にモデル化し、固有値解析を行って求めた振動特性を実橋振動試験において効果的に測定するため、各振動形の腹に着目し、図—6 に示す重錘落下加振位置および応答加速度測定位置を決定した。本試験では、人工損傷導入前後で各測点に 10 回ずつ重錘落下加振^{10), 15)}を行った。測定結果については、加振力と各応答加速度から伝達関数を求め、実験モーダル解析の手法¹⁶⁾により各振動特性を同定した。

(4) 損傷パラメータの推定

試験により求められた振動特性のうち、1-1 次の固有振動数と振動モードに着目し、損傷パラメータのうちの剛性低下を SI 法により次の手順で求めた。

① 人工損傷導入前の橋梁について、SI 法における

構造パラメータを各主桁、横桁の剛性および支点の回転拘束ばね定数としてこれらを同定する。

② 人工損傷導入後の橋梁について、損傷パラメータを人工損傷部の剛性および支点の回転拘束ばね定数とし、その他の主桁部分および横桁の剛性は①で求めた推定値を用いて、これら損傷パラメータを同定する。

表—3 は以上の手順に従って求めた 1-1 次の固有振動数、各主桁毎の平均剛性、人工損傷部の平均剛性および支点の回転拘束ばね定数を示したものである。この結果によると、人工損傷導入による固有振動数の変化は約 8% とかなり大きなものとなっている。また、SI 法の結果を見ると、主桁 A, B の他に支点の回転拘束ばねが大幅に変化している。これは、人工損傷導入前後において、隣接スパンとの舗装および床版の拘束条件が変化したことによるものと考えられる。このように、現況の橋梁は単純支持条件にもかかわらず、支点の回転拘束がかなり大きく、振動特性の測定値そのものを損傷と関連づけることができない場合があり、このような場合、支点の回転拘束をも同定変数とした SI 法が有効となる。

各桁の剛性の同定結果から、現況の橋梁における主桁の剛性の推定値は全断面有効として計算した理論値に近く、事前に行った目視検査での「本橋の健全度は高い」という診断結果¹⁵⁾とほぼ一致した。また、コンクリート引張領域が主桁の剛性に及ぼす影響が大きいため、コンクリート引張領域に曲げひびわれとして導入した人工損傷による剛性低下率は A 桁で 33%、B 桁で 26% と非常に大きくなっている。また、これらの剛性低下から損

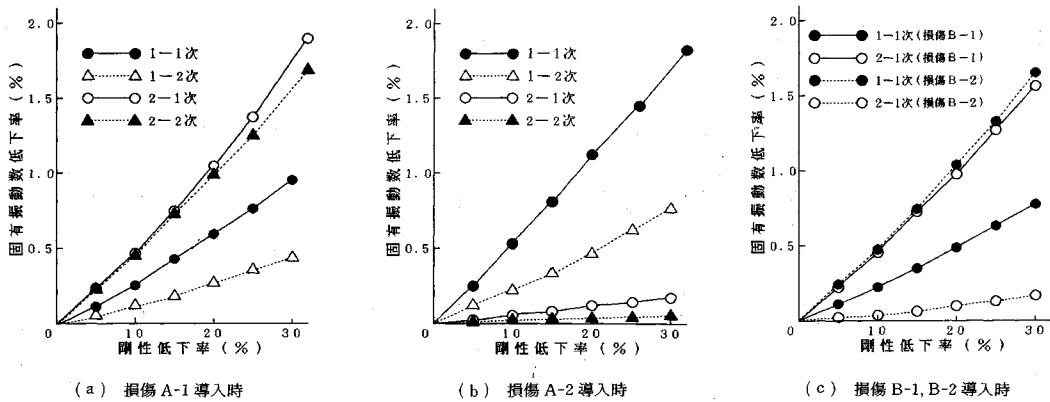


図-9 損傷部の剛性低下と橋梁の固有振動数との関係

傷部のコンクリート有効断面領域を求めると、A 桁、B 桁の有効断面領域の下縁線がコンクリート断面下縁から、それぞれ、約 44 cm、28 cm となっており、人工損傷として設定したコンクリート桁の損傷としては、ほぼ妥当な同定値であると考えられる。

4. 損傷評価における振動パラメータの有効性の検討

橋梁の損傷を安全性の面から評価するためには、各損傷が橋梁全体へ及ぼす影響を把握する必要がある。本研究では、その影響を表わすパラメータとして橋梁の振動特性に着目し、各部の損傷と各種振動特性との関係を用いて振動特性の変化から損傷を推定し、その損傷と橋梁全体系との関係の評価しようとするものである。その際、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るといえる。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、振動パラメータとして固有振動数、振動モードの他に減衰特性、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。

(1) 損傷を考慮した橋梁の解析モデル

解析の対象は図-1 に示した 3 主桁で中桁を有する RC 単純 T 桁橋とし、部分的な損傷を仮定し、損傷パラメータを変化させて固有値解析を行った。損傷としては、図-1 に示した損傷部 A-1~2、B-1~2 における剛性低下率 0~30% および損傷部 A-3、B-3 における減衰定数 0~30% の範囲での変化として考慮した。ここで、減衰定数は、便宜上、以下の手順により求められる値を用いた。まず、3 主桁をそれぞれ独立な単桁とし、全スパンで一様な減衰係数マトリックス C を内部粘性減衰による比例減衰 $C = \beta K$ (β : 内部粘性係数, K : 剛性マトリックス) と仮定すると、減衰比は $\zeta = \beta\omega/2(\omega$: 減衰固有振動数) で表わされるので、この関係を図-1

に示した解析モデルの主桁各要素に適用し、各要素毎に $C_i = \beta K_i$ を仮定し、 $\zeta = 0 \sim 0.3$ の変化に対応して、 $\beta = 2\zeta/\omega$ の値を設定した。したがって、各モードにおける減衰特性を解析する場合、各モード毎にそれぞれ対応する内部粘性係数 β を設定し直した。

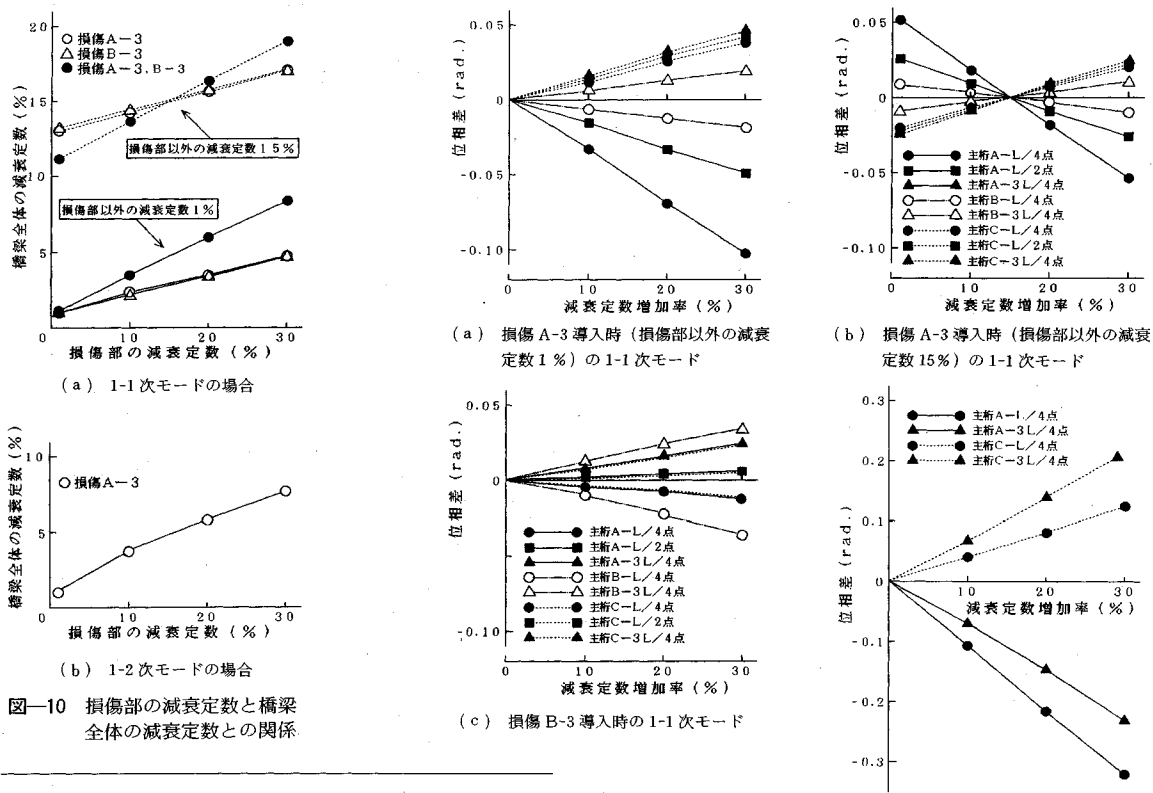
(2) 固有振動数

図-9 (a)~(c) は各損傷部の剛性低下率と固有振動数との関係を示したものである。外桁の局部損傷 A-1、A-2 の剛性低下による固有振動数の変化が大きいモードは、前者の場合、2-1 および 2-2 次、後者の場合、1-1 次となっており、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。中桁の損傷 B-1、B-2 の場合、中桁に振幅が生じない 1-2 および 2-2 次の固有振動特性には影響を及ぼさず、その他のモードについて、外桁の損傷の場合と同様に、損傷 B-1 の剛性低下により 1-1 次、損傷 B-2 の剛性低下により 2-1 次に大きな変化が生じる。

以上の結果から、中桁と外桁の損傷を区別するためには、2-2 もしくは 1-2 次の固有振動数、同一桁内での損傷位置を推定するためには、1-1、2-1、2-2 次の固有振動数がパラメータとして有効 (感度が高い) であることがわかる。この結果は、模型桁によって測定された結果¹³⁾ とほぼ一致する。また、あらゆる箇所損傷を評価対象とする場合、各損傷に対して感度の高い振動モードを用いる必要があり、1-1 次の固有振動数のみでなく 2-1、2-2 次の固有振動数あるいは固有振動数以外の振動パラメータを考慮しなければならない。

(3) 減衰特性

図-10 (a), (b) は各損傷部の減衰定数変化と橋梁全体系の減衰特性との関係を示したものである。1-1 次モードに関する結果から、損傷部 A-3、B-3 の減衰定数変化は橋梁全体系の減衰特性に対して同一の感度を有し、また、損傷部以外の減衰定数が異なる場合でも感度は一致していることがわかる。さらに、これらの損傷部



図—10 損傷部の減衰定数と橋梁全体の減衰定数との関係

の感度は線形であり、複数の損傷が生じる場合は個々の感度の線形和として表わすことができる。これに対して、1-2次モードに関する結果では、モードの節となる損傷部 B-3 の減衰定数変化は全体系の減衰特性にはほとんど影響を及ぼさないため、1-1 次、1-2 次両方の振動特性を用いると、各主桁毎の損傷程度を推定することが可能である。

(4) 位相差

図—11 (a)~(c) は各損傷部の減衰定数変化と 1-1 次モードに関する橋梁各部の位相差との関係を示したものである。ここで位相差は主桁 B の L/2 点の位相を基準として求めたものである。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り、特に損傷部 A-3 の減衰定数が 30% に増加した場合、位相差の変化が最も大きく、約 0.1 rad. となっている。また、損傷部以外の減衰定数が異なる場合でも感度は一致しており、さらに、これらの損傷部の感度は線形であることから複数の損傷が生じる場合は個々の感度の線形和として表わすことができる。次に、図—11 (d) に 2-1 次モードに関する結果を示す。ただし、この場合の位相差は主桁 A, C の各点とそれに対応する主桁 B の各点との位相のずれを示す。この結果から、損傷部 A-3 の減衰定数の変化は 2-1 次モードの位相差に大きな影響を及ぼし、減衰定数の変化 30% により主桁 A の L/4 点で位相差約 0.3 rad. が生じている。また、主桁

図—11 損傷部の減衰定数と橋梁の位相差との関係

A と主桁 C との位相差は最大約 0.5 rad. となっている。以上の結果から、1-1 次および 2-1 次モードの位相差は端桁に生じた損傷の位置と程度を推定するためのパラメータとして有効であると考えられる。

(5) 減衰定数による損傷評価

橋梁全体系の減衰特性および位相差から、損傷部の減衰特性が評価されると、これを損傷パラメータとして、種々の模型や実橋における測定結果から損傷程度との関係を把握し、損傷の評価へと結びつけることができる。図—12 は、既存 RC-T 桁橋 (兵庫県内における 4 橋) における破壊試験^{10),15)}および人工損傷を有する RC 供試体⁸⁾において測定された剛性低下率と減衰定数との関係を示したものである。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る。また、実橋と供試体との間および各橋梁間でその関係が異なることから、橋梁の形式、寸法諸元毎の測定値を蓄積することにより、損傷パラメータとしての減衰定数を確立する必要がある。

(6) 振動パラメータを用いた損傷評価の流れ

以上で検討した各振動パラメータの各部損傷に対する感度特性を利用して、図—13 に示すフローにしたがっ

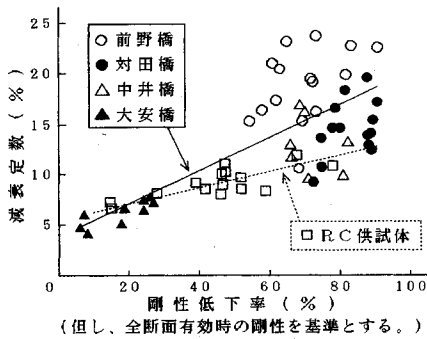


図-12 剛性低下と減衰定数との関係

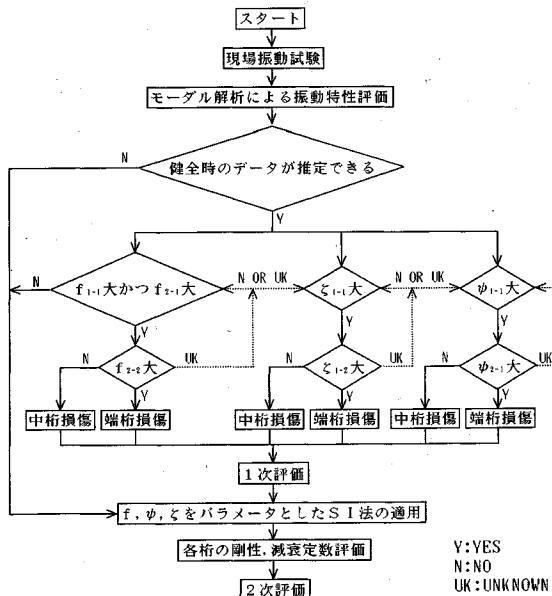


図-13 損傷評価の流れ

て、損傷の位置と程度を推定することができる。まず、対象橋梁に対して、3.で示した手順で現場振動試験を行い、実験モデル解析の手法により振動パラメータを抽出する。次に、健全時すなわち架設時の振動計測データがある場合、もしくは、設計データからそれらが解析的に推定できる場合には、まず、概略評価として損傷位置の簡易推定を行うことができる。振動パラメータとしては、固有振動数 f_{1-1} , f_{2-1} , f_{2-2} , 減衰定数 ζ_{1-1} , ζ_{1-2} , 位相差 ψ_{1-1} , ψ_{2-1} の全部あるいは一部とし、一次レベルの判定として f_{1-1} かつ f_{2-1} , ζ_{1-1} , ψ_{1-1} のそれぞれの大小で、損傷の有無を調べる。一次レベルで損傷の存在が判定されると、二次レベルとして f_{2-2} , ζ_{1-2} , ψ_{2-1} 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、各種振動パラメータ毎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。この判断には、現場振動試験の準備として行われる各振動パラメータの感度解析結果

を考慮する。また、この判定手法には、一部の振動パラメータのデータが欠落している場合でも、推定精度に関する問題はあるものの、損傷位置の概略を把握できるという利点がある。さらに、損傷の詳細評価として、これら振動パラメータと橋梁の解析モデルを利用した動的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。ただし、この場合には、橋梁形式毎に、感度解析から損傷に対して最も感度の高い振動パラメータを抽出して利用する必要がある。また、健全時の振動パラメータに関する測定データがなく、かつ、設計データによる概略推定も困難な場合、損傷の概略推定は行えず、SI法による詳細推定のみによって、損傷評価を行う必要がある。このような場合は、特に、非破壊検査やコア抜きによる材料試験により材料強度の推定を行うことによりSI法の精度をできる限り改善するとともに、最終的には損傷要因の目視検査によって行われる耐用性の簡易診断手法等による結果とあわせて総合的に判定する必要があるものと考えられる。

5. あとがき

本研究は、既存コンクリート橋の損傷評価に用いられる各種振動パラメータの有効性を解析および実橋試験により評価し、それらに基づく効率的な損傷評価法を検討したものである。得られた結論を以下にまとめる。

(1) 損傷評価のための振動パラメータとして固有振動数、振動モードの他に減衰特性および位相差を考慮するため、一般粘性減衰を考慮した複素固有値解析を区分モード合成法により効率的に行う手法を検討し、解析精度を調べた結果、通常複素固有値解析の約半分の解析規模(採用自由度)で十分な精度の解が得られることを確認した。

(2) 固有振動数および振動モードに関する動的感度係数を利用したSI法を検討し、解析精度の検討によりその妥当性を確認した。さらに、既存RC単純T桁橋において桁の曲げびびわれに相当する人工損傷を導入し、その前後で振動特性変化の測定結果に本手法を適用した。その結果、損傷部の剛性低下の同定がほぼ妥当であることを確認した。また、本実験の場合、1-1次の固有振動数の変化は約8%とかなり大きかったが、SI法による同定結果から支点部の回転拘束条件の変化による影響が大きいことが確認された。SI法では、このように支点の条件等をも同定パラメータとして考慮できる利点がある。

(3) 3主桁RC単純T桁橋の解析モデルを用いて、各部の損傷に対する各種振動パラメータの感度を調べた結果、2-1, 2-2次の固有振動数、1-1, 1-2, 2-1次の減衰定数、1-1, 2-1次の位相差の感度が高く、それぞれ

の感度特性の相違を用いると、損傷位置の概略をIF～THEN～型のフローにしたがって推定することが可能である。

(4) 損傷に対する各振動特性の感度は橋梁形式毎に異なるとともに、測定精度も種々の要因により変化する。そこで、振動特性をパラメータとして損傷評価を行う場合、予め対象橋梁について感度解析を行い、感度の高い振動パラメータを抽出しておくとともに、複数の振動パラメータを用いたIF～THEN～型の損傷推定により、損傷を多面的に評価する必要がある。さらに、第2段階での詳細な評価として、動的感度を用いたSI法を適用し橋梁各部の損傷パラメータを推定し、最終的には、各種目視検査結果等と合わせて橋梁技術者による総合的な判断が必要であるといえる。

なお、本研究では減衰特性および位相差のパラメータとしての有効性を解析的に評価したが、今後、測定結果に基づいた検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、貴重なご助言を頂いた故神戸大学工学部西村昭教授に深く感謝いたします。

また、現場実橋試験を行うにあたって、兵庫県土木部、(株)栗本鐵工所の方々から多大なるご協力を頂きました。ここに、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Natke, H.G. and Yao, J.T. P. (ed.) : Structural safety Evaluation Based on System Identification Approaches. Proceedings of the Workshop at Lambrecht/Pfalz, Friedr. Vieweg & Sohn, 1988.
- 2) Nowak, A.S. (ed.) : Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, 1990.
- 3) Agbabian, 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.

- 4) Biswas, M., Pandey, A.K. and Samman, M.M. : Modal Technology for Damage Detection of Bridges, Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, pp.161~174, 1990.
- 5) Kato, M. and Shimada, S. : Vibration of PC Bridge During Failure Process, Proceedings of ASCE, Vol.112, No.ST 7, pp.1692~1703, 1986.
- 6) Flesch, R.G. and Kernbichler, K. : Bridge Inspection by Dynamic Tests and Calculation Dynamic Investigations of Lavant Bridge, Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches, pp.433~459, 1988.
- 7) 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.
- 8) 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) 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，第10巻，第3号，pp.81~86，1988.
- 10) 宮本文穂・前田敏也・熊谷 稔・前田 強：コンクリート橋の安全性評価と補修・補強法の検討，コンクリート工学年次論文報告集，第11巻，第2号，pp.245~250，1989.
- 11) 大熊政明・長松昭男：区分モード合成法による振動解析（第4報，固有振動数と固有モードその2），日本機械学会論文集（C編），49巻，443号，1983.7.
- 12) Douglas, B.M. and Reid, W.H. : Dynamic Tests and System Identification of Bridges, Proceedings of ASCE, Vol.108, No.ST 10, pp.2295~2312, 1982.
- 13) 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.
- 14) 宮本文穂・森川英典・串田守可・山本昌孝：橋梁の振動挙動変化に基づく損傷評価，第2回橋梁振動に関するコロキウム論文集，pp.213~226，1989.8.
- 15) (財)建設工学研究所：国道176号「旧大安橋」耐用性診断試験報告書，1990.
- 16) Ewins, D.J. : Modal Testing-Theory and Practice, Research Studies Press, 1984.

(1991.2.18受付)

SENSITIVITY ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR IN EXISTING CONCRETE BRIDGES AND ITS APPLICATION TO DAMAGE DETECTION

Ayaho MIYAMOTO, Hidenori MORIKAWA and Masataka YAMAMOTO

The necessity of damage assessment by combination of visual inspections, dynamic loading tests and analytical study for existing bridges has been pointed out for a diagnosis of bridge serviceability. Since the relationship between the damage of bridges and the dynamic behavior of the bridges can not be evaluated clearly and also since it changes according to type of bridge and damage, it is difficult to identify damages by localization and quantification.

In this paper, the sensitivity of dynamic behaviors which consist of the natural frequency, mode shape, damping and phase of concrete bridges in damage detection is studied utilizing the complex modal analysis and dynamic loading tests on existing concrete bridges in which some specified artificial damages were induced. Also a method of damage assessment of concrete bridges based on the change of their dynamic behavior and on the system identification approach is discussed.