

論文

[1054] 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

正会員 宮本文穂(神戸大学工学部)

正会員 森川英典(神戸大学工学部)

正会員○山本昌孝(阪神高速道路公団)

桜井敏幸(山口県)

1. はじめに

従来、物資の流通や人の移動手段として鉄道が中心であったものが、道路を利用した輸送形態へ依存する割合が高まってきており、道路施設の一層の整備拡充が要求されると共に維持管理の問題が注目されつつある。特に、これらの根幹となる橋梁については架設後20～30年を経て老朽化が進んできつつあることや通行車両の大型化や超重量車両の混入が急速に進んできたこと、さらに近年、アルカリ骨材反応や塩害等コンクリートの早期劣化が問題化したことによって、早急な維持管理対策が求められている。

このため、維持管理に対する意識が、建設当時の壊れたら直すという後追いの姿勢から、予防的・計画的な維持管理手法へ移行してきており、これにより安全性、信頼性の確保や供用期間の延長等を図ることが可能となる。従って、広く積極的な維持管理を行っていくためには、現行の技術者の高度な知識と豊富な経験に裏付けられた主観的な判断によるのではなく、可能な限り定量的な評価に基づく客観的な判断によって行う維持管理手法へと移行する必要があると考える。

そこで、本研究では、客観的定量的な維持管理を行うための第一段階として、まずは橋梁損傷部の定量的な評価を行うことが重要であると考え、振動特性に基づいた損傷評価法の検討を行った。損傷パラメータとしては、剛性低下の他に減衰の変化に着目した複素固有値解析を導入すると共にその効率化を図るために区分モード合成法の適用を試みた。また、損傷評価には動的感度係数を用いたSystem Identification法(以下S.I.法)を適用し、損傷パラメータの同定を行った。

また、評価法の検討と同時に実橋試験を、①解析モデルと既存橋梁の動的感度の相違について確認する、②実用的現場試験法の選択手法の確立、③損傷モデルの確立という目的で行った。

2. 振動特性に基づく損傷評価法の検討

2.1 橋梁のモデル化

橋梁の振動特性を評価するにあたり、以下の特徴を有するモデル化を行った(図-1参照)。①主桁及び床版をすべて曲げ、せん断、ねじり剛性を考慮した梁モデルを用いて格子状に分割し、各部の剛性変化の影響が検討できるようにした。②質量、回

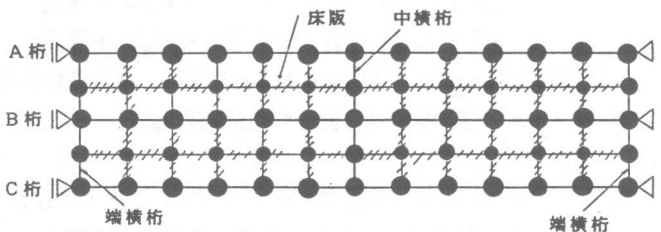


図-1 橋梁のモデル化の例

転慣性質量は各部材の節点に集中させた。③支点は回転拘束バネを設け、支承部の損傷が考慮できるようにした。

2.2 区分モード合成法を用いた複素固有値解析

本評価法では注目する損傷パラメータとして剛性の他に減衰を考えているが、これを正確に解

析に取り込むためには、複素固有値解析が必要となる。一般に複素固有値解析は計算容量が大きく、実用的でないと考えられており、現状ではあまり実施されていない。従って、本評価法に適用するにあたって、解析手法の効率化が必要であると思われる。そこで、部分構造合成法の一つである区分モード合成法¹⁾を適用することを検討した。区分モード合成法は、図-2に示すように構造物の全体系をいくつかの分系に分割し、結合部を拘束した分系ごとの拘束モードと結合部のみ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う手法であり、各分系の採用モードを適切に設定することにより、

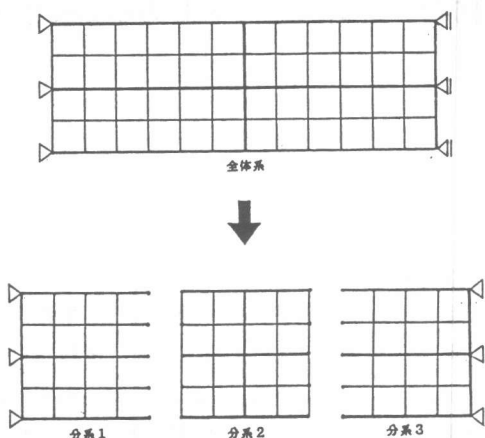


図-2 区分モード合成法のための分割例

大型構造物に対しても小さな自由度の計算で振動特性が得られる効果的な手法であるといえる。

本評価法においては、この手法に一般粘性減衰を取り入れて新たに定式化を行い、複素固有値解析への適用を試みた。

1) 結合領域の固有振動特性

n 個に分割した分系のうち、 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される。

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

この運動方程式に対しGuyanの静縮小を行う。まず、式(1)の上部式において慣性項、減衰項を無視すると、

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

となる。式(1)の各マトリックスに対してGuyanの静縮小を行うと次式を得る。

$$[M_i] \{\ddot{\delta}_{ib}\} + [C_i] \{\dot{\delta}_{ib}\} + [K_i] \{\delta_{ib}\} = \{f\} \quad (3)$$

$$\text{ここで、} [M_i] = [T_i]^T M_{aa} T_i + T_i^T M_{ab} + M_{ba} T_i + M_{bb} \quad (4)$$

$$[K_i] = [T_i]^T K_{aa} T_i + T_i^T K_{ab} + K_{ba} T_i + K_{bb} \quad (5)$$

$$[C_i] = [T_i]^T C_{aa} T_i + T_i^T C_{ab} + C_{ba} T_i + C_{bb} \quad (6)$$

次に各分系毎に上述の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、

$$[M] \{\ddot{\delta}_b\} + [C] \{\dot{\delta}_b\} + [K] \{\delta_b\} = \{f\} \quad (7)$$

を得、これから得られる固有モードのうち、1次～ 2ℓ 次までの固有モードを採用して (採用モード数は 2ℓ)、固有モードマトリックスを次のように表す。

$$[\phi_b] = [\phi_{b1} \ \bar{\phi}_{b1} \ \phi_{b2} \ \bar{\phi}_{b2} \ \cdots \ \phi_{b2\ell} \ \bar{\phi}_{b2\ell}] \quad (8)$$

$[\phi_b]$ は複素マトリックスであり、 $\{\phi_{br}\}$ と $\{\bar{\phi}_{br}\}$ 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、

$$\{y_b\} = [\phi_b] \{\xi_b\} \quad (9)$$

と表される。ここで、 $\{y_b\}^T = \{\delta_b^T \delta_b^T\}$ 、 $\{\xi_b\}^T = \{\xi_{1b}^T \xi_{2b}^T \cdots \xi_{nb}^T\}$ とする。

2) 非結合領域の固有振動特性

分系 i において結合領域 b を完全に固定とした場合は、領域 a の単独の固有値問題となる。このときも結合領域の時と同様に固有モードを $1 \sim m$ 次まで採用すると(採用モード数は $2m$)、次式が得られる。

$$[\phi_{ia}] = [\phi_{ia1} \ \bar{\phi}_{ia1} \ \phi_{ia2} \ \bar{\phi}_{ia2} \ \cdots \ \phi_{iam} \ \bar{\phi}_{iam}] \quad (10)$$

非結合領域の変位 $\{y_{ia}\}^T = \{\delta_{ia}^T \delta_{ia}^T\}$ は、結合領域の変位と結合部を固定した場合の変位を用いて、

$$\{y_{ia}\} = [[T_i] [\phi_{ib}] \ [\phi_{ia}]] \{\xi_i\} \quad (11)$$

と表される。ここで、 $\{\xi_i\}^T = \{\xi_{ib}^T \ \xi_{ia}^T\}$ 、 $[T_i]^T = \begin{bmatrix} [T_i] & [0] \\ [0] & [T_i] \end{bmatrix}$

3) 全系の固有振動特性

全系の変位は、1)と2)の結果から、

$$\begin{Bmatrix} y_b \\ y_a \end{Bmatrix} = [X] \begin{Bmatrix} \xi_b \\ \xi_a \end{Bmatrix} = [X] \{\xi\} \quad (12)$$

ここで、

$$\{y_a\}^T = \{y_{ia}^T \ \cdots \ y_{na}^T\}, \{\xi_a\}^T = \{\xi_{ia}^T \ \cdots \ \xi_{na}^T\}, \{\xi_b\}^T = \{\xi_{ib}^T \ \cdots \ \xi_{nb}^T\}, \{\xi\}^T = \{\xi_b^T \ \xi_a^T\}$$

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

$$[T] = \begin{bmatrix} [T_1] & & 0 \\ & [T_2] & \\ 0 & & \ddots \\ & & & [T_n] \end{bmatrix} \quad [\phi_a] = \begin{bmatrix} [\phi_{1a}] & & 0 \\ & [\phi_{2a}] & \\ & & \ddots \\ 0 & & & [\phi_{na}] \end{bmatrix}$$

であり、これより最終的に得られる運動方程式は次式となる。

$$[X]^T [P] [X] \{\dot{\xi}\} + [X]^T [Q] [X] \{\xi\} = \{0\} \quad (13)$$

$$\text{ここで、} [P] = \begin{bmatrix} [0] & [M_{bb}] & [0] & [M_{ba}] \\ [0] & [M_{ab}] & [0] & [M_{aa}] \\ [M_{bb}] & [C_{bb}] & [M_{ba}] & [C_{ba}] \\ [M_{ab}] & [C_{ab}] & [M_{aa}] & [C_{aa}] \end{bmatrix}, [Q] = \begin{bmatrix} -[M_{bb}] & [0] & -[M_{ba}] & [0] \\ -[M_{ab}] & [0] & -[M_{aa}] & [0] \\ [0] & [K_{bb}] & [0] & [K_{ba}] \\ [0] & [K_{ab}] & [0] & [K_{aa}] \end{bmatrix}$$

式(13)についての固有値解析を行うことによって得られる固有値より全系の固有振動数が明らかとなり、さらに式(13)で得られた固有モードを式(12)に代入することにより、全系の物理座標系での固有モードを知ることができる。自由度は結合部の採用モード数 ($2l$) と各分系の採用モード数 ($2 \sum_{i=1}^n m_i$) [n : 分系の数] の和となり、物理座標系において全系の変位の自由度で解く場合よりもはるかに小さな自由度で済む。従って、大型構造物で減衰を考慮した解析にも十分対応できると考えられる。なお、本手法を用いた橋梁モデルの解析精度について検討したが、直接剛性法では195のモード計算を行ったのに対して、区分モード合成法では全体で約半分の80のモードだけ採用して計算した値と一致し、本手法の有効性を確認した。

2.3 動的感度係数を利用したS.I.法

動的S.I.法はいわゆる逆解析的な手法であり、実

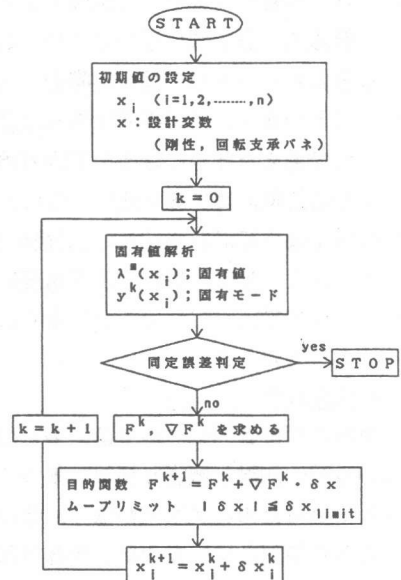


図-3 動的S.I.法のフロー

験による橋梁の振動挙動を基にしてこれと一致するように解析モデルの構造パラメータを同定しようとするものである。本手法のフローを図-3に示す。まず始めに、目的関数Fおよび目的関数に対する設計変数の感度 ∇F を決める。同定のためには測定値との誤差を最小とするように目的関数を定義する必要があるが、比較するパラメータとしては固有値 μ と固有振動モード z とがあり、これらを一つの目的関数内で取扱うため、同定する実測値に対して無次元化した次式を用いた。

$$Err^2 = W_1(\mu_p / \mu_p^m - 1)^2 + W_2 \sum_{k=1}^n (z_{pk} / z_{pk}^m - 1)^2 \rightarrow \min \quad (14)$$

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^m 、 z^m は実測値(モード解析値)、 W_1 、 W_2 は固有振動数と振動モードの比が同一となるような重みで $W_1=1.00$ 、 $W_2=0.25$ とした。

一般には式(14)を決定する未知の構造パラメータを設計変数と置くが、ここでは各部材の剛性とすることにした。ただし、この時に、設計変数が多くなるほど計算時間を要して実用的でなく、また同定に含まれる誤差も多くなる等の問題点がある。従って、それぞれの構造パラメータが有効に作用する振動特性を採用して部分的に同定することで計算の効率化を図った。次に、設計変数 k_i の目的関数式(14)に対する感度を求めると、次式が得られる。

$$\frac{\partial (Err^2)}{\partial k_i} = 2W_1(\mu_p / \mu_p^m - 1) / \mu_p^m \frac{\partial \mu_i}{\partial k_i} + 2W_2 \sum_{k=1}^n (z_{pk} / z_{pk}^m - 1) / z_{pk}^m \frac{\partial z_i}{\partial k_i} \quad (15)$$

ここで、

$$\frac{\partial \mu_p}{\partial k_i} = z_p^T \frac{\partial K}{\partial k_i} z_p \quad (16)$$

$$\frac{\partial z_p}{\partial k_i} = \sum_{j=1}^n \left(-\frac{1}{\mu_j^m - \mu_p^m} z_j^T \frac{\partial K}{\partial k_i} z_p \right) z_j \quad (17)$$

また、 $j=p$ のときは、式(17)は0としている²⁾。

以上の関係式より、式(16)、式(17)を式(15)に代入して目的関数に対する各パラメータの感度を求め、目的関数の線形近似を行って直線的に最小値に近づけていくことができる。ただし、この直線近似を行う場合には、実際の目的関数の値から大幅にそれていくことがあり、その誤差にある程度の制限(move limit)を設けてこれを越えたときには改めて固有値解析を行い、感度を求め直してから近似計算を繰り返す、S.L.P.(Sequential Linear Programming; 逐次線形計画法)による最小値探索手法を用いて同定を行った。また、モデル解析による精度検討の結果、初期値と誤差制限を適切に設定していくことにより、かなり精度良く同定が行えることを確認した。

2.4 損傷評価のフロー

現行の維持管理においては、多くの場合損傷評価・判定という過程が専門的知識と豊富な経験に基づく技術者の主観的判断に委ねられているため、汎用性がなく、その判断においても確実性という面から絶対とはいえない、曖昧な部分を残している感がある。従って、損傷の程度を定量的に評価し、補修・補強を行う判断基

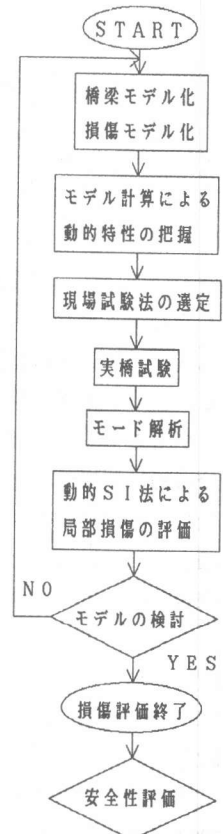


図-4 損傷評価のフロー

準とするためには、合理的な損傷評価法の確立が必要である。本研究ではこの問題について図-4のフローに示すような振動特性に基づいた定量的な損傷評価法を検討した。

まず、損傷を考慮して評価対象橋梁をモデル化し、解析的に振動特性を求める。これによって、損傷を評価するために最も感度の良い振動特性が把握でき、これに基づいて実橋で行う試験法や試験項目、測定項目等が決定される。次に、この方法に従って試験を行い、測定結果をモード解析し、各振動特性を求める。そして、この振動特性に動的感度係数を利用したS.I.法を適用することにより、剛性や減衰定数等の構造パラメータが同定できる。ここで、各種損傷の数値モデルが剛性、減衰定数を損傷パラメータとして解析及び実験的に評価されれば、実際の損傷の状況を把握することができる。あるいは、剛性低下のみに着目した場合、各部の損傷による荷重分配を考慮した安全性評価に結び付けることができることになる。

3. 人工損傷を伴う現場実橋試験

実橋試験の対象とした「大安橋」の概略図と橋梁台帳を図-5、表-1に示す。「大安橋」は供用年数27年と比較的新しいものであり、その特徴としては斜角46度を有する斜橋であるということである。まず、本橋を図-6に示す

図-5「大安橋」の概略図

表-1「大安橋」の橋梁台帳

橋梁名	大安橋	路線名	国道176号線福知山大阪線
橋梁形式	RC単純T桁橋	所在地	兵庫県三田市藍本
橋長	43.9m(14.6+14.7+14.6m)	架橋河川	武庫川
幅員	7.3 m	架設年度	昭和37年度
径間別	3径間	適用示方書	昭和31年度版
等級	1等級	設計荷重	TL-20
橋梁形式	上部工	主桁	RC単純T桁
		床版	RCスラブ
	下部工	橋台	重力式コンクリート
		橋脚	重力式コンクリート
		構造	主桁 本数=4本、間隔=1.95m
		橋面	本数=3本
		舗装	アスファルト舗装
		高架	コンクリート製

解析モデルに置換し、固有値解析を行って求めた健全な場合の振動特性を図-7に示す。これらの振動特性を実橋において効果的に測定できるよう図-8に示すような重錘落下加振位置及び測定位置を決定した。試験は、現状の状態で重錘落下加振を行った後、図-8に示すように耳桁と中桁一本ずつに局所的な人工損傷を施して、再度同一の加振を行った。測定結果に対して行うS.I.法は、1次固有振動数と固有モードに着目し、次の手順で行った。①現状の状態の橋梁に対して行った試験については、構造パラメータを各主

図-6 大安橋の解析モデル

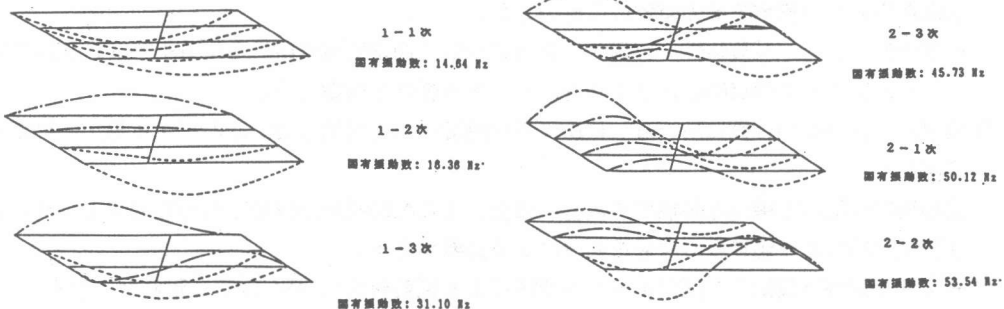


図-7 大安橋の固有振動数と振動モード

桁、横桁の剛性及び回転拘束バネ定数として同定する。②人工損傷導入時は構造パラメータを人工損傷部の剛性及び各支点の回転拘束定数のみとして、その他は①で求めた推定値を用いて同定する。

以上のようにして求めた同定結果を表-2に示す。これらの結果から、現状の状態の橋梁における主桁の剛性については、全断面有効として計算した理論値に近い値となっており、健全度が高いと判断された目視検査結果と一致した。次に、人工損傷導入による剛性低下はA桁で33%、B桁で26%となっており、想定された損傷程度とほぼ一致した。減衰特性の変化については、今回の試験においては、人工損傷導入前後での支承部の回転拘束条件が大きく変わったこと等により、正確に測定できなかった。しかし、損傷パラメータの感度は、固有振動数や固有モードよりも減衰特性や位相差の方が大きいと考えられるため、今後さらに検討を行っていく予定である。

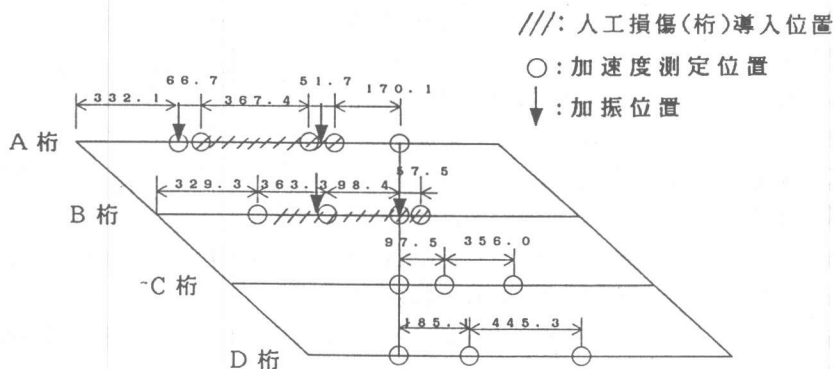


図-8 加振位置、測定位置及び人工損傷導入位置

表-2 大安橋の同定結果

(但し、A1～D2は各支点の回転拘束バネを表し、篠山側を'1'、三田側を'2'とする。)

	A桁	B桁	C桁	D桁	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	1次振動数
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%

単位系(桁: $\times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, A1～D2: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{rad}$, 振動数: Hz, 理論値は全断面有効)

4. 結 論

本研究においては汎用的手法による客観的定量的な維持管理を行うことを目的として、振動特性に着目した損傷評価手法の検討を行った。以下に、本研究で得られた結論をまとめる。

- ①振動特性に基づく損傷評価を種々の解析手法及び実験を用いて効率的に行う手法を示し、人工損傷を導入した実橋でその有効性を確認した。
- ②損傷の進行に伴う減衰特性を評価するために用いる複素固有値解析を区分モード合成法を適用することによって効率的に行う手法を示し、その精度を確認した。
- ③損傷パラメータの評価に用いるS.I.法に動的感度係数を利用したS.L.P.による最小値探索法を適用した。
- ④振動特性を用いて損傷を評価する場合、損傷による動的感度が評価精度を左右するため、各振動特性の感度と評価精度の関係を明確にする必要がある。

参考文献 1)大熊・長松:”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、1983.7,2)土木学会:”構造システムの最適化 理論と応用”、1988.9