

阪神高速道路公団 正員○山本昌孝

神戸大学工学部 正員 森川英典

神戸大学工学部 正員 宮本文穂

山口県 正員 桜井敏幸

1. はじめに 近年、橋梁の損傷が問題化するとともに維持管理が注目され、特にその核となる損傷評価については客観的・合理的手法の確立が要求されている。本研究では、損傷と振動特性の変化との関係を利用した損傷評価法の確立を目指し、橋梁の振動特性を正確かつ効率よく把握するための橋梁の数値モデル化と区分モード合成法を用いた複素固有値解析手法に関する検討および動的S.I法との併用により現場振動試験結果から各部の構造パラメータを同定し損傷を評価する手法についての検討を行った。さらに、人工損傷を導入した実橋への本手法の適用を試み、その有効性を検討した。

2. 損傷評価のための解析手法

2.1 固有値解析手法 橋梁の振動挙動を的確に捉えるため、次の特徴を有する橋梁モデルを作成した(図1参照)。①橋梁全体を床版も考慮してすべて梁モデルで格子状に分割する。②質量は回転慣性質量も含め各梁要素の両端に集中させる。③支承部の損傷を支点回転拘束ばねの導入により取扱う。ここで、評価対象とする振動特性としては固有振動数、振動モード、減衰、位相を取り上げ、一般粘性減衰を考慮した複素固有値解析を効率的に行うため、部分構造合成法の一つである区分モード合成法¹⁾の適用を検討し、一般的な固有値解析手法とほぼ同精度での解析が比較的容易に行えることを確認した。

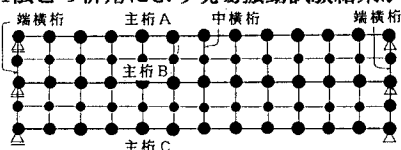


図-1 橋梁モデル

2.2 動的感度係数を用いたS.I法 図2に動的S.I法のフローを示す。動的S.I法は実橋振動試験で得た測定値と解析モデルの振動特性値が一致するように構造パラメータを同定する手法である。比較対象とする振動特性に固有値 λ と振動モード x を選ぶ場合、測定値との誤差を最小にするための目的関数を式(1)のように無次元化して定義する。

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

ただし、 λ^m 、 x^m は実測値(モード解析値)であり、 p は採用振動次数、 n は比較する振動モード数を表す。また、 W_1 、 W_2 は重みを表し、今回は $W_1=1.00$ 、 $W_2=0.25$ とした。

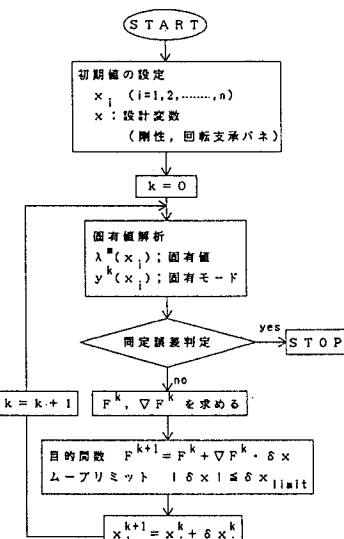


図-2 動的S.I法のフロー

次にこの目的関数に対する各パラメータの感度を求め²⁾、ムープリミット内で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逐次線形計画法(SLP法)による最小値探索手法を用いて同定を行う。モデル計算による精度解析の結果、初期値とムープリミットの設定を適切に行うことにより、かなり精度良く同定が行えることを確認した。なお、今回振動特性として固有振動数、振動モードを採用したが、実際はこれらに限定されず、同定する構造パラメータに対して最も感度のよい振動特性を利用すれば一層の同定精度の向上が期待できるものとする。

2.3 損傷評価の手順 以上の解析手法を用いた損傷評価のフローを図3に示す。まず、対象とする橋梁についての情報や目視検査をもとに、橋梁および損傷部のモデル化を行い、モデル計算により剛性低下、減衰定数変化といった損傷パラメータに対して最も感度の高い振動特性を把握する。これに基づいて実橋で行う試験法や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、モデル解析により各振動特性を求める。その結果に動的S.I法を適用するが、最初は局部損傷を考慮せず各桁毎に平均化した構造パラメータを同定することにより全体的な損傷程度を把握し、次に損傷位置とそれ以外の構造パラメータを区別して同定を行い局部損傷についての評価を得る。ここで、各種損傷の数値モデルが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。また、剛性低下に着目した場合、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。

3. 人工損傷を導入した実橋への適用例 今回、人工的に損傷を導入して実施した実橋の振動試験結果に対して本損傷評価法を適用し、その有効性を検討した。試験対象橋梁である大安橋の概要を表1、図4に示す。人工損傷としては、A、B桁において図5に示す位置にコバ抜き損傷を導入した（図6参照）。まず、最も有効な試験方法を選択するため大安橋のモデル化を行い、モデル上で人工損傷部の剛性を低下させ、人工損傷と振動特性の変化との関係について把握した。その結果、人工損傷に対して感度の高い1-1次、2-1次の振動モードが卓越するように重錘落下振動試験を行い、現状及び損傷導入後の振動特性の測定結果に動的S.I法を適用した。適用方法はまず現状の橋梁において、各主桁、横桁および支点回転ばね定数を未知の構造パラメータとして同定を行い、人工損傷導入後においては損傷部の剛性と支点回転ばね定数のみ未知とし、他の構造パラメータは現状時の値を用いた。表2の結果から、現状における主桁剛性の同定値が、全断面有効で計算した理論値に近いことがわかる。これより、主桁の剛性に寄与する断面領域は中立軸以下の引張領域に相当していると考えられ、人工損傷はかなりの剛性低下を及ぼしたと思われる。A、B桁の損傷部の平均的な剛性低下率の値は、現状を全断面有効と考えた場合、A桁では桁下縁から約44cm、B桁では約28cmの引張側コンクリート断面を無視した値に相当し（図6参照）、ほぼ妥当な数値として捉えることができた。

4. 結論 (1)区分モード合成法を用いた複素固有値解析および動的感度係数を用いたSLP法によるS.I法の適用化検討を行い、既存橋梁の損傷評価手順を示した。
(2)実橋において人工的に導入した損傷を『損傷パラメータ解析』→『試験方法の選択』→『S.I法による同定』という流れにより、損傷部の構造パラメータの値の変化として数値的に捉えることができた。

【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

表-1 「大安橋」の橋梁台帳

橋梁名	大安橋	橋梁形式	RC単純T桁橋
橋梁形式	RC単純T桁橋	架設年度	昭和37年度
上部工	主桁 RC単純T桁 床版 RCスラブ	主桁	本数=4本、間隔=1.95m
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	横桁	本数=3本
		舗装	アスファルト舗装
		要	コンクリート製

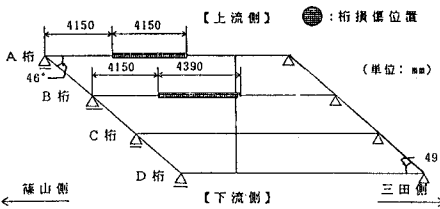


図-5 人工損傷導入位置

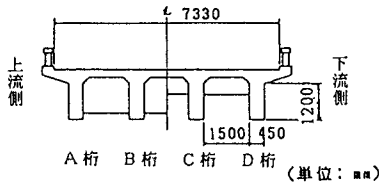


図-4 「大安橋」の横断面図

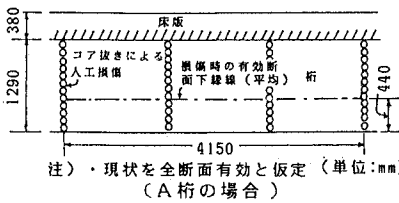


図-6 損傷導入による有効断面の減少

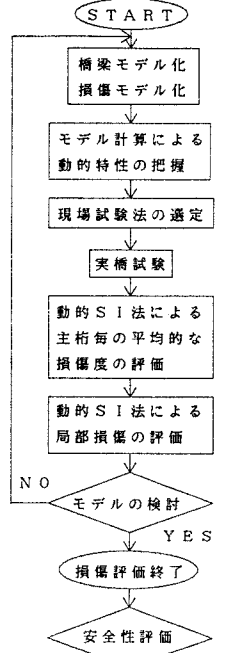


図-3 損傷評価のフロー

表2 「大安橋」へのS.I法の適用結果(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: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{m/rad}$, 振動数: Hz, 理論値は全断面有効)