

橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性

SENSITIVITY OF MECHANICAL BEHAVIOR OF BRIDGES FOR THEIR DAMAGE ASSESSMENT

西村 昭*・藤井 学**・宮本文穂***・加賀山泰一****

By Akira NISHIMURA, Manabu FUJII, Ayaho MIYAMOTO and Taiichi KAGAYAMA

The diagnosis of bridge serviceability has been performed by a combination of field inspection of the bridges such as a visual inspection and static and dynamic loading tests and an analytical study. Because the mechanical behavior of bridges with various damages could not be made clear, it is very difficult to estimate exactly both of the damage mode and degree of damage of existing bridges.

In this paper, the sensitivity of both static and dynamic behaviors of bridges for their damage assessment is proved through the experiments on model bridges induced some specified artificial damages. And also a method of damage assessment of bridges based on these behaviors is discussed in detail.

Keywords : bridge, damage assessment, diagnosis, static behavior, dynamic behavior

1. ま え が き

橋梁が設計、架設された時期には予測し得なかった環境の変化、たとえば自動車荷重の質的、量的増大、自然条件の悪化等により、供用後10～20年を経た橋梁を中心にさまざまな損傷が目立ち始め、今後、橋梁の老朽化に伴い、事態はさらに深刻化してくるものと考えられる。このような状況に対し、橋梁の維持、管理は、見る、触るといった人間の感覚的な検査および点検が中心であり、その結果に基づく損傷の評価、判定には高度な専門知識や豊富な経験に裏付けられた主観的判断に負う点が多い。しかし、今後、数多くの橋梁を合理的に維持、管理していくためには、橋梁の損傷状況をできるだけ定量的に評価する方法を確立し、客観的な判断基準を設けることが必要である。このような例として、一部の橋梁では、たわみや固有振動数等の力学的挙動のデータを得るための載荷試験を行い、その結果と理論値を比較するこ

とにより損傷評価の際の資料とする例^{1),2)}がみられるが、複合する損傷に伴うそれらの力学的挙動の変化が明確にされていない状態では、力学的挙動のデータが得られても損傷の詳細な評価ができず、概略的なものにとどまる可能性がある。従来から実橋においては、特に損傷発生率の高いRC床版のみを対象とした、損傷に伴う力学的挙動の変化による損傷評価に関する研究がさまざまな形で行われているが³⁾、橋梁の上部構造全体を対象とした研究は、橋梁の構造条件の個別性、複雑性、あるいは損傷発生に至るメカニズムの複雑性や実橋でのデータ不足等の原因もあり、本格的に進められた例は少ない。過去において固有振動数を扱った例として、川人³⁾はコンクリートの模型ばりにより固有振動数に与えるひびわれの影響を、また加藤ら⁴⁾はPC橋において、破壊過程における振動数の変化をそれぞれ実験により明らかにし、損傷に伴う振動数の変化の定性的傾向を把握しようとしている。本研究では橋梁の上部構造の全体系に着目した損傷の定量的評価法確立への第一段階として、損傷に伴う力学的挙動の変化をモデル計算ならびに模型桁実験により解明し、その結果に基づき、実橋から得られる力学的挙動のデータより、どの程度の損傷を評価できるか、またどのくらいの精度で損傷が評価できるか等、損傷評価の際の力学的挙動の有効性を検討することを目的とし

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

** 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工博 神戸大学助手 大学院自然科学研究科
(同上)

**** 正会員 工修 阪神高速道路公団大阪第一建設部
(〒559 大阪市住之江区北加賀屋2-11-8)

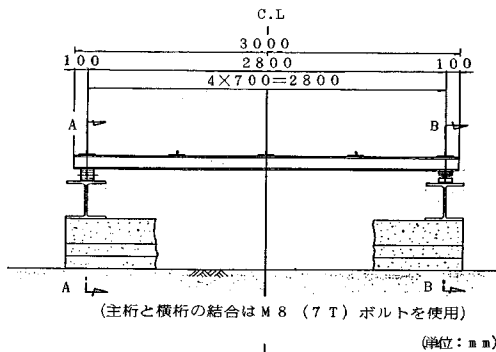
ている。なお、実際に供用されている橋梁の構造条件や、発生している損傷の内容は多種多様であり、これらの個々について検討を加えることは不可能である。したがって本研究では、標準的な単純支持の桁橋を対象形式とし、主桁本数は橋軸直角方向の荷重分配特性等を知るのに必要と考えられる最小限の3本とした。一方、これらのモデルに導入する損傷は、実橋で生じている一般的な損傷、たとえば鋼橋での腐食、継手のゆるみ、合成桁でのずれ止めの損傷、コンクリート橋でのひびわれによる剛性の低下、コンクリートの劣化等、数多くの損傷を理想化できるものとして、曲げ剛性の低下を主に取り上げ、その他、実橋での損傷発生率が高く力学的挙動に影響を与えると考えられる支承に関連する損傷として、沈下、および回転拘束を考慮した。

2. モデル計算、および模型桁実験の概略

(1) 模型桁

図-1に、今回作製した模型桁の一般図を示す。ここでは、力学的挙動に与える要因をできる限り少なくする

(a)に示すように、健全な桁に対し、全長、 $l/2$ 部、および $l/4$ 部で、それぞれ剛性（断面二次モーメント）低下率約20%、40%の桁合計6本をあらかじめ用意し、これらの桁を健全な桁と交換することにより行った。低下率をこのように定めた理由は、後述するモデル計算や簡単なはりによる実験結果⁵⁾より、低下率20%前後で力学的挙動に変化が現われ始めることや、実橋において、腐食により20~30%の剛性が低下している例⁶⁾があること、合成桁のずれ止めの機能が完全に損なわれると50%以上の剛性低下が生ずること、2段階にすることで各力学的挙動の変化の傾向を知ることが可能であること等による。剛性低下は下フランジ幅を減少させることにより導入したが、実橋でみられる損傷では剛性が低下しても質量は不変という場合が多いと考えられるため、質量の減少分は剛性に影響を与えないように、減少させた下フランジ部に鋼材を分布させて接着し、桁全体の質量を常に一定とした。次に横桁の剛性については、実橋における主桁の剛性に対する横桁の剛性の比と模型桁のそれがほぼ同程度となるよう考慮し、表-1(b)に示



(主桁と横桁の結合はM8(7T)ボルトを使用) (単位: mm)

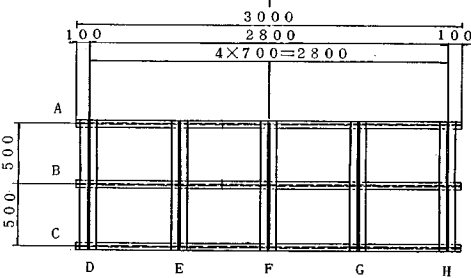


図-1 模型桁一般図

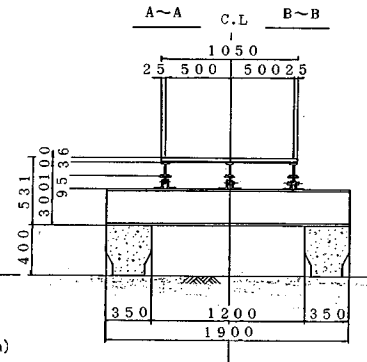


表-1 主桁、横桁の概略

(a) 主桁

NO.	断面二次モーメント(%)	損傷位置 (単位: cm)	実橋での対応損傷	NO.1に対する剛性の比
1	187.0	健全		1.0
2	148.0	30 220 30	主桁のさび 桁と床版のずれ	0.79
3	113.0	全長剛性低下	腐食、ひびわれ	0.60
4	148.0	119 42 119	主桁の局部的さび	0.79
5	113.0	局部剛性低下 ($l/2$ 部)	継手の損傷	0.60
6	148.0	49 42 189	主桁の局部的さび	0.79
7	113.0	局部剛性低下 ($l/4$ 部)	継手の損傷	0.60

ためと、構造モデルを単純化するために床版は設けず、主桁および横桁の剛性低下の影響のみが力学的挙動に現われるように配慮した。実橋でみられる固有振動数（約10 Hz以内）に近づけるため、主桁は既製のH型鋼の中で最小のもの（H-100×50×5×7.5 mm (SS 41)）を使用した。主桁剛性低下としての損傷の導入法は、表-1

(b) 横桁 (全長剛性低下)

NO.	断面二次モーメント(%)	摘 要	主桁に対する剛性の比
1	26.8	実橋における高重分配横桁のモデル	0.14
2	12.4	実橋における対傾構のモデル	0.066
3	0.53	横方向の剛性がほとんど無い場合	28×10 ⁻⁴

す荷重分配横桁と対傾構をモデルとしたT型鋼をそれぞれ作製した。さらに、これに対し剛性が低下したモデルを加え、合計3種類の横桁を用意した。

(2) 模型実験

まず、健全なものを含め7種類の主桁に対し、個々に独立に静的および動的試験を行い、それらから得られた変位、ひずみ、および固有振動数より、各主桁が所定の剛性を有していることを確認した。そして、それら7種類の主桁と3種類の横桁を表2に示すような34ケースに組み合わせ(すべての桁が健全(No.1)の場合を含む)、それぞれについて実験を行った。これら34ケースは、以下に示す4シリーズに大別できる:

(1) シリーズ1 (15ケース): 横桁の組合せは変えず、主桁の剛性低下が力学的挙動に与える影響を調べることを目的としている。なお、E、G(図-1参照)に横桁を取り付けていないのは、力学的挙動に与える要因を可能な限り少なくするためで、以下のシリーズにおいても、必要な場合以外は最小限の数とした。

(2) シリーズ2 (9ケース): シリーズ1の主桁の組合せのうち代表的なものについて、スパン中央、Fの横桁を、その剛性が約半分(対傾構のモデル)のものに取り替えている。このシリーズとシリーズ1との結果を比較することにより、主桁の剛性低下による力学的挙動変化への横桁の剛性の影響を調べることを目的としている。

(3) シリーズ3 (7ケース): シリーズ1、2に対し、主桁は常に健全な状態で、横桁の組合せを変化させることにより、横方向の剛性低下による力学的挙動の変化を

調べることを目的としている。

(4) シリーズ4 (2ケース): シリーズ1の健全な状態の主桁、横桁の組合せ(No.1)で、外桁または中桁の支点のローラを取り除いて自由端として実験を行い、支点の沈下による影響を調べた。

(3) 実験および解析方法

動的および静的試験の概略を図-2に示す。静的試験は図中に示す2か所にそれぞれ載荷し、ひずみおよびたわみを計測した。ひずみの測定位置は図-2に示す位置での下フランジ下面とした。荷重の大きさは、3主桁の1等橋にT-20荷重を載荷した場合に生じるたわみのスパンに対する比が、模型桁のそれと同程度になるように、200 kgfとした。

動的試験ではその動的諸量の算出にモーダル解析^{7),8)}を適用するため、図-2に示す11測点に加速度計を設置し、4か所からの単一衝撃入力を与える、固定振動法と移動振動法の併用で伝達関数の導出精度を高めるため、それぞれの位置で20回ずつ衝撃入力を与え、そのときの応答加速度をデータレコーダに記録した。

図-3は、モーダル解析の一連の流れを図示したもので、任意点における入力と応答の関係が既知となれば伝達関数を利用してモーダルパラメーター(卓越振動数、振動形、振幅、位相、減衰定数)を同定することができる。また、卓越振動数を算出することにより得られる振動モードはアニメーション化でき(図-7参照)、振動次数の同定が容易となる。なお、モーダル解析における伝達関数は、上述20回の衝撃入力に対する応答の加重平均として求めた。

(4) モデル計算

模型実験と並行して、解析モデルを用いた計算による力学的挙動の変化を確認し、実験結果とどの程度の一致が得られるかを調べ、今後、実橋へ適用する際の解析モデルの精度を検討した。また、模型実験では実施できなかった範囲の剛性低下の影響や、支点の回転拘束の影響

表-2 実験における主桁、横桁の組合せ

シリーズ No.	実験 No.	主 桁			横 桁															
		A	B	C	D	E	F	G	H											
1	1	1	1	1	2															
	2	1	2	1	2	1														
	3	1	3	1	2	1														
	4	1	5	1	2	1														
	5	1	7	1	2	1														
	6	1	1	2	2	1														
	7	1	1	3	2	1														
	8	1	1	4	2	1														
	9	1	1	5	2	1														
	10	1	1	6	2	1														
	11	1	1	7	2	1														
	12	2	2	1	2	2	1													
	13	2	2	2	2	2	1													
	14	3	3	1	3	2	1													
	15	2	3	2	2	2	1													
2	1	1	1	1	2															
	3	1	3	1	2	2														
	4	1	5	1	2	2														
	5	1	7	1	2	2														
	7	1	1	3	2	2														
	9	1	1	5	2	2														
3	1	1	1	7	2	2														
	14	3	1	3	2	2														
	16	3	3	3	2	2														
	17	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2									
4	18	1	1	1	2	3	2	3	2	3	2									
	19	1	1	1	3	3	2	3	3	3	3									
	20	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3									
	21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1									
	22	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2									
	23	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2									
	A	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2									
B	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2										

注) 表中の桁記号は図1参照、表中の数字は桁番号を示す(表1参照) ブランクの位置は横桁を取り付けていない。

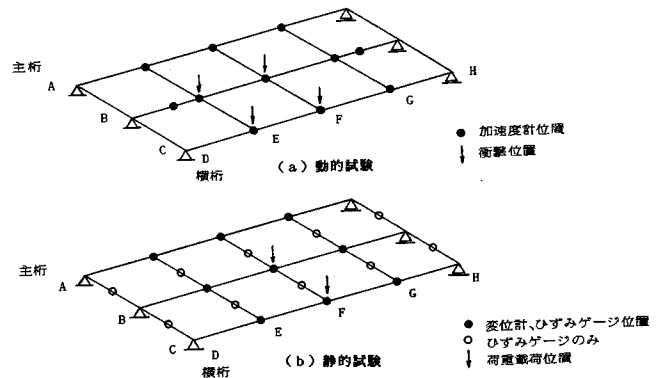


図-2 各試験の概略

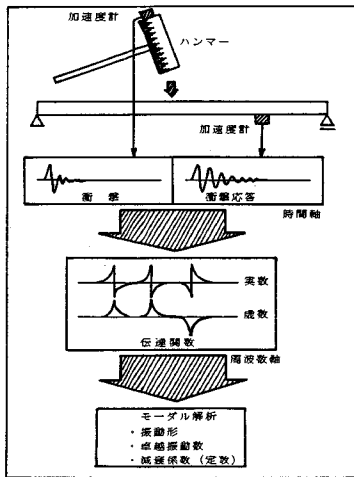


図-3 モーダル解析の概略⁸⁾

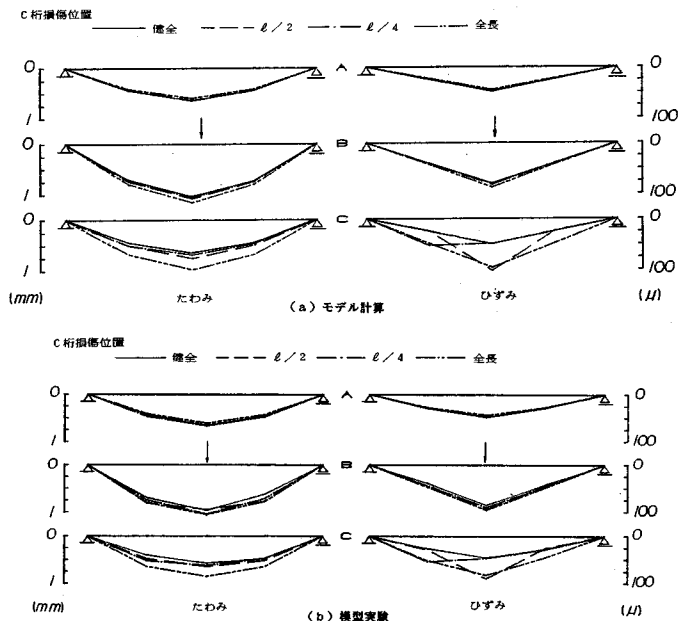


図-5 外桁剛性低下時の変位およびひずみ分布 (中桁載荷時)

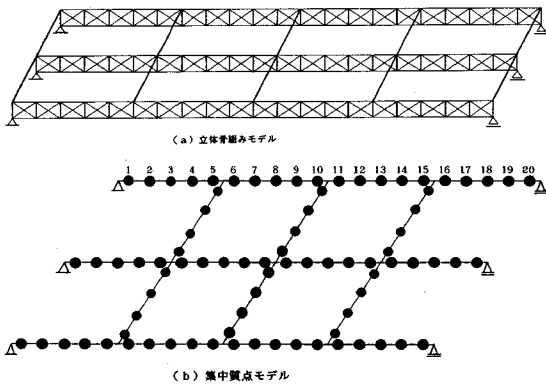


図-4 解析モデル

についても、力学的挙動の変化を算出した。以下にモデルの概略を説明する。

静的解析モデルは図-4 (a) に示す立体骨組モデルとした。これは特に、局所的な剛性低下を導入した場合、主桁、横桁の荷重分配作用を調べるには、このような三次元モデルを採用した方が精度がよいとされている⁹⁾ためである。一方、動的解析モデルは図-4 (b) に示すように、主桁を 20 質点、横桁を 8 質点に分割した集中質量モデルとし、ねじれ剛性のある格子桁として伝達マトリックス法により固有振動数および振動モードを求めた。

3. 計算および実験結果

(1) 静的変位およびひずみ

図-5 に、シリーズ 1 での外桁が剛性低下 (低下率 40%) した場合の変位およびひずみ分布の解析モデルによる計算結果、および実験結果をそれぞれ示す。計算および実験結果の両者を比較すると、ひずみの場合には非常によく一致し、局所的な剛性低下の影響も明確に現われている。一方、変位は、主桁全長において剛性低下が生じた場合、両者の結果はよく一致するものの、局所的な剛性低下では計算でみられるほど、細かな変化は実験結果に現われてこない。これは測定精度とも関係するが、変位には、本質的に局所的な剛性低下の影響が現われにくいとためと考えられる。また、同一の剛性低下が中桁で生じた場合と、外桁で生じた場合とでは、全体に与える影響が大きいのは、外桁の場合であった。

次に、主桁に導入した剛性低下を図-5 と対応させ、横桁の剛性を小さくしたシリーズ 2 の場合の実験結果を図-6 に示している。図-5 と比較すると、全体の荷重分配効果が劣ることで、他の主桁への剛性低下の影響が少なくなり、剛性低下の生じた主桁のみでその影響が現われる傾向がみられる。

最後に、支点的損傷として、計算では沈下と回転拘束、実験では沈下のみの影響を調べた。その結果、支点到これらの損傷が生じた場合、変位、およびひずみの橋軸方向分布が大きく変化する結果となった。しかし、支点沈下の場合のひずみ分布は健全時と比べほとんど変化しないが、支点上の横桁のひずみのみが大きくなる傾向を示した。

(2) 固有振動数

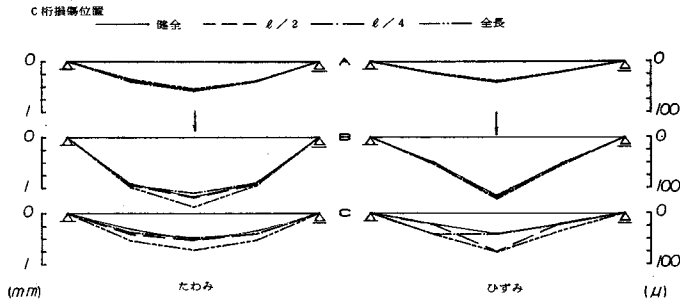


図-6 シリーズ2における外桁剛性低下時の変位およびひずみ分布

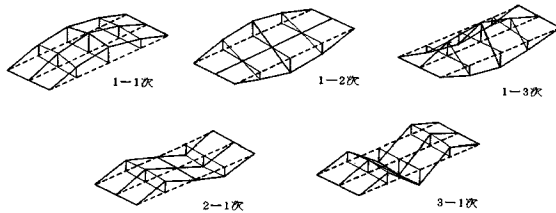


図-7 対象とした振動次数とモード

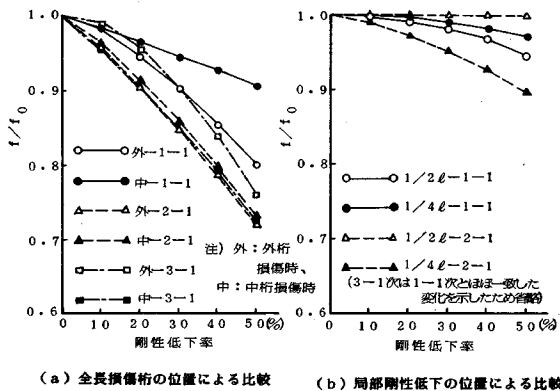
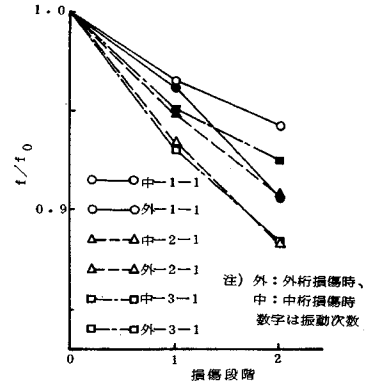


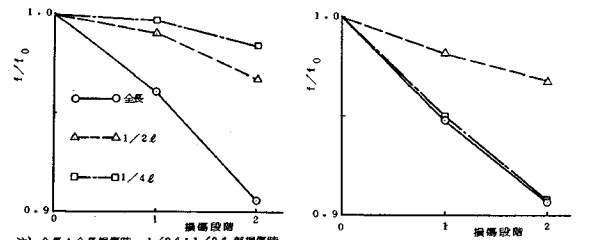
図-8 剛性低下率と振動数変化の関係(解析結果)

本研究で対象とした振動次数は、1-1次、1-2次、1-3次、2-1次、3-1次の5つの振動数で、そのモードを図-7に示す。これら5つの振動数が、剛性低下を導入した主桁位置、橋軸方向および横桁位置により、特徴的な変化の傾向を示した。すなわち、図-8(a)、(b)は、それぞれ外桁あるいは中桁のうち、1本の主桁が全長にわたる剛性低下を生じた場合、および外桁に局部的な剛性低下を生じた場合の曲げ振動数変化の解析結果を示したものである。また、図-9(a)~(d)は、解析結果とほぼ対応させた実験結果をまとめて示したものである(損傷段階1は剛性低下率20%、同2は40%を表わしている)。これらより以下のことが明らかである：

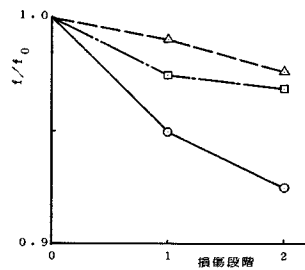
① 外桁全長にわたる剛性低下が生じた場合は、各次の振動数変化がほぼ同程度であるのに対し、中桁全長の剛性低下が生じた場合は、1-1次の振動数変化が他に比



(a) 全長損傷桁の位置による比較



(b) 外桁剛性低下時の振動数変化(1-1次) (c) 外桁剛性低下時の振動数変化(2-1次)



(d) 外桁剛性低下時の振動数変化(3-1次)

図-9 損傷段階と振動数変化との関係の凡例(実験結果)

べて小さくなっている。これらの傾向は解析結果とほぼ一致したものとなっている(図-8(a)、図-9(a)参照)。

② 主桁全長にわたる剛性低下が生じた場合の各次の振動数変化の程度は、局部的剛性低下の場合より大きくなる(図-8(a)、(b)、図-9(a)~(d)参照)。

③ 局部剛性低下の位置による振動数変化の実験結果に注目すると、1-1次の振動数に与える影響は、 $l/2$ 部で生ずる剛性低下の方が、また、2-1次、3-1次に与える影響は、 $l/4$ 部で生ずる剛性低下の方が、それぞれ大きくなっている。これは振動モードの腹、節の位置に関係しているものと考えられ、モードの腹にあたる位置で剛性低下が生じると、その振動数に大きな変化が現われることになる。これらを解析結果と比較すると、1-1次、2-1次についてはほぼ一致する傾向を示しているが、3-1次については逆の傾向となっており、実験において

横桁の効果が大きく現われたものと考えられる (図-8 (b), 図-9 (d) 参照)。

図-9は、シリーズ1 (表-2参照) の実験結果を示したものであり、横桁の剛性が他と比べて比較的大きい場合の結果である。そこで、横桁剛性低下の影響を明らかにするため、表-3に横桁の剛性を低下させたシリーズ2との比較を示す。この表から、シリーズ2 (横桁剛性低下) においてはシリーズ1と異なり、特に3-1次の振動数に与える影響は、損傷導入位置 ($l/2$, $l/4$ 部) によりあまり変化しなくなることがわかる。このように3-1次の振動数のように高次のものになるほど、横桁の剛性等の影響が現われにくくなり、それだけ実験におけるばらつきも大きくなる可能性がある。

図-10は、中桁あるいは外桁で全長にわたる剛性低下が生じた場合のねじれ振動の変化の解析および実験結果を示したものである。また、図-11には、横桁の剛性を変化させた、シリーズ3におけるねじれ振動の解析および実験結果を示している。両図からわかるように、ねじれ振動は、橋軸直角方向の剛性のバランスが崩れるような損傷が生じた場合や、横桁の剛性低下が生じた場合の高次の振動数で変化しやすいことがわかる。

以上のように、模型実験より得られる各次の固有振動数変化は多質点モデルによる解析結果と比較的よく一致した傾向を示しており、3-1次のような高次の振動数以外はばらつきも少なく、再現性もあり、わずかの剛性の変化の影響も明確に現われやすいことが明らかとなった。

(3) 振動モードおよび振幅

図-12 (a)~(h) に、実験より得られた振動モード

の変化の一例を解析結果とともに示している。ここでは、振動モードの変化をB桁 $l/2$ 部を基準値 (1.0) とする基準振動形として表わしている。これらより以下のことが明らかとなる：

① 中桁 (B桁) に損傷 (剛性低下) が発生した場合、振動モードには健全時に比べほとんど変化が現われない (図-12 (b) 参照)。これに対し、

② 外桁 (A, C桁) に損傷 (剛性低下) が発生した場合、それが局部的な損傷の場合でも、その振動モードには健全時に比べ大きな変化が現われ、しかも $l/2$ 部に局部剛性低下が生じた場合と、 $l/4$ 部に局部剛性低下が生じた場合とでは、モード変化の現われ方に差が出る (図-12 (c), (d), (h) 参照)。

③ 支点沈下が生ずるような損傷が生じた場合、静的変位の結果 (図-5参照) と同様に支点の損傷を生じている桁のモードの橋軸方向分布が大きく変化する (図-

表-3 局部剛性低下時の振動数変化率

損傷位置	シリーズ No.	振動次数		
		1-1	2-1	3-1
$l/2$	1	3.2	2.3	2.3
	2	3.8	0.7	3.4
$l/4$	1	1.6	9.2	3.1
	2	1.1	5.7	3.0

単位：%

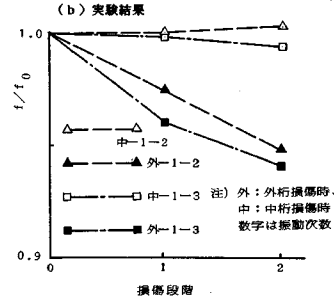
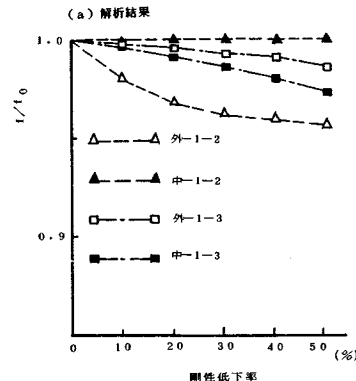
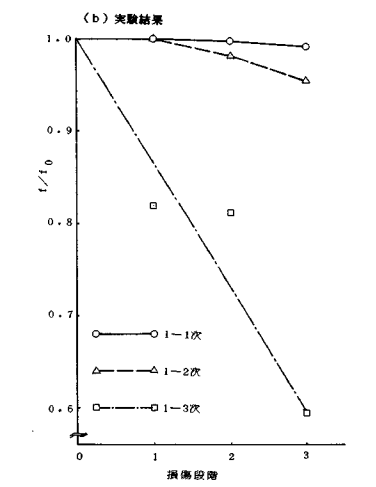
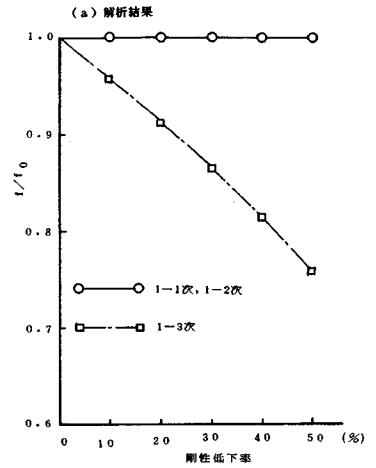
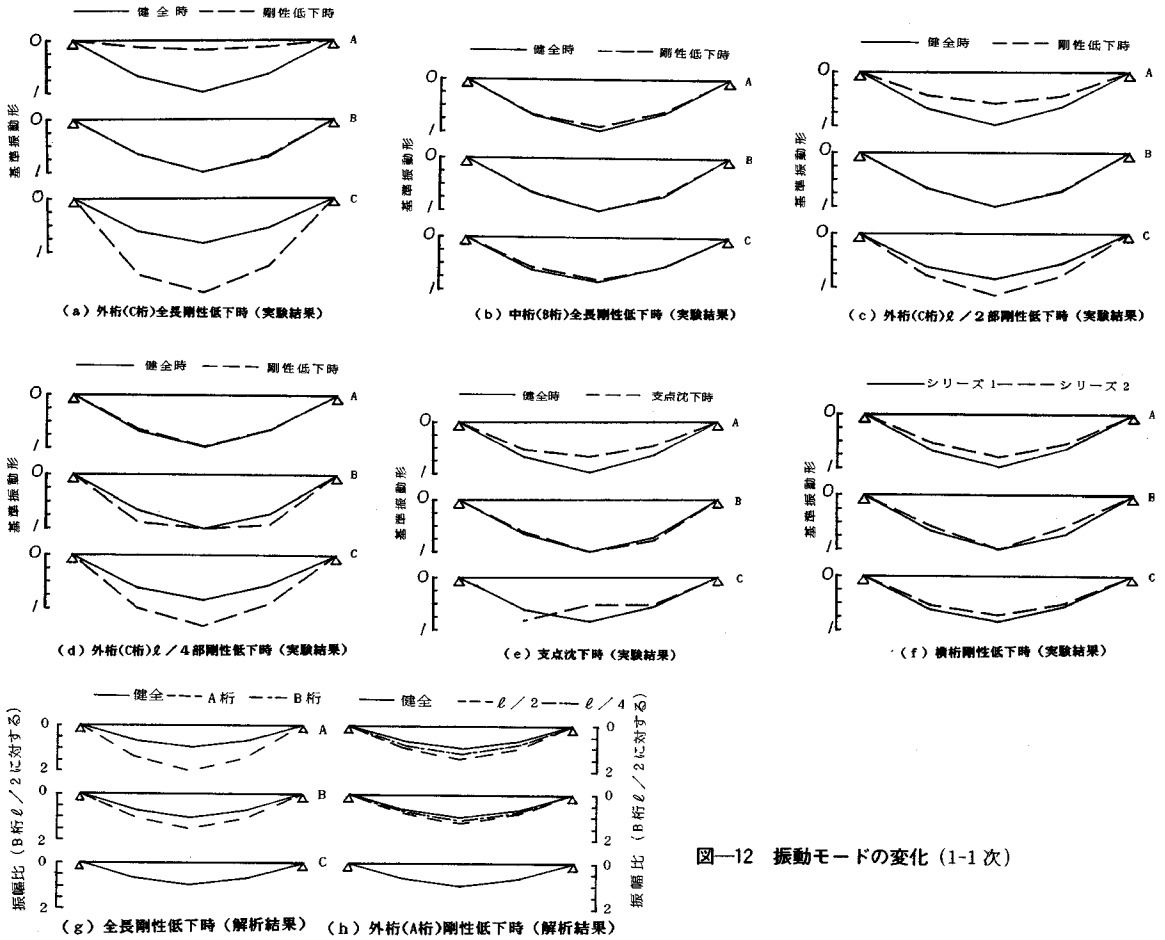


図-10 ねじれ振動に及ぼす全長剛性低下桁位置の影響

図-11 横桁剛性低下のねじれ振動数に及ぼす影響



図—12 振動モードの変化 (1-1 次)

12 (e) 参照)。

④ 主桁剛性が一定で横桁の剛性低下が生じるような損傷が発生した場合、荷重分配効果の低下により外桁の振幅が小さくなる傾向がある (図—12 (f) 参照)。

図—13 は、外桁および中桁の全長剛性低下時の振幅変化率を示したものである。これより、中桁剛性低下の振幅変化率に及ぼす影響はほとんどみられないが、外桁剛性低下は振幅変化率に顕著な影響を及ぼすことがわかる。

(4) 減衰定数

振動減衰に与える影響要因は非常に多く¹⁰⁾、今回の模型実験結果にもばらつきとして現われた。図—14 は、各桁の全長および局部剛性低下を模型桁全体の剛性低下に換算した場合の減衰定数の変化を示したものであるが、ある程度以上の剛性低下が生じなければ減衰定数の増加となって現われないようである。このことは、振動減衰に目立った変化がみられるようになる場合には相当大きな損傷が発生している可能性があることを示していると考えられる。

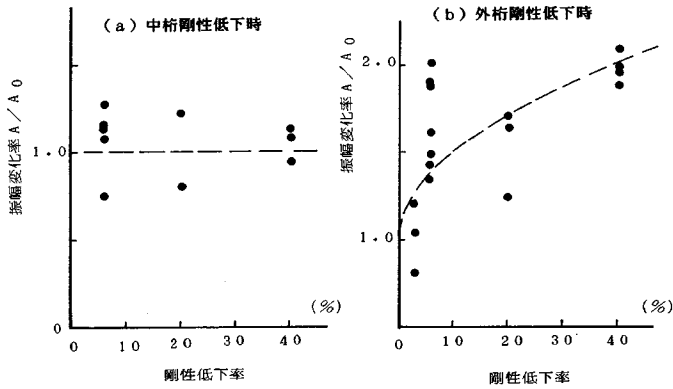
(5) まとめ

以上、得られた各力学的挙動の変化をまとめて概略的に示すと表—4 のようになる。一般に、中桁よりも外桁で損傷 (剛性低下) が生じる場合、すなわち橋軸直角方向についてのバランスが不均衡となるような損傷に対して、各力学的挙動の変化は大きくなる傾向がみられた。

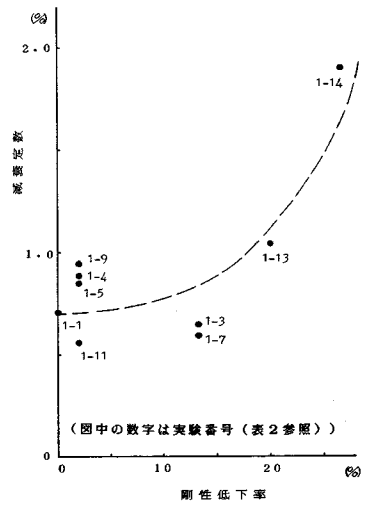
4. 損傷評価における力学的挙動の有効性と評価法の検討

前節までの検討結果を基に、模型実験でみられたデータのばらつき等を考慮し、力学的挙動の損傷評価における有効性を検討するとともにこれらを利用した損傷評価法を提案する。

模型実験および集中質点モデルによる解析より明らかとなった主桁および横桁損傷 (剛性低下) による力学的挙動の変化をまとめて模式的に示すと図—15 のようになる。また、これらの力学的挙動の変化の特徴を項目別に整理し、相対比較したものを図式化すれば図—16 のようになる。これら両図から各力学的挙動についての考



図—13 全長剛性低下の振幅変化率に及ぼす影響



図—14 剛性低下（換算）と減衰定数の関係

表—4 各力学的挙動の変化の概要

損傷位置	静的挙動	動的挙動					
		変位	ひずみ	振動数 (0-1, 2-1, 3-0)	ねじれ振動数 (1-2, 1-3)	振動形	減衰定数
中桁	部分的剛性低下	ばらつきが大きく、低下率40%でやや増加	ばらつきが少なく、低下率に対し比例的に増加	2の時1-1が2の時2-1が減少率大	1-3は減少するが、1-2はほとんど変化なし	ほとんどなし	ばらつきが大
	全断面剛性低下	剛性低下に対し段階的に増加	ばらつきが少なく、低下率に対し比例的に増加	1-1の減少率は2-1, 3-1のそれに比べ小	両者とも減少するが、1-3の方が減少率大	変化大	低下率40%で増加の傾向が出現
外桁	部分的剛性低下	中桁の場合よりも変化の傾向はやや顕著	ばらつきが少なく、低下率に対し比例的に増加	2の時1-1が2の時2-1が減少率大	両者とも減少するが、1-3の方が減少率大	低下率20%でも変化育、2/4が影響大	ばらつきが大
	全断面剛性低下	他の桁に与える影響も大	ばらつきが少なく、低下率に対し比例的に増加	3つの振動数の減少率がほぼ同一	変化大	低下率40%で増加の傾向が出現	ばらつきが大
横桁	剛性低下	荷重分配効果が劣り、損傷の影響が他の桁へ分配されない	ほとんどなし	ほとんどなし	1-3の振動数が減少大	中桁の振幅が外桁に比べ大	ばらつきが大
支点	沈下	橋軸方向の分布が変化	ほとんどなし	やや減少	やや減少	橋軸方向の分布が変化大	ばらつきが大

察をまとめると以下のようなになる：

(1) 変位（たわみ）はわずかな損傷に対しても敏感に変化するものの、平均化された挙動変化として現われるためその絶対量は小さく、測定精度等の関係もありばらつきが大きくなりやすく、特に局部的な損傷、あるいは横桁損傷に対しては、感度が鈍る。

(2) ひずみは損傷に対する敏感性、あるいはデータのばらつきの点では損傷評価項目としての要件を備えていると考えられるが、損傷部のみで変化する傾向があり、測点を設けなかった部分の損傷を見落とす可能性がある。

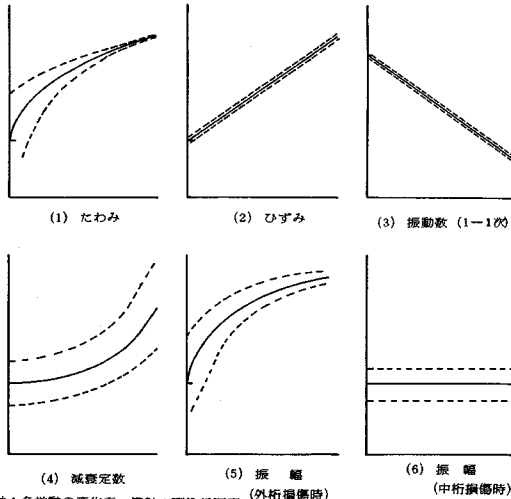
(3) 各次の振動数は、損傷に対する鋭敏性という点では今回考慮している力学的挙動の中では中程度に位置するが、特に比較的低次の振動数については精度もよい。また、ねじれ振動や高次の曲げ振動に対する振動数をすることで、局部的な損傷についても評価できる可能性があり、他の力学的挙動に比べ、損傷評価項目としての要件を最も多く満たしているものと考えられる。

(4) 減衰定数については、測定値のばらつきが大きく、軽微な損傷に対してはその変化は著しく鈍感である。しかし、逆にこの点を利用し、減衰定数に大きな変化が現われる時点で重大な損傷をチェックできることになる。

(5) 振幅、および振動モードは、外桁の損傷と中桁の損傷に対してその変化に大きな差が現われた。すなわち、橋軸直角方向の剛性のバランスに変化を生じさせない中桁の損傷では、振動モードはほとんど反応しないが、逆にそのバランスを崩すような外桁の損傷に対しては、他の力学的挙動に比べ最も敏感に変化する。

以上の検討結果、損傷評価法としては各次の固有振動数の変化に従うのを基本とし、必要に応じて感度の高い項目でチェックする手法が有効と考えた。そこで、モデル計算、模型実験の結果を参考にし、今回のモデルを対象とした固有振動数による損傷評価法を作成し、どの程度損傷の評価が可能であるかを検討する。

解析および実験結果より明らかとなった各次の振動数変化の傾向を整理すれば、その特徴をいくつかに分類することができる。ここではそれを利用し、分類を実行する際の条件を情報とする分岐の作成を行い、損傷位置推定のフローを図—17のように作成した。同図は、IF A THEN B ELSE C ルールの知識ベースに基づく形式を基本とするフローであり、図中(2)の評価項目以降で、ねじれ振動による橋軸直角方向についての損傷評価と、曲げ振動による橋軸方向についての評価とに分けられ、それらの結果を合わせ、二次元的な損傷位置の推定を行うおうとするものである。また、固有振動数以外の力学的挙動についてもそれぞれの評価項目における変化の特徴



注) 縦軸：各挙動の変化率、横軸：剛性低下率
点線の幅はばらつき程度を表す

図-15 剛性低下による各力学的挙動の変化の概略

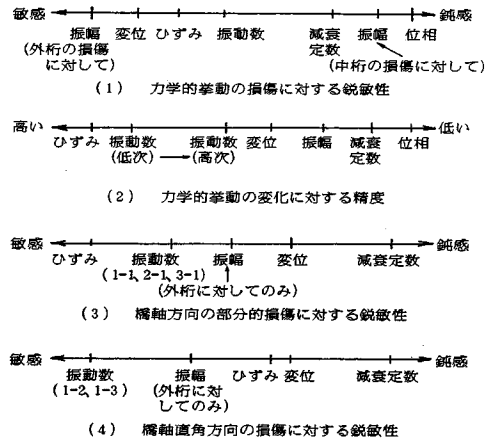
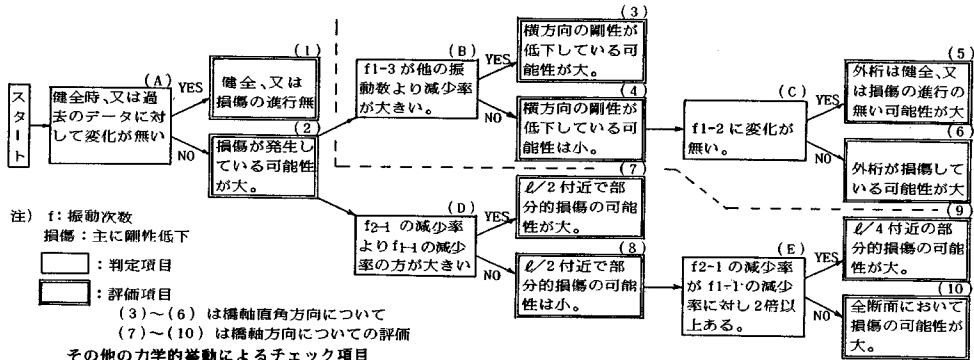


図-16 各力学的挙動の特性の相対比較



注) f: 振動次数
損傷: 主に剛性低下
□: 判定項目
□: 評価項目

(3)~(6)は橋軸直角方向について
(7)~(10)は橋軸方向についての評価

その他の力学的挙動によるチェック項目

評価N.O.	チェック項目	内容
(1)	全挙動	変化なし
(2)	全挙動	変化している項目を整理
(3)	ひずみ、変位	荷重分配が劣る
	モード	外桁の振幅が小
(4)	ひずみ、変位	荷重分配に変化なし
	モード	外桁の振幅に変化なし
(5)	ひずみ、変位	中桁の値が増加
	モード	全体的に変化なし
(6)	ひずみ、変位	外桁の値が増加
	モード	外桁の振幅が大
(7)	ひずみ	1/2 l 付近の値が増加
(8)	ひずみ	1/2 l 付近の値が他に比べ特に大でない
(9)	ひずみ	1/4 l 付近の値が増加
(10)	ひずみ、変位	損傷している桁を中心に増加
	減衰定数	変化率に注目

図-17 固有振動数による損傷評価フロー

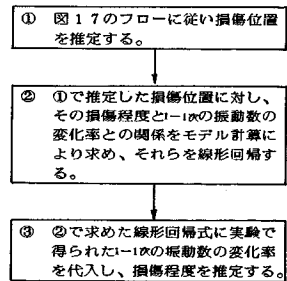


図-18 損傷評価の流れ

をチェック項目として示しており、各評価が得られた時点でこれらを確認することで評価精度を高めることも可能である。なお、本手法は単一損傷を導入したモデル計算および模型実験結果に基づいているため、特定の損傷の進行が卓越している場合の位置の推定に適するものであるが、図-8~11より明らかのように、種々の損傷による各次の固有振動数の変化は剛性低下とほぼ線形関係にあり、重ね合わせを仮定することにより本手法が有効

に利用できると思われる。

次に、図-17のフローを利用することにより損傷位置の推定を行った後の損傷程度の推定法の検討を行う。ここでは、剛性低下と低次の固有振動数の変化との間の線形関係を利用することより、図-17のフローで推定した位置に対して、1-1次の振動数と剛性低下の関係を模型実験あるいはモデル計算により求め、これらを線形回帰し、その回帰式より損傷程度を推定する。この手法の流れを図-18に示す。図-18に従って、今回の模型

表—5 剛性の推定結果 (単位：%)

実験 No.	推 定 値		実際の剛性低下率
	実 験	モデル計算	
1-2	22.3	20.6	20.0
1-3	30.5	25.5	40.0
1-4	5.1	6.9	6.0*
1-5	4.5	2.7	6.0*
1-6	23.7	21.5	20.0
1-7	43.4	33.2	40.0
1-8	2.4	3.3	3.0*
1-9	5.7	7.2	6.0*
1-10	4.5	2.7	3.0*
1-11	6.0	5.4	6.0*

*局部剛性低下を全長剛性低下に換算した値

実験結果から推定した損傷程度の一例を表—5に示す。実橋で損傷評価を行う場合、個々の橋梁について模型を作製することは困難であるため、モデル計算の結果より推定することになるが、表—5の結果より判断すれば、モデル計算で推定した場合でも、ほぼ妥当な評価ができるものと思われる。これは、この推定に用いている固有振動数が、特に精度がよく理論値とも一致しやすい低次の振動数であるためと考えられる。しかし、今回は健全時の振動数が、実験より確認できたが、実橋において健全時のデータが存在する場合はほとんどなく、計算により健全時の状態を推定することになる。したがって、その際の計算のモデルの精度や、それらの計算結果がどの程度一致するかを実橋において確認する必要がある。ただ、今回の推定法は、振動数の変化が線形であることを利用しているため、たとえ損傷がある程度進行した段階でのデータに対する比較でも、同様の方法により、どの程度損傷が進行したかを推定できるものと考えられる。

5. あとがき

本研究は、橋梁の損傷評価に利用される力学的挙動の感度、精度等を対象とする有効性を、モデル解析および模型実験で検証し、これらを利用した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) 損傷評価に一般的に利用される力学的挙動の変化は、損傷位置やその程度により、それぞれ特徴的傾向を示し、これらを組み合わせた損傷位置および程度の評価が可能である。

(2) 固有振動数は、一般的な評価に利用されている低次の曲げ振動だけでなく、ねじれ振動や高次の振動数を含めることによって、損傷位置に対する鋭敏性や精度を高めることが可能である。また、損傷程度(剛性低下)とほぼ線形関係を有する等、今後の評価法開発にあつ

て最も有効となり得るパラメーターと考えられる。

(3) 各次の固有振動数の変化を基本とする損傷評価法を検討した結果、IF A THEN B ELSE Cルールを基本とする知識ベースに基づく方法により損傷位置が推定でき、その評価結果もほぼ妥当なものであった。

(4) モデル計算と模型実験両者の力学的挙動変化の傾向は比較的よく一致しており、さらに解析モデルの精度を高めることによって、モデル計算のみで各種損傷による力学的挙動変化の概略を知ることが可能となる。

なお、本研究で対象としたモデルは3主桁の単純支持で、しかも損傷が比較的大きい場合を対象としたが、他形式および損傷程度の小さい場合についても、力学的挙動の変化や損傷評価法の基本的な考え方は同様であると考えられ、今後検討していく予定である。

謝 辞：本研究の模型桁作製にあたり、(株)栗本鉄工所の皆様方に多大なご協力を頂いたことを記し、関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会関西支部：既設の橋梁構造およびその構成部材の健全度、耐久性の判定に関するシンポジウム論文集、1983.2.
- 2) 橋梁と基礎：補修・補強特集号、建設図書、Vol.17、No.8、1983.8.
- 3) 川人達夫：振動特性による橋梁の健全性調査法に関する研究(その1)、日本道路公団、昭和48年度試験報告、pp.158~167、1974.11.
- 4) 加藤雅史・高木保志・島田静夫：PC橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第341号、pp.111~116、1984.1.
- 5) 西村 昭・宮本文徳・加賀山泰一・新宅正道：橋梁模型による耐用性評価法の開発、第39回年次学術講演会講演概要集第1部、pp.389~390、1984.10.
- 6) 日本鋼構造協会：鋼構造物の耐用性調査報告、道路橋編、JSSC、Vol.8、No.84、pp.6~26、1972.12.
- 7) Hewlett Packerd：5451C Fourier Analyzer System Operating Manual-MODAL ANALYSIS OPERATING & SERVICE MANUAL、1978.
- 8) Ewins, D. J. : Modal Testing : Theory and Practice, Research Studies Press, 1984.
- 9) Heins, C. P. and Kato, H. : Load Redistribution of Cracked Girders, Jour. of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST8, pp.1909~1915, 1982.8.
- 10) 伊藤 学・片山恒雄：橋梁構造の振動減衰、土木学会論文報告集、第117号、pp.12~21、1965.5.

(1986.6.11・受付)