

斜材を有する上路式 PC 吊床版歩道橋の振動特性

Vibration characteristics of PC stress ribbon pedestrian bridge with roadway slab decks and diagonal members

梶川康男*, 深田宰史**, 久保修平***, 近藤真一****

Yasuo Kajikawa, Saiji Fukada, Shuhei Kubo and Shinichi Kondoh

*工博, 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

**博 (工), 金沢大学大学院助手, 自然科学研究科 (同上)

***金沢大学大学院学生, 自然科学研究科 (同上)

****住友建設株式会社, 土木本部技術部 (〒160-8577 東京都新宿区荒木町 13 番地の 4)

Six prestressed concrete stress ribbon bridges with roadway slab decks have already been constructed. For instance, there is Kouryu Bridge with diagonal members. Because there wasn't Bridge with diagonal members in prestressed concrete stress ribbon bridges with slab deck, vibration behavior is not clear.

Therefore we carried out vibration tests on this bridge. The static, eigen value and dynamic response analysis were also simulated to verify the validity of analytical model with diagonal members. Moreover, analytical model with vertical members was made. Comparison of vibration characteristics in these bridges with diagonal members and with vertical members, we confirmed the difference of that with each web member.

Key words: stress ribbon bridge with roadway slab decks, vibration characteristics

キーワード: 上路式PC 吊床版橋, 振動特性

1. はじめに

コスト縮減, 省力化の流れを受けて, 経済性や景観性に優れた上路式 PC 吊床版橋^{1)~3)}が全国で数多く架設されている。この橋梁は, 上床版, 吊床版およびストラットからなり, 吊床版の上にストラットを介して路面となる上床版を載せた構造である。長所として, 吊床版が直接路面となる直路式吊床版橋と異なり, 路面の縦断線形が平坦になるため, 歩道橋においてはバリアフリー化でき, 道路橋においては通常の車両通行が可能となる。また, 吊床版のサグ比を大きく設定することで水平力を抑えることができる。

この上路式 PC 吊床版橋は, 我が国でも既に歩道橋 4 橋〔潮騒橋 (静岡), 夢つり橋 (石川), ハ塔寺遊歩道橋 (岡山), 交流橋 (岐阜)], 道路橋 2 橋〔速日峰橋 (宮崎), 湯の花橋 (愛媛)] が架設されている。ストラット形式別に見ると, 斜材形式を採用した交流橋 (岐阜県荘川村) 以外の橋梁は, すべて鉛直材形式である。

交流橋は, 河川における計画高水位の制約条件から, 他の上路式 PC 吊床版橋に比べてサグ比 (1/25) を大きくとることができなかったことから, 全体剛性を増加させて歩行者の使用性や耐風安定性を向上させるために, 鋼トラス

斜材で上床版を支持する構造となっている。

本研究では, まず斜材を有する交流橋において, 車両を用いた静的載荷実験, 人力による加振実験を行い, 交流橋の有する剛性および振動特性について把握した。さらに, 斜材を有する解析モデルを作成して静的解析, 固有値解析および歩行, 走行による動的応答解析を行い, 実験値と比較することで交流橋の特性を表現できる解析モデルを構築した。

次に, ストラット形式の違いによる振動特性および歩行による動的応答特性の違いについて検討するために, 交流橋と同一のスパン, サグおよび断面形状の鉛直材を有する解析モデルを試設計した。鉛直材を有する解析モデルにおいても, 斜材形式の場合と同様に静的解析および固有値解析を行い, ストラット形式の違いによる剛性および振動特性の違いを検討した。最後に, 鉛直材を有する解析モデルに対して, 斜材を有する解析モデルで行った場合と同じ解析条件を用いて共振歩行, 走行による動的応答解析を行い, ストラット形式の違いによる振動使用性への影響について検討した。

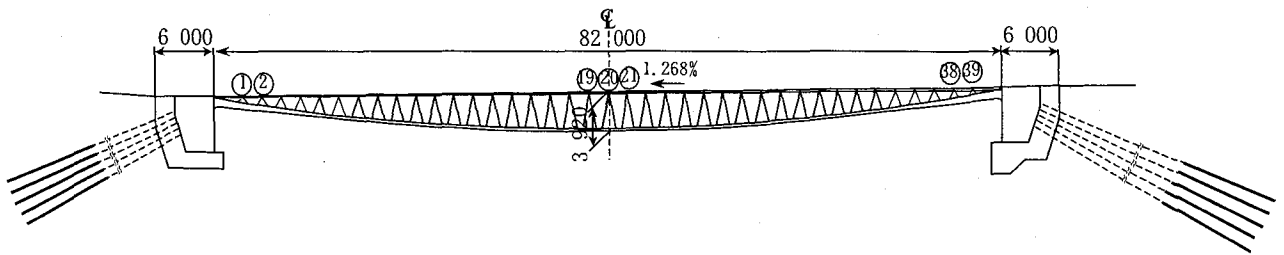
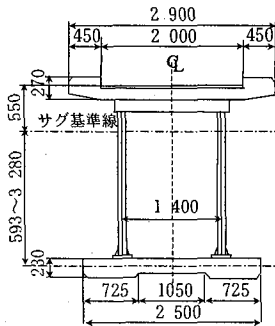
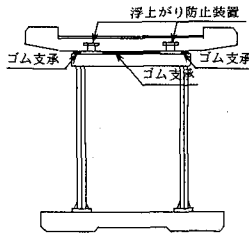


図-1 側面図



(a) 標準断面

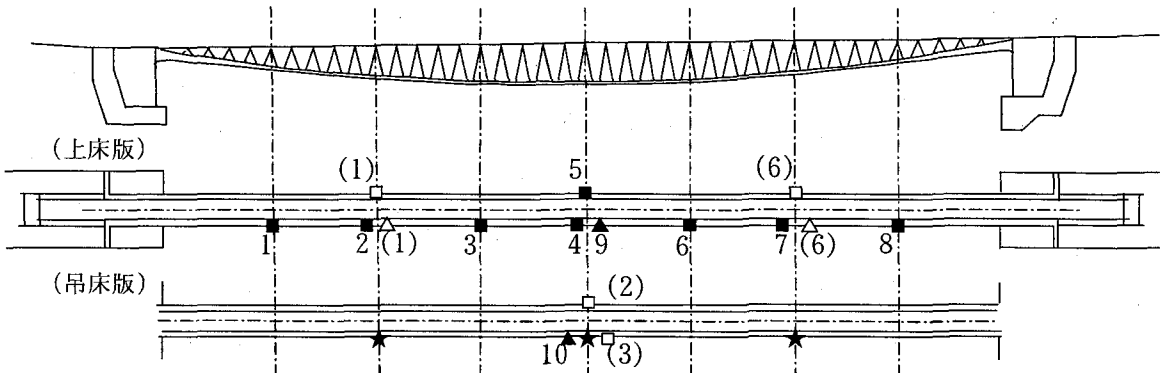


(b) 19, 20, 21 断面

表-1 交流橋の構造諸元

橋長(支間長)	94.0m (82.0m)
全幅(有効幅員)	2.9m (2.0m)
サグ	3.28m
サグ比	1/25

図-2 断面図



■ : 速度計 (鉛直) ▲ : 速度計 (水平) ★ : 変位計
□ : 速度計 (鉛直, 配置換え) △ : 速度計 (水平, 配置換え)

図-3 測点配置図

2. 対象橋梁の概要

検討の対象とした交流橋は、これまで架設された上路式 PC 吊床版橋の中で最大スパンを有しており、支間長 82.0m、吊床版のサグ 3.28m (サグ比 1/25) である。交流橋の側面図を図-1、断面図を図-2、構造諸元を表-1 に示す。

交流橋は、河川の計画高水位の制約条件から他の上路式 PC 吊床版橋に比べてサグ比を大きくとることができなかった。したがって、全体剛性を増加させ、歩行者の使用性や耐風安定性を向上させるために、鋼トラス斜材で上床版を支持する構造となっている。鋼トラス斜材を用いることで、鉛直材を用いた場合に比べてたわみ特性が大幅に改善できる。

交流橋の特徴は、上床版は兩岸の橋台と剛結されており、スパン中央で温度変化などによる伸縮を可能とする構造になっていることである。そのため、スパン中央を含む 3 箇所の斜材部分において斜材上端と上床版との間にゴム

支承が挿入されている (図-2 (b) 参照)。

3. 実験概要

3.1 静的載荷実験

対象橋梁の有する剛性の確認および実験結果と解析結果との比較から解析モデルの妥当性を確認するために静的載荷実験を行った。また実験では、19.6kN トラックにコンクリート塊を積載した総重量 40.57kN の車両を上床版の支間の 8 等分点に載荷したときの吊床版の鉛直変位を計測した。変位計の測点配置図を図-3 に示す。

3.2 振動実験

振動実験ではサーボ型速度計 (東京測振 (株) 製・VSE-15、計測周波数 0.1~70Hz) を 10 個用いて、各測点に配置した。測点配置図を図-3 に示す。

(1) 衝撃加振実験

衝撃加振実験は、対象橋梁の各卓越振動数を把握するために行った。吊床版橋は、橋梁全体の質量が小さいので人間の飛び降りによる衝撃力でも十分加振できる。そのため、対象橋梁の適当な加振点において椅子から2人が同時に飛び降りて衝撃加振を行った。また、水平方向への衝撃加振は、地覆または高欄の柱に横方向から水平に飛び移ることにより衝撃力を加えた。さらに、衝撃加振実験から得られた速度波形からFFTによるスペクトル解析を行い、卓越振動数、固有振動モードを把握した。

(2) 定点加振実験

定点加振実験は、対象橋梁の各モード減衰定数を求めるために行った。これは、衝撃加振実験より得られた卓越振動数と固有振動モードからそのモードの腹となる地点において、卓越振動数前後のメトロノーム電子音にあわせて人間が一定のリズムで屈伸やジャンプし、そのモードだけが卓越した後に加振を止め、自由振動させることにより、自由減衰波形を得るものである。そして、得られた速度波形にフィルタ処理をして波形から直接読み取る方法で減衰定数を求めた。

(3) 共振歩行・走行実験

対象橋梁は、歩行者の歩調範囲である2Hz前後の低振動数領域において多くの卓越振動数を有するため、歩行、走行時においてどの程度振動し、歩行者にどの程度影響を与えるのかを把握する必要がある。そこで、歩行者が共振歩行(1.5Hz～2.5Hz)、走行(2.5Hz～3.5Hz)したときの振動使用性を検討するために、共振歩行、走行実験を行った。共振歩行、走行実験では衝撃加振実験より得られた対象橋梁の卓越振動数(1.5Hz～3.5Hz内に存在する卓越振動数)にできるだけ歩調を合わせながら、歩行時には2人が共振歩行、走行時には1人が共振走行を行った。

4. 解析概要

交流橋を3次元骨組構造にモデル化し、表-2に示すような解析ケースを設定した。解析モデルは、図-4(a)に示すように、上床版、吊床版、斜材を梁部材とし、横継ぎ材を剛部材とした。表-3にモデルの断面諸元を示す。

解析ケースにおけるパラメータとしては、支間中央およびその前後の斜材上端と上床版の間にはゴム支承が挿入されているため(図-2参照)、その支承条件(図-4(c)参照)および吊床版内に配置されている1次ケーブルの張力による幾何剛性をパラメータとした。また、微小振幅時のゴム支承のばね定数が不明であるため、ばね部材としてモデル化した際の各定数は、文献⁴⁾より算出した値に対して1～5倍まで変化させ、実験値の卓越振動数に近い傾向を示した2倍の値(表-4参照)を用いた。

本研究では、まず交流橋をモデル化した斜材を有する解

析モデルを作成して静的解析を行い、実験値と比較することにより解析モデルで仮定した剛性の確認を行った。そして、サブスペース法を用いて固有値解析を行い、実験によって得られた卓越振動数や振動モードと解析値との比較を行った。次に、定点加振実験から得られたモード減衰から解析モデルの減衰マトリックスを決定し、共振歩行、走行による動的応答解析を行い、実験結果との比較から振動使用性について比較することで実橋をよく表現できる斜材を有する解析モデルを構築した。

次に、ストラット形式の違いによる振動特性および共振歩行、走行による動的応答特性の違いについて検討するために、交流橋と同一のスパン、サグおよび断面形状の鉛直材を有する解析モデルを試設計した。試設計した鉛直材を有する解析モデルは、応力の検討から斜材と同じ断面の鉛直材を用いることにした。鉛直材を有する解析モデルを図-4(b)に示す。鉛直材形式においても斜材形式の解析モデル同様、表-2に示す解析ケースを設定し、ゴム支承を考慮する場合は図-4(d)の位置に挿入している。表-3にモデルの断面諸元を示す。

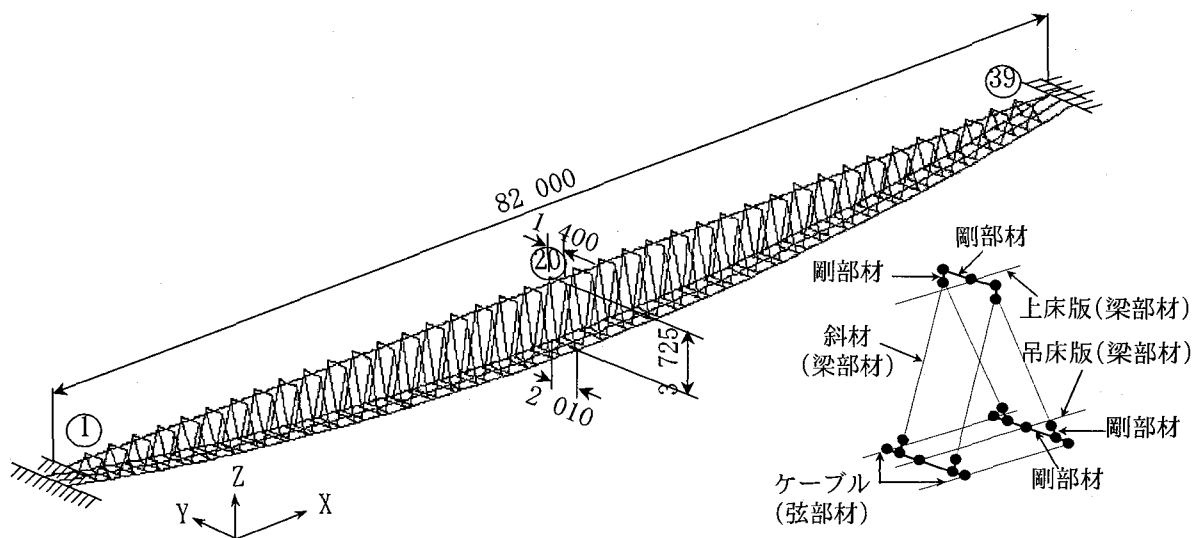
鉛直材を有する解析モデルにおいても、静的解析および固有値解析を行い、ストラット形式の違いによる剛性および振動特性の違いを検討した。さらに、鉛直材を有する解析モデルに対して、斜材を有する解析モデルで行った場合と同じ解析条件を用いて共振歩行、走行による動的応答解析を行い、ストラット形式の違いによる振動使用性について検討した。

なお、共振歩行、走行による動的応答解析は、Newmark β 法(時間間隔0.01sec, $\beta=1/4$)を用いて直接積分法により解析を行った。歩行外力は、半余弦波⁵⁾として扱った。

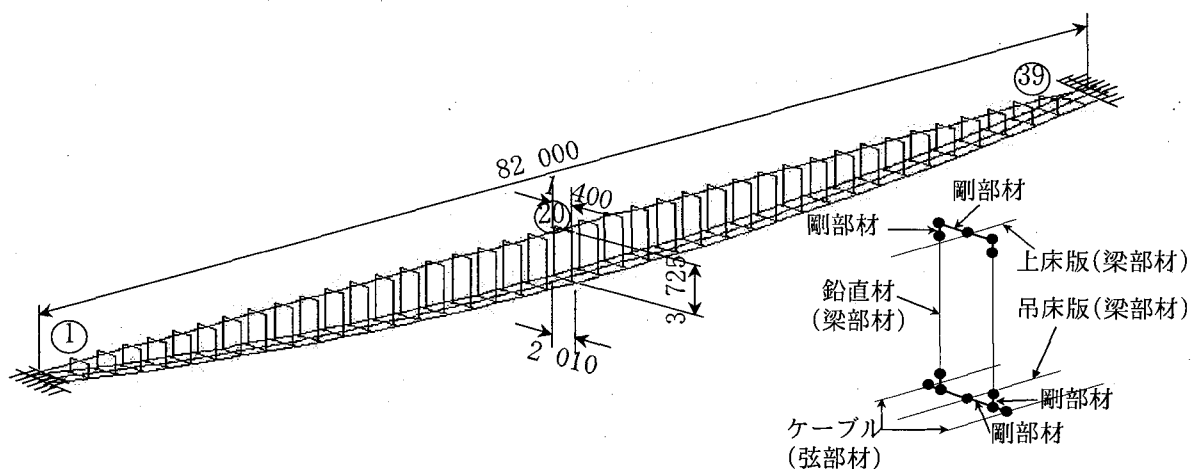
減衰については、斜材を有する解析モデルでは、たわみ対称1次とたわみ逆対称1次振動の実験により得られたモード減衰を用いてRayleigh減衰を仮定した。鉛直材を有する解析モデルに対しては、まず斜材を有する解析モデルを用いて、ひずみエネルギー比と実測のモード減衰定数から各部材の等価減衰定数を算出した。次に、その値を鉛直材を有する解析モデルに用いることで各モード減衰を算出し、たわみ対称2次とたわみ対称3次振動のモード減衰を用いてRayleigh減衰を仮定した。

表-2 解析ケース

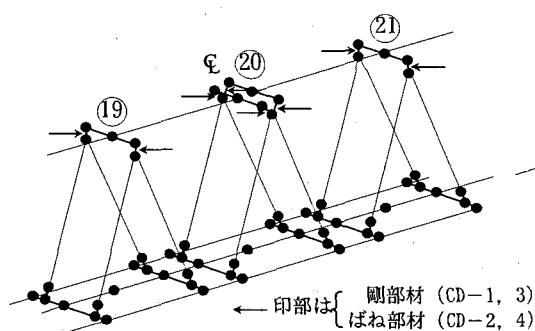
ストラット形式	CASE	支承条件		幾何剛性	
		ばね部材	剛部材	考慮	非考慮
斜材	CD-1		○		○
	CD-2	○			○
	CD-3		○	○	
	CD-4	○		○	
鉛直材	CV-1		○		○
	CV-2	○			○
	CV-3		○	○	
	CV-4	○		○	



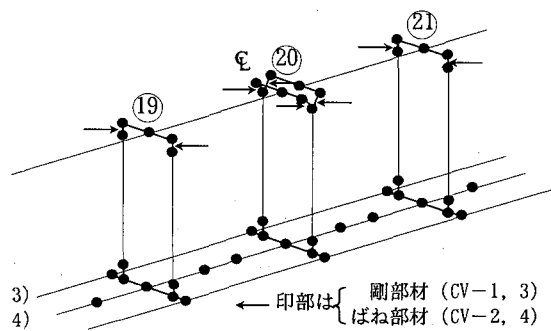
(a) 解析モデル (斜材形式)



(b) 解析モデル (鉛直材形式)



(c) ばね部材挿入部 (斜材形式)



(d) ばね部材挿入部 (鉛直材形式)

図-4 解析モデル図

表-3 断面諸元

部材	断面積(m ²)	断面2次I _y (m ⁴)	断面2次I _z (m ⁴)	ねじれ(m ⁴)	張力(kN)	重量(kN/m)
上床版 (標準部)	4.990E-01	2.236E-03	4.043E-01	2.651E-03	—	1.456E+01
吊床版 (標準部)	5.370E-01	2.234E-03	2.917E-01	6.008E-03	—	1.316E+01
ケーブル	3.528E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.430E+03	2.715E-01
斜材, 鉛直材 (標準部)	2.040E-03	3.000E-06	3.000E-06	6.000E-06	—	1.570E-01

表-4 ゴム支承をモデル化したばね部材の各定数(但し, ②は以下の半分)

	X	Y	Z	θ_x	θ_y	θ_z
ばね定数(kN/m)	9.800E+03	9.800E+03	2.839E+06	8.563E+05	1.693E+04	0.000E+00

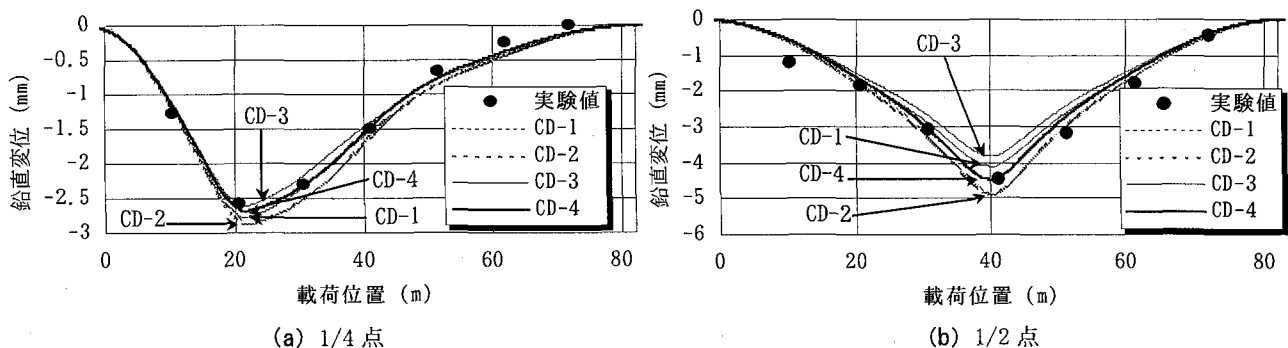


図-5 鉛直変位(実験値と斜材を有する解析モデルの比較)

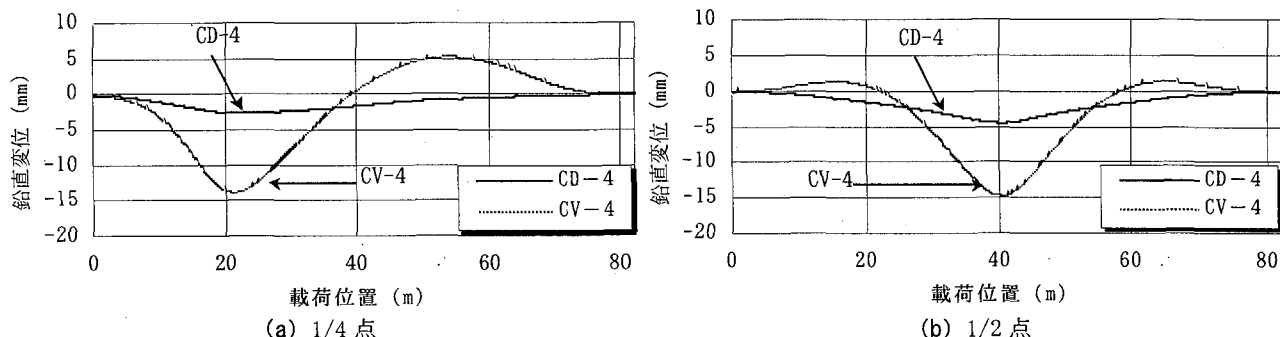


図-6 鉛直変位(斜材および鉛直材を有する解析モデルの比較)

5. 実験結果と解析結果の比較

5. 1 静的特性

交流橋において、静的荷重実験により得られた実験値と斜材を有する解析モデルを用いて静的解析により得られた支間1/4、1/2点における鉛直変位を図-5に示す。

実験により吊床版の鉛直変位は、支間1/4点において支間1/4点に荷重を載荷した場合2.5mm程度、支間1/2点において支間1/2点に載荷した場合4.5mm程度の値が得られた。実験値と解析値を比較すると、解析ケースCD-4が実験値に近い値を示している。

また、実験値に近い値を示していた斜材ケースCD-4とこれに同じ解析条件でストラット形式を鉛直材にしたケースCV-4を比較する(図-6参照)。これより、1/4点において鉛直材形式は斜材形式の約5倍、1/2点において約3倍近い変位量を示している。また、斜材ケースCD-4では、梁の挙動に近い傾向を示しているのに対して、鉛直材ケースCV-4では、吊構造やアーチ構造に見られる鉛直逆方向への浮き上がりの変位が見られた。

5. 2 固有振動特性

実験により得られた交流橋の卓越振動数と斜材を有する解析モデルに対する固有値解析の結果を表-5に示す。また、それに対応した振動モード図を図-7に示す。さらに、定点加振実験により得られた振動モード図と固有ベクトルから求めた振動モード図の比較を図-8に示す。なお、この図は固有値解析から得られた固有ベクトルの最大値に対する振幅比で示している。

表-5より、各解析ケースともに面内方向のたわみ振動

モードについては、実験値に近い傾向を示している。しかし、支承条件を剛部材とした解析ケースCD-1とCD-3では、水平ねじれ連成1次、3次において実験値と相違が見られるが、支承をばね部材としてモデル化した解析ケースCD-2とCD-4は実験値に近い傾向を示している。実験と解析における水平ねじれ連成1次振動の振動モード図(図-8(a))を見ると、ゴム支承の寄与が大きいものと考えられ、支承部をばね部材でモデル化したCD-2とCD-4が実験値に近い。

また、吊床版内に配置された1次ケーブルの張力による幾何剛性を考慮したケース(CD-3、CD-4)と考慮しなかったケース(CD-1、CD-2)で比較すると、振動数にそれほど変化がない。斜材による全体剛性への影響が大きく、1次ケーブルの寄与が小さいためと考えられる。

以上から、静的および固有値解析と実験値とを比較すると解析ケースCD-4が交流橋の構造特性を最もよく表現できていると考えられる。このCD-4を用いて、面内方向のたわみ対称1次振動とたわみ逆対称1次を対象として、実験と解析の振動モード図(図-8(b)、(c))を比較する。これより、比較的よく類似していることがわかる。また、図-9(a)、(b)ではこのCD-4を用いて、支間中央の断面における水平ねじれ連成1次および水平ねじれ連成2次振動の実験と解析の振動モード図を比較した。水平ねじれ連成1次モード、2次モードにおいて上床版、吊床版それぞれが面外方向に振動し、なおかつねじれていることがわかる。水平ねじれ連成2次振動においては、多少の差異があるものの斜材を有する解析モデルは対象橋梁をよく表現できていると考えられる。

表-5 振動特性（実験値と斜材を有する解析モデルの比較）

次数	振動モード	振動数(Hz)				
		実験値	CD-1	CD-2	CD-3	CD-4
1	水平ねじれ連成1次	1.43	1.63	1.34	1.71	1.38
2	たわみ対称1次	1.73	1.76	1.69	1.83	1.76
3	水平ねじれ連成2次	2.21	2.15	1.97	2.21	2.07
4	たわみ逆対称1次	2.94	2.95	2.80	3.03	2.89
5	水平ねじれ連成3次	3.87	4.34	3.63	4.53	3.67
6	たわみ対称2次	4.87	4.71	4.49	4.82	4.61

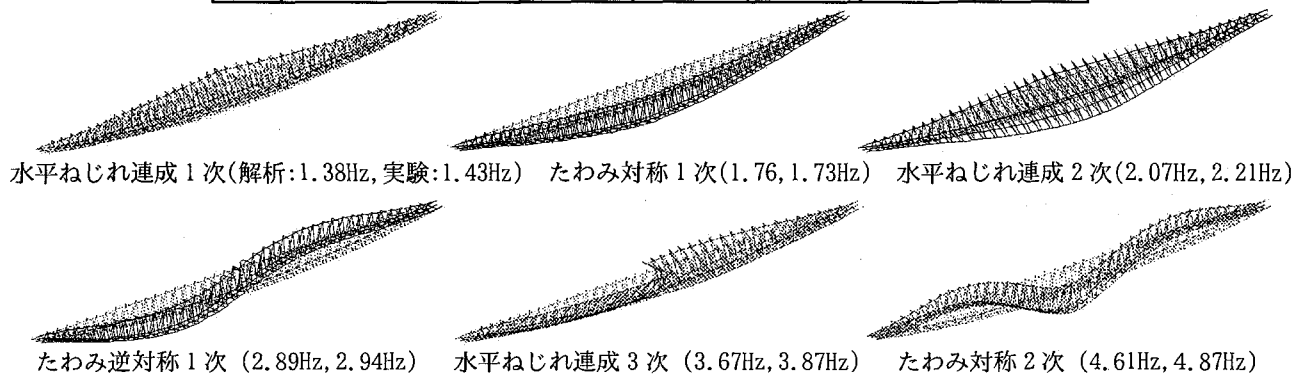
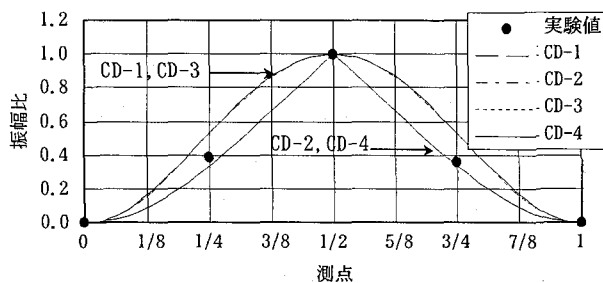
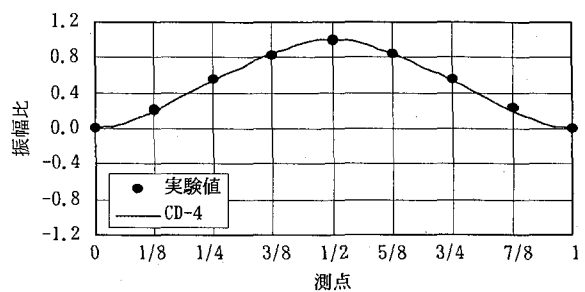


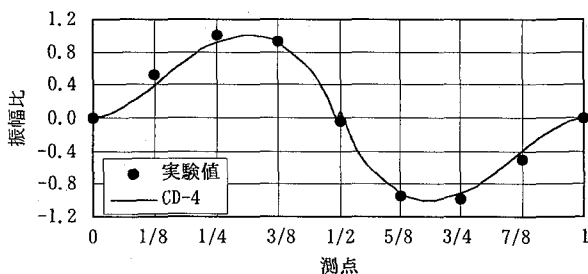
図-7 振動モード（斜材形式，解析：CD-4）



(a) 水平ねじれ連成1次（水平方向）

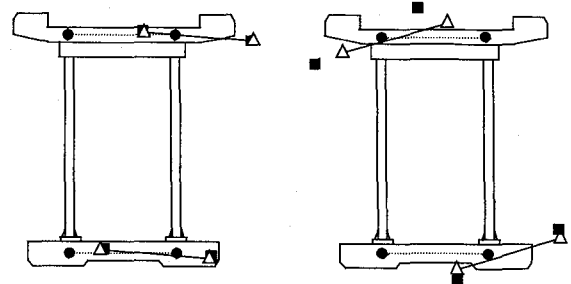


(b) たわみ対称1次（鉛直方向）



(c) たわみ逆対称1次（鉛直方向）

図-8 上床版の振動モード形状(斜材形式)



●：非加振時，■：実験値，△：解析値

(a) 水平ねじれ連成1次

(b) 水平ねじれ連成2次

図-9 振動モード形状(斜材形式CD-4，支間中央断面)

次に，斜材形式同様に，鉛直材形式の固有値解析結果を表-6に，振動モード図を図-10に示す。ここでは，実橋をよく表現していたCD-4と同じ解析パラメータで作成したCV-4を対象とする。

鉛直材を有する解析モデル（CV-4）は，斜材を有する場合（CD-4）に比べて，たわみ対称1次の振動数が約3割減少しているのに対して，たわみ逆対称1次においては，6割減少している。ほとんどの吊床版橋のたわみ振動は，サグや部材剛性などの影響から，最低次にたわみ逆対称モードが現れ，次いでたわみ対称1次モードの順に現れるの

が特徴である。鉛直材形式では，面内方向の最低次にたわみ逆対称1次モード，次に，たわみ対称1次モードが出現している（図-10参照）。これと比較して斜材形式では，面内方向の最低次にたわみ対称1次モード，たわみ逆対称1次モードの順で出現している（図-7参照）。

静的特性で明らかのように，斜材を有する場合，斜材の影響により，一般的な吊床版橋の特性とは異なり，桁橋の特徴に類似する。また，交流橋では最低次の振動モードとして面外方向の水平ねじれ連成1次が出現しており，斜材により面内剛性が増加したと考えられる。

表-6 振動特性 (鉛直材形式)

次数	振動モード	振動数(Hz)			
		CV-1	CV-2	CV-3	CV-4
1	たわみ逆対称1次	0.75	0.74	1.05	1.05
2	水平ねじれ連成1次	1.04	1.04	1.27	1.26
3	たわみ対称1次	1.53	1.25	1.72	1.27
4	水平ねじれ連成2次	1.61	1.52	1.82	1.78
5	たわみ対称2次	1.80	1.64	1.84	1.81
6	たわみ逆対称2次	1.89	1.89	2.34	2.34
7	たわみ対称3次	2.64	2.63	3.12	3.11
8	水平ねじれ連成3次	3.39	3.38	3.90	3.52

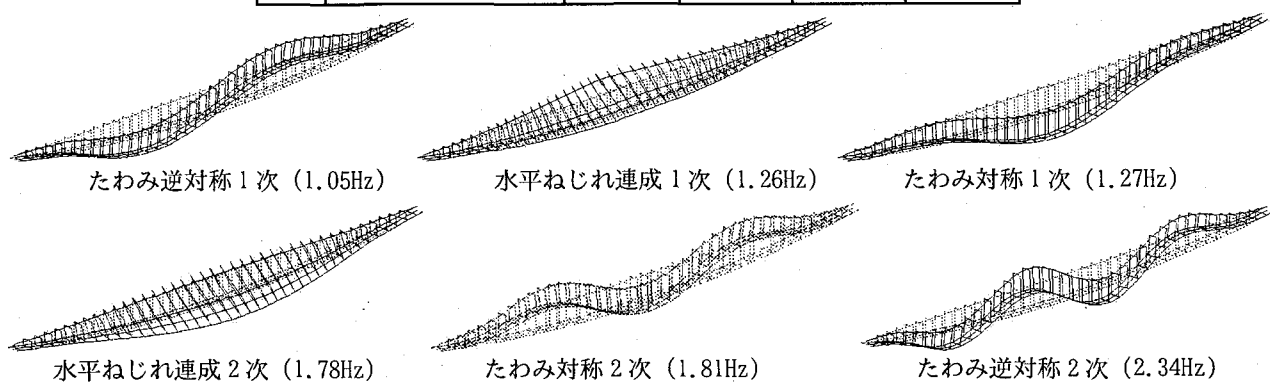


図-10 振動モード (鉛直材形式, 解析: CV-4)

次に、鉛直材の解析モデルにおいて、1次ケーブルの張力による幾何剛性の影響に着目してみる (CV-1, 2 と CV-3, 4) と、ケーブル張力により固有振動数が大きく変化している。鉛直材形式の場合は、ケーブル張力による全体剛性への影響が大きいことがわかる。

斜材形式 (CD-4) では、歩行者の歩調範囲である 2Hz 前後の振動数領域において、たわみ対称1次、水平ねじれ連成2次振動が、走行範囲である 3Hz 付近には、たわみ逆対称1次振動がそれぞれ存在している。また、鉛直材形式 (CV-4) では、歩行範囲において水平ねじれ連成2次、たわみ対称2次、たわみ逆対称2次振動が、走行範囲ではたわみ対称3次が存在している。これらの振動使用性の検討は、5.4節で行う。

5.3 減衰特性

モード減衰が各部材のひずみエネルギー比から評価できることが知られている⁶⁾。そこで、交流橋の減衰特性を各部材のひずみエネルギー比に着目して評価する。各振動モードにおいて、CD-4を用いた固有値解析から得られた全振動エネルギーに対する各部材のひずみエネルギーの比を表-7に示す。ここで、ケーブルは1次ケーブルの断面積による軸剛性と張力による幾何剛性とに分けている。また、定点加振実験により各振動数に共振させた後の自由減衰速度波形から求めたモード減衰定数を同表に付記した。

実測のモード減衰定数とひずみエネルギー比から各部材の等価減衰定数を非線形最小2乗法により算出することにした。ここでは、ゴム支承による影響は小さいとし、

さらに、1次ケーブルの幾何剛性による減衰への影響はないものとした。また、1次ケーブルの断面積による軸剛性は吊床版の剛性と一体として考えた。

これにより、上床版、吊床版とケーブル (断面) および斜材の3つの部材にわけて等価減衰定数を算出した。なお、水平ねじれ連成2次振動においては、実験値と解析値のモード形状に差異が生じていたので、この実験値は除外した。その結果として、上床版: 0.0054, 吊床版とケーブル (断面): 0.0078, 斜材: 0.0082 の等価減衰定数が求められた。

次に、鉛直材形式 (CV-4) においても同様にひずみエネルギー比を算出したものを表-8に示す。鉛直材形式の試設計モデルでは実測のモード減衰定数がないため、上で算出した等価減衰定数を用いてモード減衰定数を算出した。その結果を同表に付記した。

斜材形式 (表-7) および鉛直材形式 (表-8) を比較すると、たわみ逆対称1次振動において、斜材形式では斜材の寄与が大きく、鉛直材形式では、ケーブル (幾何) の寄与が大きい。これは、逆対称変形に対して斜材形式では斜材によるせん断剛性が大きく寄与し、鉛直材形式ではケーブル張力による幾何剛性が大きく寄与しているものと考えられる。

5.4 動的応答特性

斜材を有する交流橋においては、歩行者の歩調範囲である 2Hz 前後の振動数領域にたわみ対称1次、水平ねじれ連成2次振動が存在していた。ここで、面内方向のたわみ対称1次振動 (実験 1.73Hz) を対象として共振歩行による実験と解析の比較を行った。

表-7 実測のモード減衰定数とひずみエネルギー比（斜材形式）から算定したモード減衰定数

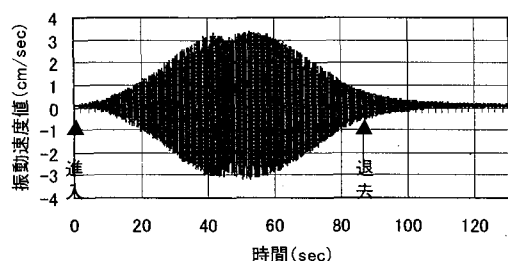
振動モード	上床版	吊床版	ケーブル(断面)	ケーブル(幾何)	斜材	支承	モード減衰	実験値
水平ねじれ1次	43.4%	39.1%	3.6%	2.6%	10.0%	0.9%	0.65%	0.65%
対称1次	15.3%	62.3%	4.3%	3.4%	14.4%	0.3%	0.72%	0.72%
水平ねじれ2次	9.0%	57.7%	3.9%	5.8%	23.4%	0.1%	0.72%	0.45%
逆対称1次	14.2%	16.4%	0.5%	5.1%	57.3%	6.5%	0.68%	0.68%
水平ねじれ3次	33.8%	16.1%	1.1%	0.6%	7.3%	41.1%	0.38%	-
対称2次	17.4%	15.8%	0.4%	4.4%	61.3%	0.7%	0.72%	-

表-8 ひずみエネルギー比（鉛直形式）から算定したモード減衰定数

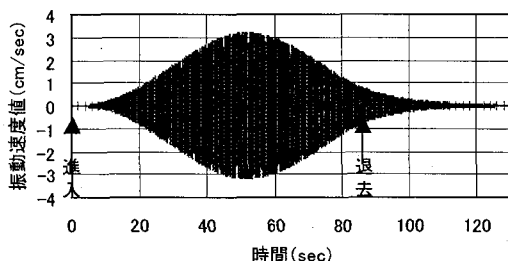
振動モード	上床版	吊床版	ケーブル(断面)	ケーブル(幾何)	鉛直材	支承	モード減衰
逆対称1次	9.4%	14.5%	0.0%	47.6%	28.4%	0.2%	0.40%
水平ねじれ1次	63.8%	26.2%	1.7%	0.9%	6.0%	1.1%	0.61%
対称1次	3.8%	57.3%	3.6%	22.9%	12.3%	0.0%	0.60%
水平ねじれ2次	5.7%	77.1%	6.4%	8.3%	2.4%	0.0%	0.70%
対称2次	10.4%	39.2%	1.8%	29.1%	19.4%	0.1%	0.54%
逆対称2次	17.5%	22.9%	0.0%	34.1%	25.2%	0.2%	0.48%
対称3次	21.1%	28.1%	0.2%	28.1%	22.5%	0.1%	0.52%
水平ねじれ3次	40.2%	11.3%	0.2%	0.4%	3.3%	44.5%	0.33%

動的応答解析では、対象橋梁をよく表していた解析モデル CD-4 を用いて、固有値解析結果から得られた 1.76Hz で共振歩行した場合を解析した。

実験と解析における支間 1/2 点の鉛直方向速度波形とそのスペクトルをそれぞれ図-11、図-12 に示す。実験と動的解析の結果は良く似た結果が得られている。

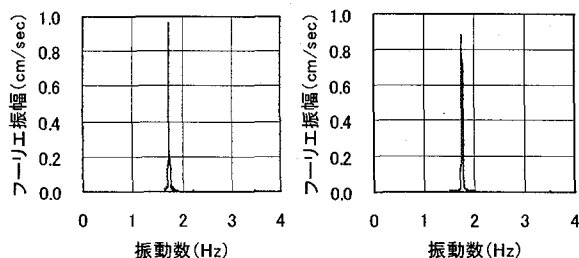


(a) 1.73Hz 歩行時（実験・支間 1/2 点）



(b) 1.76Hz 歩行時（解析・支間 1/2 点）

図-11 共振歩行時の速度波形（斜材形式，交流橋）



(a) 実験，支間 1/2 点 (b) 解析，支間 1/2 点

図-12 速度スペクトル（斜材形式，交流橋）

次に、歩行者の振動に対する心理的な影響からみた振動限度の各提案値^{7)~9)}に対し、共振歩行，走行実験による卓越振動数とその時の最大加速度，速度応答値との関係を図-13 に示す。また，同図に直路式吊床版橋において本研究が以前実験を行った結果¹⁰⁾（○および△）を付記する。これより，斜材形式の交流橋では，限度の提案値付近にあるものの，実験時の加振力を考慮すると日常の歩行時においてその可能性は少なく，問題ないと考えられる。

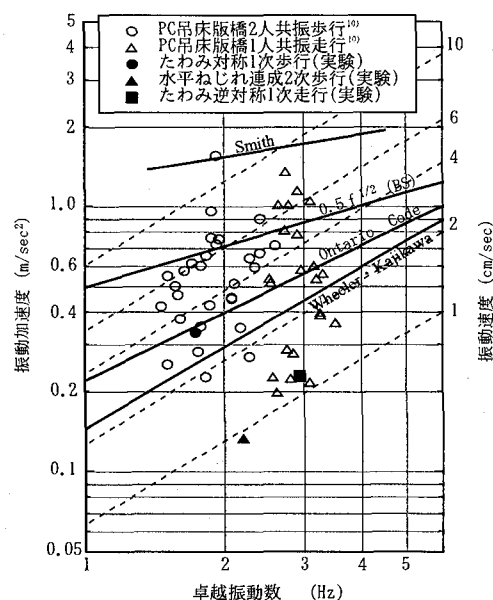


図-13 最大振幅と振動限度の提案値との比較

斜材を有する解析モデル（CD-4）は，歩行外力による動的応答解析において実験値をよく表現していた。次に，鉛直材を有する解析モデル（CV-4）を用いて，同じ解析条件下で共振歩行，走行による動的応答解析を行い，斜材形式と鉛直材形式の違いによる振動使用性への影響について検討した。対象とした振動モードと解析結果を表-9 に示す。なお，鉛直材形式（CV-4）のたわみ対称 1 次，た

わみ逆対称1次振動は、歩調範囲よりも低い、斜材形式と同じモード形状との比較を行うために示した。

これより、鉛直材形式における歩調範囲の振動モードでは、恕限度の各提案値を大きく超えるような振幅はなかった。この理由として、たわみ対称2次やたわみ逆対称2次は、たわみ対称1次に比べて節が多いため、共振歩行による振動振幅が増幅しなかったためと考えられる。

また、鉛直材形式では歩調範囲ではないが、たわみ対称1次やたわみ逆対称1次において、斜材形式と比較した場合、斜材形式の応答が小さく、斜材による影響が顕著に現れた。したがって、鉛直材形式においては、節の少ないたわみ対称1次振動やたわみ逆対称1次振動が歩調範囲に入った場合、振動使用性について十分な検討が必要である。

表-9 共振歩行による最大速度振幅の比較

振動モード	解析ケース	振動数	最大振幅
		(Hz)	(cm/sec)
たわみ対称1次	斜材形式 CD-4	1.76	3.17
	鉛直材形式CV-4	1.27	7.28
水平ねじれ連成2次	斜材形式 CD-4	2.07	0.48
	鉛直材形式CV-4	1.78	0.55
たわみ逆対称1次	斜材形式 CD-4	2.89	1.42
	鉛直材形式CV-4	1.05	3.86
たわみ対称2次	鉛直材形式CV-4	1.81	3.22
たわみ逆対称2次	鉛直材形式CV-4	2.34	1.60

6. まとめ

本研究では、まず斜材を有する交流橋において行った静的載荷実験および振動実験から、交流橋の静的特性や振動特性について把握した。次に、実験結果と解析結果を比較することにより、実橋の構造特性を表現できる斜材を有する解析モデルを構築した。さらに、ストラット形式の違いによる上路式PC吊床版橋の静的特性や振動特性について比較するために、鉛直材を有する解析モデルを試設計し、斜材形式の場合と同様な解析を行った。

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 静的荷重に対する鉛直変位は、鉛直材形式では従来の吊床版に見られる傾向を示し、斜材を有する交流橋では斜材の影響により梁の挙動に近い傾向を示していた。

(2) 固有振動モードは、鉛直材形式では一般的な吊床版橋と同じように最低次に逆対称振動がみられたが、斜材を有する交流橋では桁橋同様に、面内では対称振動が最低次振動として卓越した。

(3) 部材のひずみエネルギー比から、たわみ逆対称1次振動を比較した場合、斜材形式では斜材の寄与率が大きく、鉛直材形式では、ケーブル(幾何)の寄与が大きい。これは、逆対称変形に対して斜材形式では斜材によるせん断剛性が大きく寄与し、鉛直材形式ではケーブル張力による幾何剛性がそれぞれ寄与したためと考えられる。

(4) 斜材形式である交流橋における共振歩行、走行時の

振動振幅を比較したところ、日常の歩行における振動使用性に対して問題ないことがわかった。

(5) ストラット形式の違いによる共振歩行、走行時の振動振幅を比較したところ、斜材形式は鉛直材形式に比較して小さい応答が得られた。また、鉛直材形式においては、節の少ないたわみ対称1次振動やたわみ逆対称1次振動が歩調範囲に入った場合、振動使用性について十分な検討が必要である。

以上に示したように、ストラットを斜めに配置することでたわみ性状や振動特性を大きく変化させ、かつてアーチ橋や吊橋に斜め部材を入れることで構造特性の改善はかったことと同様の結果を確認することができた。また、構造体としてのせん断力が斜材には働くことから注意する必要がある。

謝辞 本実験に際し、岐阜県荘川村の方々には大変お世話になりました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 梶川康男, 深田宰史, 山田智之: 上路式PC吊床版歩道橋の振動特性と振動使用性, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 363-370, 2001.
- 2) 梶川康男, 唐下善文, 深田宰史, 松元香保里: 4 径間連続上路式吊床版橋の振動実験と解析, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 835-842, 1998.
- 3) 鳥野清, 成富勝, 日笠山徹巳, 小坪清真: 上路式PC吊橋の動特性とその改善, 構造工学論文集, Vol. 32A, pp. 691-698, 1986.
- 4) 日本道路協会: 支承便覧, 丸善, 1991.3.
- 5) 小幡卓司, 林川俊郎, 佐藤浩一: 人間の振動感覚に基づいた歩道橋の使用限界状態に関する研究, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 217-231, 1996.4.
- 6) 角本周, 梶川康男: PC吊床版橋の減衰定数の評価と振動使用性照査における影響, 土木学会論文集, No. 612/I-46, pp. 337-348, 1999.1.
- 7) Wheeler, J.E.: Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, *Proc. of ASCE*, No. ST9, pp. 2045-2065, 1982.
- 8) 梶川康男: 振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察, 土木学会論文報告集, No. 325, pp. 23-33, 1982.
- 9) Blanchard, J., Davis, B.L. and Smith, J.W.: Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Foot-bridge, *Proc. of Symposium of Dynamic Behavior of Bridges*, Supple. Rpt. 275, UK TRRL, pp. 90-106, 1977.
- 10) 梶川康男, 深田宰史, 吉川裕晃: 単径間PC吊床版歩道橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 811-817, 1998.

(2001年9月14日受付)