

上路式 PC 吊床版歩道橋の振動特性と振動使用性

Vibration characteristics and vibration serviceability of
deck type prestressed concrete stress ribbon pedestrian bridge

梶川 康男* 深田 宰史** 山田 智之***
Yasuo KAJIKAWA, Saiji FUKADA and Tomoyuki YAMADA

* 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 丁目 40 番 20 号)
** 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 自然科学研究科 (同上)

Year by year, Prestressed concrete stress ribbon pedestrian bridge was constructed to give a reply for demander's needs. Deck type PC stressed ribbon pedestrian bridge was constructed to walk easily for children and disabled person in Ishikawa zoo. In this study, we examined vibration test in this bridge in the aim of grasping natural frequency, vibration mode and damping characteristics subject to exciting load. The test results show that this type of bridge has vibration characteristics with low natural frequency and low damping. An analytical model was made by finite element method and simulation of static, eigen value and dynamic response analysis was carried out. From this study, the vibration serviceability of this bridge subjected to walking and running was confirmed.

Key words: deck type pc stress ribbon pedestrian bridge, vibration characteristics, vibration serviceability
キーワード: 上路式 PC 吊床版橋, 振動特性, 振動使用性

1. まえがき

PC 吊床版橋とは、従来の吊橋において、吊ケーブルと補剛桁を一体化してアンカーするという形式の橋梁であり、最近スパンの長大化¹⁾や2径間²⁾や3径間³⁾といった多径間を有する連続形式化など形式の多様化が見られる。なかでも、橋梁の景観性、バリアフリーなども考慮し、なおかつ経済的にも優れた形式の橋梁として上路式 PC 吊床版橋⁴⁾が挙げられる。

上路式 PC 吊床版橋は、従来からある PC 吊床版橋の床版上に鉛直材を配置し、その上に路面となる上床版を架設するという形式の橋梁である。本形式橋梁の特徴としては、吊構造特有のスレンダーな外観を持つことや、橋面の形状に左右されることなく吊床版のサグを設定し、張力をコントロールすることができる。さらに、張力を小さくすることでサグ量を大きくすることができることからアンカーが安価で済み、橋全体のコストを下げることができる。その一方で路面の横断勾配を小さくすることができるのでバリアフリーにも対応した形式であることなどが挙げられる。しかしその一方で、本形式橋梁の問題点として、吊構造であるがゆえに低い振動数領域に多くの固有振動数

を持つことが考えられ、歩行者の通行時に大きな振動が発生し歩行者に不快感を与える可能性がある。

そこで、本研究では石川動物園に架設された上路式 PC 吊床版橋(写真-1 参照)を対象として、静的および動的解析を行い対象橋梁の振動特性について調べた。また、実橋にて実験を行い、解析結果との比較から解析手法の妥当性を検討した。さらに、同程度の支間を有する吊床版橋⁵⁾や他の形式の橋梁^{6) 7)}と、その振動特性や振動使用性について比較を行った。

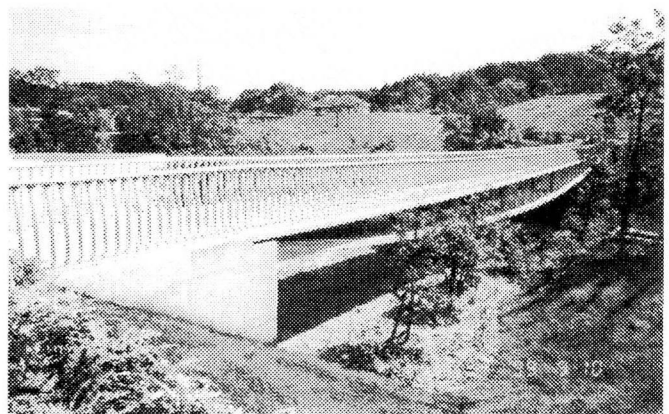
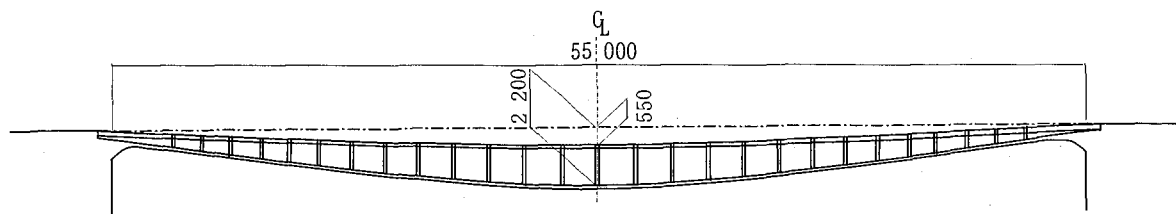
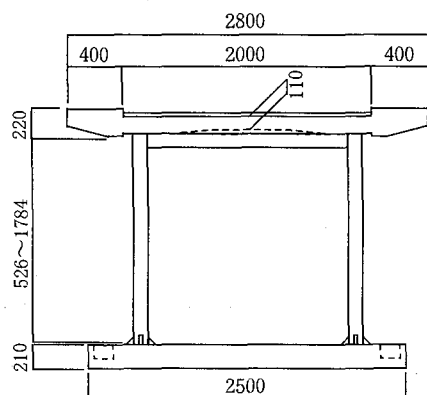


写真-1 上路式 PC 吊床版橋
(石川動物園夢つり橋)



(a) 側面図



(b) 断面図

図-1 一般図

表-1 構造諸元

橋長(支間長)	67.5m (55.0m)
全幅(有効幅員)	2.8m (2.0m)
吊床版厚	0.21m
サグ	2.2m
サグ/スパン比	1/25
縦断勾配	4.0%

2. 実験概要

2.1 対象橋梁の概要

本研究で対象とした、上路式 PC 吊床版橋の一般図を図-1 に、構造諸元を表-1 に示す。対象橋梁は単径間の上路式 PC 吊床版橋で、橋長 67.5m、支間長 55.0m、吊床版のサグ量は 2.2m (サグ/スパン比 1/25) である。

本橋の特徴として温度や乾燥収縮に配慮して上床版の支間中央にゴム製の伸縮継ぎ手が設けられている。

この橋梁に対して、静的特性および振動特性を把握するために静的載荷実験および振動実験⁹⁾を行った。測点配置図を図-2 に示す。また、比較の対象とした他の橋梁についても同様の機材、手法を用いて振動実験を行った。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、最大測点数 10 点)を各測点に配置し、増幅アンプに接続し、データレコーダーに振動波形を記録した。

2.2 静的載荷実験

静的載荷実験では、上路式 PC 吊床版橋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

デルの剛性の妥当性を確認するために、コンクリート塊(17.64kN)を上床版の支間 1/2、1/4、3/4 にそれぞれ載荷して、そのときの下床版の鉛直変位を計測した。

2.3 衝撃加振実験

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によって各卓越振動数を把握することができる。よって、本研究の対象橋梁である上路式 PC 吊床版橋の場合においても、橋梁の適当な加振点において 2 人が椅子から同時に飛び降りる衝撃加振実験⁹⁾を行った。また、水平方向への衝撃加振は地覆部分または高欄の柱の部分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。そして、この衝撃加振実験の結果より得られた速度波形から FFT によるスペクトル解析を行い、卓越する振動数、振動モードを求めた¹⁰⁾。

2.4 定点加振実験

上路式 PC 吊床版橋の各卓越振動数の減衰定数を求めるために定点加振実験を行った。衝撃加振実験の結果より求められた、振動数と振動モードを基にして、モードの腹となる地点において卓越振動数前後の振動数にあわせて屈伸やジャンプを行い、そのモードだけが卓越した後に加振を止め、自由振動させて減衰定数を求めた。減衰定数は、フィルタ処理により、波形から直接読み取る方法¹⁰⁾によって求めた。

2.5 歩行・走行実験

本橋は低い振動数領域に多くの卓越振動数を有し、それらのいくつかは歩行者の歩調範囲に存在するため、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、走行したときの振動使用性を検討するために、歩行、走行実験を行った。実験では衝撃加振実験の結果より求められた、本橋の卓越振動数前後の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 人が共振走行を行い、得られた結果から本橋梁の振動使用性の検討を行った。

3. 解析概要

解析モデルとして対象橋梁を図-3 に示すように 3 次元骨組み構造にモデル化した。上床版、下床版、鉛直材は梁部材、ケーブル部材は幾何剛性を考慮した弦部材、

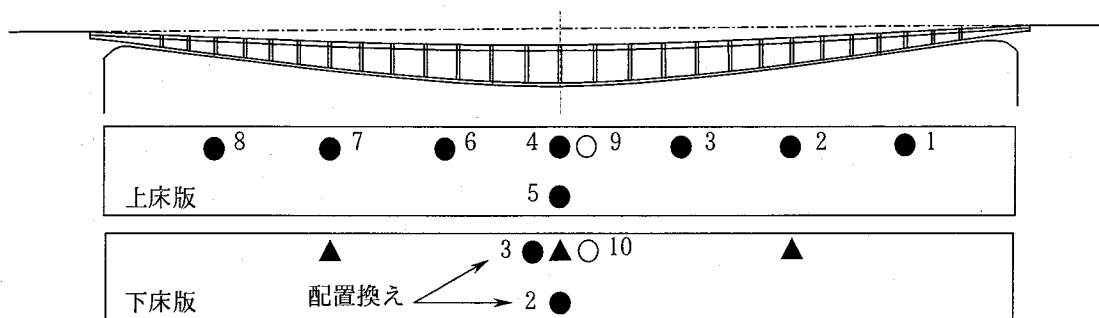


図-2 測点配置図

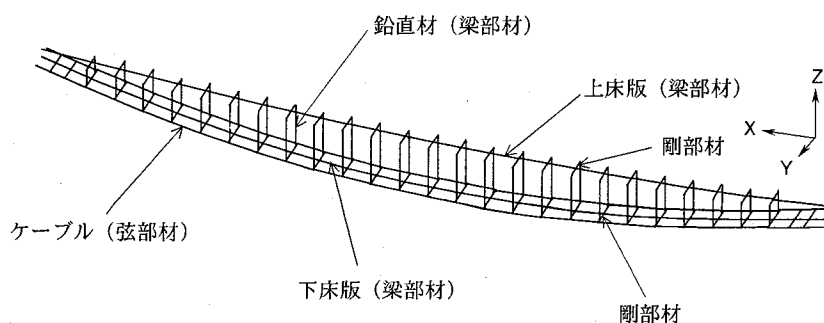


図-3 解析モデル

表-2 断面諸元

部材	断面積(m^2)	断面2次 $I_y(\text{m}^4)$	断面2次 $I_z(\text{m}^4)$	ねじれ(m^4)	張力(kN)
上床版	3.862E-01	8.303E-04	2.887E-01	8.333E-04	0.000E+00
下床版 (標準部)	5.000E-01	1.675E-03	2.669E-01	5.716E-03	0.000E+00
ケーブル	2.084E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.395E+03
鉛直材	2.040E-03	3.001E-06	3.001E-06	6.001E-06	0.000E+00

横継ぎ材は剛部材としてモデル化した。境界条件としては、上床版と下床版の両端部を固定としている。また、上床版の支間中央部にはゴム製の伸縮継ぎ手が設けられているが、ゴムの特性が不明なため、本解析モデルではこれを考慮していない。表-2に断面諸元を示す。

本研究では、この解析モデルを用い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。さらに、サブスペース法を用いて固有振動解析を行い、実験によって得られた卓越振動数や振動モードとの比較を行った。また、実橋で行った歩行、走行実験を解析上で再現する動的応答解析を行い、使用性について検討した。動的解析では Newmark β 法 (時間間隔 0.01sec, $\beta=1/4$) を用いて直接積分法にて解析を行なった。なお、歩行外力は、半余弦波¹¹⁾として扱った。減衰は逆対称1次と2次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。

4. 比較対象とした橋梁の概要

4.1 自碇式上路PC吊橋

自碇式上路PC吊橋とは、鉛直材を介して主桁を支持する吊ケーブルを主桁両端に定着し吊ケーブルに作用する

張力の水平反力を主桁方向に負担させ、かつその軸力によりコンクリート製の主桁にプレストレスを導入するという形式の橋梁である。対象としたのは、支間 39m, サグ 2.565m の橋梁であり、図-4 にその一般図を表-3 に構造諸元を示す。

4.2 張弦橋

張弦橋とは橋梁の主桁高を低くするために、外ケーブル(PC鋼材)を桁下に大きく偏心させてプレストレスの効率を高めた形式の橋梁である。対象としたのは、支間 40m, 張弦ケーブルの偏心量(主桁下縁から) 2.0m の橋梁であり、図-5 に一般図を表-4 に構造諸元を示す。

4.3 吊床版橋

これまでに架設されている吊床版橋、なかでも本橋と同程度の支間を有するもの(支間長はそれぞれ 51m と 60m, サグは 1.4m と 1.8m) 2 橋を比較の対象とした。図-6 に一般図を、表-5 に構造諸元を示す。

5. 実験解析結果

5.1 静的特性

静的載荷実験においてコンクリート塊 (17.64kN) を上

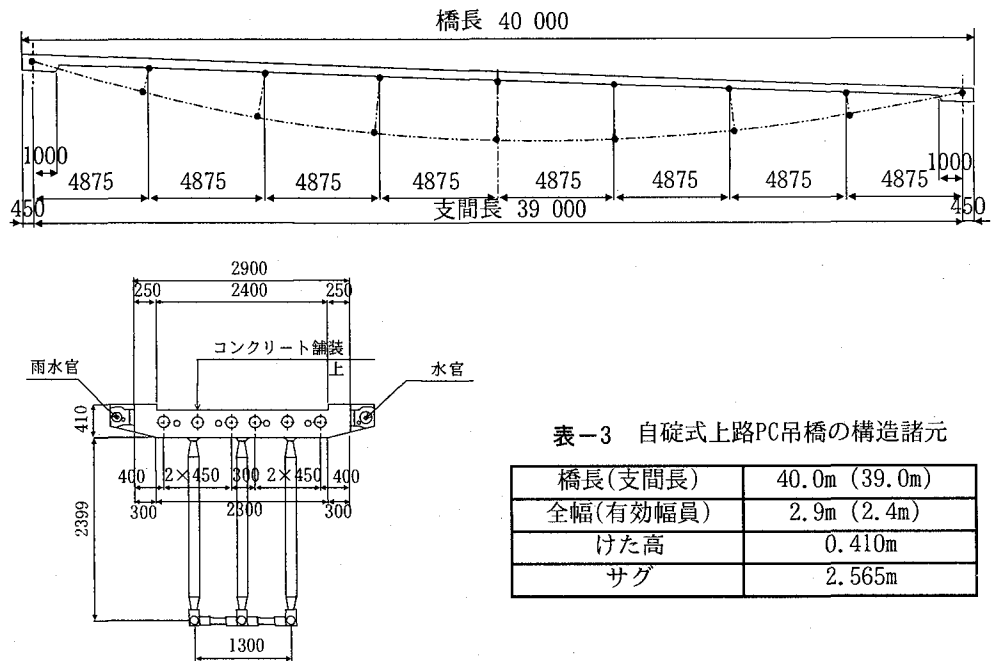


図-4 自碇式上路 PC 吊橋の一般図

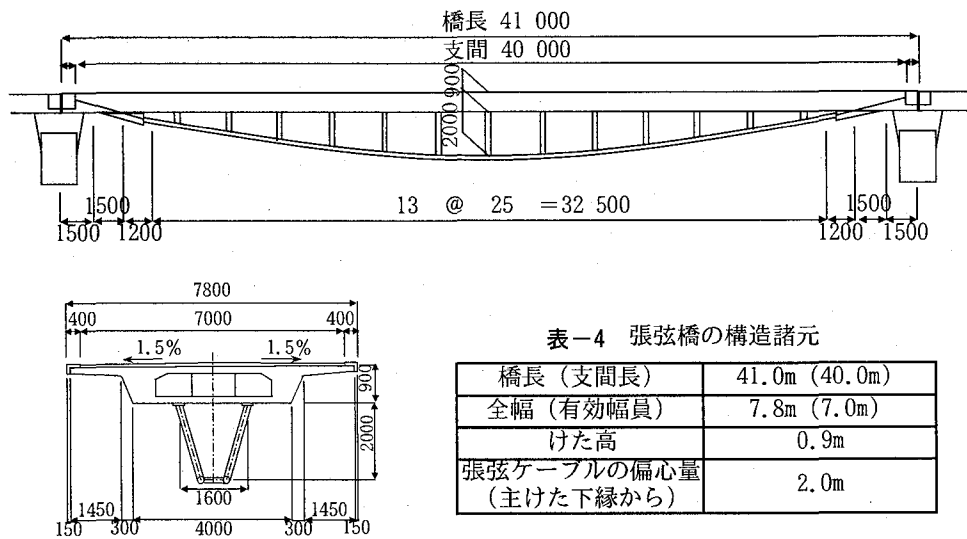


図-5 張弦橋の一般図

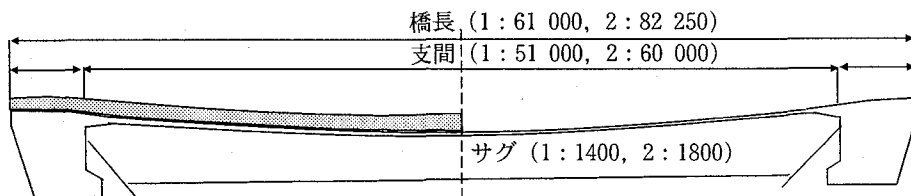
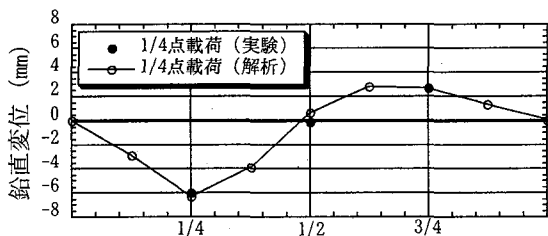


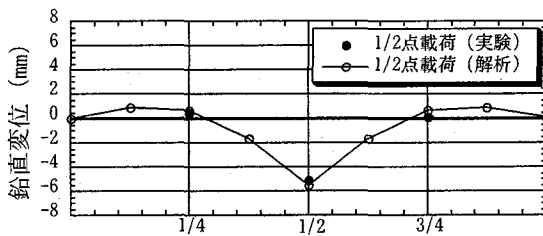
図-6 吊床版橋の一般図

表-5 吊床版橋の構造諸元

	吊床版橋1	吊床版橋2
橋長(支間長)	61.0m (51.0m)	82.25m (60.0m)
全幅(有効幅員)	2.5m (2.0m)	2.8m (2.0m)
吊床版厚	0.185~0.20m	0.185~0.20m
サグ	1.4m	1.8m
サグ/スパン比	1/36	1/33



(a) 1/4点載荷



(b) 1/2点載荷

図-7 鉛直変位

表-6 固有振動数 (Hz)

次数	上路式 PC吊床版橋 (解析値)	上路式 PC吊床版橋 (実験値)	PC吊床版橋 (支間51m)	PC吊床版橋 (支間60m)	自旋式 上路PC吊橋	張弦橋
たわみ逆対称1次	1.30	1.4	1.61	1.27	1.73	4.83
たわみ対称1次	1.77	1.7	1.78	1.59	1.17	1.78
たわみ対称2次	2.49	2.5	2.91	2.34	3.86	-
たわみ逆対称2次	2.99	3.2	4.3	3.25	-	-
水平1次	2.81	2.8	-	-	-	-
水平2次	3.47	3.0	-	-	-	-
水平ねじれ連成1次	-	-	3.54	2.81	-	-

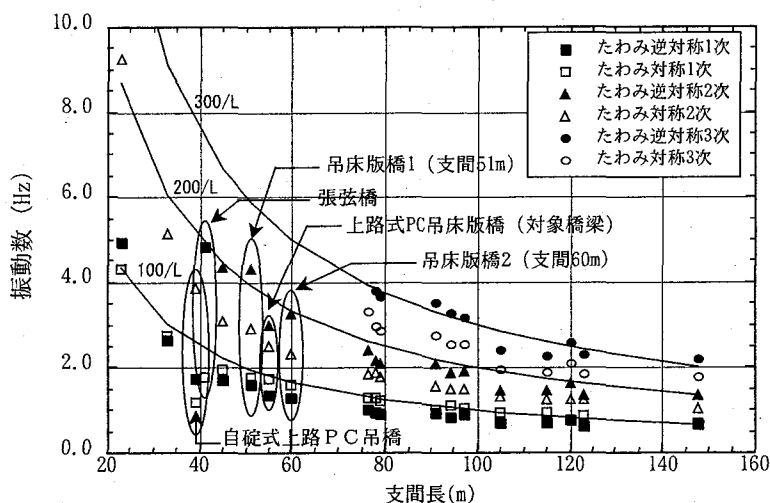


図-8 他の吊床版橋との卓越振動数の比較

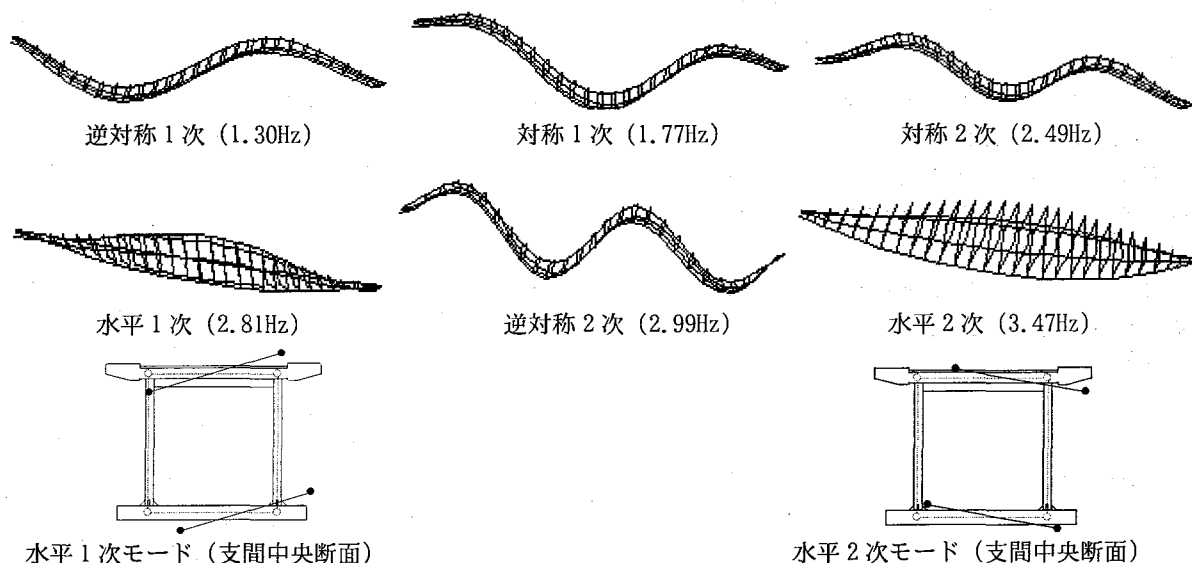


図-9 固有振動モード

表-7 減衰定数 (%)

次数	上路式 PC吊床版橋	PC吊床版橋 (支間51m)	PC吊床版橋 (支間60m)	自碇式 上路PC吊橋	張弦橋
たわみ逆対称1次	0.75	0.89	0.82	1.20	1.59
たわみ対称1次	0.93	1.28	1.39	0.67	0.95
たわみ対称2次	0.65	1.02	1.06	1.06	-

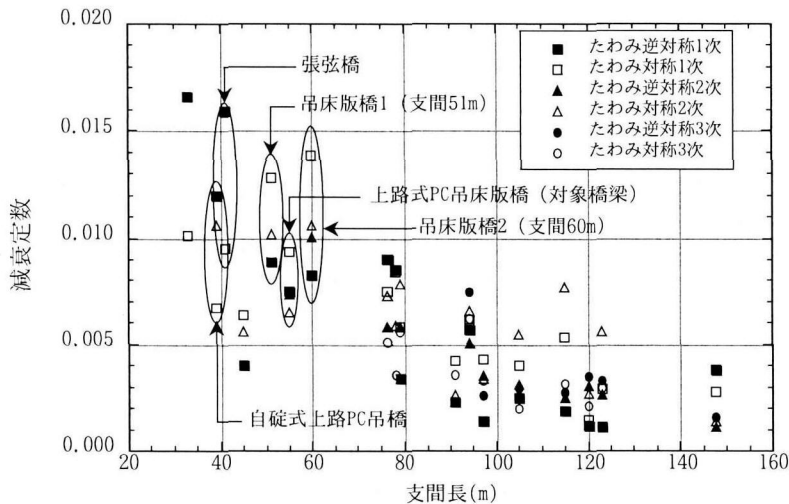
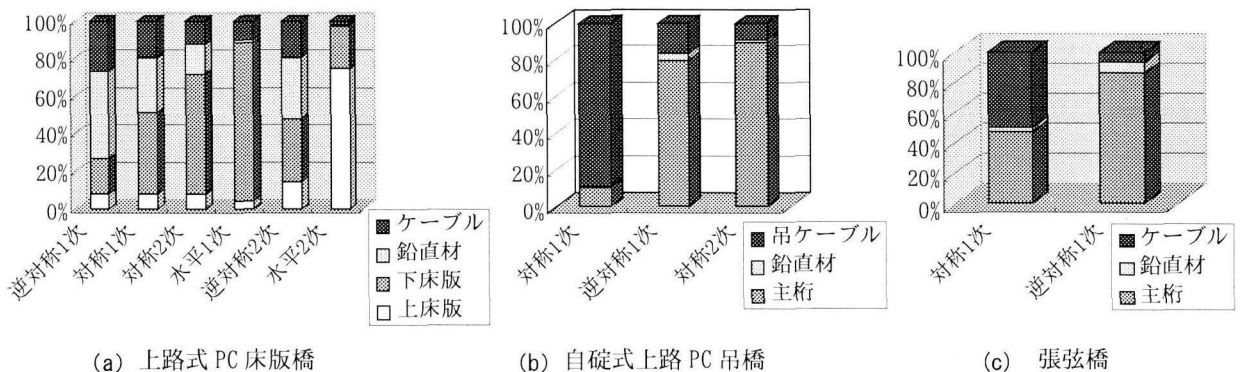


図-10 他の吊床版橋との比較



(a) 上路式 PC 床版橋

(b) 自碇式上路 PC 吊橋

(c) 張弦橋

図-11 橋梁ごとの各振動モードにおけるひずみエネルギー比

床版の 1/4, 1/2, 3/4 点それぞれに荷重したうち、1/4, 1/2 点の実験と解析によって得られた鉛直変位を図-7(a), (b)にそれぞれ示す。これより、下床版の鉛直変位は、支間の 1/4 点に荷重を載荷した場合には 6mm 程度、1/2 点に荷重した場合には 5mm 程度の最大変位が実験と解析によって得られた。また、荷重が 1/2 点に載荷されたときに 1/4 と 3/4 点では、橋梁が鉛直上方向に変位する傾向が見られた。また実験結果と解析結果は概ね一致した値となり解析モデルの剛性評価の妥当性を確認できた。

5.2 固有振動特性

実験で得られた卓越振動数と固有値解析の結果、ならびに同程度の支間を有する吊床版橋と他の形式の橋梁での実験の結果得られた固有振動数の値を表-6 に示す。

さらに、他の吊床版橋についても、同様の実験を行い、得られた結果を加えて比較したものを図-8 に示す。また、上路式 PC 吊床版橋の振動モード図を図-9 に示す。これより、吊床版橋でのたわみ振動の場合、サグなどの影響からほとんどの橋梁において、最低次に逆対称モードが現れ、次いで対称モードの順に現れており、しかもそれらの振動数は非常に近接しているのが特徴的である。今回対象とした上路式 PC 吊床版橋についても、最低次にたわみ逆対称 1 次モード、次いでたわみ対称 1 次モードと他の吊床版橋と同様の結果が得られ、振動数と支間との関係も図に示した双曲線で概ね近似できる範囲に入っている。他の形式の橋梁（自碇式上路 PC 吊橋、張弦橋）では、最低次の基本モードに対称 1 次モード、次いで逆対称 1 次モードという順で出現している^{6) 7)}。これは一般的な桁橋の特徴に類似している。

水平方向では、水平2次モードにおいて解析との振動数に相違が見られた。これは、解析では考慮しなかった上床版の支間中央部に挿入されているゴムが影響しているものと考えられる。また実験から、水平1次および水平2次モードは、支間中央部において上床版と下床版がそれぞれねじれる振動モード形状であり(図-9参照)、水平1次モードは下床版の水平方向の測点で、水平2次モードは、上床版の水平方向の測点で卓越が顕著に見られた。また本橋では、人が歩いた時の歩調範囲である1.5~2.5Hzには、たわみ対称1次とたわみ対称2次の2つの固有振動数が、走行範囲である3.0Hz付近には水平1次、逆対称2次、水平2次の固有振動数が存在していた。

今回比較対象とした橋梁のうち、自碇式上路PC吊橋、張弦橋の固有振動モード図については文献^{6) 7)}を参照していただきたい。

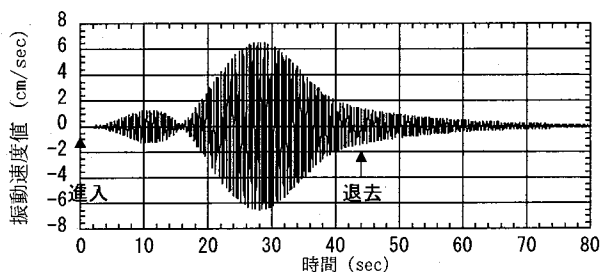
5.3 減衰特性

定加振実験により、本橋の歩行者の歩調範囲に存在する各振動モードに共振させた後の自由減衰波形から求めた減衰定数、ならびに本橋と同程度の支間を有する他の吊床版橋や他の形式の橋梁についても比較したものを表-7に示す。また、他の吊床版橋の支間長と減衰の関係を図-10に示す。各振動モードの減衰定数を比較してみると、本橋の値はいずれも概ね0.7~0.9%の範囲にあることがわかった。これは他の吊床版橋と比較すると小さい値となっている。

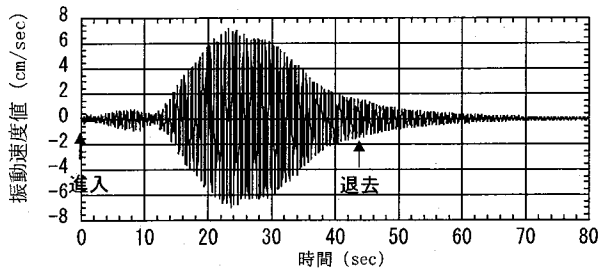
この減衰特性を調べるため、固有値解析から得られる各部材のひずみエネルギー比に着目した¹²⁾。本橋と比較対象とした橋梁のうち、自碇式上路PC吊橋と張弦橋について各振動モードの各部材におけるひずみエネルギー比を図-11に示す。これによると、本橋の場合、逆対称1次、2次モードでは鉛直材のエネルギー比率が他に比べて大きくなっており、対称1次、2次モードでは下床版の比率が大きくなっていった。また、水平方向では、水平1次モードは下床版の比率が、水平2次モードは上床版のエネルギー比率が大きくなっており、エネルギー比に大きな違いが見られ、それぞれ下床版、上床版を主体とする水平振動であることがわかった。また、自碇式の場合たわみ1次の減衰が小さいのは、吊ケーブルに大きく依存しているためであるとわかる。それに対して、張弦橋ではたわみ1次では主桁が大きく寄与しているため減衰も大きくなったものと考えられる。

5.4 動的応答特性

対象橋梁は、歩調範囲に卓越する振動モードがいくつか存在するため、歩行者が歩行および走行する際に共振する場合がある。そこで、歩行者の通行に対して、本橋の振動使用性を検討するため、共振による歩行および走行により最大どの程度の振動振幅に達するかを歩行、走行実験ならびに歩行外力による動的応答解析を行った。



(a) 1.77 歩/秒歩行時(解析・支間1/2)



(b) 1.73 歩/秒歩行時(実験・支間1/2)

図-12 共振歩行時の速度波形(実験と解析)

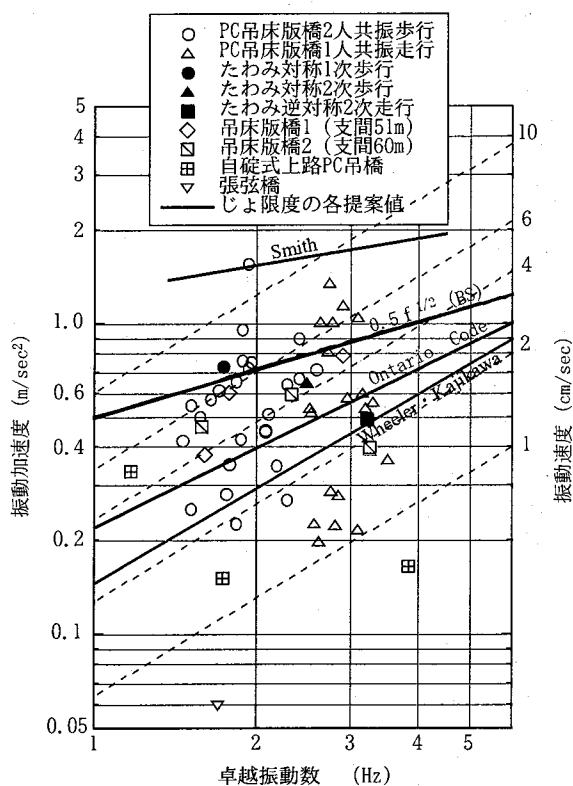


図-13 振動じよ限度

実験によって得られた水平方向の振動を除く歩調付近の対称1次(1.7Hz)から逆対称2次(3.2Hz)の振動モードのうち、図-12(a)、(b)に解析と実験によって求めた対称1次の鉛直方向速度波形を示す。実験結果と動的応答解析の結果は良く似た結果が得られている。

次に、歩行者の振動に対する心理的な影響からみた振動じよ限度^{13) 14) 15)}に対し、人間の歩行および走行の歩

調範囲と考えられる (1.5~3.0 歩/秒) 付近において先の解析と実験により得られた卓越振動数とその時の最大応答値との関係を図-13 に示す。また、比較として他の吊床版橋や他の形式の橋梁においても実験において得られたものを合わせて示す。これによると、歩調範囲である 2Hz 前後に存在するたわみ対称 1 次モード、対称 2 モードの値はカナダの Ontario code や Wheeler-Kajikawa の提案値を超えているが、実験では強制的に大きく振動させて得られた結果であるということとを考慮すると日常の利用時での歩行外力では問題は生じないであろうと考えられる。また、本橋の値は同程度の支間の吊床版橋に対しては比較的近い値を示しているが、他の形式の橋梁と比べると大きい値となっている。特に、張弦橋は小さな値となっているが、この要因として、張弦橋が上路式 PC 吊床版橋に比べ幅員が約 3 倍程度と大きく、これにともない質量も大きくなっているため、歩行外力が相対的に小さくなり、応答値も小さくなったものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、上路式 PC 吊床版橋を対象として、静的載荷実験と人力による振動実験を行い、静的および振動特性を把握するとともに歩行者が通行する際の振動使用性を検討した。本研究より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、荷重が支間 1/2 点に載荷された時、1/4 と 3/4 点では、橋梁が鉛直上方向に変位する傾向が見られた。また、実験結果と解析結果は概ね一致しており、解析モデルの剛性評価が妥当であった。
- 2) 固有振動モードは、他の吊床版橋と同じく逆対称 1 次が最低次のモードとなり、同程度の支間長を有する吊床版橋と同じ傾向を示していた。さらに自碇式上路 PC 吊橋と張弦橋は、吊床版橋とは異なる特性を示していた。
- 3) 本橋の減衰定数は、同程度の支間長を有する吊床版橋の値に比べて小さい値となっていた。また逆対称モードは鉛直材、対称モードは下床版の寄与がそれぞれ大きかった。水平方向については、水平 1 次が下床版主体、水平 2 次は上床版主体の振動モードであった。
- 4) 本橋では、歩調範囲にたわみ対称 1 次とたわみ対称 2 次の 2 つの固有振動モードが確認されたが、歩行者の通行によって生じる振動振幅は日常の利用時での歩行外力では問題は生じないものであった。

謝辞 本研究に際し、石川県土木部公園緑地課および住友建設(株)の方々には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 塩形幸雄, 小野賢二, 伊藤賢: 備後の水がめ・八田原ダム芦田湖にかかる“夢吊橋”, 橋梁, Vol.32, No.5, pp.31-42, 1996.
- 2) 村上良丸, 藤田義弘, 長井健雄, 藤田安宏: 吊床版歩道橋「蜂の巣キャンプ場橋」の特性, プレストレストコンクリート, Vol.27, No.5, pp.53-63, 1985.
- 3) 藤田稔, 吉川正行, 相良謙治, 児山祐樹: 宇多津歩道橋について (3 径間連続吊床版橋), プレストレストコンクリート技術協会 第 2 回シンポジウム論文集, pp.161-164, 1991.
- 4) 赤堀裕, 荒川隆史, 浦外樹, 齋藤謙一: バリアフリーの上床版を持つ PC 吊床版橋の設計と施工, プレストレストコンクリート技術協会第 8 回シンポジウム論文集 pp.611-614, 1998.
- 5) 梶川康男, 深田宰史, 山田智之: 単径間 PC 吊床版橋の振動特性と振動使用性, 土木学会, 第 55 回年次学術講演会講演概要集, I-B98, 2000.
- 6) 梶川康男, 犬島秀治, 角本周, 大沼孝司, 堀達浩: 自碇式上路 PC 吊橋の構造特性と振動使用性, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1377-1386, 1999.
- 7) 近藤真一, 内村高利, 中積健一, 梶川康男, 前田研一: 斜張橋を複合させた張弦桁橋の構造特性と振動使用性, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1449-1459, 1999.
- 8) 梶川康男, 深田宰史, 吉川裕晃: 単径間 PC 吊床版橋歩道橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.811-817, 1998.
- 9) 岡林隆敏, 原忠彦: 道路橋振動特性測定における衝撃加振法の適用, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.731-738, 1998.
- 10) 橋梁振動研究会編: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Wheeler, J.E.: Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, *Proc. of ASCE*, No.ST9, pp.2045-2065, 1982.
- 14) 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.
- 15) 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.

(2000 年 9 月 14 日受付)