

床版端部の橋台への取り付け構造が吊床版橋の動特性に及ぼす影響

Influence of Support Condition on the Dynamic Characteristics of Stress Ribbon Bridge

中沢隆雄*、今井富士夫**、赤木正見***、前田文男****

Takao NAKAZAWA, Fujio IMAI, Masami AKAGI and Fumio MAEDA

* 工博	宮崎大学教授	工学部土木環境工学科 (〒889-21 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)
** 工博	宮崎大学助教授	工学部土木環境工学科 (〒889-21 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)
***	宮崎大学技官	工学部土木環境工学科 (〒889-21 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)
****	株式会社ピー・エス	九州支店技術部設計課 (〒810 福岡県福岡市博多区中洲5-6-20)

This paper describes the dynamic characteristics of stress ribbon bridge obtained by experiments and theoretical analyses. Generally, stress ribbon bridge has a low natural frequency, because the stress ribbon is thin in comparison with its span length and has a low rigidity. For this reason, it is necessary to make clear the dynamic characteristics. The stress ribbon bridge named Usagibasi has been subjected to dynamic test by a human force. And the eigen value analysis by using FEM has been made to make clear the influences of different support conditions and the difference of altitude of abutments. It is obtained that the vibration mode of first natural frequency is 1st-point-symmetric in case that the span to sag ratio is less than 60. And the support condition of stress ribbon has effect on the dynamic characteristics. But there is no effect of the difference of altitude of abutments.

Key Words: stress ribbon, span to sag ratio, support condition, natural frequency

1. まえがき

近年、吊床版橋は、優美な景観的特色および経済性及び施工性が評価され、100mを超える長スパンの歩道橋として相次いで建設されてきている^{1), 2)}。

吊床版橋の床版厚は、これまでの施工例を見ると20cm程度であり³⁾、支間長に比較して極めて薄く、曲げ剛性よりも伸び剛性の卓越した柔構造形式となっている。このような構造形式の場合、荷重と変位が比例しなくなり幾何学的非線形性を呈するため、吊床版橋を設計する場合にはこれを考慮する理論によらなければならない。よって従来から、吊床版の曲げ剛性を無視し、ケーブル構造としてモデル化して、ケーブル理論を適用した設計法が用いられてきている。

この理論は、床版の橋台への取付部近傍で、温度変化や活荷重などによる回転変形が大きくなることから、この区間の橋台に曲面支承を設置し、その上に床版をのせてたわみの変化に応じて支持位置が移動可能な形状とした場合に対して、優れた適用性を発揮する。しかし最近では、このような支承や伸縮装置が不要であり、維持管理の面からも好ましいとして、床版を橋台に直接剛結合させた構造が多く施工されてきている。このような場合

には把握できないと考えられる。

したがって、著者らはこれまで、取付部の構造形式が静的力学特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、有限変形理論を用いてスパン／サグ比を解析因子とした検討を行ってきた⁴⁾。その結果、床版の橋台への結合構造がピン結合であっても剛結合であっても、水平反力やたわみに差異はそれほど生じないこと、剛結合にすれば取付部に大きな曲げモーメントが発生し、力学的な優位性はそれほどないことや、剛結合された場合へのケーブル理論の適用には、有効支間長などの検討が必要であることなどを示している。

本論はこれをさらにすすめて、床版端部の橋台への取付構造ならびに橋台間の高低差が、動的力学特性に及ぼす影響を検討したものである。

2. 解析モデル

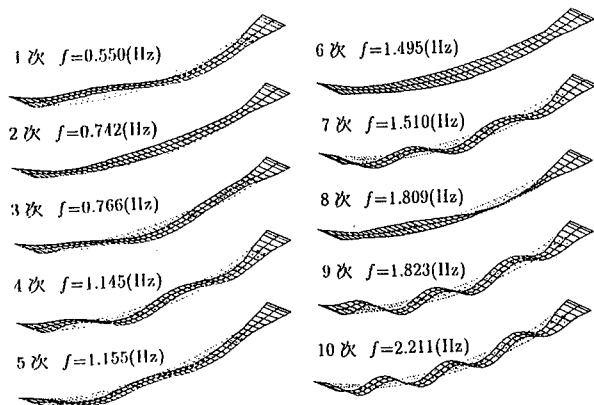
解析に用いたPC吊床版橋は、図-1に示すような宮崎県東臼杵郡北方町の五ヶ瀬川を跨ぐ歩道橋として平成4年8月に竣工したうさぎ橋⁵⁾を基本モデルとしたものである。支間は115m、サグ量は3.5m (スパン／サグ比は約33) であり、床版と橋台は剛結されている。また、両橋台間には7.2mの高低差がある。床版断面は、横風によ

図-1 うさぎ橋一般図

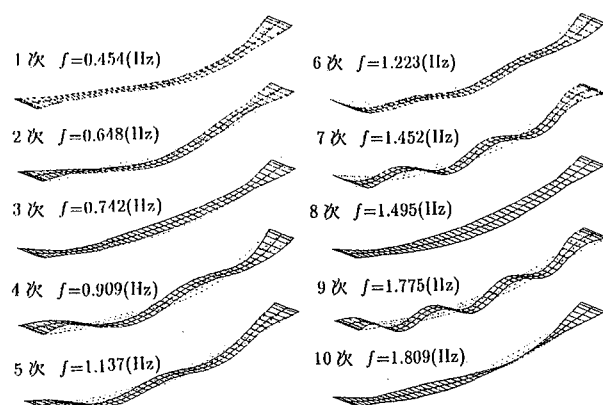
図一 2 解析モデル

要素番号	断面積 (m^2)	断面 2 次 モーメント		ねじり定数 R (m^4)
		$I_x (\text{m}^4)$	$I_y (\text{m}^4)$	
1. 48	4. 620	0. 3654	9. 186	0. 3521
2. 47	2. 776	0. 1131	5. 024	0. 1082
3. 46	1. 176	0. 01123	1. 790	0. 01030
4. 45	0. 601	0. 001402	0. 6579	0. 001140
5. 44	0. 520	0. 001218	0. 4288	0. 0009883
6. 43	0. 438	0. 001026	0. 2596	0. 0008363
7. 42	0. 354	0. 0008240	0. 1418	0. 0006842
8~41	0. 312	0. 0007210	0. 09465	0. 0006082

- 1064 -



振動モード（橋台間の高低差なし、端部剛結）



振動モード（橋台間の高低差なし、端部剛結）

図-3 振動モード

表-3 うさぎ橋の固有振動解析結果

次数	床版端部剛結合		床版端部ピン結合	
	振動モード	固有振動数 (Hz)	振動モード	固有振動数 (Hz)
1	たわみ逆対称1次	0.550	たわみ逆対称1次	0.454
2	ねじれ対称1次*	0.742	たわみ対称1次	0.648
3	たわみ対称1次	0.766	ねじれ対称1次*	0.742
4	たわみ逆対称2次	1.145	たわみ逆対称2次	0.909
5	たわみ対称2次	1.155	たわみ対称2次	1.137
6	ねじれ対称2次*	1.495	たわみ対称3次	1.223
7	たわみ対称3次	1.510	たわみ逆対称3次	1.452
8	ねじれ逆対称1次*	1.809	ねじれ対称2次*	1.495
9	たわみ逆対称3次	1.823	たわみ対称4次	1.775
10	たわみ対称4次	2.211	ねじれ逆対称1次*	1.809

注) *: 水平・ねじれ連成

このように吊床版橋の振動特性は3次元はり要素モデルで解析することができるが、質量や剛性、サグ、ケーブル本数などのパラメータとの対応関係がとらえられない欠点を有するとの指摘もなされ、これらのパラメータを考慮できる固有振動数算定式が提案されている⁷⁾。この方法は、ケーブル理論によるケーブルのひずみエネルギーと梁理論および曲がり梁理論に基づくコンクリート床版の面内および面外変形によるひずみエネルギーならびに床版の運動を剛体運動とみなした運動エネルギーを

算定し、ラグランジュの方程式を用いて求めた運動方程式を固有値解析することで、固有振動数の算定式を陽な形で誘導したものであり、床版端部の取り付け条件としては剛結に近いことを考慮して振動モードを仮定している。そこで、この提案式を用いた場合の結果および実測固有振動数を3次元はり要素を用いた解析結果と比較して、表-4に示す。なお、この提案式を用いる際の入力値は次のとおりである。

ケーブルの本数および断面積

架設用ケーブル：6本 (0.001387m^2)

引張用ケーブル：8本 (0.003129m^2)

コンクリートおよびケーブルの弾性係数

コンクリート： $3.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$

ケーブル： $2.0 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$

床版断面積： 0.3118m^2 （標準部の等断面）

支間長：115m、サグ：3.5m、死荷重時水平力：451tf

床版の単位長さあたりの重量： 0.78t/m

断面主軸に関する断面2次モーメント

I_y ： 0.000721m^4 、 I_z ： 0.09465m^4

ねじり定数： 0.000608m^4

表-4 固有振動数 (Hz) の比較

振動モード		実測値	3次元はり要素	近似解 ⁷⁾
たわみ	対称1次	0.732	0.766	0.702
	対称2次	1.172	1.155	1.288
	逆対称1次	0.586	0.550	0.416
	逆対称2次	1.123	1.145	1.145
ねじり	連成1次	0.781	0.742	0.757
	連成2次	2.344	1.495	1.484

表-4から、この提案式は3次元はり要素モデルを用いた解析結果および実測値に近い値がえられていることがわかる。したがって、この提案式によって簡単に固有振動数の近似解が得られるが、端部結合条件の相違や変断面となっている影響を考慮することができていない。よって、端部における剛性を低く評価したことから、3次元はり要素モデルによる解析結果および実測値よりもやや低い固有振動数になっていると考えられる。

4. 動的パラメトリック解析

本論で解析対象としている「うさぎ橋」においては、前述のように床版は変断面となっており、床版端部は橋台へ剛結され、両橋台には高低差がある。よって、これらが振動特性に及ぼす影響を検討するために、(1) 実橋に沿って床版断面を端部付近で変断面構造とし、橋台への取付部を剛結にした基本モデル（変断面剛結）、(2) 床版断面は実橋と同じではあるが、橋台への取付部をピン結としたもの（変断面ピン結）、(3) 取付部は剛結であるが、床版断面は標準部断面で一樣としたもの（等断面剛結）、ならびに(4) 取付部はピン結で床版断面は標準部断面で一樣としたもの（等断面ピン結）の4種類の

構造形態の吊床版橋モデルを想定し、これらのモデルにおいてスパン／サグ比を変化させるとともに、両橋台の高低差の有無が振動特性に及ぼす影響を検討することとした。

解析に用いる座標とケーブルの水平張力は、有限変形理論によって求めた値を用いている。座標はあらかじめ設定したものに、死荷重を作用させたときの鉛直方向のたわみを初期設定の座標値に加味して入力座標とし、支間中央のたわみを基本サグとしてスパン／サグ比を決定している。水平張力は死荷重載荷時に生じた値を初期水平張力とした。

4. 1 橋台間に高低差のない場合の検討

まず橋台間に高低差がなく、断面が支間全長にわたって一様で、床版端部の橋台への取付がピン結である場合は、ケーブル理論が適用可能である。この理論ではケーブルの水平張力 H とサグ f の関係は $H = q L^2 / 8 f$ 、(q : 荷重強度、 L : 支間長) で与えられる。そこで $L = 115\text{m}$ 、死荷重載荷時の荷重強度を、標準部の断面寸法を想定して $q = 0.78\text{tf/m}$ として、 L/f を10から120まで変化させれば、水平張力 H は112.1tfから1345.5tfまで変動することとなる。これらの値を用い、前述の3次元はり要素モデルによって解析した。求められた結果の中から3次モードまでにとどめれば、図-4に示すような固有振動数とスパン／サグ比の関係が得られた。

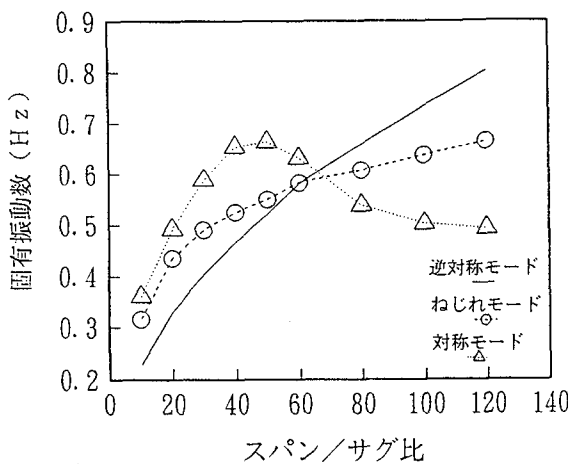


図-4 固有振動数—スパン／サグ比関係

スパン／サグ比の変化にともなって水平張力も変動し、剛性が大きく変わることから、振動性状が異なったものになっていく状況がよく現れている。すなわち、スパン／サグ比の増大にともなって最低固有振動数の振動モードが逆対称から対称へと移行する様子がよく示されている。対称モードの固有振動数は、スパン／サグ比が40付近でピークに達し、その後スパン／サグ比の増大に伴って次第に低下していくものの、スパン／サグ比が80以上になってくるとそれほど変化しなくなっている。

また、スパン／サグ比が約60で対称、逆対称およびねじれモードの3者の固有振動数がほぼ一致した値となっており、これ以上のスパン／サグ比になってくると、逆対称モードと対称モードの固有振動数の差が大きくなっていく。これは、スパン／サグ比が60以上になってくると、サグが小さくなっていくため最低次の対称モードの固有振動数はさほどの変化しなくなるが、逆対称モードとねじれモードは、大きな水平張力が作用するに伴って剛性が高くなることによって、固有振動数が増大していくためである。

ケーブル理論によれば、水平張力とスパン／サグ比は線形関係にあるが、床版断面が変化したり床版端部が橋台へ剛結されてくるとその関係は非線形となってくる。そこで、等断面剛結、変断面ピン結および変断面剛結の場合を想定し、有限変形理論を用いて死荷重載荷時の水平張力とスパン／サグ比の関係を求めた。得られた結果は図-5に示すとおりである。なお、有限変形理論による解析にあたっては、死荷重載荷によってたわみがある程度生じることから、スパン／サグ比はすべての場合において約60が限度であった。この図から、変断面剛結の場合にのみスパン／サグ比が40付近から明確に非線形性が生じているのが理解できる。床版端部結合法の影響についてみれば、ピン結とした場合の方が剛結時よりも同一スパン／サグ比では大きな水平張力となっている。また、変断面ピン結における水平張力が他の場合よりも大きくなっているのは、変断面剛結のときよりも剛性が小さいことや等断面のときよりも死荷重が端部拡幅している分だけ大きくなっていることによるものである。

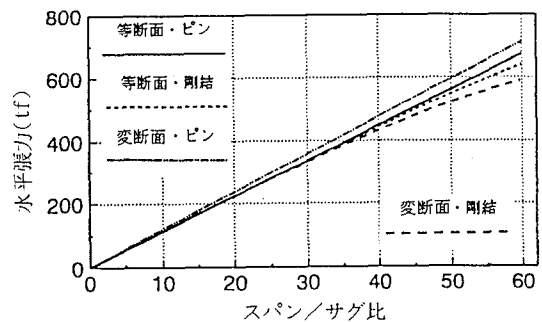
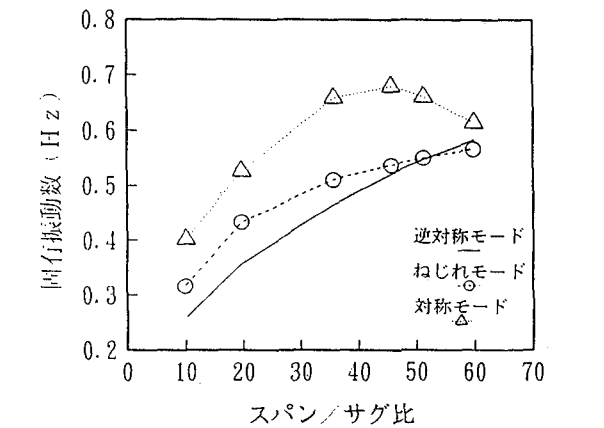


図-5 水平張力—スパン／サグ比関係

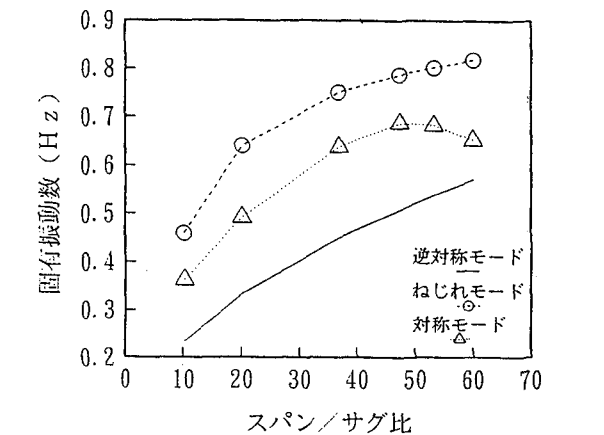
次に、これらの水平張力による幾何剛性を剛性マトリックスに導入して求めた、スパン／サグ比による3次までの固有振動数の変化の状況を図-6～図-8に示す。これらの図から、スパン／サグ比が60程度までであれば最低次の固有振動数に対応する振動モードはたわみ逆対称であること、たわみ逆対称モードおよびねじれモードの固有振動数はスパン／サグ比が大きくなるにともなって増大すること、変断面ピン結、変断面剛結と剛性が高くなるにともなってねじれ固有振動数が増大するとともに振動次数が2次から3次に移行すること、さらにはた

わみ対称モードの固有振動数にはピーク値が存在し、ピークに達するスパン／サグ比は剛性の増大にともなって小さくなるなどがわかる。

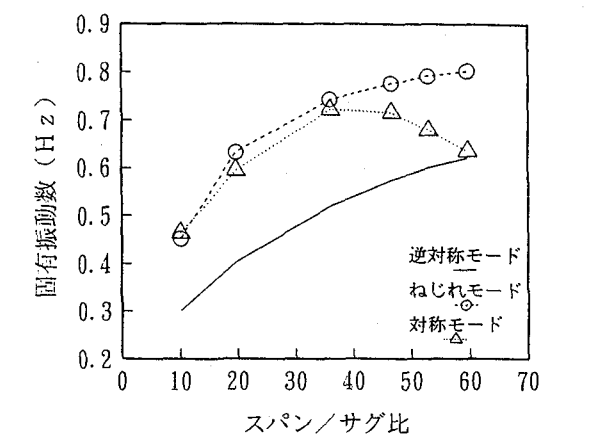
なお、スパン／サグ比が20程度までにおいては、サグが大きすぎるためにたわみ対称1次モードではなく、たわみ対称2次モードが生じており、たわみ対称1次モードが現れるのはスパン／サグ比が30以上となってからであるという結果が得られている。



図－6 固有振動数－スパン／サグ比（等断面剛結）



図－7 固有振動数－スパン／サグ比（変断面ピン結）

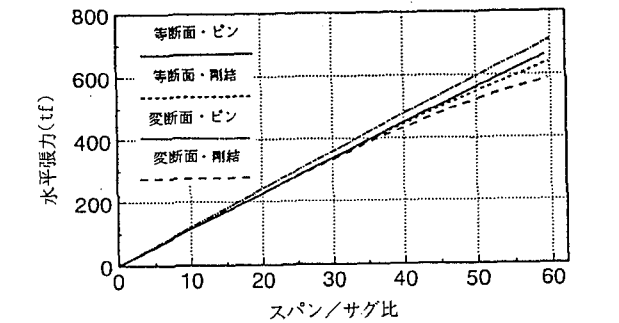


図－8 固有振動数－スパン／サグ比（変断面剛結）

4. 2 橋台間に高低差のある場合の検討

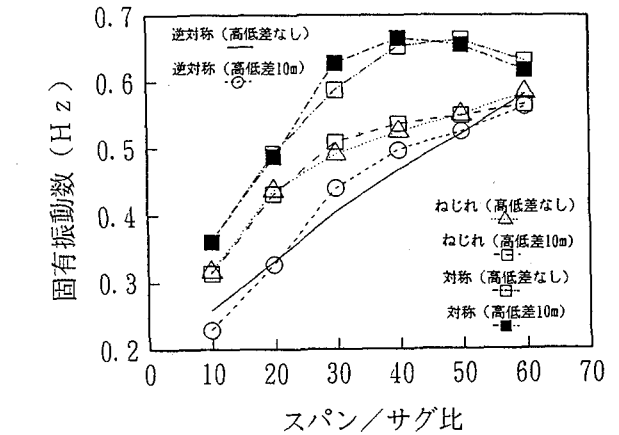
うさぎ橋では両橋台間の高低差が7.2mあり、最急縦断

勾配は約20％にも達する。そこで、このような橋台間での高低差がある場合の振動特性への影響を検討する。そこで、両橋台間に 10mの高低差がある場合を想定し、死荷重が作用する前の床版の縦断曲線は、2次放物線で表現できるものとし、死荷重作用時の水平張力とスパン／サグ比の関係を、有限変形理論によって求めた。得られた結果は図－9に示すとおりである。これらの結果を見ると、高低差がない場合と比較して水平張力の変化は最大でも約 0.3％減少するのみで、ほとんど影響はないと考えられる。



図－9 水平張力－スパン／サグ比関係

続いて、これらの得られた水平張力を剛性マトリックスに導入して、床版端部の結合法別に橋台間の高低差が振動特性に及ぼす影響を解析した。図－10～図－13に高低差が 10mのとき、3次までの固有振動数に及ぼす影響を示す。これらの結果から、支間長 115mに対し10m程度の橋台間の高低差であれば、振動特性は高低差がない場合とほとんど差異はないと考えられる。



図－10 橋台間高低差の影響（等断面ピン結）

5. あとがき

本論では吊床版端部と橋台の取り付け部を剛結合あるいはピン結合としたとき、両橋台間の高低差の有無や、床版端部の断面変化の有無、さらにはスパン／サグ比の変化に対して振動性状がどのように変化するかを、P C 吊床版橋「うさぎ橋」の振動性状と比較する中で検討し

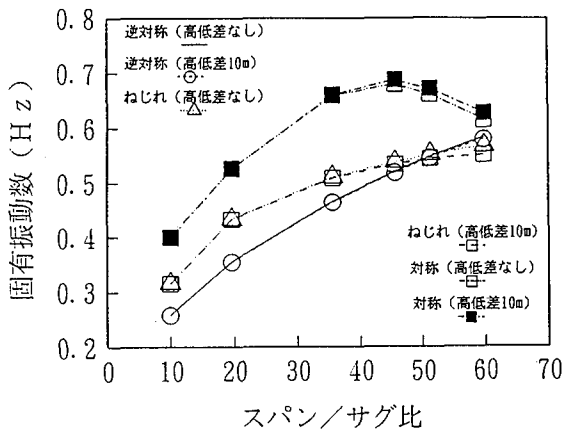


図-1 1 橋台間高低差の影響 (等断面剛結)

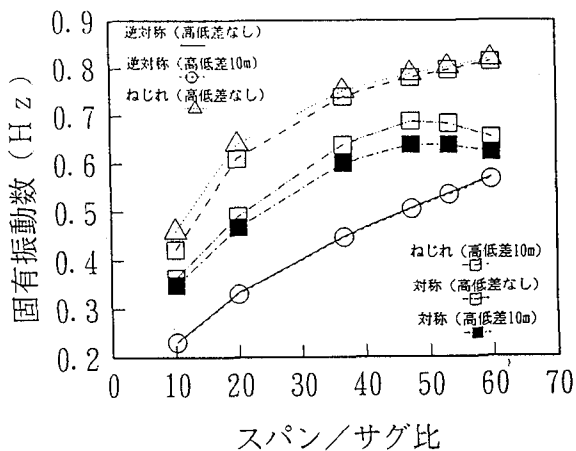


図-1 2 橋台間高低差の影響 (変断面ピン結)

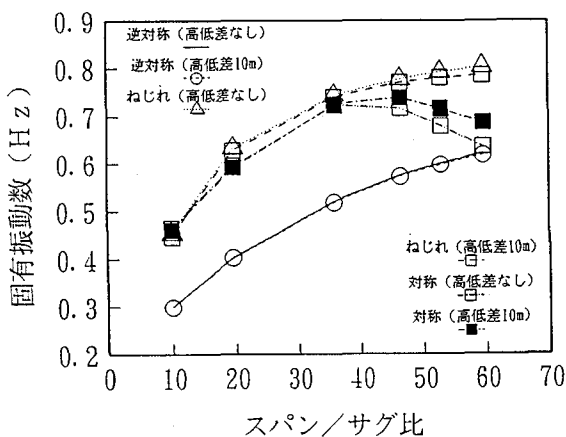


図-1 3 橋台間高低差の影響 (変断面剛結)

てきたが、得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 変断面、等断面のいずれにおいても、ねじれモードの場合には床版端部の剛結とピン結の差異が固有振

動数に及ぼす影響はほとんどないが、対称、逆対称モードの場合には、剛結としたことで固有振動数が高くなる。

- 2) 同じ端部結合条件であれば、最も高い固有振動数を示すのは、変断面の場合にはねじれモードであり、等断面であれば対称モードである。
- 3) うさぎ橋程度の支間長に対する橋台間の高低差であれば、固有振動数の変化に及ぼす影響は少ない。
- 4) スパン/サグ比の増大とともにたわみ逆対称モードとねじれモードの固有振動数は大きくなる。これは床版が次第に大きな水平張力となることから剛性が高くなるためと考えられる。
- 5) たわみ対称モードではスパン/サグ比が40程度で固有振動数にピークが生じる。また、スパン/サグ比が60程度でたわみの逆対称と対称モードの固有振動数が合致し、以後は対称モードが最低次の振動モードとなる。これは、スパン/サグ比が増大すれば対称モードは曲げ振動から縦振動に移行していくためと考えられる。
- 6) うさぎ橋ではスパン/サグ比が約33と比較的小さいため、たわみ逆対称モードが最低次の基本モードとなっている。

参考文献

- 1) 松永純一、岡崎洋、荒巻武文、錦英樹：梅の木轟講演吊橋について、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、P C技術協会、1990.10
- 2) 則武邦具、細野宏巳、新井英雄、錦英樹、高橋正雄：石槌橋の設計と施工、プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集、pp.217-222 1992.11
- 3) 新井英雄、錦英樹：吊床版橋、コンクリート工学、Vol.30、No.3、pp.42-52、1992.3
- 4) 中沢隆雄、今井富士夫、赤木正見、前田文男：吊床版橋の力学特性に及ぼす取付部の構造形式の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.997-1002、1994.6
- 5) 柴田英雄、山口順一、牧野正明、前田文男：P C吊床版橋「うさぎ橋」の設計と施工、プレストレストコンクリート、Vol.35、No.1、pp.14-21、1993.1
- 6) 前田幸雄、林正、中村守：増分法による平面骨組構造物の大変形解析の加速計算法、土木学会論文報告集、第223号、pp.1-9、1974.3
- 7) 比江島慎二、原口一哉、藤野陽三：吊床版橋の面内面外モードの固有振動数の近似解、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第1部、pp.904-905、1989.10

(1994年9月14日受付)