

2.3 次元サグを有する歩道吊橋の静的・動的構造特性

2-1. 研究の背景と目的

従来の歩道吊橋は、図 2-1 に示す Type-A のように、鉛直に張られた主索と斜め下に張られた耐風索により支持されている。しかし、実際に橋梁を計画する際には、いくつかの制約条件が伴ってくる場合があり、例えば上空制限により主塔の高さが制限される場合は、図 2-1 の Type-B や Type-C のような構造が考えられる。

一方、第 1 章で述べたように、歩道吊橋の多くは無補剛で設計されており、揺れやすい構造となっている。歩道吊橋が振動を生じる原因はいくつかあるが、風によるものや歩行者自身によって引き起こされる振動が、橋体や使用者に対して大きな影響を与えると考えられる。歩行時に発生する振動については、鉛直振動やねじり振動に加え、ミレニアムブリッジで大きな問題となった水平振動が注目されるようになった。

図 2-1 の Type-A のような一般的な歩道吊橋においては、設計事例も多く、振動解析も行われてきたが、主索や耐風索の角度を変化させた場合の特性はあまり検討されていない。設計の自由度を広げるために、このような種々の形状の吊橋を想定し、検討を行うことは有意義であるといえる。

そこで本研究では、鉛直面内に配置される主索を橋軸直角方向に傾斜させ角度を変化させた構造と、耐風索を鉛直方向から水平方向に変化させるケーブルシステムについて、固定荷重解析、固有振動解析を行って、その静的、動的構造特性を把握することを目的とした。

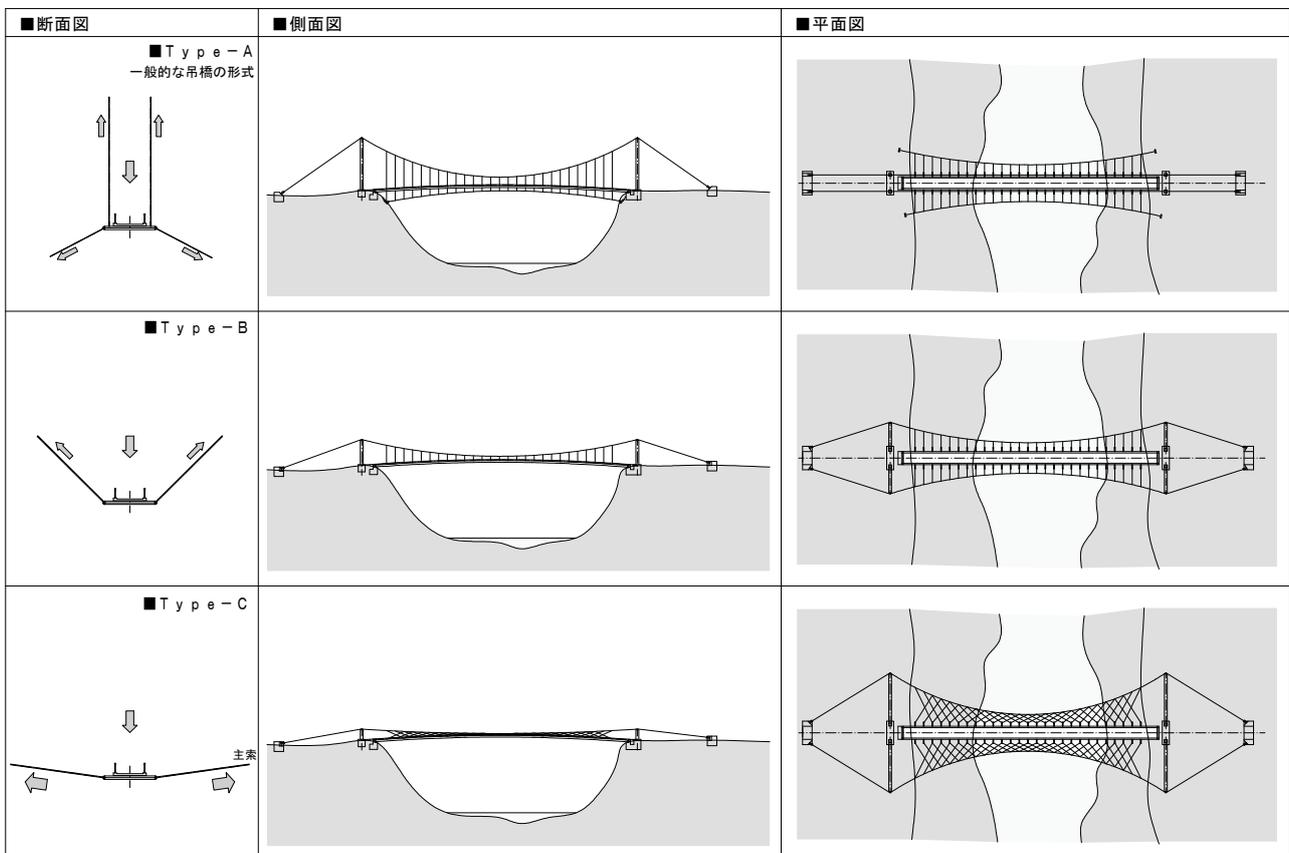


図 2-1 ケーブルシステムの形状

2-2. 検討条件

(1) 検討対象とする実橋モデル

本検討を行う条件は、実際に架橋されている歩道吊橋を参考に決定した。表 2-1 に、参考とした歩道吊橋を示す。本検討においては、これら歩道吊橋の幅員構成、床版形式、主桁および床組み構造を参考にモデルを決定した。

表 2-1 歩道吊橋の例

橋 名	もみじ谷大吊橋	つつじ吊橋
写 真		
形 式	無補剛吊橋	無補剛吊橋
主塔間隔	320 m	130 m
有効幅員	1.5 m	1.5 m
耐風索	有り	有り
サグ比	1/14	1/12
床 版	木床版	木床版
主桁、床組	H形鋼	H形鋼

(2) 橋梁諸元

検討を行う橋梁の基本モデルを図 2-2、図 2-3 に、橋梁諸元を表 2-2 に、それぞれ示す。歩行者専用の吊橋であるため、床版は木床版とし、幅員は 1.5m とする。床組みは H 形鋼を組み合わせた構造とし、主索間隔を 2.2m とする。支間長は 100m とし、2.5m 間隔で吊索を設ける。また、耐風索も設置し、2.5m 間隔で床組みと連結するものとする。なお、サグ比は基本となる 1/10 とした。

表 2-2 検討対象の橋梁諸元

橋梁形式	木床版無補剛歩道吊橋
塔柱間隔	$L=100\text{ m}$
有効幅員	$B=1.5\text{ m}$
主索間隔	$SB=2.2\text{ m}$
サグ比	1/10

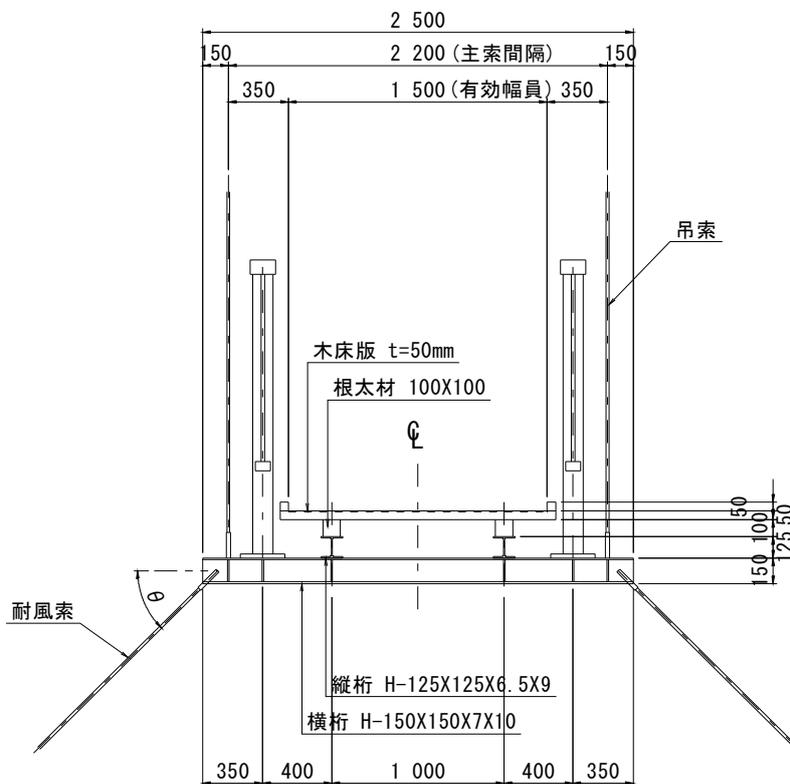


図 2-2 検討橋梁の断面図

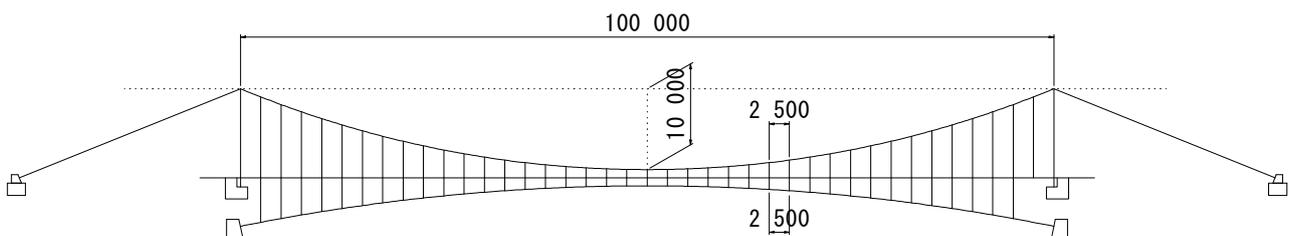


図 2-3 検討橋梁の基本形状

(3) 荷重強度

荷重強度の算定は、仮定した各部位の重量をそれぞれ積算して求めた。死荷重、活荷重の荷重強度は、以下の通りである。

【死荷重】

1. 橋体 (橋体長さあたり)

木床版	$8.000 \text{ kN/m}^3 \times 0.050 \text{ m} \times 1.600 \text{ m}$	= 0.640 kN/m
地 覆	$8.000 \text{ kN/m}^3 \times 0.050 \text{ m} \times 0.050 \text{ m} \times 2$	= 0.040 kN/m
根太材	$8.000 \text{ kN/m}^3 \times 0.100 \text{ m} \times 0.100 \text{ m} \times 2$	= 0.160 kN/m
主 桁	$0.231 \text{ kN/m} \times 1.1 \times 2$	= 0.509 kN/m
横 桁	$0.305 \text{ kN/m} \times 1.2 \times 2.5 \text{ m} \times 41/100 \text{ m}$	= 0.375 kN/m
横 構	$0.204 \text{ kN/m} \times 3.3/2.5 \times 2$	= 0.540 kN/m
高 欄	$0.500 \text{ kN/m} \times 2$	= 1.000 kN/m
その他		= 0.236 kN/m

合 計 $W_d = 3.50 \text{ kN/m}$

2. 主索と吊索 (仮定した直径：主索φ65、吊索φ10) ※片側あたり

主 索	0.163 kN/m	= 0.163 kN/m
吊 索	$(0.004 \text{ kN} \times 6.5 \text{ m} + 0.4 \text{ kN/個}) \times 39 \text{ 組} / 100 \text{ m}$	= 0.166 kN/m

合 計 $W_{dmc} = 0.33 \text{ kN/m}$

3. 耐風索と耐風支索 (仮定した直径：耐風索φ45、耐風支索φ10) ※片側あたり

耐風索	0.078 kN/m	= 0.078 kN/m
耐風支索	$(0.004 \text{ kN} \times 110 \text{ m} + 0.2 \text{ kN/個}) \times 39 \text{ 組} / 100 \text{ m}$	= 0.082 kN/m

合 計 $W_{dvc} = 0.16 \text{ kN/m}$

【活荷重】

活荷重強度 $W_l = 3.0 \text{ kN/m}^2 \times 1.5 \text{ m} = 4.5 \text{ kN/m}$

(4) 格点荷重の算出

格点荷重は、構造解析のモデル化において、各節点に作用させる集中荷重であり、要素の部材長 1.25m、2.5m に対して算定すると、表 2-3 のようになる。

表 2-3 橋体およびケーブルの格点作用させる集中荷重

		端格点 (kN)	中間格点 (kN)
橋 体		2.1875	4.375
ケーブル	主索 + 吊索	0.4125	0.825
	耐風索 + 耐風支索	0.200	0.400

2-3. 検討モデルと 3 次元サグの形状決定

(1) 解析モデルと 3 次元サグの形状に関するパラメータの設定

図 2-4 に、解析モデルの基本形状を示す。モデル化の範囲は、主塔から主塔までとし、主塔サドル部、主桁支承部、耐風索アンカー部には、支点を設けて拘束するものとした。また、簡便化のため、主塔、主ケーブルのバックスティはモデル化しなかった。ハンガー間隔は、主索、耐風索ともに、2.5m 間隔とした。

本研究では、主索角度 α 、耐風索角度 β をパラメータとして、解析的な検討を行うことから、表 2-4 に示すように、解析パラメータを設定した。まず、耐風索がない場合について、主索角度 α の変化が静的・動的構造特性に及ぼす影響を検討する。次に、主索角度 α 、耐風索角度 β をそれぞれ変化させて検討を行うこととした。主索角度 α は、90、45、30、15° の 4 ケース、および、耐風索角度 β は、90、45、30、15、0° の 5 ケース設定した。

ケーブル形状については、主索の鉛直方向のサグ量は 10m (サグ比 1/10) で固定し、主索角度 α の変化によって、主索定着点の水平方向長さを変化させるものとした。耐風索については、定着端部の鉛直面内において、耐風索から桁端 (耐風支索の定着点) までの距離を 10m に、また、支間中央部の鉛直面内において、耐風支索長さを 3m に、それぞれ固定して検討することとした。これらのパラメータを組み合わせると、表 2-5 に示すような 24 の解析ケースとなる。これらのケースに対して、次に述べる手法によりケーブル形状を決定して、解析モデルを作成した。

(2) 3 次元サグの形状決定

3 次元サグを有する吊形式橋梁は、トラス要素で連結された立体的なリンクケーブルの座標と張力を、鉛直と水平に分けて形状決定を行うことができる。例えば、文献 1) には、MONO-DUO 形式超長大吊橋を対象としたものであるが、その立体ケーブルの形状決定の方法が示されており、本研究においてもその方法を応用することとした。すなわち、鉛直方向のケーブル形状は、通常の吊橋と同様に、放物線形状としてモデル化し、水平方向のケーブル形状は、塔頂部の座標と水平方向張力を既知量として、連立一次方程式を解いて算定した。

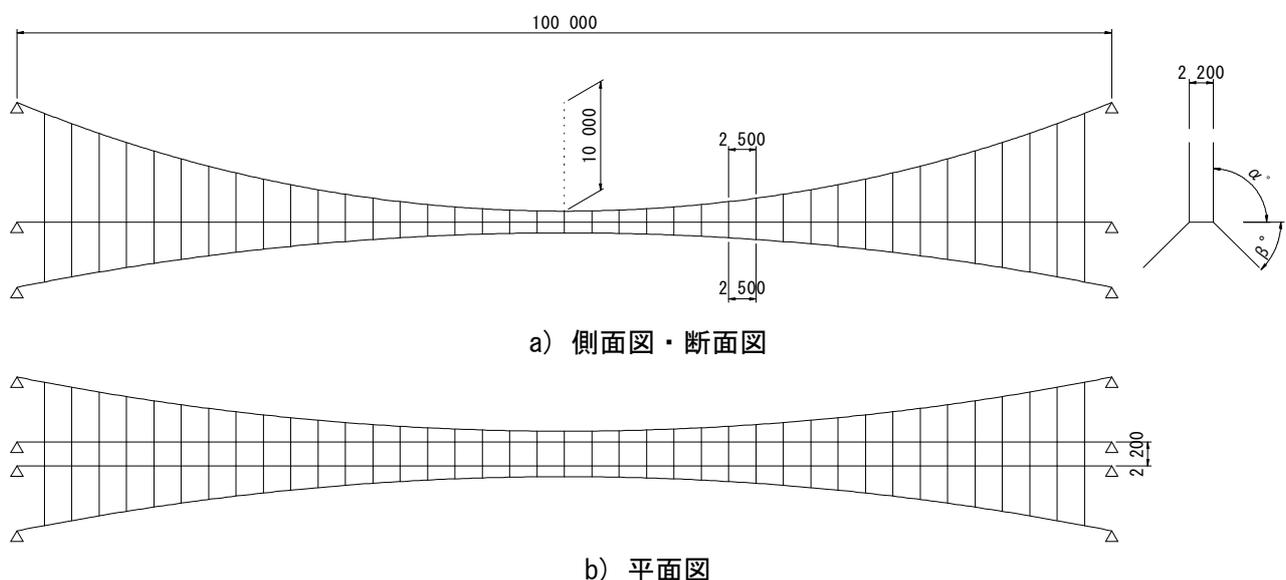


図 2-4 解析モデルの基本形状

表 2-4 ケーブル形状に関する解析パラメータ

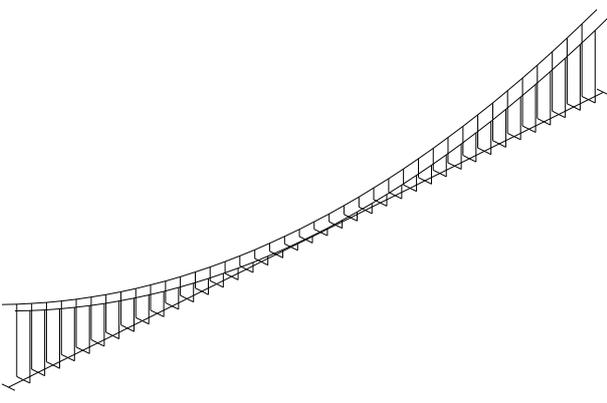
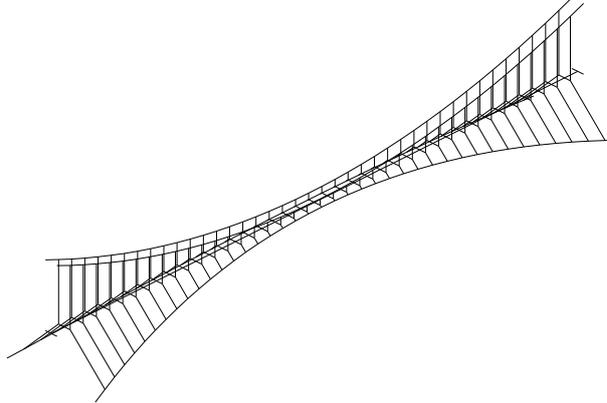
耐風策なし		耐風策あり	
			
主索角度 α (°)	耐風索角度 β (°)	主索角度 α (°)	耐風索角度 β (°)
90、45、30、15	—	90、45、30、15	90、45、30、15、0

表 2-5 解析ケース一覧

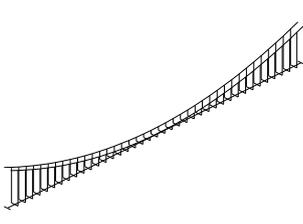
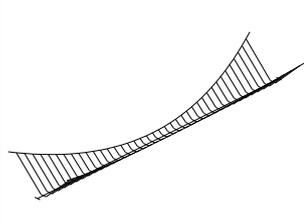
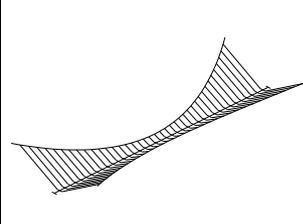
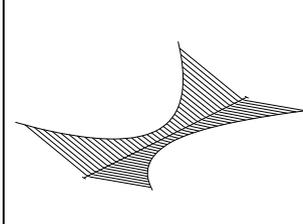
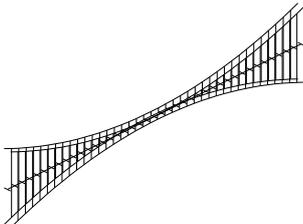
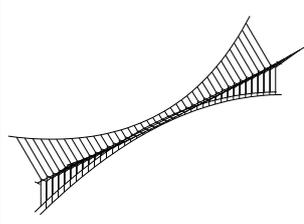
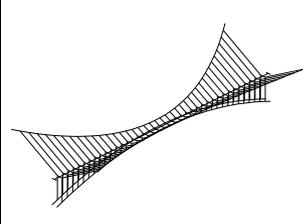
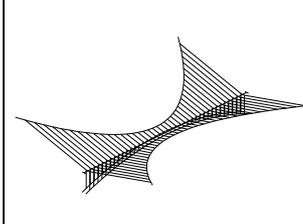
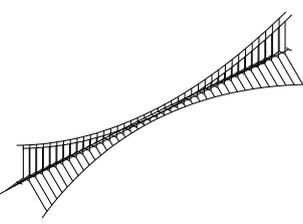
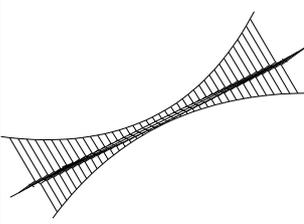
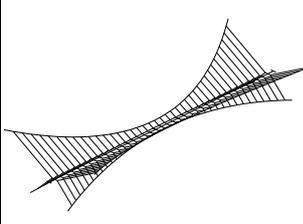
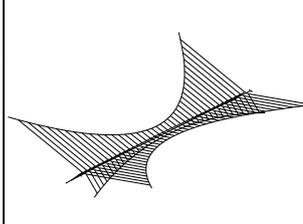
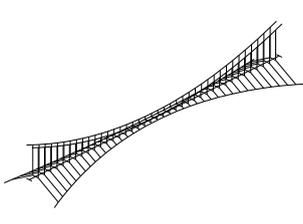
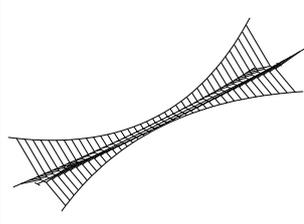
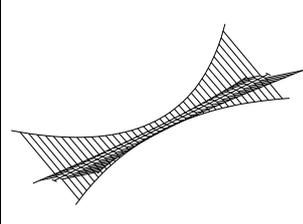
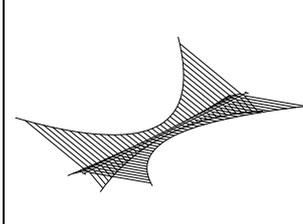
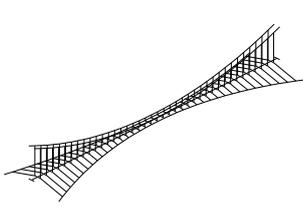
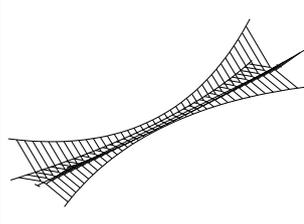
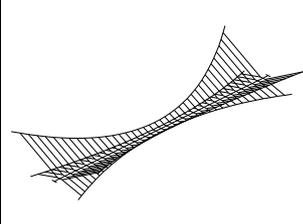
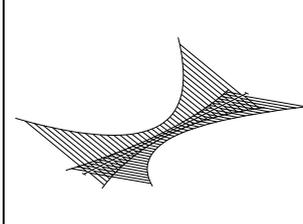
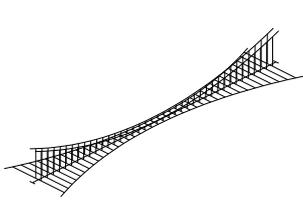
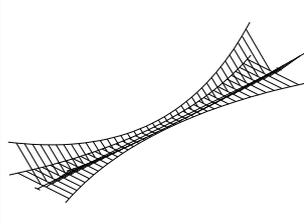
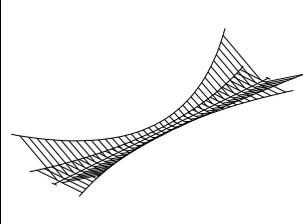
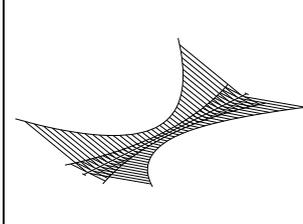
		主索角度 α (°)			
		90	45	30	15
耐風索なし		case-90-n	case-45-n	case-30-n	case-15-n
耐風索あり 耐風索角度 β (°)	90	case-90-90	case-45-90	case-30-90	case-15-90
	45	case-90-45	case-45-45	case-30-45	case-15-45
	30	case-90-30	case-45-30	case-30-30	case-15-30
	15	case-90-15	case-45-15	case-30-15	case-15-15
	0	case-90-00	case-45-00	case-30-00	case-15-00

本研究では、前述したように、主索、耐風索ともに断面内に角度を有することから、立体的なケーブル形状となる。主索の形状は、無補剛桁に曲げモーメントを生じないという条件を適用すれば、文献 1) の形状決定の手法を用いて、主索角度 α に対して、容易に計算することが可能である。

一方、耐風索の形状は、耐風索角度 β だけでは形状が定まらず、水平方向張力も入力データとして与える必要がある。これは設計パラメータになるが、本研究では、全ての検討ケースで、死荷重時に 100MPa の張力が生じるように、耐風索の設計張力を設定した。ここでは、モデル化を簡便にするために、死荷重時における耐風索の形状は、耐風索の死荷重は考慮せず、上に凸の放物線形状を仮定して決定した。ただし、固有振動解析においては、耐風索の質量を考慮し、各節点に集中質量を与えて計算した。さらに、耐風索角度 β が 0° のケースについては、解析の都合上、 $\beta=0.1^\circ$ として形状を決定した。

これらの形状決定の条件をもとに、24 ケースの解析モデルを作成した。ちなみに、死荷重時における桁の鉛直方向の誤差は、主索角度 α が 90°~30° までは、6mm 以内であったが、主索角度 α が 15° では、最大で 38mm の誤差を生じた。主索角度が小さくなるほど、鉛直変位の誤差が増大する傾向を示したが、値そのものは十分に小さいといえた。全解析ケースのモデル図を表 2-6 に示す。

表 2-6 解析モデル一覧

case-90-n	case-45-n	case-30-n	case-15-n
			
case-90-90	case-45-90	case-30-90	case-15-90
			
case-90-45	case-45-45	case-30-45	case-15-45
			
case-90-30	case-45-30	case-30-30	case-15-30
			
case-90-15	case-45-15	case-30-15	case-15-15
			
case-90-00	case-45-00	case-30-00	case-15-00
			

2-4. 固定荷重解析による静的構造特性の検討

(1) 荷重条件の設定

固定荷重解析では、死荷重 (D) と活荷重 (L) を載荷するものとし、活荷重については、図 2-5 に示すように、“全載荷 ($L1$)” と“半載荷 ($L2$)” の2ケースについて検討を行った。載荷条件は、「耐風索ありモデル」の場合であるが、「耐風索なしモデル」についても同様である。

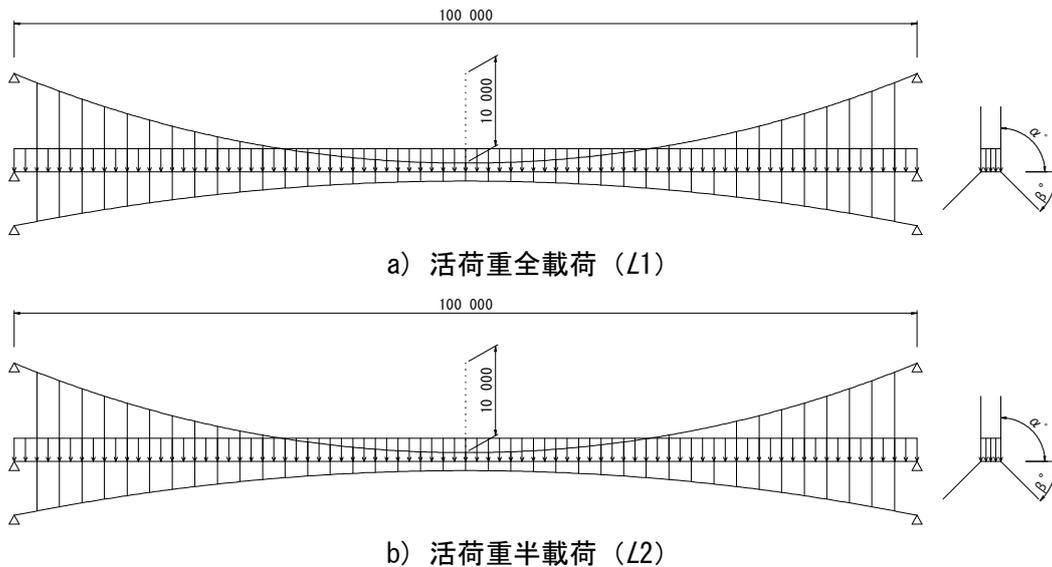


図 2-5 活荷重載荷図

(2) 耐風索なしモデルの検討結果

a) 活荷重載荷による桁の鉛直変位

$L1$ および $L2$ 活荷重の載荷による鉛直変位の解析結果を図 2-6 に示す。各ケースの代表として、「case-45-n」、「case-15-n」を示す。図より、全載荷 $L1$ よりも半載荷 $L2$ の方が、たわみが大きくなること、また、主索の角度が小さくなると、鉛直変位が増大する傾向にあることがわかる。

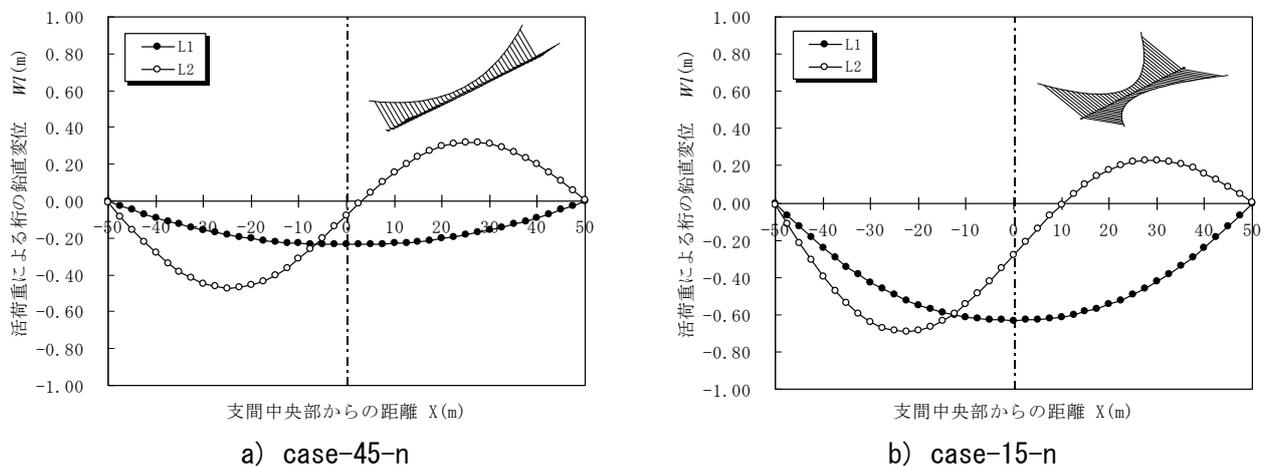


図 2-6 耐風索なしモデルにおける桁の鉛直変位分布

主索角度 α を 90° から 15° まで変化させた時における桁の鉛直変位の最大値、最小値を図 2-7 に示す。桁の鉛直変位は、 90° 、 45° 、 30° においては大きな差異はみられなかったが、主索角度が 15° になると急激に変位が増えることがわかる。参考値として、RC 床版を用いた時のたわみ制限²⁾ (支間長に対する $1/350$ のたわみ) 併記したが、若干超えている。

b) 活荷重載荷による主索張力

主索角度 α を 90° から 15° まで変化させた時における主索張力 (T_{mc}) の最大値を図 2-8 に示す。死荷重時 (D)、死活荷重時 ($D+L$) において、主索張力も、桁の鉛直変位と同様に、主索角度 15° において大きく増加していることがわかった。

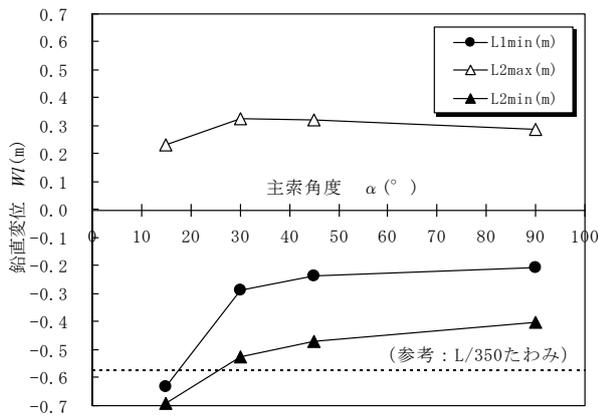


図 2-7 主索角度を変化させた時の桁の鉛直変位 (耐風索なしモデル)

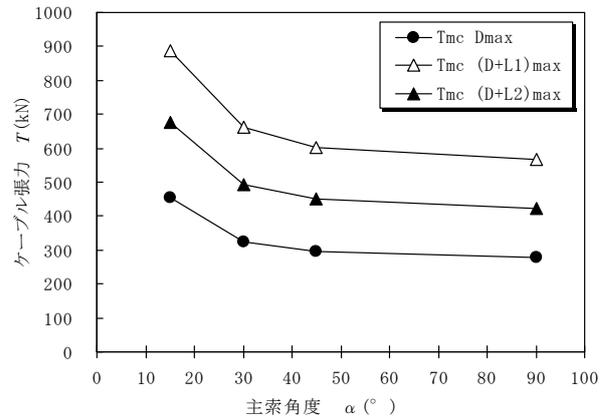
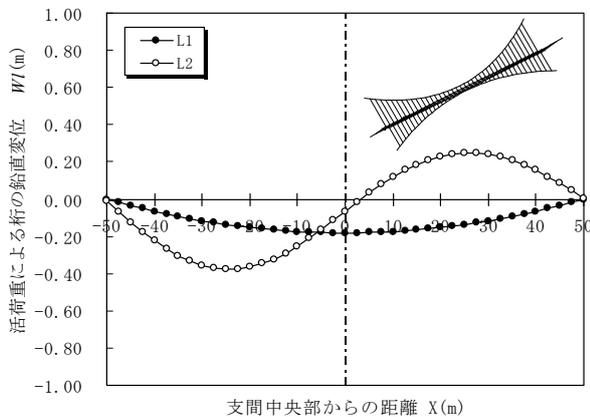


図 2-8 主索角度を変化させた時の主索張力 (耐風索なしモデル)

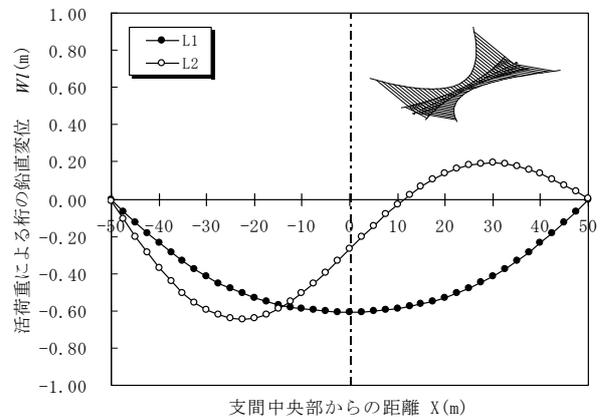
(3) 耐風索ありモデルの検討結果

a) 活荷重載荷による桁の鉛直変位

L1 および L2 活荷重の載荷による鉛直変位の解析結果を図 2-9 に示す。各ケースの代表として、「case-45-45」、「case-15-00」を示す。



a) case-45-45



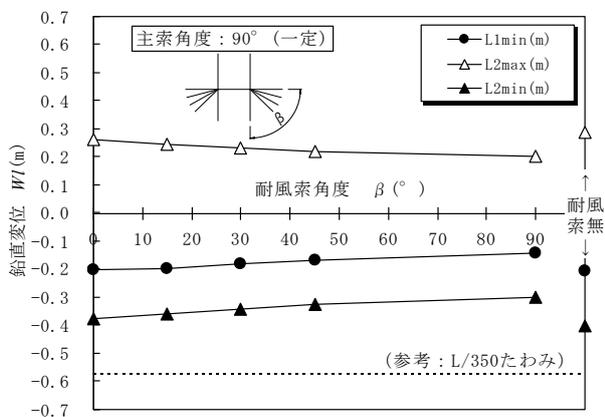
b) case-15-00

図 2-9 耐風索ありモデルにおける桁の鉛直変位分布

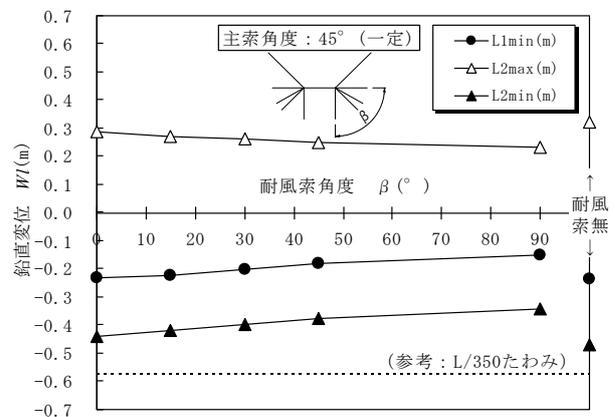
図より、耐風索なしモデルと同様に、全载荷 $L1$ よりも半载荷 $L2$ の方が、たわみが大きくなること、また、主索の角度が小さくなると、鉛直変位が増大する傾向にあることがわかる。

図 2-10 に、耐風索角度 β を 15° から 90° まで変化させた時における桁の鉛直変位の最大値、最小値を、主索角度 α ごとにそれぞれ示す。まず、図 2-10 a) の主索角度 $\alpha=90^\circ$ (一定) において、耐風索角度 β を 15° から 90° に変化させた場合、桁の鉛直変位が低下していることがわかる。この傾向は、主索角度 α が小さいほど顕著である。特に、図 2-10 d) において、主索角度 $\alpha=15^\circ$ (一定) で、耐風索角度 β が 45° 以下となると、桁の鉛直変位が急激に増大することがわかる。このとき、参考値として、RC 床版を用いた時のたわみ制限 (支間長に対する $1/350$ のたわみ) 併記したが、耐風索角度 β が 30° 以下で制限値を超え、耐風索がない場合と同程度の鉛直たわみを生じることもわかる。

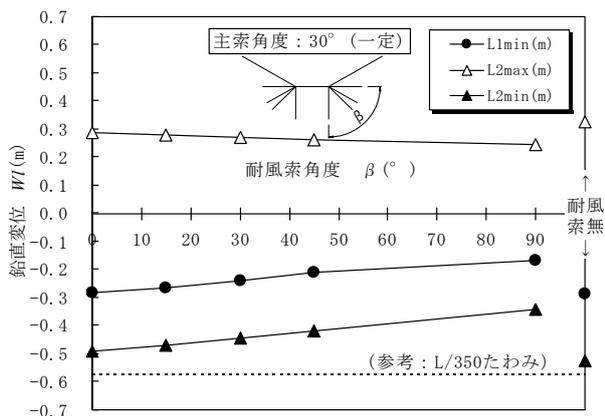
以上のことから、桁の鉛直変位は、主索角度 α ほど顕著ではないものの、耐風索角度 β の影響も受けること、また、耐風索角度 β が小さくなると、鉛直変位は増大することが確かめられた。



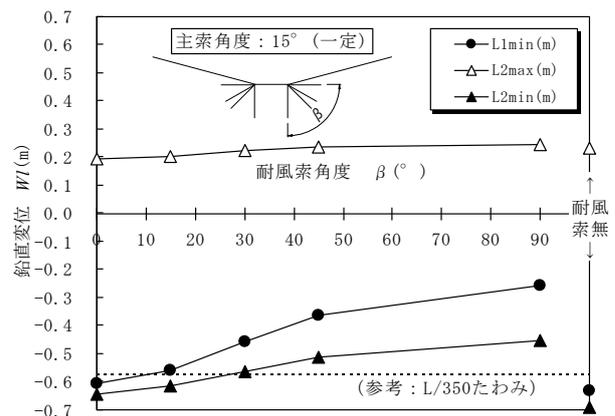
a) 主索角度 $\alpha=90^\circ$ (一定)



b) 主索角度 $\alpha=45^\circ$ (一定)



c) 主索角度 $\alpha=30^\circ$ (一定)



d) 主索角度 $\alpha=15^\circ$ (一定)

図 2-10 主索角度を変化させた時の桁の鉛直変位 (耐風索ありモデル)

b) 活荷重载荷によるケーブル張力

図 2-11 に、耐風索角度 β を 15° から 90° まで変化させた時におけるケーブル張力の最大値を、主索

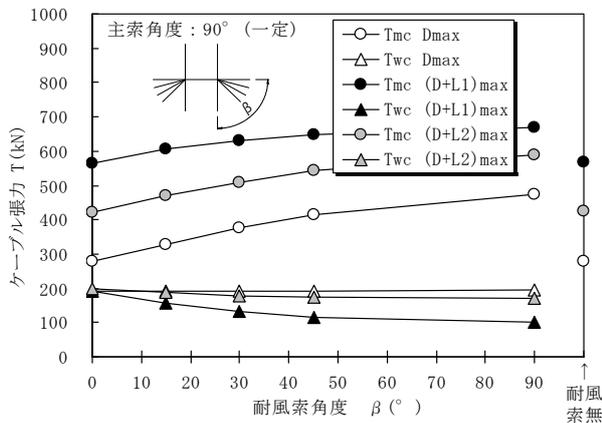
角度 α ごとにそれぞれ示す。図中、 T_{mc} は主索の張力、 T_{wc} は耐風索の張力であり、死荷重時 (D)、死活荷重時 ($D+L1$ および $D+L2$) の最大張力をそれぞれ示している。

まず、耐風索なしモデルにおいて述べたように、主索角度 α が小さくなると、ケーブルの傾斜によって、主索の張力は増大することがわかる。

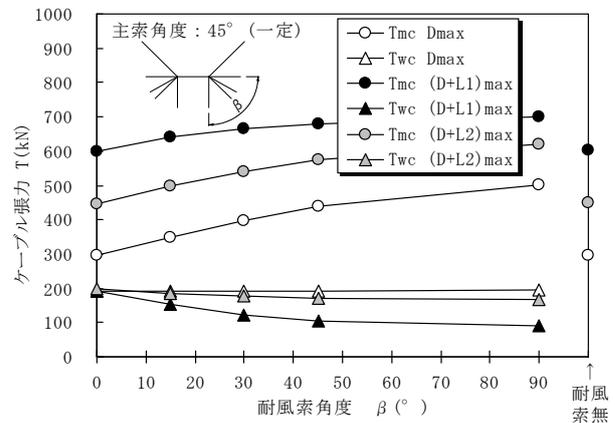
次に、図 2-11 a) の主索角度 $\alpha=90^\circ$ (一定) において、耐風索角度 β を 15° から 90° に変化させた場合、主索の張力は増加するのに対して、耐風索の張力は低下することがわかる。この傾向は、主索角度 α が小さいほど顕著である。

また、全ての主索角度において、耐風索角度 $\beta=0^\circ$ の時、荷重条件によらず、耐風索の張力は変化しないこともわかる。これは、耐風索角度 $\beta=0^\circ$ では、鉛直荷重の作用下では、張力の水平成分には影響しないためである。

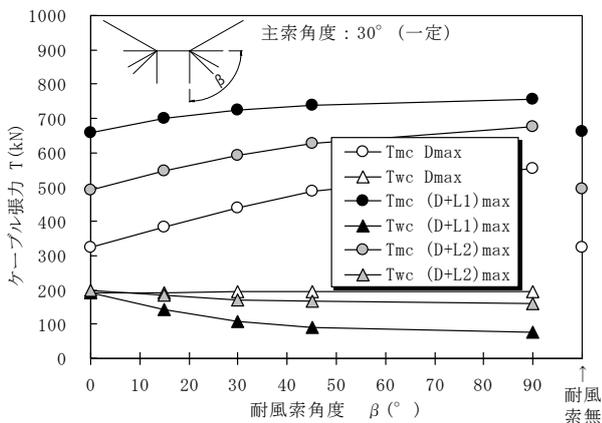
一方、図 2-11 d) において、主索角度 $\alpha=15^\circ$ (一定) で、耐風索角度 β が 30° 以上になると、耐風索の張力がかなり低下することから、耐風索の初期張力の設定には、十分留意する必要があるといえた。



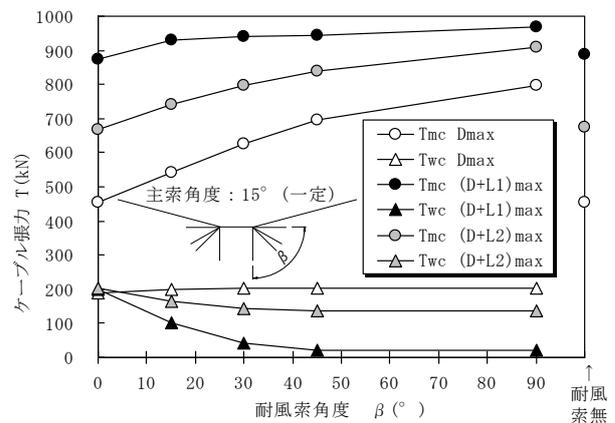
a) 主索角度 $\alpha=90^\circ$ (一定)



b) 主索角度 $\alpha=45^\circ$ (一定)



c) 主索角度 $\alpha=30^\circ$ (一定)



d) 主索角度 $\alpha=15^\circ$ (一定)

図 2-11 主索角度を変化させた時のケーブル張力 (耐風索ありモデル)

2-5. 固有振動解析による振動特性の検討

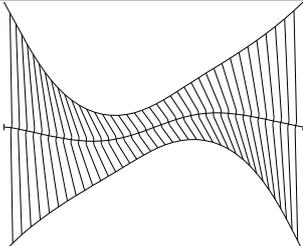
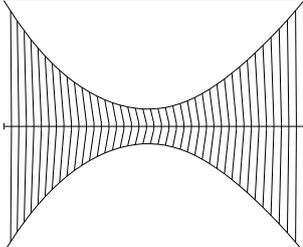
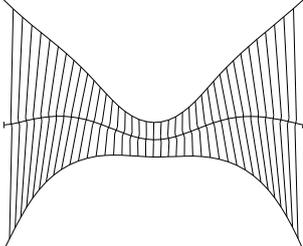
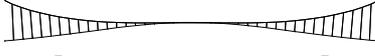
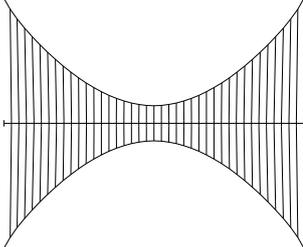
(1) 耐風索なしモデルの固有振動解析結果

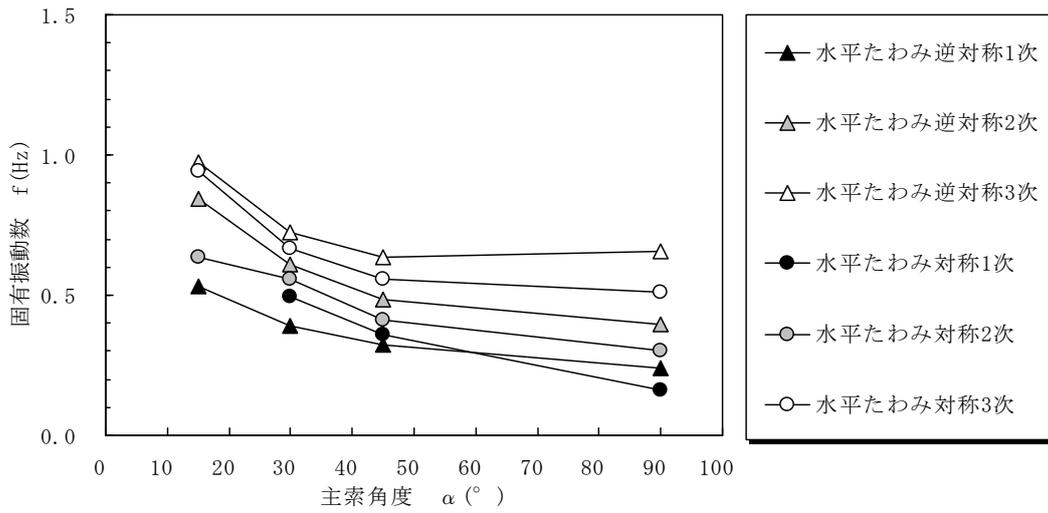
耐風索なしモデルにおける固有振動解析結果の一部として、表 2-7 に、case-15-n の 1~4 次までの固有振動数、固有周期、固有振動モード図を示す。表より、水平たわみ逆対称 1 次モードが最低次で現れたが、4 次までの範囲においても種々の固有振動モードが近接して現れることがわかる。したがって、1.5Hz 付近までの固有振動モードを水平たわみ振動モード、鉛直たわみ振動モード、ねじり振動モードに分類して、固有振動特性を検討することとした。

図 2-12 に、主索角度に対する固有振動数を、a) 水平たわみ振動モード、b) ねじり振動モードおよび c) 鉛直たわみ振動モードにまとめて比較したものを示す。

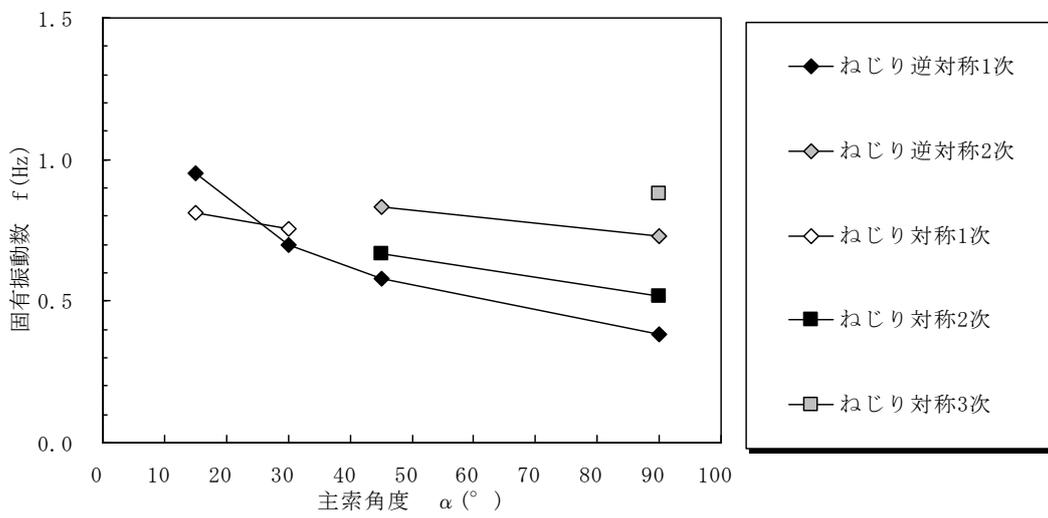
これらの図より、水平たわみ振動モードとねじり振動モードについては、主索角度 α が小さく、水平になるにつれて、固有振動数が高くなることがわかる。これに対して、鉛直たわみ振動モードは、低くなる傾向がみられる。この傾向は、鉛直たわみ対称 1 次モードの固有振動数で顕著であった。

表 2-7 耐風索なしモデル (case-15-n) における固有振動数、固有周期、固有振動モード図

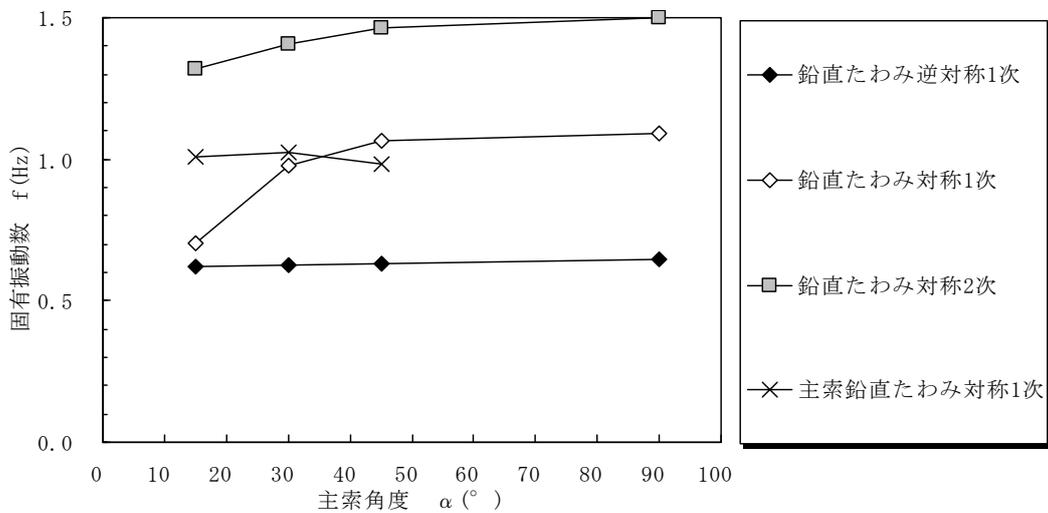
次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	固有振動モード図	
			側面	平面
1 次	0.530	1.89	 【水平たわみ逆対称 1 次】	
2 次	0.622	1.61	 【鉛直たわみ逆対称 1 次】	
3 次	0.635	1.58	 【水平たわみ対称 2 次】	
4 次	0.704	1.42	 【鉛直たわみ対称 1 次】	



a) 水平たわみ振動モード



b) ねじり振動モード



c) 鉛直振動モード

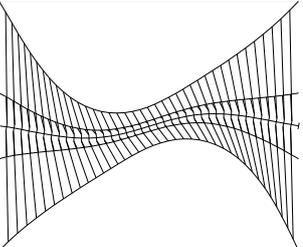
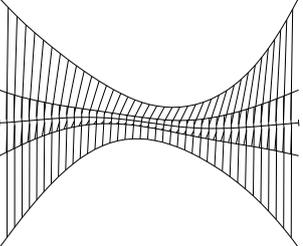
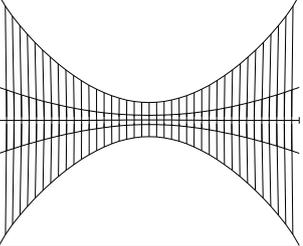
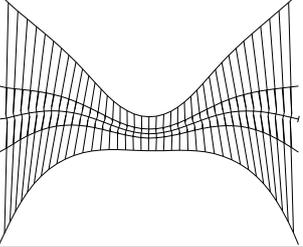
図 2-12 耐風索なしモデルにおける主索角度と固有振動数の関係

(2) 耐風索ありモデルの固有振動解析結果

耐風索ありモデルにおける固有振動解析結果の一部として、表 2-8 に、case-15-15 の 1~4 次までの固有振動数、固有周期、固有振動モード図を示す。表より、耐風索なしモデルと同様に、水平たわみ逆対称 1 次モードが最低次で現れたが、4 次までの範囲においても種々の固有振動モードが近接して現れることがわかる。また、表に示した固有振動モード図からわかるように、全ての固有振動モードで、完全な面内、面外モードは現れず、面内あるいは面外のモード成分が支配的であっても、連成していることがわかる。これは、主索と耐風索が立体的に設置されていることに起因するものであり、高次モードになるほど、その連成が顕著となり、固有振動モードによる分類が困難になる場合があった。

耐風索なしモデルと同様に、1.5Hz 付近までの固有振動モードの分類を試みた。モード成分が支配的な、水平たわみ振動モード、鉛直たわみ振動モードおよびねじり振動モードに分類し、主索角度 α ごとに、耐風索角度 β をパラメータとして、固有振動特性を検討することとした。

表 2-8 耐風索ありモデル (case-15-15) における固有振動数、固有周期、固有振動モード図

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	固有振動モード図	
			側面	側面
1 次	0.653	1.53	 【水平たわみ逆対称 1 次】	
2 次	0.673	1.49	 【鉛直たわみ逆対称 1 次】	
3 次	0.736	1.36	 【鉛直たわみ対称 1 次】	
4 次	0.800	1.25	 【水平たわみ対称 2 次】	

a) 主索角度 α が 90° (一定) で、耐風索角度 β ($0\sim 90^\circ$) を変化させた場合

図 2-13 に、主索角度 $\alpha=90^\circ$ (一定) で、耐風索角度 β を変化させた時の固有振動数を、a) 水平たわみ振動モード、b) ねじり振動モードおよび c) 鉛直たわみ振動モードに分類し、比較したものを示す。

この検討ケースは、主索角度 $\alpha=90^\circ$ であることから、通常の歩道吊橋において、耐風索角度が変化した場合に相当するものである。

まず、耐風索なしモデルと比較して、耐風索を設置すれば耐風索角度 β に関わらず、全ての固有振動モードで固有振動数が上昇することがわかる。

図 2-13 a)の水平たわみ振動モードでは、耐風索角度 β が小さく、水平になるにしたがって、水平たわみ振動モードの固有振動数は高くなる傾向にあり、高次モードになるほどその傾向は顕著である。耐風索角度 β が 45° 以下では、水平たわみ対称 3 次モードが現れることもわかった。

一方、図 2-13 a)、b)のねじり振動モード、鉛直たわみ振動モードでは、耐風索角度 β が小さくなるほど、両振動モードの固有振動数は小さくなるが、低下の度合いは小さいことがわかる。

b) 主索角度 α が 45° (一定) で、耐風索角度 β ($0\sim 90^\circ$) を変化させた場合

図 2-14 に、主索角度 $\alpha=45^\circ$ (一定) で、耐風索角度 β を変化させた時の固有振動数を、a) 水平たわみ振動モード、b) ねじり振動モードおよび c) 鉛直たわみ振動モードに分類し、比較したものを示す。

まず、主索角度 α が 45° (一定) においても、耐風索なしモデルと比較して、耐風索を設置すれば耐風索角度 β に関わらず、全ての固有振動モードで固有振動数が上昇することがわかる。

図 2-14 a)の水平たわみ振動モードでは、固有振動数は、耐風索角度 β が 45° で最大となり、 0° と 90° では同程度になることがわかる。この傾向は、主索角度 α が 90° ではみられなかったことから、主索と耐風索の傾斜の相互作用によって、このような特性になったものと考えられた。また、水平たわみ対称 3 次モードは鉛直成分が連成した固有振動モードであった。

一方、図 2-14 a)、b)のねじり振動モード、鉛直たわみ振動モードでは、主索角度 α が 45° においても、耐風索角度 β が小さくなるほど、両振動モードの固有振動数は小さくなること、また、その低下の度合いは小さいこともわかる。

c) 主索角度 α が 30° (一定) で、耐風索角度 β ($0\sim 90^\circ$) を変化させた場合

図 2-15 に、主索角度 $\alpha=45^\circ$ (一定) で、耐風索角度 β を変化させた時の固有振動数を、a) 水平たわみ振動モード、b) ねじり振動モードおよび c) 鉛直たわみ振動モードに分類し、比較したものを示す。

まず、主索角度 α が 30° (一定) においても、耐風索なしモデルと比較して、耐風索を設置すれば耐風索角度 β に関わらず、全ての固有振動モードで固有振動数が上昇することがわかる。

図 2-15 a)の水平たわみ振動モードでは、固有振動数は、耐風索角度 β が 45° で最大となり、 0° と 90° では同程度になることがわかる。この傾向は、主索角度 α が 45° の場合と同じであるが、耐風索角度 β が小さくなると、高次モードでは、固有振動モードの分類が困難であった。これは、面内と面外の振動モード成分の連成することによるものである。

一方、図 2-15 b)、c)のねじり振動モード、鉛直たわみ振動モードでは、主索角度 α が 30° においても、耐風索角度 β が小さくなるほど、両振動モードの固有振動数は小さくなること、また、その低下の度合いは小さいこともわかる。特に、ねじり振動モードでは、耐風索角度 β が小さくなるほど、振動数が近接し、水平成分と連成するようになることがわかる。

d) 主索角度 α が 15° (一定) で、耐風索角度 β ($0\sim 90^\circ$) を変化させた場合

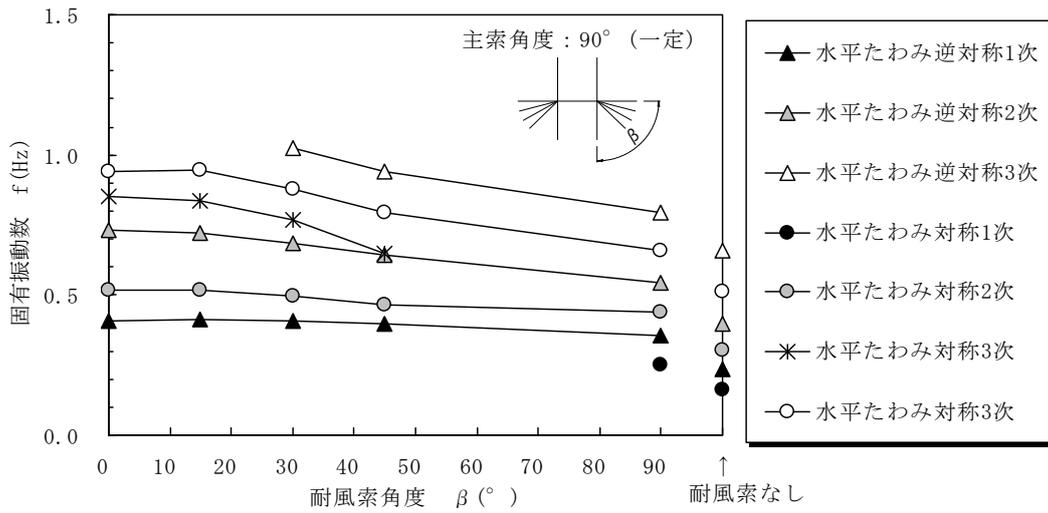
図 2-16 に、主索角度 $\alpha=15^\circ$ (一定) で、耐風索角度 β を変化させた時の固有振動数を、a) 水平たわみ振動モード、b) ねじり振動モードおよび c) 鉛直たわみ振動モードに分類し、比較したものを示す。

まず、主索角度 α が 15° (一定) においても、耐風索なしモデルと比較して、耐風索を設置すれば耐風索角度 β に関わらず、全ての固有振動モードで固有振動数が上昇することがわかる。

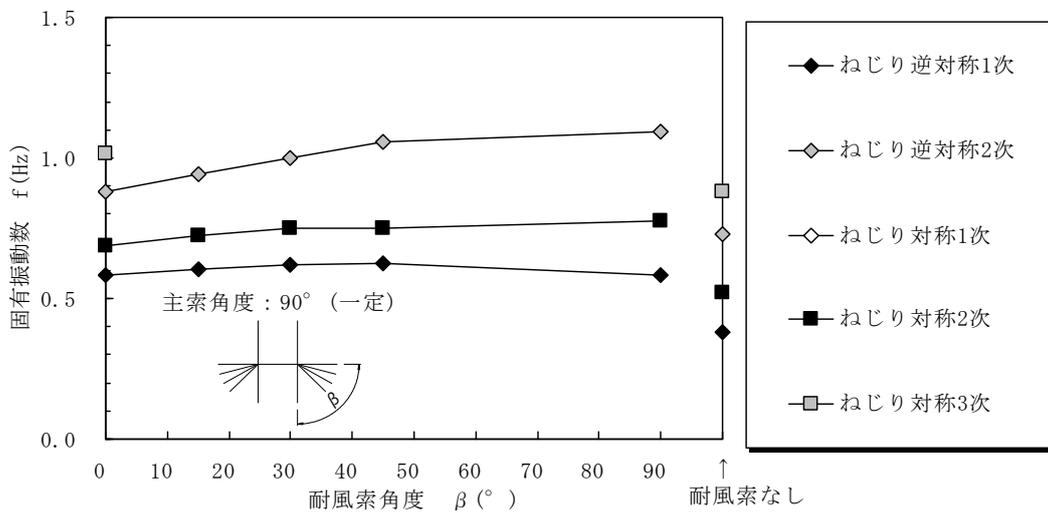
図 2-16 a)~c) に分類された、全ての固有振動モードにおいて、耐風索角度 β が小さくなるほど、固有振動数も小さくなること、また、その低下の度合いは、水平たわみ振動モードで小さく、ねじり振動モードで大きいこともわかる。なお、鉛直たわみ振動モードでは、耐風索角度 β が小さくなるにしたがって、鉛直たわみ逆対称モードの振動数は僅かに低下する程度であり、鉛直たわみ対称 1 次モードでは大きく低下し、高次モードほど低下の度合いは大きいこともわかる。

図 2-16 c) のねじり振動モードからは、分類された各固有振動モードが近接することがわかる。

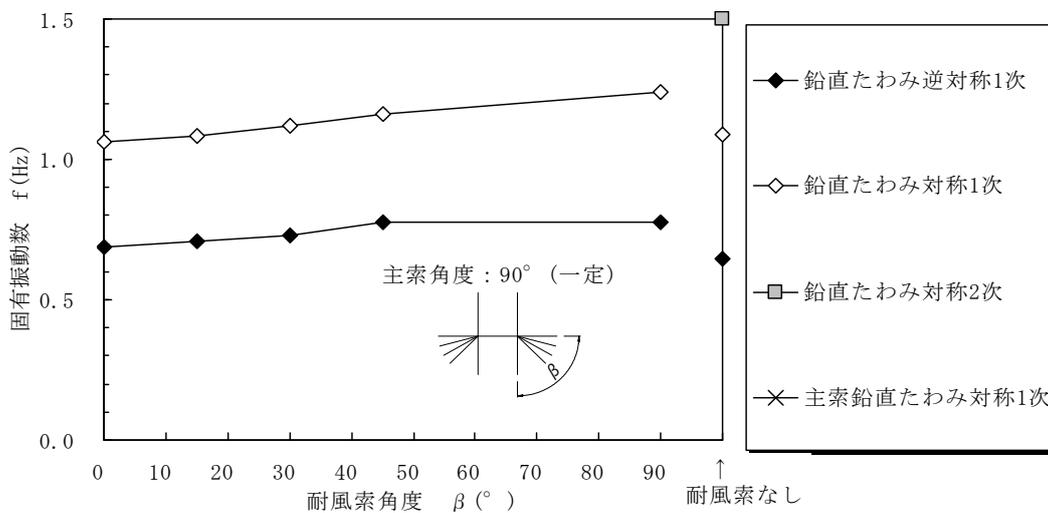
以上のことから、主索角度 α が 15° (一定) の場合、耐風索との相互作用もあるものの、水平たわみ振動モードでは、主索の傾斜角が小さいことから、主索角度 α が 45° 、 30° とは固有振動特性が異なる傾向を示したものと考えられた。



a) 水平たわみ振動モード

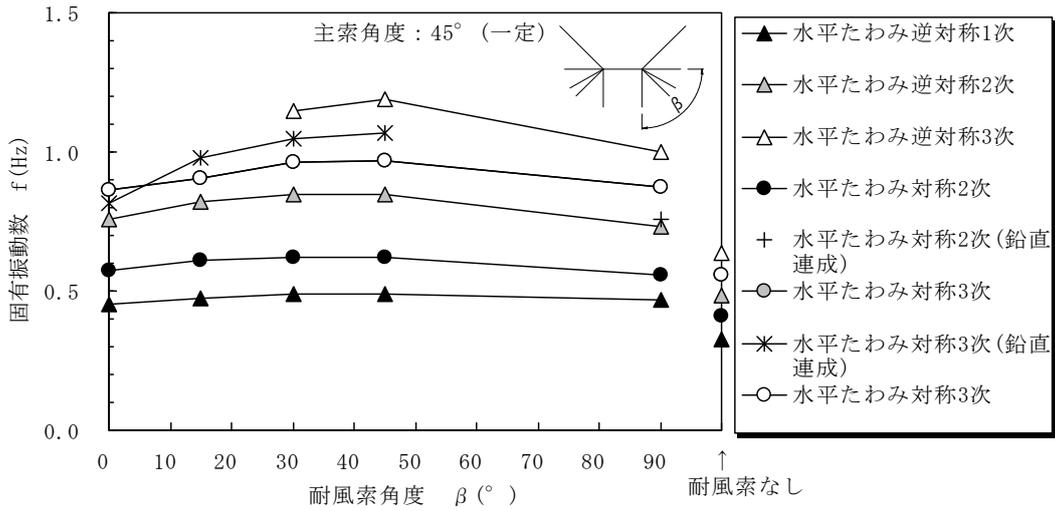


b) ねじり振動モード

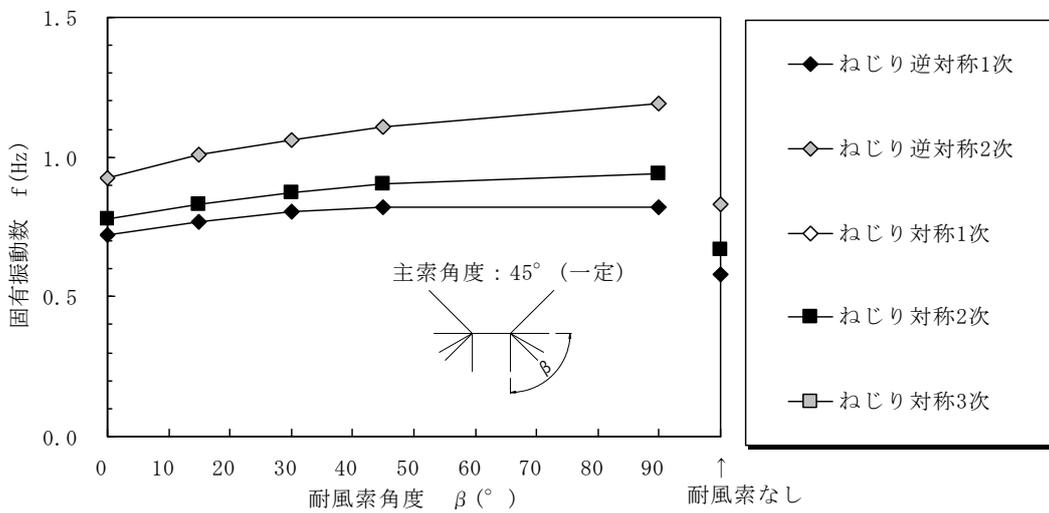


c) 鉛直振動モード

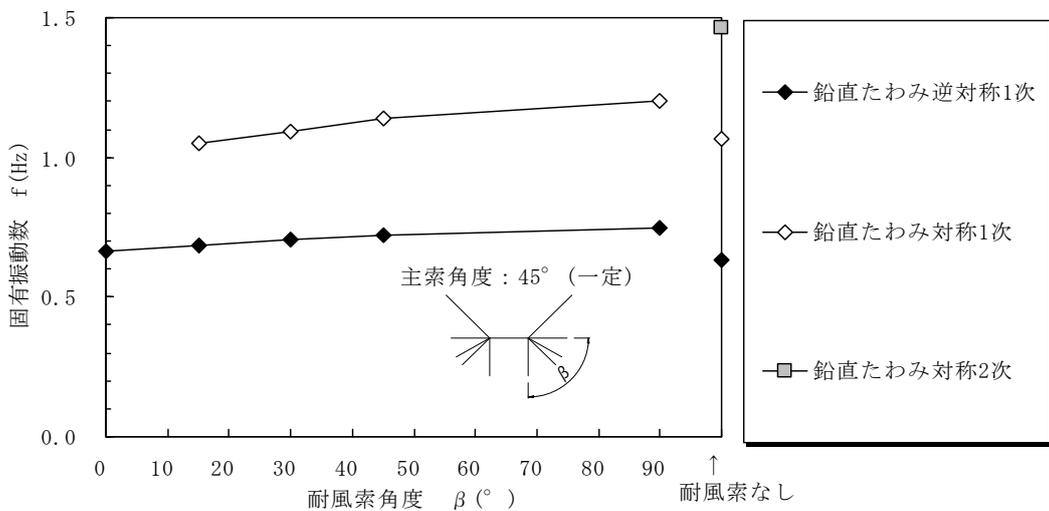
図 2-13 耐風索ありモデル ($\alpha=90^\circ$) の固有値解析結果



a) 水平たわみ振動モード

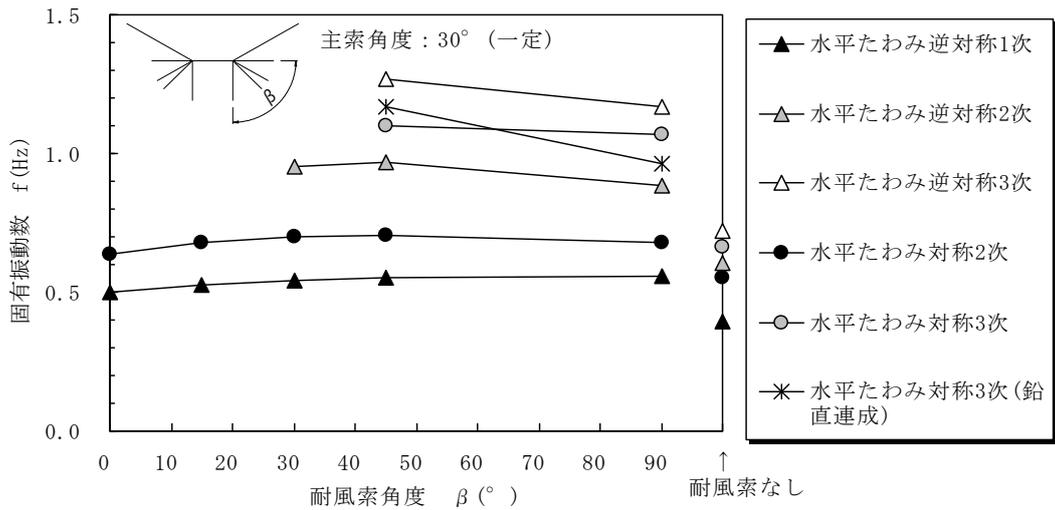


b) ねじり振動モード

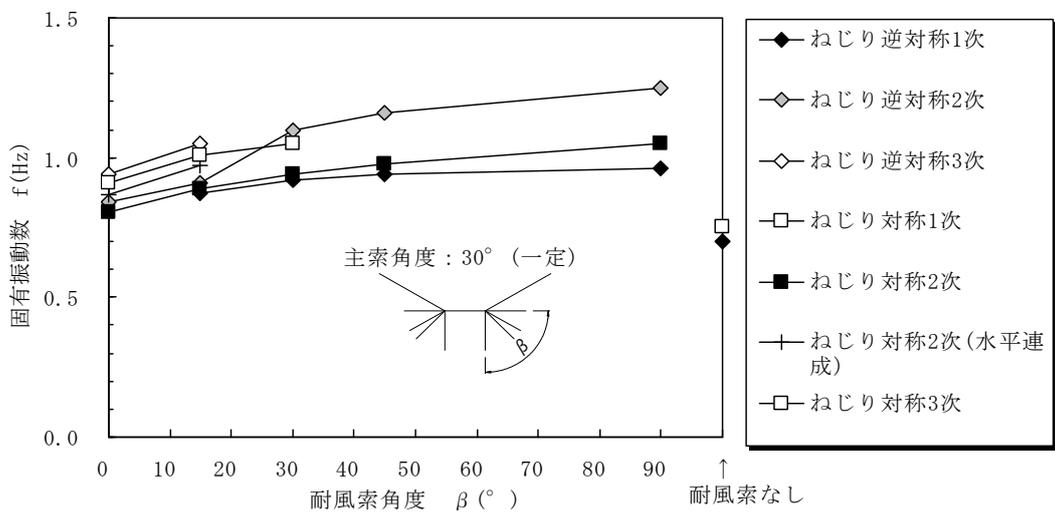


c) 鉛直振動モード

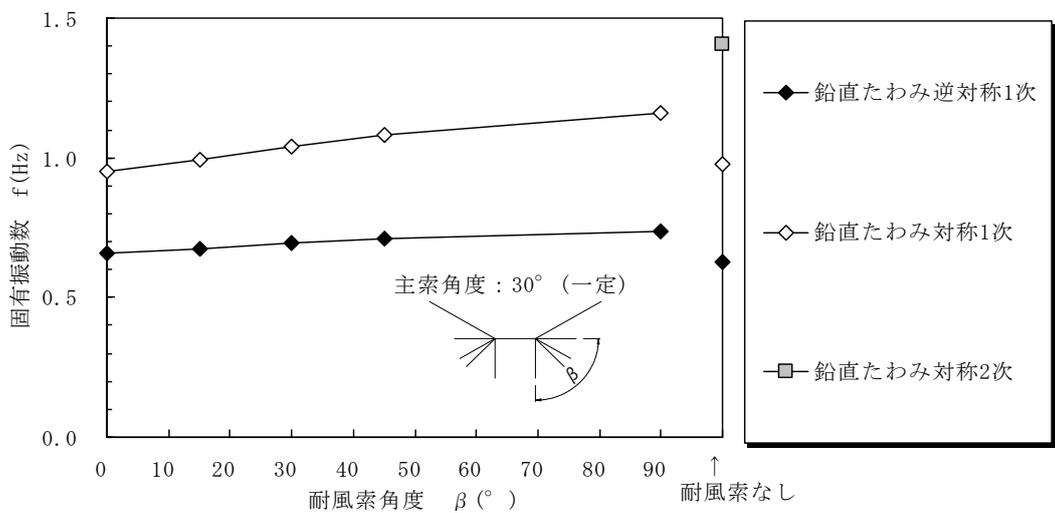
図 2-14 耐風索ありモデル ($\alpha=45^\circ$) の固有値解析結果



a) 水平たわみ振動モード

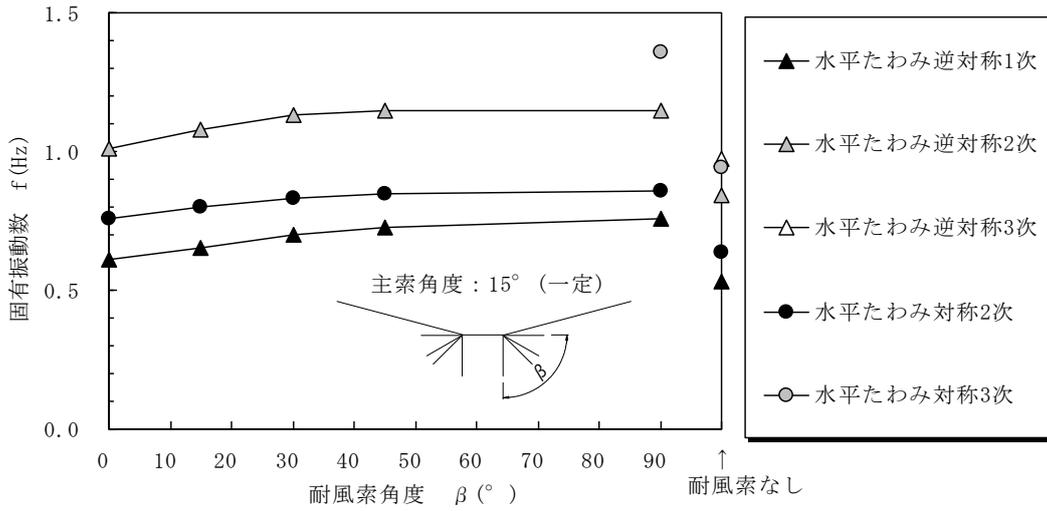


b) ねじり振動モード

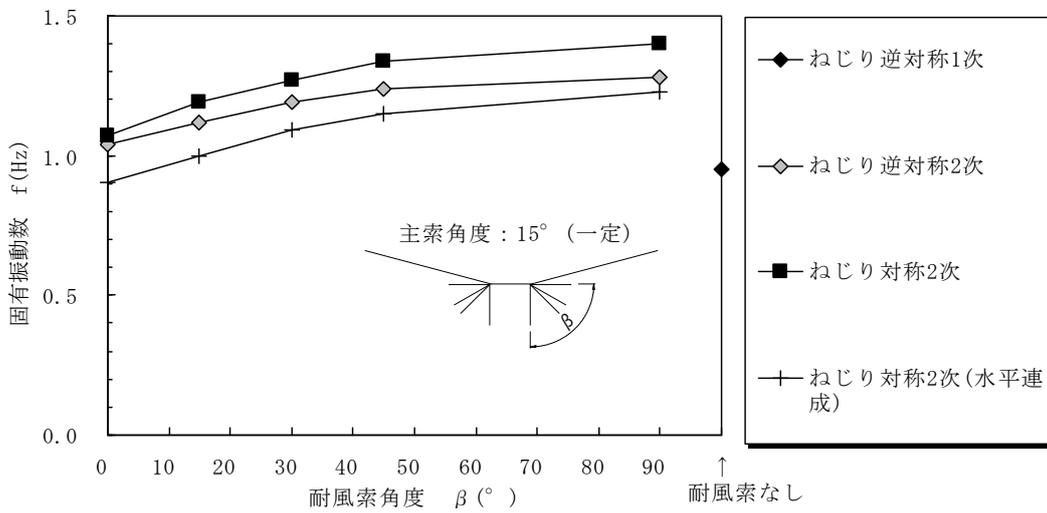


c) 鉛直振動モード

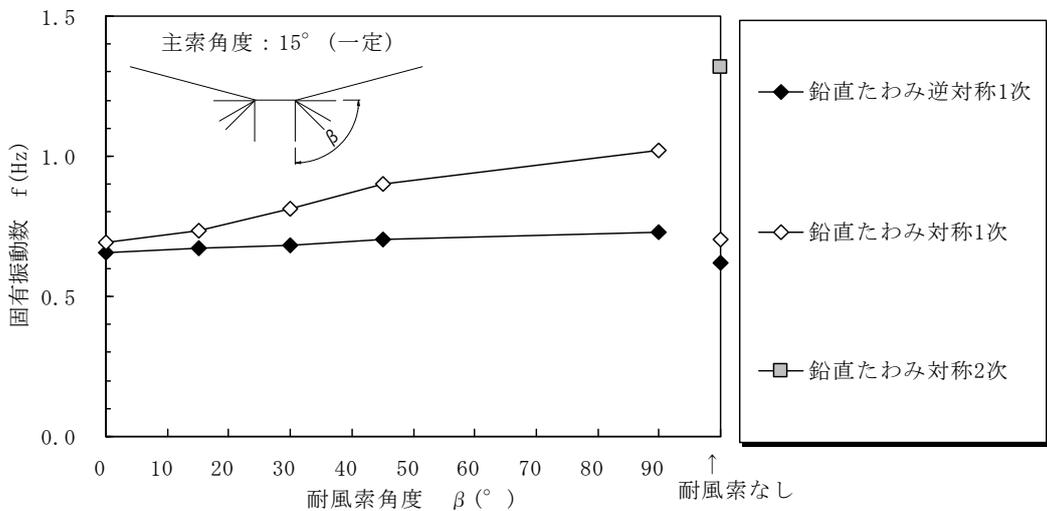
図 2-15 耐風索ありモデル ($\alpha=30^\circ$) の固有値解析結果



a) 水平たわみ振動モード



b) ねじり振動モード



c) 鉛直振動モード

図 2-16 耐風索ありモデル ($\alpha=15^{\circ}$) の固有値解析結果

2-6. まとめ

本研究では、支間長 100m の無補剛吊橋を対象に、鉛直面内に配置される主索を橋軸直角方向に傾斜させるとともに、耐風索の傾斜角度も変化させた、立体的なケーブルシステムについて、固定荷重解析、固有振動解析を行って、その静的、動的構造特性を検討した。それらの結果をまとめると、以下のようである。

(1) 固定荷重解析結果

固定荷重解析の荷重条件として、死荷重 (D) と活荷重 (L) を載荷させて検討を行った結果からは、次のことがいえた。

- 1) 桁の鉛直変位は、主索角度が支配的であり、主索角度が小さくなると急激に大きくなること、また、主索張力も大きくなることがわかった。これは、図 2-17 に構造特性の概念図を示すように、主索角度が小さい場合、吊索と主索の張力と長さが増加するため、鉛直荷重に対する見掛けの剛性が低下することに起因すると考えられた。
- 2) 耐風索の張力は、耐風索角度が大きくなるほど、低下する傾向を示すことから、初期張力の設定に留意する必要があるといえた。

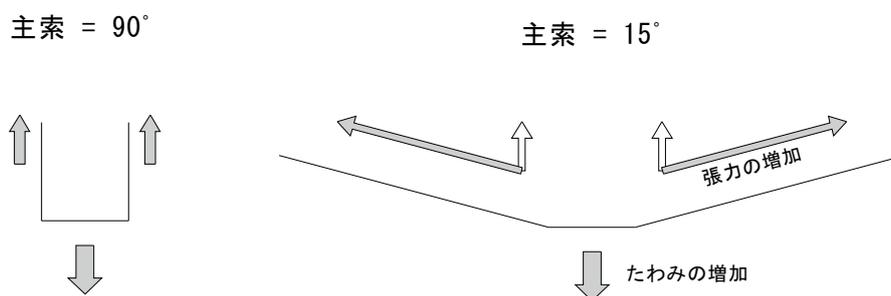


図 2-17 主索角度と構造特性の概念図

(2) 固有振動解析結果

固有振動解析を行った結果からは、次のことがいえた。

- 1) 耐風索がない場合、主索角度が小さくなるほど、水平たわみ振動モード、ねじり振動モードの振動数は増加すること、また、鉛直たわみ振動モードでは低下することがわかった。これは、鉛直たわみ振動モードについては、図 2-17 の概念図で示した理由によるものであり、それ以外については、傾斜した主索が水平、ねじりに対して抵抗するためである。
- 2) 耐風索の設置により、全てのケースにおいて固有振動数が上昇した。これは、耐風索の設置によって、主索張力の増加と立体的なケーブルの寄与によるものといえた。
- 3) 主索角度、耐風索角度の変化が固有振動特性に及ぼす影響については、表 2-9 に、各固有振動モードにおいて固有振動数の最大値を示したケース数の比較を示した通りであり、次のことがいえた。
 - ・ねじり振動モードの固有振動数は、耐風索角度が大きいほど、また、主索角度が小さいほど、大き

くなることがわかった。

- ・鉛直たわみ振動モードの固有振動数は、ねじり振動モードと同様に、耐風索角度が大きいほど、また、主索角度が小さいほど、大きくなるが、その変化の割合は小さい。
- ・水平たわみ振動モードは、主索角度、耐風索角度が、30～45°程度で最も固有振動数が高くなることが確かめられた。これは、主索と耐風索が立体的に配置されたことによる相乗効果であると考えられた。

表 2-9 各固有振動モードにおいて固有振動数の最大値を示したケース数の比較

a) 水平たわみ振動モード

		主索角度 α (°)			
		90	45	30	15
耐風索角度 β (°)	90	-	-	1	3
	45	-	4	5	-
	30	-	2	-	-
	15	1	-	-	-
	0	4	-	-	-

b) ねじり振動モード

		主索角度 α (°)			
		90	45	30	15
耐風索角度 β (°)	90	2	3	3	3
	45	1	-	-	-
	30	-	-	-	-
	15	-	-	-	-
	0	-	-	-	-

c) 鉛直たわみ振動モード

		主索角度 α (°)			
		90	45	30	15
耐風索角度 β (°)	90	2	2	2	2
	45	-	-	-	-
	30	-	-	-	-
	15	-	-	-	-
	0	-	-	-	-

(3) 実橋への応用と今後の課題

本研究の結果により、主索と耐風索の角度が歩道吊橋の固有振動特性に及ぼす影響が明らかとなった。例えば、主索と耐風索を 30～45° の範囲で傾斜させることで、歩道吊橋の振動使用性で問題となる水平たわみ振動モードの固有振動数を増加させることができる。したがって、従来の歩道吊橋の形状にとらわれることなく、立体的なケーブルシステムを採用することによって、自由度の高い橋梁計画が可能になると考えられる。

本研究では、主に、固有振動特性に着目したが、現実にはケーブル張力が変動することによって、工事費の増加が懸念される。また、歩道吊橋では、水平たわみ振動モードの固有振動数は、1.0Hz 付近で歩行者との共振が問題になるため、必ずしも固有振動数を増加させることがよいわけではない。実橋への適用にあたっては、それらの点を含めて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 前田研一、森園康之、岩本政巳、長井正嗣、藤野陽三：補助ハンガーシステムを併用した MONO-DUO 形式超長大吊橋の構造特性、構造工学論文集、Vol.42A、pp.1049-1060、1996.3
- 2) 日本道路協会編：小規模吊橋指針・同解説、1984.4