

曲線斜張橋の耐風性について

Study on Wind-resistant Characteristics of Cable-stayed Curved Bridge

日暮 宏* 山崎 章** 岡内 功***

Hiroshi Higurashi, Akira Yamazaki, Isao Okauchi

近年、曲線状に設けられる道路に対応し、それに接続する橋自体にも曲率を設け、交通流の円滑化を図った曲線橋が、高速道路や山間部などで多く架設されている。この曲線橋の長大化・軽量化を図るには、吊形式の曲線橋、つまり、曲線斜張橋や曲線吊橋によることが有利であると考えられる。しかし、この種の形式の橋梁の実例はまだ極めて少なく、その実例においても中心角や曲率が小さく、曲線橋としての特徴が顕著に現れていない場合が多い。また、一般に吊形式の橋梁には、風や地震に対する動的応答の問題が存在する。このようなことから、本研究は、大きな中心角と曲率を持った曲線斜張橋を対象として、風洞実験を行い、耐風性に関して検討したものである。

In recent years, many curved bridges have been and getting constructed for the purpose of alleviating the traffic congestion on the superhighway and at mountainous locations. It is considered that suspended type curved bridge, i.e. cable-stayed curved bridge and suspension curved bridge, takes advantage of the elongation of the span and the reduction of weight of bridges. However there are few experiences of the said style bridges. Moreover in the few cases of suspended carved bridges built, they have small curvature and center angle which do not show the characteristics of the curved bridges. Generally there are some problems for the dynamic response against the wind and the earthquakes. Therefore, this paper deals with the wind tunnel test and wind-resistant characteristics for the cable-stayed curved bridge having large center angle and curvature.

1. はじめに

曲線斜張橋の力学的特性に関する既往の研究成果から、曲線斜張橋は曲げとねじれが連成する上、直線斜張橋に比べ静的変形は大きくなり、固有振動数が低下することが知られ、特に、曲線斜張橋の中心角が90度以上になると固有振動数の低下が著しくなり、実用性が大きく損なわれることが見いだされている。このため、曲線斜張橋には耐風性や耐震性に問題を生じる恐れがあると考えられることから、風洞実験を行い、このような特性を持つ曲線斜張橋の耐風性の特徴を検討したものである。

2. 研究方法および対象

90度の中心角を持つ曲線斜張橋を対象として研究を進め、その結果を直線斜張橋の結果と比較することにより、曲線斜張橋の場合の耐風性を明らかにすることとした。実験ではスパン150mの実際の橋を想定し、この橋を50分の1の縮尺でほぼ相似する曲線斜張橋と直線斜張橋の全体模型（スパン3m）を製作した。研究対象は、図1に示すような、曲線斜張橋（ケーブルの取り付け位置が円弧外側の場合と断面中心の場合の2ケース）と、直線斜張橋（おもりなしの場合と断面の外側におもりを取り付けた場合の2ケース）の計4ケースとし、それぞれのケースについて、静力学的特性、固有振動特性を検討する解析と実験を行った上で、風洞実験を行った。さらに、風洞実験結果を理論的に検討するために、簡単な空気力モデルを想定し、その入力に対する動的応答解析を行った。

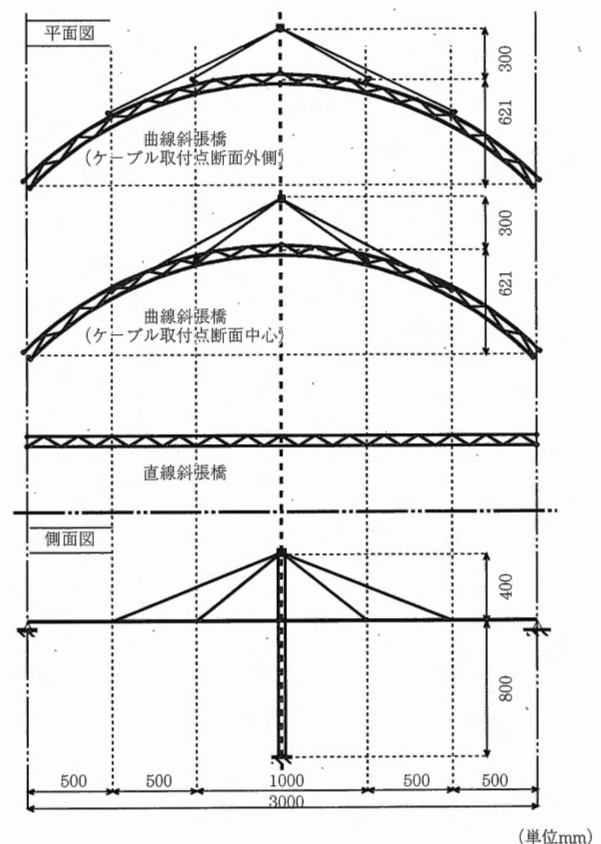


図1 全体模型の骨組みモデル

Fig.1 Skeleton of model

* 鉄構事業部 設計第1部 システム課
 ** 鉄構事業部 設計第1部 設計2課
 *** 中央大学 理工学部土木工学科教授 工学博士

3. 実験方法

実験に当たっては、図1に示す骨組みモデルに、外装（木材）を取り付けた模型を用いて静力学的特性、固有振動特性を検討する実験および風洞実験を行った。なお、模型の詳細図を図2に示す。

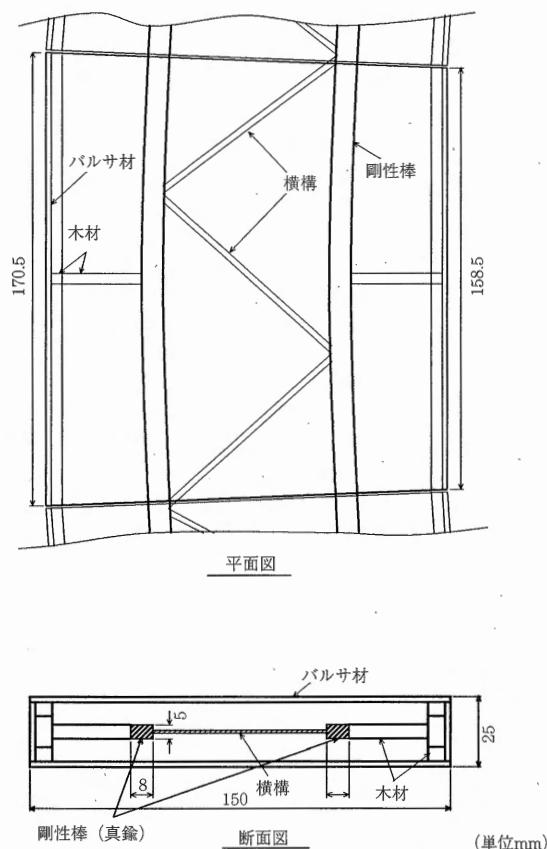


図2 模型の平面図および断面図
Fig.2 Plane and cross section of model

1) 静的実験

静的実験では、スパン1/2点および1/4点における、曲げおよびねじり変形に関する影響線を測定し、この結果より、外装が剛性に及ぼす付加的効果を検討した。

2) 振動実験

振動実験では、耐風性に固有振動特性が大きく影響すると考えられることから、卓越振動モード、固有振動数および減衰定数を求めた。そのため、スパン1/2点および1/4点に適当な初期変位を与えたときに生ずる自由振動の測定、ならびに、電磁式加振器により加振したときの強制振動の測定を行い、その際に得られた時刻歴応答のデータから、FFT法を用いて卓越振動モードおよび固有振動数を求めた。

3) 風洞実験

風による振動特性は断面形状によって大きく変化すると考えられるので、主桁の断面形状として、図3に示すような流線型断面(A型)および辺長比が1:6(B型)、

1:4(C型)、1:2(D型)の4種類の断面で風洞実験を行った。また、気流は図4に示すように曲線斜張橋では円弧外側に作用させ、直線斜張橋では橋軸直角方向に作用させた。応答の測定方法としては、スパン1/2点ではレーザ変位測定器を用いて変位を測定し、スパン1/4点では小型加速度計を用いて加速度を測定した。なお、それぞれの測定点で断面の両側に測定器を設置して、曲げ応答とねじれ応答を同時に測定できるようにし、また、各応答はRMS値を用いて評価している。曲線斜張橋の風洞実験模型写真を図5に示す。

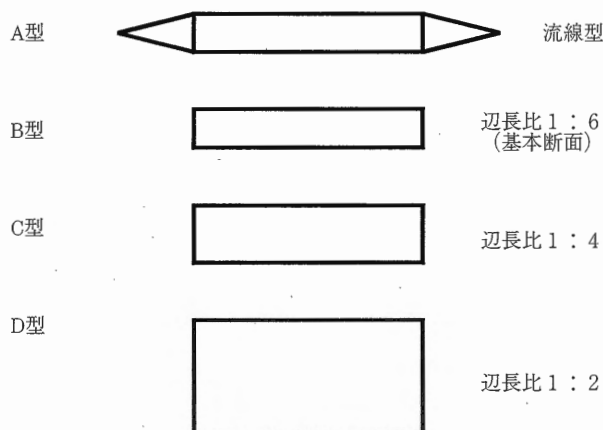


図3 主桁の断面形状
Fig.3 Section of main girder

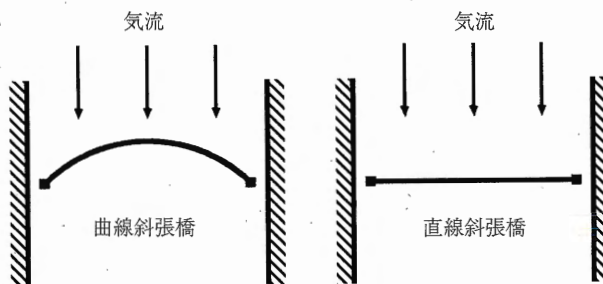


図4 気流の方向
Fig.4 Direction of wind flow

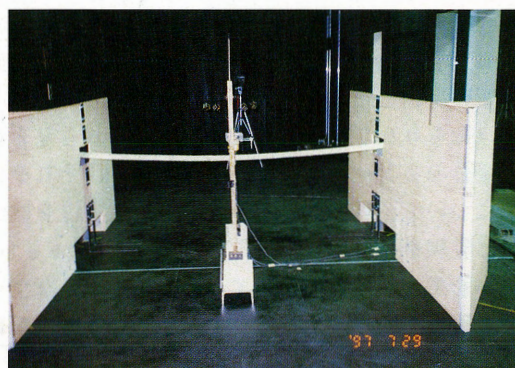


図5 風洞実験模型 (曲線斜張橋)
Fig.5 Model of wind tunnel test
(Cable-stayed curved bridge)

4. 風洞実験結果

一般に、風により構造物に生ずる動的現象として、①渦励振（物体からの渦生成に伴う非定常空気力の作用による振動）②バフエッティング（接近流の乱れに伴う変動空気力による振動）③フラッタ（物体の振動に伴って生ずる非定常空気力の作用による自己励起型の振動）が挙げられる。そして、このような動的現象は、構造物の特性に応じて生ずるが、今回の風洞実験では、曲線橋と直線橋の違いの他、断面形、固有振動特性が発生現象の

特徴に主として影響している。そこで、横軸に無次元風速 $V/(N \cdot B)$ （ V ：風速、 N ：固有振動数、 B ：断面の幅）をとり、振動数の違いの影響を少なくした上で、各断面における曲線斜張橋と直線斜張橋の応答値を比較することによって、耐風性能を検討した。

これらの風洞実験結果の代表的なものを、図6から図13に示す。これらの図は、横軸に無次元風速を、縦軸に振幅のRMS値をとったものである。

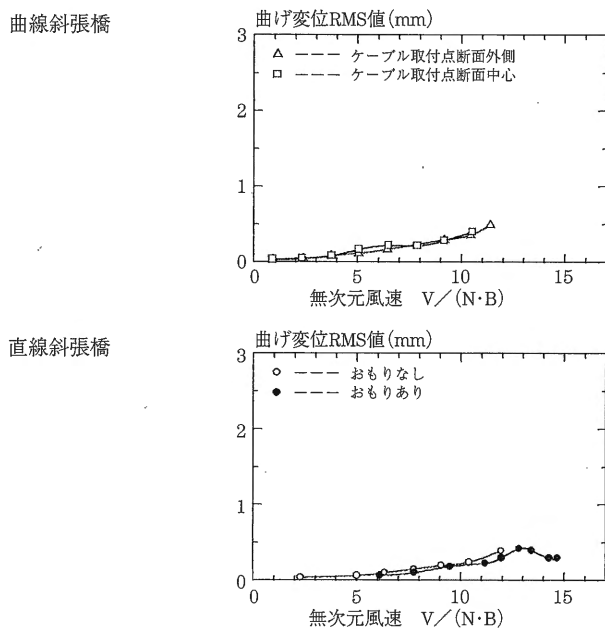


図6 流線形断面（A型）の風速と曲げ変位の関係
（スパン1／2点）

Fig.6 Bending displacement at center of span (Type A)

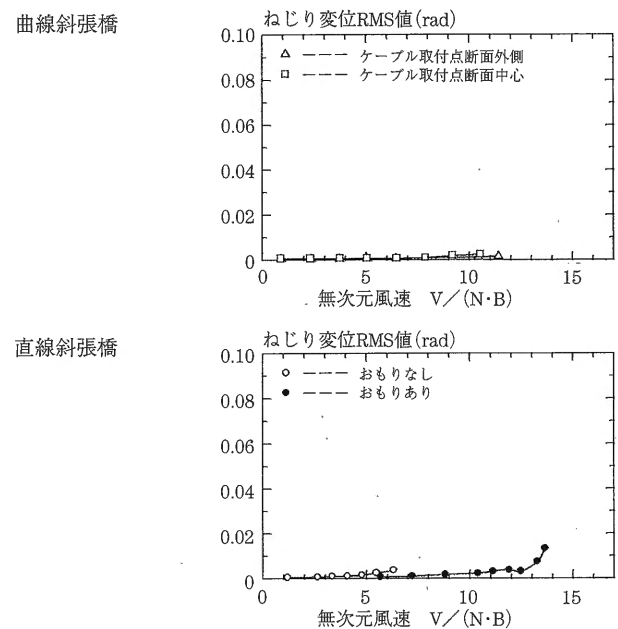


図7 流線形断面（A型）の風速とねじり変位の関係
（スパン1／2点）

Fig.7 Torsional displacement at center of span (Type A)

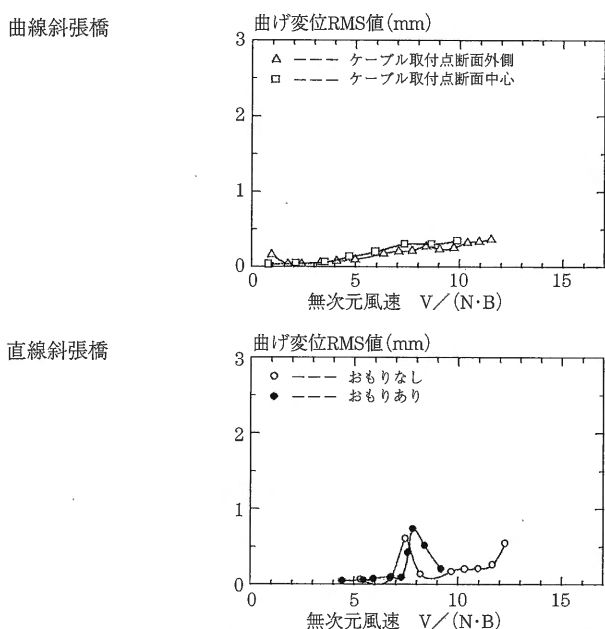


図8 辺長比1：6断面（B型）の風速と曲げ変位の関係
（スパン1／2点）

Fig.8 Bending displacement at center of span (Type B)

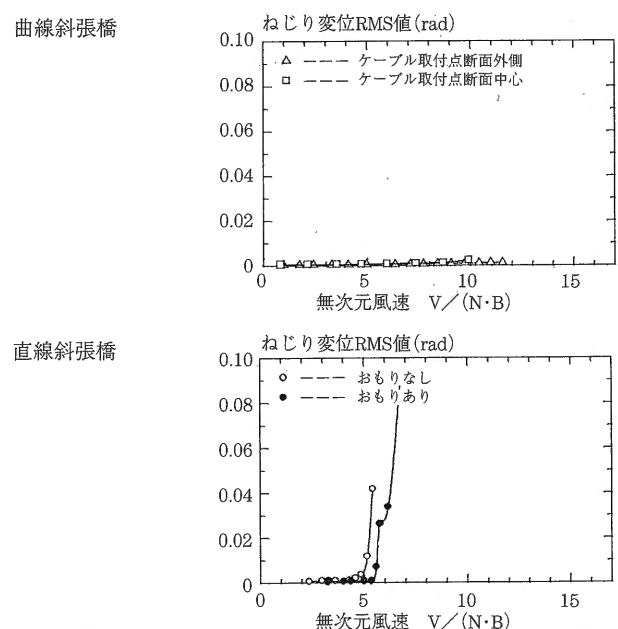
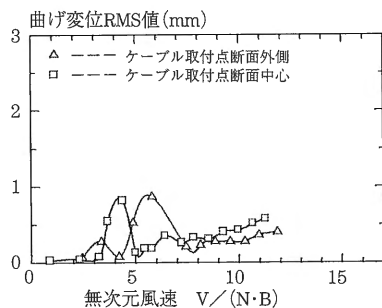


図9 辺長比1：6断面（B型）の風速とねじり変位の関係
（スパン1／2点）

Fig.9 Torsional displacement at center of span (Type B)

曲線斜張橋



直線斜張橋

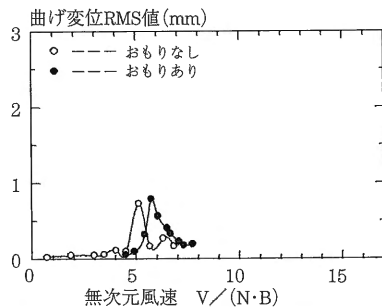
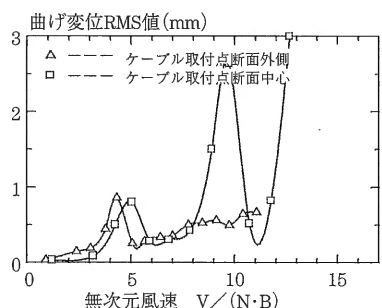


図10 辺長比1：4断面（C型）の風速と曲げ変位の関係（スパン1／2点）

Fig.10 Bending displacement at center of span (Type C)

曲線斜張橋



直線斜張橋

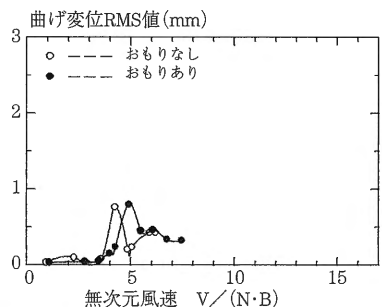


図12 辺長比1：2断面（D型）の風速と曲げ変位の関係（スパン1／2点）

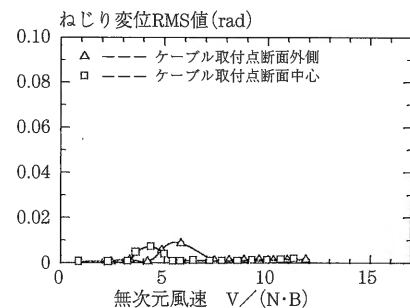
Fig.12 Bending displacement at center of span (Type D)

以上の図よりわかるように、今回の風洞実験では、前述の①渦励振と③フラッタ現象が主桁の断面形状に対応して観測されたが、各断面の風洞実験において現れた現象の特徴を示せば、次のとおりである。

1) 流線型断面（A型）

図6、図7は流線型断面（A型）のスパン1／2点における風速と曲げ変位およびねじり変位の関係を示したものである。この図から、曲線斜張橋、直線斜張橋ともに、渦励振やフラッタと見られる現象は認められなかつ

曲線斜張橋



直線斜張橋

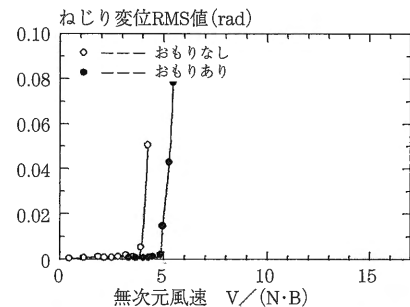
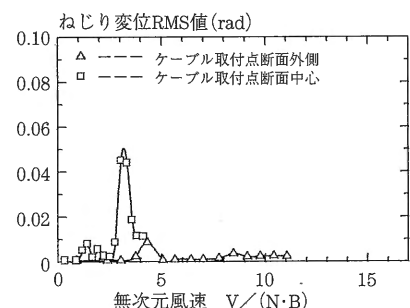


図11 辺長比1：4断面（C型）の風速とねじり変位の関係（スパン1／2点）

Fig.11 Torsional displacement at center of span (Type C)

曲線斜張橋



直線斜張橋

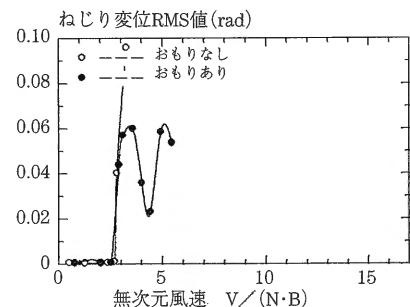


図13 辺長比1：2断面（D型）の風速とねじり変位の関係（スパン1／2点）

Fig.13 Torsional displacement at center of span (Type D)

た。したがって、曲線橋と直線橋の両方において、この断面形は風に対して安定していると考えられる。

2) 辺長比1：6断面（B型）

図8、図9は辺長比が1：6の断面（B型）のスパン1／2点における風速と曲げ変位およびねじり変位の関係を示したものである。この図から、曲線斜張橋では渦励振およびねじれフラッタと見られる現象が認められなかったのに対して、直線斜張橋ではねじり振幅が卓越したねじれフラッタと見られる現象の発生が認められた。

3) 辺長比 1 : 4 断面 (C型)

図10、図11は辺長比が 1 : 4 の断面 (C型) のスパン 1 / 2 点における風速と曲げ変位およびねじり変位の関係を示したものである。この図から、曲線斜張橋、直線斜張橋ともに渦励振と見られる現象が認められた。さらに、直線斜張橋では、渦励振がおさまった後に、ねじれフラッタと見られる現象が認められたのに対し、曲線斜張橋では認められなかった。

4) 辺長比 1 : 2 断面 (D型)

図12、図13は辺長比が 1 : 2 の断面 (D型) のスパン 1 / 2 点における風速と曲げ変位およびねじり変位の関係を示したものである。この図から、曲線斜張橋、直線斜張橋ともに渦励振およびねじれフラッタと見られる現象が認められたが、曲線斜張橋の場合、ケーブルを円弧外側に取り付けたケースでは、ねじれフラッタと見られる現象は認められなかった。

5. 解析的考察

風洞実験結果については実験的だけではなく、解析的にも検討した。一般的に風を受ける構造物の運動方程式は、

$$[M][\Phi]q'' + [C][\Phi]q' + [K][\Phi]q = F(t) \quad (1)$$

ここで、

[M] : 質量マトリックス

[Φ] : モードマトリックス

[C] : 減衰マトリックス

[K] : 剛性マトリックス

F(t) : 空気力ベクトル

q : 一般座標

のように書けるので、F(t)を適当にモデル化することにより、応答値を求めたのである。しかし、フラッタ現象における空気力は複雑でモデル化が困難であったため、今回は、渦励振の場合の解析のみを試みた。すなわち、直線の場合の風洞実験結果から各断面の渦励振時に働く空気力値を求め、その値を以下に示すような考えの下に修正して、曲線斜張橋の応答を計算し、その結果を実験値と比較したのである。この修正は、曲線橋の場合図14および図15に示すように、気流方向に見た場合、各点で断面の辺長比が異なること、ならびに、作用する空気力に位相差があることを考慮したものであるが、具体的には次のように考えている。まず、外力ベクトルとしては、

$$F(t) = L \sin \{2\pi f_c t - \phi\} \quad (2)$$

ここで、

t : 時間

φ : 位相角

L : 揚力

f_c : 渦発生周波数

の形で扱った。そして、揚力 L は、

$$L = C_L \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \quad (3)$$

ここで、

C_L : 揚力係数

A : 受風面積

ρ : 空気密度

v : 風速

とし、揚力係数 C_L は理論的に算定するのが困難であるので、直線斜張橋の実験結果から逆算した。さらに渦発生周波数 f_c は、

$$f_c = S_t \cdot v / D \quad (4)$$

ここで、

S_t : ストローハル数

D : 物体代表長

とし、今回の検討では長方形断面に対して既往の研究で示されている値を用いている。

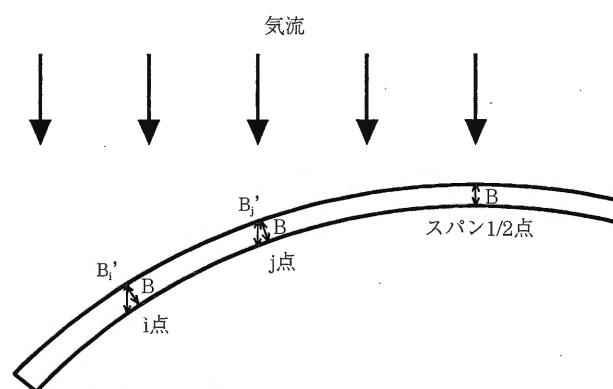


図14 曲線橋における気流の方向と辺長比

Fig.14 Direction of wind flow and height-width ratio of curved bridge

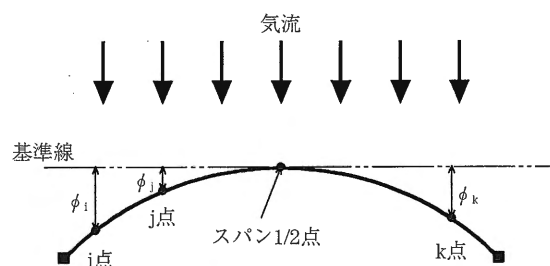


図15 曲線橋における気流の位相差

Fig.15 Phase difference of wind flow for curved bridge

以上のように考えた空気力モデルを(1)式に代入し、モード解析を行って得た値と風洞実験値を比較した結果の一例として、ケーブルを円弧外側に取り付けた場合における、辺長比 1 : 4 断面 (C型)、および、1 : 2 断面 (D型) に対して得られた曲げ変位に関する結果を図16に示す。これらの図より解析値は実験値と比較的よく一致していることが認められた。

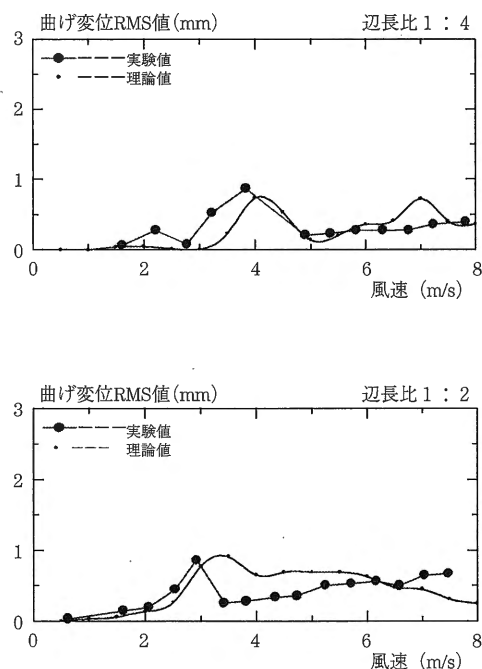


図16 辺長比1：4断面（C型）および1：2断面（D型）における曲線斜張橋の実験値と解析値の比較

Fig.16 Comparison between experiment and analysis: Type C and Type D of cable-stayed curved bridge

5. 結論

以上の結果より、次のような事項が認められた。

- 1) 渦励振に関しては、風洞実験に加えて解析的にも検討したが、曲線斜張橋の応答値は直線斜張橋のそれと比較して特に著しく異なる点は認められなかった。
- 2) ねじれフラッタに関しては、直線斜張橋の場合に顕著に認められた現象が、曲線斜張橋ではあまり明確には認められなかった。

従って、曲線斜張橋の耐風性については直線斜張橋の場合と比較して特に注意する必要はないであろうと認められた。しかしながら、曲線斜張橋の耐震性については、若干の検討によれば直線斜張橋と比較してかなり低下することが認められており、曲線斜張橋の実用性を十分に確認するためには、耐震性を確保する対策の検討が大きな課題となるように考えられる。

参考文献

- 1) 日暮 宏、若林 大、岡内 功：曲線斜張橋の耐風性について（土木学会第53回年次学術講演概要）
- 2) 日暮 宏、大塚篤生、岡内 功：吊形式曲線橋の振動特性（土木学会第50回年次学術講演概要）
- 3) 若林 大：曲線斜張橋の実用性に関する研究（平成9年度中央大学修士論文）

執筆者

日暮 宏

Hiroshi Higurashi

昭和63年入社

鋼橋の設計業務に従事



山崎 章

Akira Yamazaki

平成10年入社

鋼橋の設計業務に従事



岡内 功

Isao Okauchi

中央大学 理工学部

土木工学科教授 工学博士

