

建設省土木研究所 正員 横山功一
 建設省土木研究所 正員 佐藤弘史
 建設省土木研究所 神寄一夫

1. まえがき

斜張橋で2本のケーブルが近接して配置される場合、上流側ケーブルの後流による下流側ケーブルの不安定振動、いわゆる wake galloping に対する検討が重要となる。一般に斜張橋ケーブルの構造諸元を耐風性の観点から他の円柱構造物（例えばランガー橋の吊材に用いられるパイプ部材）と比較すると、以下のような特徴が挙げられる。a. 無次元質量が大きい。b. 検討すべき無次元風速の範囲が広い。c. ケーブルが水平面に対して傾いているため、水平偏角の作用により迎角が付加されたような効果を与える。d. さらに、今回対象としたケーブルはそのケーブル中心間隔がケーブル軸方向に変化している。

このため今回は特にケーブルの3次元性の影響（振動モード、ケーブル中心間隔の軸方向の変化）ならびに水平偏角の影響を考慮し、3次元弾性模型を用いた風洞実験を行った。

2. 実験方法

模型化は1組（2本）のケーブルのみとした。模型ケーブルの長さ（ l ）は1.5m、直径（ D ）は5mm、傾き（ θ ）は 30° 、無次元質量（ $m / (\rho D^2)$ ）は約2400にそれぞれ設定することとした。模型の概要図を図1に示す。模型はステンレス・スチールを芯材とし、まわりにビニールチューブを整形材としてとりつけている。また、模型の振動は、各模型に取付けた2台の小型加速度計（質量0.4g）により測定した。ケーブル模型の固有振動数は1次モードで約8.5Hz、2次モードで約18Hzであり、無風時の減衰率は0.01～0.05の範囲であった。振動モードは1次モードおよび2次モードとも正弦波に近い形状を示していた。実験では、無次元風速（ $U / f_2 D$ ）、水平偏角（ β ）を変えて対風応答を調査した。なお、Re数は $10^3 \sim 5 \times 10^3$ であった。

3. ケーブルの対風応答特性

ケーブル中心間隔を軸方向に $2D \sim 4D$ に変化させて設定し、水平偏角（ β ） $0^\circ \sim 90^\circ$ （橋軸直角方向を 0° とする）の2本ケーブルの風による振動を調べた。顕著な振動が発現した例として $\beta = 0^\circ$ のケースと $\beta = 40^\circ$ のケースの風速と振幅との関係を図2に示す。 $\beta = 0^\circ$ のとき、無次元風速（ $U / f_2 D$ 、 f_2 ；2次の固有振動数）30より2次モードの振動が発現する。この振動は下流側ケーブルだけに見られ、また、鉛直振動および水平振動とも同程度の振幅で振動し、その振動波形はほぼ正弦波的なものであった。振幅は、 $U / f_2 D$ が約130まで風速とともに増加するが、それ以上の風速ではこの振動は発現しなくなり、代わりに、1次モードが卓越した不規則な振動が発現する。 $\beta = 40^\circ$ の場合は、 $U / f_2 D$ が60より、 $\beta = 0^\circ$ で見られた振動と同様な2次モードが卓越した振動が発現し、実験した範囲（ $U / f_2 D < 130$ ）では振幅は風速とともに増加する。また、 $U / f_2 D$ が120より上流側ケーブルも2次モードで振動を始めるが、これは、下

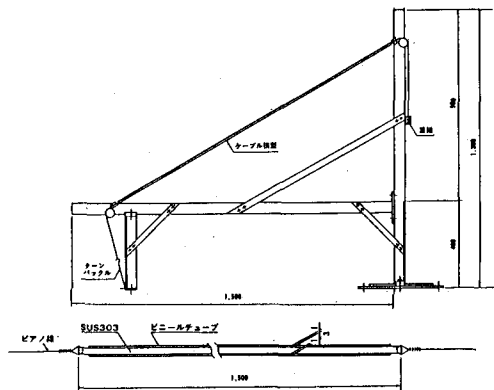


図1. 模型概要図

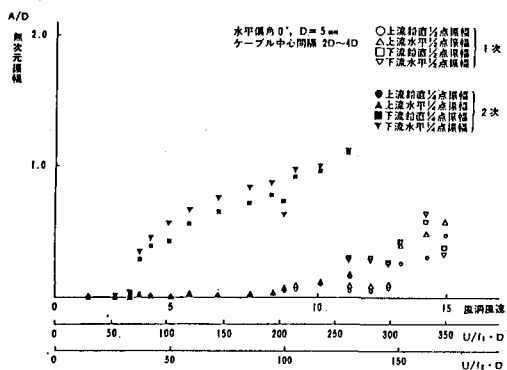


図 2. 1. 風速と振幅の関係 ($\beta = 0^\circ$)

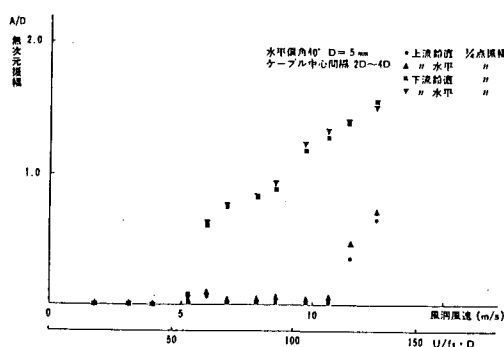


図 2. 2. 風速と振幅の関係 ($\beta = 4^\circ$)

流側ケーブルの振幅が大きくなり、ぶつかるために生じたものである。

他に水平偏角 β を変えて顕著な振動が発現したケースは、いずれも $\beta = 0^\circ, 4^\circ$ と同様に、下流側ケーブルが 2 次のモードで振動し、しかも鉛直方向および水平方向とも同程度の振幅であった。この下流側ケーブル 2 次モードの鉛直振動のケーブル 1/4 点の振幅に着目し、これに及ぼす水平偏角の影響をとりまとめて図 3 に示す。実験は各水平偏角で $U/f_2 D$ がおよそ 160 まで実施したが、この範囲では $\beta = 1^\circ, 2^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 9^\circ$ については顕著な振動は観測されなかった。

4. 制振対策の検討

本ケーブルの振動を抑制するためには、1 つは減衰を増加させるという方法があり、既往の実験結果によれば、他段のケーブルと結ぶことにより減衰を増すことが可能である。ここでは他の方法として、近接した 2 本のケーブルを結ぶ対策を取りあげ、その効果を調べた。結び方としては、2 本のケーブルがその相対高さが変わるような振動をしたときに、これに対しケーブルのねじれ剛性も抵抗するように 2 本ケーブルを剛に結んだもの（剛結合）、およびケーブルのねじれ剛性を寄与させず 2 本ケーブルの間隔を一定となるように結んだもの（ピン結合）の 2 通りを考えた。これらの対策の取付点はいずれも 2 次モードの腹の位置（1/4 点および 3/4 点）とした。その結果、いずれの対策も wake galloping 抑制に十分な効果をもつことが明らかになった。

5. まとめ

(1) 2 本ケーブルの間隔を 2 D (D; ケーブル直径) ~ 4 D にケーブル軸方向に変化させて配置し、風向を橋軸直角方向から橋軸方向まで 1° きざみに変化させて振動を計測したところ、水平偏角 β (橋軸直角方向を 0° とする) $= 0^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ において wake galloping が観測された。

(2) この wake galloping は下流側ケーブルだけが鉛直方向および水平方向に同程度の振幅で振動するものであり、2 次のモードが卓越していた。とくに $\beta = 4^\circ, 5^\circ$ では高風速で下流側ケーブルが上流側ケーブルにぶつかるほどの振幅に達した。

(3) wake galloping を抑制する方法としては、2 本ケーブルを振動モードの腹の位置で互いの間隔が一定となるように結ぶ対策が効果のあることが実験的に確認された。

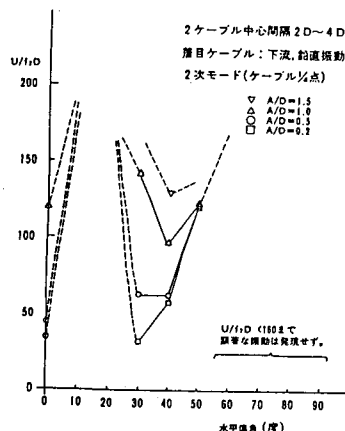


図 3. 水平偏角の影響