

## I-720

## 斜張橋並列ケーブル耐風制振用ねじれ減衰スペーサー

鶴比・エス 正員○久保明英 正員 河村哲男  
 鶴比・エス 正員 赤嶺文繁 正員 河村直彦

## 1. まえがき

斜張橋ではしばしば並列ケーブル方式が採用される。並列ケーブルでは一方のケーブルの存在で風の流れが特殊となり、風下側ケーブルが大きく振動するウェイクギャロッピングが発現する恐れがある。対策として相互を剛に連結する方法があるが、大きいサブスパン振動、1次振動が発生する恐れがある。本研究は並列ケーブルを適度に相互拘束する機能、エネルギー減衰機能を備えたスペーサーの開発を目的とする。本稿では、ねじれ減衰スペーサー（写真-1）を開発し、その効果を実験で確認したので報告する。

## 2. スペーサー片側当たりの諸元

並列2斜材に鉛直の相対変形が生じた時、スペーサー治具と斜材表面に上下面を付着させた高減衰ゴムには必然的にせん断変形が生じる。本スペーサーは、この変形に伴い発生する履歴減衰で斜材の減衰性能を高めようと工夫したものである。高減衰ゴムはブリヂストンのKL301を使用した。スペーサー片側当たり、縦5cm、幅2.5cm、厚さ3cmの高減衰ゴム2個を使用した。円周方向の最大変形を実験に一致させて $D\theta_{max}=4.5$ cmとした。スペーサー片側当たりの諸元を下に示す。高減衰ゴムの履歴特性を図-1に示す。

|       |               |               |
|-------|---------------|---------------|
| 降伏変形： | $D\theta_0 =$ | 0.46 cm       |
| 1次剛性： | $K\theta_1 =$ | 102.56 kgf/cm |
| 2次剛性： | $K\theta_2 =$ | 21.85 kgf/cm  |
| 等価剛性： | $K\theta =$   | 30.18 kgf/cm  |

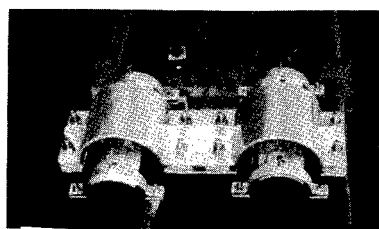


写真-1 ねじれ減衰スペーサー

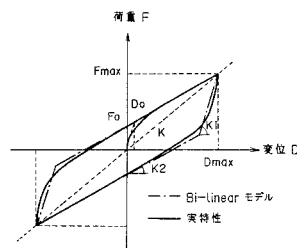


図-1 高減衰ゴムの履歴特性

## 3. 実験結果

実験を行った斜材の諸元は斜材振動長 $L=98.43$ m、単位重量 $w=18.53$ kgf/m、張力 $P=165$ t fである。斜材の構造減衰は対数減衰率で1%、1次の固有振動数は1.54Hzであった。実験値から計算した対数減衰率を図-2に示す。

## 4. 解析手法

長さ方向中央をスペーサーで連結された並列ケーブルのモード減衰を複素固有値解析と直接積分法による時刻歴解析の2法で計算し、実験結果と比較する。解析は1斜材を20等分し、19格点の弦モデルとして微小変形理論による有限要素法で行った。ケーブルの剛性は無視する。ケーブルには張力165tfが導入されており、変形復元力は隣接2弦上の張力の合力として生じる。解析モデルを図-3に示す。

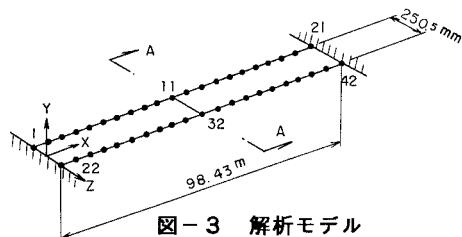


図-3 解析モデル

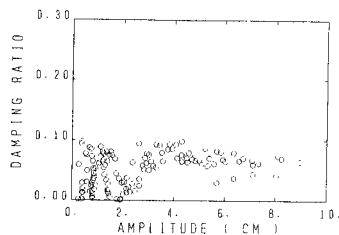


図-2 対数減衰率

## 4-1 複素固有値解析

(1) 円周方向運動の減衰係数 $C\theta$ 

スペーサー片側の高減衰ゴムで消費されるエネルギー $J$ は、図-1のループで囲まれた面積で、604.75kgf・cmとなる。平均減衰力 $F$ とし、この減衰力 $F$ を速度比例型の減衰に置き換える。なお、平均速度を $V=2 \cdot \omega \cdot D\theta_{max}/\pi$ とした。円周方向の運動の減衰係数 $C\theta$ は次の値となる。

$$F = J / D\theta_{max} / 2 = C\theta \cdot V, \quad C\theta = 2.425 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{cm}$$

## (2) 鉛直運動モデルの剛性 $K_y$ 及び減衰係数 $C_y$

円周方向の運動を鉛直方向の運動に置き換える。2斜材中央点回りのモーメントの釣り合いから。

$$M = 2 \times 7.175 \times 7.175 \times K\theta = R_y \times 2 \times 12.525$$

2斜材に作用する鉛直力 $R$ は次式となる。

$$R_y = 2 \times 7.175 \times 7.175 \times K\theta / (2 \times 12.525)$$

2斜材の鉛直相対変位は $2 \times 12.525$  cmである故、鉛直相対運動の剛性 $K_y$ は次式となる。

$$K_y = 7.175 \times 7.175 \times K\theta / (2 \times 12.525 \times 12.525) \\ = 4.95 \text{ kgf/cm}$$

$$C_y = 7.175 \times 7.175 \times C\theta / (2 \times 12.525 \times 12.525) \\ = 0.398 \text{ kgf} \cdot \text{sec/cm}$$

格点11及び格点32を結ぶ要素の鉛直方向バネとして $K_y$ を入力する。プログラムでは速度に減衰係数を乗じて減衰力を計算する。1周期の間に2サイクル鉛直運動する故、格点11及び格点32に減衰係数 $C_y/4$ を、また2斜材の連成運動を評価するため、2格点の連成項に減衰係数 $-C_y/4$ を入力する。

## (3) 複素固有値解析によるモード減衰

2斜材逆対称モードの固有値は次の値となる。

$$Re = -0.1192, \quad Im = \pm 9.64$$

固有周期 $T$ 及びモード減衰係数は次の値となる。

$$T = 0.6517 \text{ sec}, \quad c = 0.2383$$

対数減衰率 $\delta$ は次の値となる。

$$\delta = T \cdot c / 2 = 0.078$$

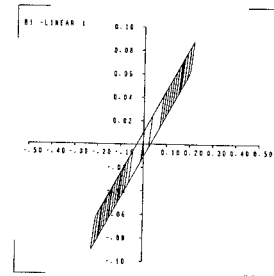


図-4 計算履歴

## 4-2 時刻歴解析

### (1) 鉛直バイリニアモデル諸元

応答計算はニューマークの $\beta$ 法( $\beta = 1/4$ )を用いた直接積分法で、計算ステップは0.01秒で行った。ケーブルの構造減衰は質量比例、スパーサーの減衰はバイリニア型履歴減衰として指定した。周期0.65秒で正弦変化する集中荷重を逆位相で、格点11と格点32に作用させて起振し、その後の自由減衰をシュミレートした。回転変形で減衰を生じる本スパーサーの特性を、鉛直変形で減衰を生じる下記の鉛直バイリニアモデルに置き換え計算を行った。

$$\text{降伏変形: } Dy_0 = D\theta_0 / 7.175 \times 12.525 = 0.803 \text{ cm}$$

$$\text{1次剛性: } Ky_1 = 7.175 \times 7.175 \times K\theta_1 / (2 \times 12.525 \times 12.525) \\ = 16.83 \text{ kgf/cm}$$

$$\text{2次剛性: } Ky_2 = Ky_1 \times K\theta_2 / K\theta_1 \\ = 3.59 \text{ kgf/cm}$$

なお、上の鉛直バイリニアモデルの1履歴で消費されるエネルギーは、スパーサー片側の高減衰ゴムで消費されるエネルギー604.75 kgf·cm(=J)と等しくなる。1周期の間に鉛直バイリニアモデルは2サイクル運動する。

### (2) 時刻歴解析によるモード減衰

鉛直バイリニアモデルの計算履歴を図-4、応答変位を図-5に示す。時刻歴解析による2斜材逆対称モードの対数減衰率は6%~8%であった。

## 4. まとめ

ねじれ減衰スパーサーの減衰効果は良好であった。複素固有値解析、時刻歴解析とも実験結果と良く一致しており、今後は解析で有効な活用法を探す考えである。なお、本研究は建設省土木研究所と民間15社による斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究の一環として行われた。

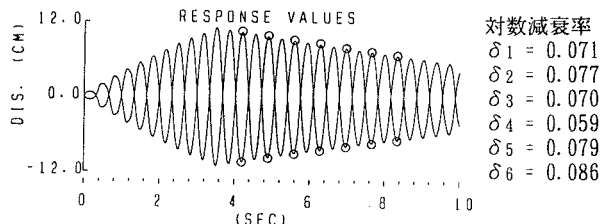


図-5 応答変位