

I - 538

並列ケーブルの減衰スパーサーに関する研究

住友建設(株)技術研究所 正会員 松元香保里
 住友建設(株)技術研究所 正会員 中井 裕司
 住友建設(株)土木設計部 正会員 近藤 真一
 住友建設(株)土木設計部 中村 収志

1. まえがき

斜張橋ケーブルの制振対策として、従来よりケーブルの表面形状を変更して安定化を図った空力的対策やケーブル相互連結方式およびダンパー方式の構造的対策が採られている。並列配置されたケーブルではスパーサー方式によりケーブル相互を連結する方法も採用されている。しかしながら、スパーサー方式は渦励振のような励振力の弱い振動の場合は効果があると考えられているものの、ウェークギャロッピングのような励振力が強い振動に対しては十分な制振効果が得られていないと報告されている。そこで、スパーサーにダンパー等の減衰向上機能を新たに設けることにより、励振力が強い空力振動に対する制振効果の向上を考えた。本稿は、並列配置されたケーブル間にダンパーとして高減衰ゴムを内蔵したスパーサーを設置した場合の振動特性について報告する。

2. 模型実験および解析

並列ケーブルの縮小模型を図-1に示す。縮小模型のケーブルとして $\phi 13\text{mm}$ PC鋼棒を、スパーサーとしてケーブル固定部に回転自由度を与えるベアリングを設けた高減衰ゴム(写真1)を用いた。加力方法は加振側ケーブルのスパン中央に与えた強制変位(10~20mm程度)を瞬時に解放することで加振力を与えた。実験パラメータはケーブルの張力およびダンパーの有無として、系全体のエネルギーを評価した。

解析モデル(図-2)は各ケーブルを1質点とし、各質点をケーブル曲げ剛性相当のばねで支持し、その間をスパーサー(ばねと粘性減衰)で連結した2質点系であり、自由度を加力方向のみとした。なお、構造減衰はRayleigh減衰とした。弦の振動をエネルギー原理から見ると、ケーブルの長さ L 、張力を N 、単位長さ当たりの質量を ρA とすれば、振動エネルギー E は運動エネルギー U とポテンシャルエネルギー T の和として式-1で表わせる¹⁾。式-1は一般的な形であり、これを1次モードについてだけ考えれば式-2が得られる。さらに、式-3より質点の質量 M' およびばね定数 K' が与えられる。

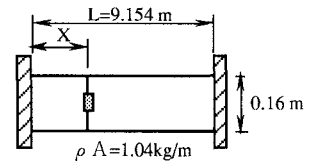


図-1 実験モデル

$$E = T + U = \frac{\rho A}{2} \int_0^L \dot{w}(x,t)^2 dx + \frac{N}{2} \int_0^L \left(\frac{\delta w}{\delta x} \right)^2 dx \quad (1)$$

$$= \frac{\rho A L}{4} \dot{w}(x=L/2, t)^2 + \frac{N \pi^2}{4} w(x=L/2, t)^2 \quad (2)$$

$$= \frac{M'}{2} \dot{\Delta}(t)^2 + \frac{K'}{2} \Delta(t)^2 \quad (3)$$



写真-1 スパーサー概観図

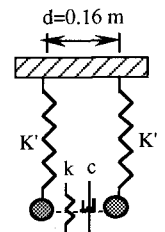


図-2 解析モデル

また、スパーサー部分、即ち高減衰ゴムのばね定数 k_1 および粘性係数 c_1 はゴムのせん断弾性係数 G 、内部摩擦係数 γ 、受圧面積 A 、ゴム厚 t 、固有円振動数 ω が与えられれば、式-4で求めることができる²⁾。解析では実験における高減衰ゴムの変位 Δ^0 と2質点の相対変位 Δ を考慮するため、式-5によった。

$$k_1 = \frac{GA}{tG}, \quad c_1 = \frac{1}{\omega} \times \frac{4\gamma}{4+\gamma^2} \times k_1 \quad (4)$$

$$k = \frac{\Delta G}{\Delta} k_1, \quad c = \frac{\Delta G}{\Delta} c_1 \quad (5)$$

式-2または式-3より求めた振動エネルギーを式-6で回帰すれば、 α は初期エネルギーであり、 β は f を固有振動数とすれば対数減衰率 δ と式-7の関係を持つ。

$$E(t) = \alpha e^{-\beta t} \quad (6) \quad \delta = \frac{\beta}{2f} \quad (7)$$

3. 結果

実験・解析結果を表-1に、ケースDの時刻歴波形を図-3に、系全体の内部エネルギーの時刻歴を図-4に、張力による対数減衰率の変化を図-5に示す。実験結果より次の2点が理解できる。スパーサーに高減衰ゴムを用いることにより、対数減衰率が向上する。また、同一のスパーサーを用いた場合、張力により対数減衰率が変化する。したがって、ケーブルの張力によりスパーサーに用いる高減衰ゴムの諸力学特性の最適化が必要である。時刻歴波形で実験の波形は連成振動を有し、位相差の乱れが認められるが、解析の波形は $\pi/2$ の初期位相差から2次モードが消滅し、1次モードの同期運動に収束していく。実験・解析結果の差異はこれに起因しており、実験の振動モードは1次および2次モードが卓越しているものの、同モードの周波数の巾が減衰に寄与していると考えられる。内部エネルギーの時刻歴において、変曲点は同期運動に収束した時刻である。解析の変曲点までは、実験と解析はより整合性を有している。解析において構造減衰(0.012)を取り除くと、同期運動になった時点で内部エネルギーは初期エネルギーの1/2(1次モードのエネルギー)となる。したがって、質点系モデルの数値計算上実構造物のように各モードの振動数に巾がある減衰を最終まで精密に再現することは困難であるが、設計諸量を決定するには有効な手法と考えられる。一方、複素固有値解析の結果は構造減衰を付与しない場合の2次モードの対数減衰率を表わしている。系全体ではこの1/2が系の対数減衰率に相当すると考えられるが、定量的にはかなり異なる結果となった。

4. まとめ

本実験および解析の範囲内で、次の知見を得た。

- ①実験から、スパーサーに高減衰ゴムを用いることにより系全体の対数減衰率が向上する。
- ②並列ケーブルを2質点系モデルに置き換え時間積分を行うことによって、並列ケーブルの1次、2次モードの振動特性を評価できる。

表-1 実験結果および解析結果

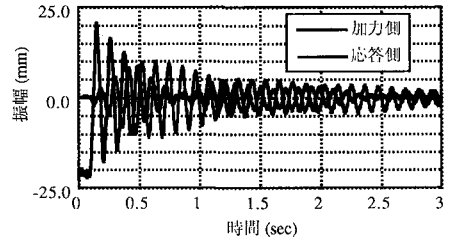
ケース	張力 T (tf)	取付 位置 X	実験						直接時間積分				複素 固有値解析
			高減衰ゴム			ダミー							
			固有1次 振動数 f1 (Hz)	対数減衰率 δ		固有1次 振動数 f1 (Hz)	対数減衰率 δ		固有1次 振動数 f1 (Hz)	対数減衰率 δ		対数 減衰率 δ	
				0-0.5 sec	0-2.5 sec		0-0.5 sec	0-2.5 sec		0-0.5 sec	0-2.5 sec		
A	11.94	1/2L	17.80	0.076	0.069	0.017	0.035	18.32	0.018	0.005	0.048		
B	9.03	1/2L	16.11	0.064	0.038	0.020	0.013	15.93	0.040	0.019	0.079		
C	6.07	1/2L	13.18	0.080	0.028	0.025	0.014	13.06	0.048	0.012	0.135		
D	3.04	1/2L	9.52	0.133	0.070	0.027	0.014	9.25	0.093	0.019	0.364		

注) ダミーは高減衰ゴムの代わりにゴムと同重量のプレートを用いた場合である。

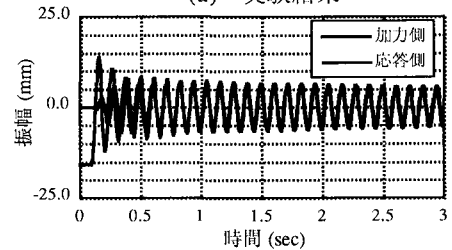
5. おわりに

本研究は建設省土木研究所、(財)土木研究センターさらに民間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。

【参考文献】1)西岡：構造振動解析，培風館，1987年4月。2)春日：高減衰ゴムを用いたケーブル制振用ダンパーに関する研究，土木学会第46回年次学術講演会。

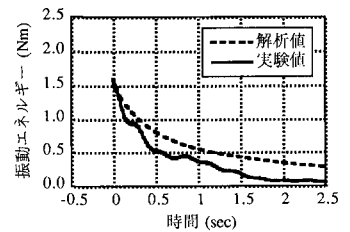


(a) 実験結果

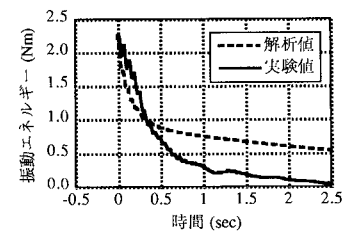


(b) 解析結果

図-3 時刻歴波形（ケース D）



(a) ケース B



(b) ケース D

図-4 内部エネルギーの時刻歴

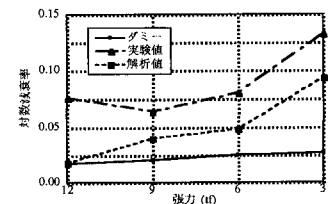


図-5 張力と対数減衰率の関係