

(13) 高減衰ゴムを用いた斜張橋ケーブルの制振装置の研究および開発

住友建設(株) 土木設計部 ○正会員 中村 収志
 住友建設(株) 横浜支店 正会員 春日 昭夫
 住友建設(株) 土木設計部 正会員 新井 英雄

1. はじめに

近年における斜張橋の施工実績は増加の傾向にあり、またその規模も長大化しつつある。しかし、斜張橋の長大化に伴う斜張ケーブルの長大化は、その振動制御という大きな問題を生み出した。斜張ケーブルの振動は、アンカー付近の2次曲げ応力による疲労が問題となるため制振対策が必要となる。今までの制振方法としては、ケーブルをロープで連結する方法、ケーブルの表面を細工する空力的方法、そしてダンパーを取り付ける方法などが挙げられる。これらの対策方法のうち、最近ダンパーを用いた制振効果に関する研究が幾つか行われている。¹⁾ この方法は、ケーブル長、ケーブル張力、ダンパー取り付け位置によって付加する対数減衰率を予測し、任意に設計を行える。また、他の方法に比べて美観を損なわないという利点がある。

本研究は、免震支承に用いられている高減衰ゴムを使用したダンパー型の制振装置の特徴および設計手法を論じたものであり、実斜張ケーブルを用いた確認実験を行い、その設計手法の妥当性を考察している。

また、ダンパー方式を採用した場合、ケーブルの2次応力低減を目的として設置される角折れ緩衝装置が制振効果に大きく影響を与える。すなわち、高欄や自動車防護柵と同程度の高さでは、ばね定数が非常に大きい緩衝ゴムでは固定点に近い作用を示すため、所要の構造減衰を付加出来ない場合がある。そのため、この緩衝ゴムがどの程度制振装置を取り付けた斜張ケーブルの振動に影響を与えるのか解析で評価するとともに実斜張ケーブルを用いた確認実験の結果から考察を行う。

2. 高減衰ゴムを用いた制振装置の特徴

減衰をとらせる機構は、粘性ダンパーと同じせん断型であるが、高粘性物質のかわりに免震支承に用いられている高減衰ゴムを使用する。その特徴としては、

- ①粘性ダンパーに比べ減衰性能はやや劣るが、温度変化に対して影響を受けにくい。
- ②振動モードによって最適ばね定数が変化しない。
- ③高減衰ゴムを放射状に分割して配置できるため、あらゆる方向の振動に効果がある。
- ④装置本体をコンパクトに出来るためダンパーを保護管の内側に隠すことが可能で美観を損なわない。
- ⑤取替えなどのメンテナンスが容易である。

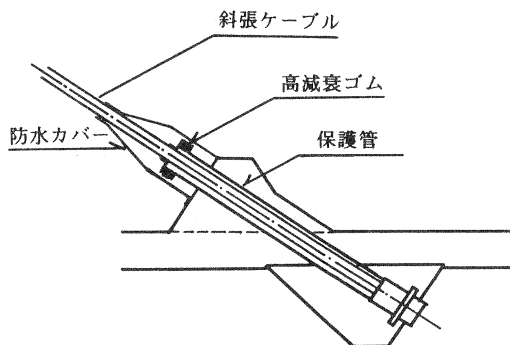


図-1 高減衰ゴムダンパーの一例

図-1 に装置本体を保護管に設置する内挿式の取付け例を示す。

3. 高減衰ゴムダンパーの推定式²⁾

高減衰ゴムを用いた斜張ケーブルの固有値解析は、複素ばねを有するモデルとして行う。図-2 に示すモデルで、複素ばね定数 $k(u+iv)$ は、ゴムの内部摩擦係数 γ が与えられれば次式で求めることができる。

$$u = \frac{4 - \gamma^2}{4 + \gamma^2}, \quad v = \frac{4\gamma}{4 + \gamma^2} \quad \dots \dots \dots (1)$$

弾性ばね定数 k は、

$$k = GA / t \quad \dots\dots\dots (2)$$

で算出できる。ただし、 G はせん断弾性係数、 A は面積、 t はゴム厚である。

また、図-2 に於ける系の対数減衰率 δ は、近似的に次式で求められる。

$$\delta = \frac{2\pi \{ \phi_i(x_i) \}^2}{2M\omega_n} \frac{kv}{\omega_n} e^{-0.72\alpha (kv/\omega_n)(2/\gamma)} \quad \dots\dots\dots (3) \quad \text{ただし、} \quad \alpha = \frac{\omega_n x_i(L-x_i)}{TL}$$

- ここで、 T : ケーブル張力
- L : ケーブル長
- x_i : ダンパーの取付け位置までの距離
- M : ケーブルの換算質量
[$=1/2 \times \mu L$] μ : 単位重量/9.8
- ω_n : n 次の円振動数
[$=n\pi/L \times \sqrt{T/\mu}$]
- $\phi_i(x_i)$: 制振装置位置のモード関数
[$=\sin(n\pi x_i/L)$]

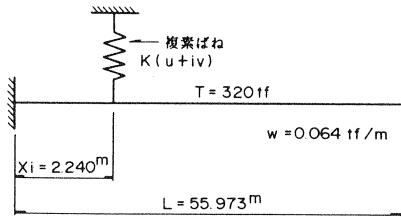


図-2 解析モデルと諸元

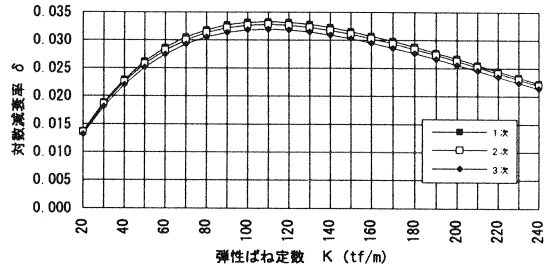


図-3 ばね定数と対数減衰率の関係

式(3)を k で微分して 0 と置くことにより、最適弾性ばね定数 k_{opt} と最大対数減衰率が求まる。

$$k_{opt} = \frac{1}{0.72\alpha} \frac{\omega_n \gamma}{2v} \quad \dots\dots\dots (4) \quad \delta_{max} = \frac{\{ \phi_i(x_i) \}^2}{n^2 \pi \frac{x_i}{L} (1 - \frac{x_i}{L})} \frac{\gamma}{2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

この(4)式および(5)式を使って図-2のケーブル諸元で最適弾性ばね定数 k_{opt} と最大対数減衰率 δ_{max} を内部摩擦係数 $\gamma = 0.5$ として算出すると一次振動では、 $k_{opt} = 109.7 \text{tf/m}$ 、 $\delta_{max} = 0.033$ となる。ばね定数と対数減衰率の関係を図-3に示す。最適ばね定数は、振動モードによって変化しないことがわかる。

4. 高減衰ゴムダンパーの温度依存性

15℃を標準温度として±25℃(-10℃~40℃) で対数減衰率がどの程度変化するかを考察する。

高減衰ゴムの場合、図-4に示したように内部摩擦係数 γ とせん断弾性係数 G は温度によって変化する。したがって、温度変化に伴いゴムのばね定数も変化する。対数減衰率に影響を及ぼす。一次振動についてそれぞれの温度における対数減衰率は、表-1のようになる。

表-1 高減衰ゴムの温度依存性

温度	内部摩擦係数 γ	せん断弾性係数 (tf/m ²)	ばね定数 (tf/m)	対数減衰率 (一次)
-10℃	0.58	300	205.7	0.031
15℃	0.50	160	109.7	0.033
40℃	0.48	110	75.4	0.030

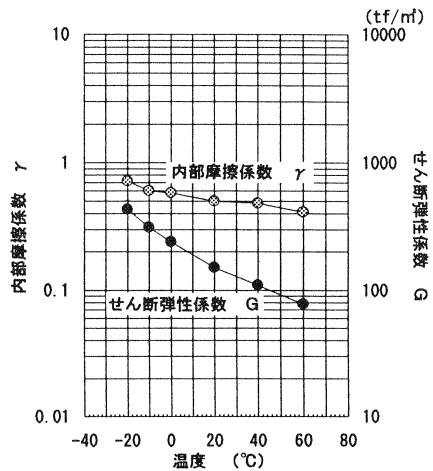


図-4 温度変化による高減衰ゴムの影響

表-1からわかるように高減衰ゴムダンパーは、温度に対して安定していることがわかる。

5. 実斜張ケーブルの振動実験による減衰効果の確認

高減衰ゴムを使用した制振装置が、所定の減衰を付加しているか加振実験により確認を行った。実験概要図を図-5に、高減衰ゴムダンパーの構造図を図-6に示す。実斜張ケーブルの諸元は、計算例に用いた解析モデル(図-1)と同じである。振動方法は、アクチュエーターを用いて3次モードまで発生させる。制振装置に用いる高減衰ゴムは、次の3種類を使用した。

- a) 最適弾性ばね定数 (k_{opt})
- b) $k_{opt} \times 0.5$ のばね定数
- c) $k_{opt} \times 1.6$ "

本実験に用いた斜張ケーブルは、角折れ防止の緩衝ゴムが主桁および主塔の定着部付近に装着されている。(図-8)したがって、最適弾性ばね定数は緩衝ゴムを固定点として(4)式の簡易式により算出した。

実験での確認事項は、次のとおりである。

- ①解析値と実験値との比較
- ②ばね定数の相違による対数減衰率の変化
- ③振動モード(1次~3次)と減衰特性の関係。

実験結果の時刻歴波形を図-7に、比較結果を表-2に示す。

表-2 実験結果

波動モード (振動数)	波数	実験値				解析値		
		ダンパーなし	$K_{opt} \times 0.5$	K_{opt}	$K_{opt} \times 1.6$	$K_{opt} \times 0.5$	K_{opt}	$K_{opt} \times 1.6$
1次モード (2.1Hz)	5		0.052	0.058	0.028	0.027	0.033	0.029
	10	0.005	0.055	0.055	0.028			
	20	0.008	0.049	0.058	0.032			
	30	0.010	0.042	0.066	0.032			
2次モード (4.2Hz)	5		0.060	0.043	0.038	0.027	0.033	0.029
	10	0.010	0.043	0.048	0.032			
	20	0.011	0.042	0.045	0.030			
	30	0.011	0.042	0.045	0.030			
3次モード (6.3Hz)	5		0.049	0.067	0.042	0.026	0.032	0.028
	10	0.012	0.047	0.038	0.041			
	20	0.012	0.040	0.049	0.036			
	30	0.010	0.039	0.075	0.023			

振動波形から求めた実験結果の対数減衰率は、斜張ケーブル自身が持つ構造減衰を含んでいる。したがって、制振装置によって付加される減衰率はダンパーなしの場合を差し引いて解析結果と比較すると、2次および3次モードは、ほぼ解析値と一致したが、1次モードでは0.05と解析値0.03より大きな値となった。この原因は、緩衝ゴムの影響が考えられるため、次項で考察を行う。

ばね定数の相違による対数減衰率の変化は、若干のばらつきはあるものの k_{opt} が最も減衰効果が高くほぼ解析値とおりの傾向を示した。したがって、最適ばね定数の算出法は適切であったといえる。

振動モードと減衰特性の関係は、1次~3次の全ての振動モードにおいてほぼ同等の減衰効果を得ることが実験でも確認できた。したがって、高減衰ゴムダンパー設計時の最適ばね定数の決定は、振動モードに関係なくばね定数を設定できることが証明された。

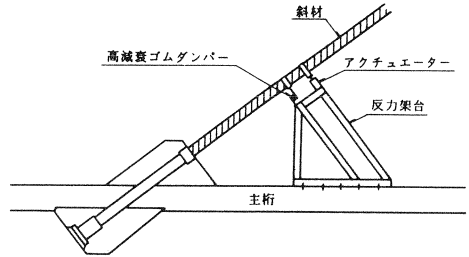


図-5 実験概要図

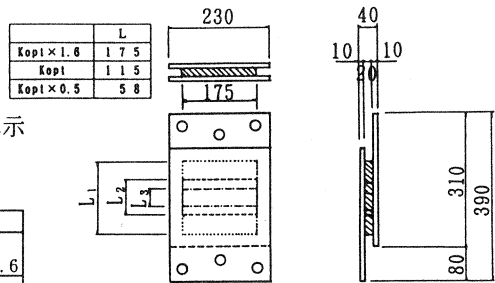


図-6 ダンパー構造図

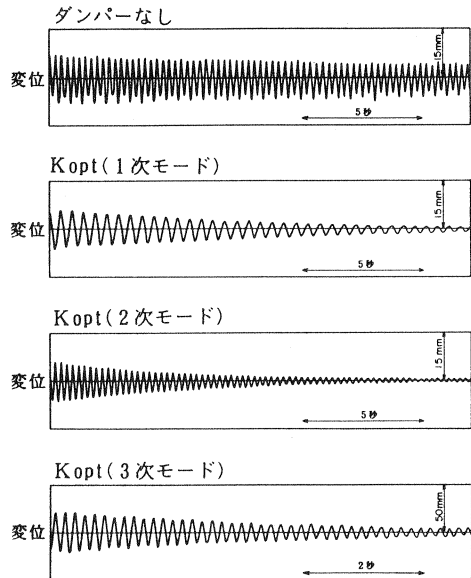


図-7 振動波形

6. 緩衝ゴムが減衰効果に与える影響

表-2に示した実験結果では、解析値に対して実験値の方が減衰効果が全般的に高い結果となった。この原因は、緩衝ゴムが減衰効果に影響を及ぼしていることが推測される。実験に使用した斜張ケーブルに用いられている緩衝ゴムのばね定数は、1700~2000tf/mと非常に硬いゴムが用いられているため、解析モデルではほぼ固定に近い性状を示す。しかし、実際の斜張ケーブルにおいては、ばね定数にかなりのばらつきが予想される。したがって、緩衝ゴムが減衰効果に与える影響を確認するため図-9に示したように緩衝ゴムの影響を考慮したモデルで複素固有値解析を行い考察する。

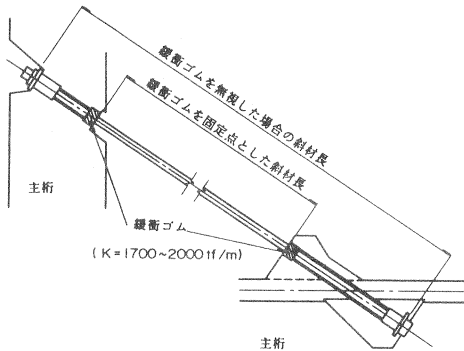


図-8 緩衝ゴムのある斜材

図-10の解析結果から緩衝ゴムのばね定数は、対数減衰率に大きな影響を及ぼすことがわかる。ばね定数が小さくなればダンパー取付け位置までの距離 x_i が斜材長 L に対して長くなるからである。実験に用いた斜張ケーブルの緩衝ゴムのばね定数は、約200tf/m程度と仮定すると実験結果の対数減衰率とほぼ一致する。ばね定数を小さくすることにより、約2倍の減衰率が得られることから、ダンパー型の制振装置を設置する場合はこの緩衝ゴムを取り除いた方が斜張ケーブルの制振効果を高めることができる。

7. まとめ

実斜材ケーブルの振動実験により高減衰ゴムダンパーの最適ばね定数の算出法の妥当性が検証された。長大PC斜張橋のケーブルに於いて、最も発生の可能性が高いレインバイブレーションの制振に必要な対数減衰率0.03以上を高減衰ゴムダンパーでも安定した状態で付加することができる。これにより、定着システム内部の緩衝ゴムの代わりに高減衰ゴムを使用して景観性を損なわない制振装置の開発が可能である。最後に高減衰ゴムのデータとダンパーを提供していただいた住友ゴム工業㈱の佐々木輝男氏、加藤清之輔氏に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 春日昭夫：ケーブル制振用ダンパーの最適減衰係数に関する研究，構造工学論文集，VOL. 37A，pp. 799~804，1991年3月
- 2) 春日昭夫・則久芳行・新井英雄：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回年次学術講演会概要集，I-460，pp. 958~959，1991年9月

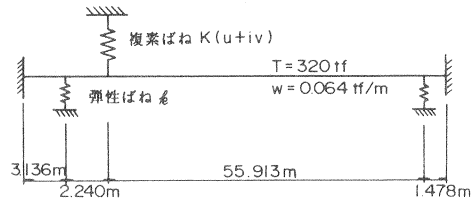


図-9 緩衝ゴムを考慮した解析モデル

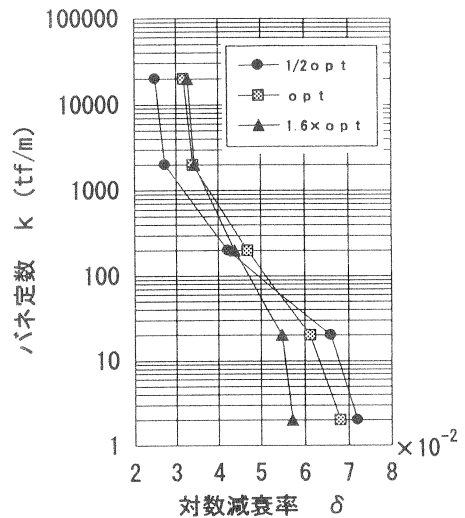


図-10 緩衝ゴムと対数減衰率の関係