

埼玉大学 正員 山口 宏樹
A I T R. ADHIKARI

1. まえがき 構造物の長大化に伴い、ケーブルは重要構造要素としてますます使用される傾向にある。橋梁に限って言えば、構造的合理性、優美性から斜張橋が数多く、長スパンにまで適用されつつあるが、斜張橋ケーブルはその軸直角方向には剛性が弱いため種々の外力に起因した振動問題を基本的に有し、特に風による振動ではその振幅も大きくなり得ることから、振動制御策の検討が必要となることが多い。本研究ではケーブル振動の制御策として粘弾性材の使用によるパッシブな減衰処置を想定し、その可能性を理論的に検討した。

2. 粘弾性材を配置した複合ケーブル 斜張橋に用いられるケーブルは外装管を有するものが多く、図1に示すように、ケーブルと外装管との間あるいはケーブル素線間に粘弾性体を挿入した複合ケーブルを想定する。

3. エネルギーに基づくモード減衰の理論的評価 ケーブルの減衰能評価に当たっては単一ケーブルのモード減衰を考え、エネルギーに基づく減衰比の定義によってそれを評価する。つまり、モード減衰比 ξ は特定モードに付随した散逸エネルギー D のモーダルポテンシャルエネルギー U に対する比; $\xi = D / (4\pi U)$ で定義される。モーダルポテンシャルエネルギーはケーブルの場合、初期のケーブル張力によるもの U_0 と伸び変形に起因したモーダルひずみエネルギー U_a が主であるが、上述の複合ケーブルでは曲げ変形による減衰効果も期待されることから、モーダル曲げひずみエネルギー U_b も一応考慮し、 $U = U_0 + U_a + U_b$ で評価する。一方、モーダル散逸エネルギーについては伸び変形および曲げ変形に起因するものとし、それぞれロスファクター η とモーダルひずみエネルギーとの積で表して $D = D_a + D_b = 2\pi (U_a \eta_a + U_b \eta_b)$ とする。以上により、ケーブルのモード減衰比は次式で評価される。

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{U_a}{U} \eta_a + \frac{U_b}{U} \eta_b \right) \quad (1)$$

4. 複合ケーブルのロスファクター 粘弾性体の挿入によりケーブルに付加される減衰だけを対象とし、ロスファクターを求める。その方法は、図1に示した複合ケーブルについて、軸力と伸びひずみ、曲げモーメントと曲率の関係を解析的に求めて等価剛性を評価し、その後粘弾性体だけに減衰を考慮して複素剛性 $E_v^* = E_v (1 + \eta_v)$ 、(G_v も同様)を導入し、 $E A^* = E A (1 + \eta_a)$ (曲げ剛性も同様、ロスファクターの別の定義式)なる等価複素剛性から等価ロスファクターを導くものである。ロスファクターに影響するパラメーターは、粘弾性体の層厚 t_v 、外装管の板厚 t_{co} 。(ともにケーブル径 d で無次元化)、粘弾性体のヤング係数 e_v 、外装管のヤング係数 e_{co} 。(ともにケーブル素線のヤング係数で無次元化)、粘弾性体のロスファクター η_v およびせん断弾性係数 G_v 、対象とする振動モードの波数 p である。解析結果を図2(伸び変形ロスファクター)、図3、4(曲げ変形ロスファクター)に示す。伸び変形に対するロスファクターは粘弾性体のヤング係数に大きく依存するのみで他のパラメーターにはほとんど影響されない。これに対し、曲げのロスファクターはすべてのパラメーターに比較的大きく依存し、その組み合わせによっては伸びのロスファクターよりもかなり大きな値になり得る。ただし剛性の高い粘弾性材料を用いた場合、せん断変形が小さくなって曲げロスファクターは伸びのそれに漸近する(図3)。

5. 単一ケーブルのモーダルポテンシャルエネルギー 両端を固定された単一ケーブルを考え、曲げ剛性を

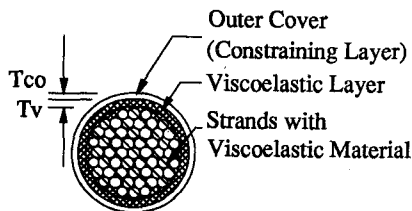


図1: 減衰処置した複合ケーブル(想定)

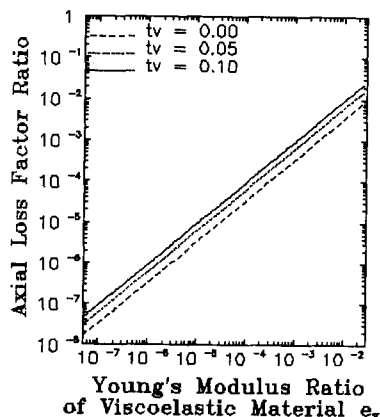


図2: 粘弾性材のヤング係数に対する伸び変形ロスファクターの変化 (t_v は層厚)。

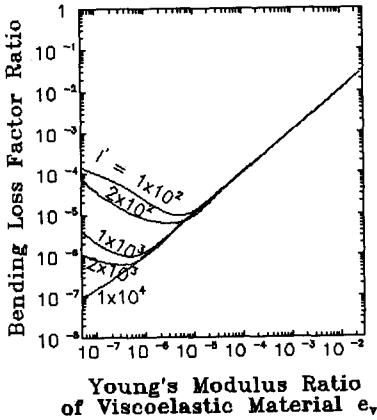


図3: 曲げロスファクターとヤング係数, l' は波長, $e_{co}=0.005$, $t_{co}=0.01$, $t_v=1$

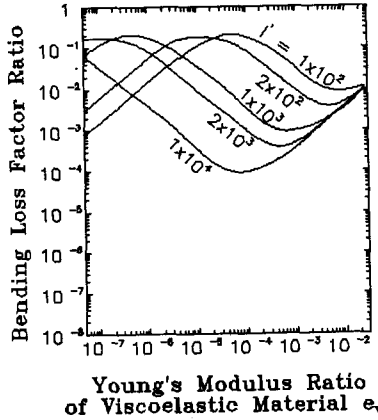


図4: 曲げロスファクターとヤング係数, l' は波長, $e_{co}=1.0$, $t_{co}=0.1$, $t_v=0.1$

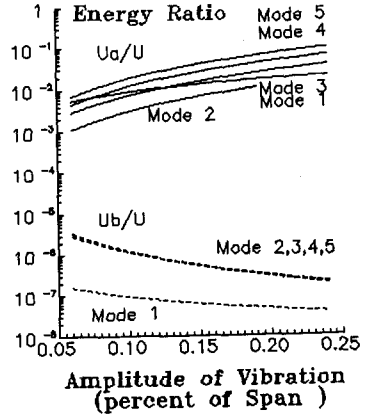


図5: エネルギー比とモード振幅 (スパン200m, サグ比0.5%, 径20cm)

無視したケーブルFEMモデルにより固有値解析を行って振動モード形を求める。これを用いて伸びひずみおよび曲率を算出し、各ポテンシャルエネルギーをモードごとに求めた。モード減衰比に関係するのは各エネルギーの全ポテンシャルに対する比(式(1))であるから、その解析結果を図5に示す。予想されるとおり、曲げひずみエネルギー U_b は伸びのそれ U_a に比べて非常に小さい。最も重要なことは伸びひずみエネルギーの全ポテンシャルエネルギーに対する比が数パーセントのオーダーでしかないこと(初期張力によるポテンシャルエネルギーが大きいことによる)、このことから通常のケーブルのモード減衰が大きくなり得ないとも理解される。ただし、初期張力に基づくポテンシャルエネルギーの評価については現時点で不明確な点があり、ポテンシャルエネルギー比の絶対値そのものについてはさらに検討が必要である。

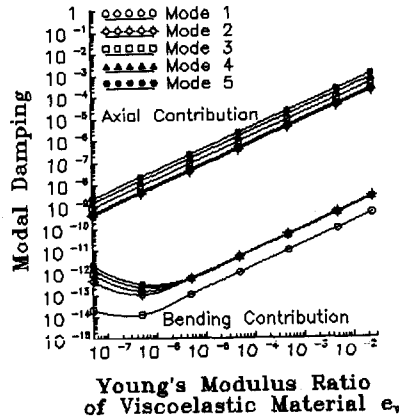


図6: モード減衰比と粘弾性材剛性との関係 (図3, 5に対応。モード振幅比.0024)

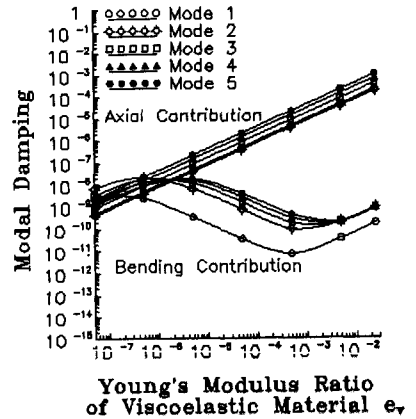


図7: モード減衰比と粘弾性材剛性との関係 (図4, 5に対応。モード振幅比.0024)

6. 構造用ケーブルの高減衰化の可能性 上述のようにポテンシャルエネルギー評価に問題を残すものの、上記の結果を基に粘弾性体をもたらす複合ケーブルのモード減衰比増分を算出した(図6, 7)。二つの図は曲げ変形が効かない場合とある程度効く場合の結果であるが、モード減衰比を大きくするには剛性の高い粘弾性体の使用が必要で、その場合粘弾性体によって付加される減衰は伸び変形によるものがほとんどである。粘弾性体使用による減衰処置は制振鋼板を例としてよく知られているが、その場合には曲げによるせん断変形が大きいいため効果も大きい、ケーブルの場合には軸変形が主であること、および初期軸力が大きなポテンシャルエネルギーをもたらすことから、減衰処置の効果はあまり大きくはない。

7. あとがき 本研究は多くの仮定に基づく理論的な研究であり、詳細な定量的考察には実験的検討が必要と考えている。なお、本研究を行うに当たり、新日本製鉄(株)の中村俊一、北條哲男両氏にいろいろな面でのサポートを頂いたことを付記し、謝意を表する次第である。