

埼玉大学工学部 学生員 矢崎 聖

埼玉大学工学部 正会員 山口宏樹

1. はじめに レインパイプレーション等、斜張橋ケーブルの風による振動が問題とされることが多いが、ケーブル自身の低い振動減衰特性に依るところが大である。したがって、ケーブルの減衰機構を解明することが斜張橋ケーブルの風による振動への対策を考える上で、極めて重要となる。現在、多々羅大橋の設計が進みつつあるが、最大径間長は900mに迫り、ケーブルは最も長いもので500m近くになる予定である。今後、さらに大きなスケールの斜張橋が建設されていくであろうが、長大斜張橋でのケーブルの占める役割は大きく、耐風安定性に大きく関与する減衰特性の把握がますます重要となる。斜張橋ケーブルの振動減衰能が設計段階で理論的に把握可能になれば、工学的に意義深いものと思われる。

2. 斜張橋ケーブルの減衰特性 文献調査により、既存の斜張橋ケーブル（約50本）の現地実験減衰データを収集し、モード減衰比と各パラメータとの相関について調べた。その結果をFig.1～Fig.4に示す。ただし、ダンパー等使用のために対数減衰率が大きいケーブルなど、異常と思えるデータは削除している。Fig.1はモード減衰と固有振動数との関係である。1次モードの減衰が高次のモード減衰に比べて大きいことが認められる。また、固有振動数の増加とともに減衰が小さくなる傾向が見られるが、ケーブル減衰の評価振幅の情報がないため、データの非均質性を考えると断言することは難しい。Fig.2はモード減衰とケーブル長との関係であるが、支点での減衰の影響を考慮して、スパン長100m以下のデータは削除してある。これより明らかなように、斜張橋ケーブルのモード減衰は1次モードを除いてとても小さく、大体0.01以下である。そして、ほとんどのケーブルにおいて1次モードの減衰が最も大きく、かつスパン長の増加とともに大きくなる傾向が伺える。Fig.3にはモード減衰とサグ比との関係を示した。ここでも先程と同じ理由で、長さの短いケーブルに対応するサグ比0.003以下のデータは削除した。Fig.2とFig.3を比較すると非常によく似ているが、これはケーブル長が増加すると、ほとんどの場合サグ比も増加するためである。Fig.4にはモード減衰とケーブル傾斜角度との関係を示した。傾斜角度が増加するとともにどのモードも減衰も大きくなる傾向が見られるが、傾斜角度によらず1次モードの減衰が他のモードに比べて大きいことが認められる。

3. 斜張橋ケーブルの減衰理論 以上のように、1次モードの減衰は他のモードより大きく、スパン長、サグ比、あるいは傾斜角度の増大に伴い、大きくなることがわかった。この理由を理論的に明らかにするためには、モード特性とモード減衰との関係を把握することが重要となる。そこで、ロスファクター η を導入し、散逸エネルギーのポテンシャルエネルギーに対する比というモード減衰比の定義を用いて、斜張橋ケーブルの n 次モードの減衰比 ξ_n を評価することを考えた。つまり、次式でモード減衰を考える。

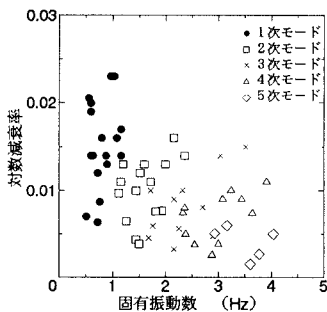


Fig.1 固有振動数-対数減衰率

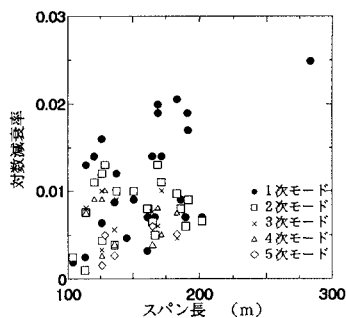


Fig.2 スパン長-対数減衰率

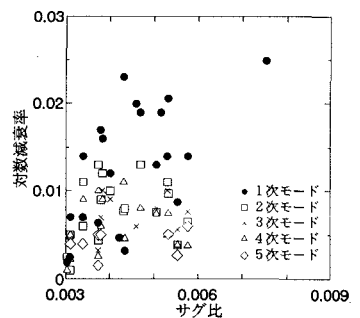


Fig.3 サグ比-対数減衰率

$$\xi_n = \frac{1}{2} \eta \frac{U_{an}}{U_{an} + U_{tn}}$$

ここで、 U_{tn} は初期ケーブル張力がたわみ振動に対してもたらすポテンシャルエネルギー、 U_{an} は振動中のケーブルに生じる軸ひずみエネルギーで、 $U_{an} / (U_{tn} + U_{an})$ はひずみエネルギー比である。

4. ひずみエネルギー比の特性と減衰との関係 無次元剛性 $(EA/H)^{1/2} = 25$ (H : ケーブルの水平張力)、ケーブル傾斜角度 $= 30^\circ$ 、減衰評価振幅比 $= 0.001$ として、サグ比とひずみエネルギー比との関係を数値解析により求めた。結果をFig. 5 に示す。実際に斜張橋に採用されるサグ比の範囲 ($0.002 \sim 0.01$) では、1次モードのひずみエネルギー比だけがサグ比の増加とともに増加している。これに対して、同じ範囲で高次モードのひずみエネルギー比はほぼ一定であり、1次モードのひずみエネルギー比より常に小さい。これは1次モードにおいてサグ比が増加するとモード遷移がおき、モード形状が変化するのに対し、高次モードではこのサグ比の範囲ではモード遷移が生じないことによる。ここでは振幅比を0.001としているが、実橋での測定ではもっと小さいことが予想され、モードのひずみエネルギー比はもっと小さくなるものと思われる。しかし、いずれにしても斜張橋ケーブルのひずみエネルギー比の大きさは、1次モードでもせいぜい 10^{-1} のオーダーで、高次モードはもっと小さいことがわかる。この理由は、ケーブルの剛性が主として初期張力によるものであり、その初期張力が非常に大きいためである。このため、斜張橋ケーブルそのものの減衰はとて小さくなってしまふ。

サグ比が0.006 となるような長いケーブルの場合、Fig. 5 より、1次モードのひずみエネルギー比は約0.08、高次モードのは平均で約0.006 とわかる。ケーブルの減衰性に関する既往の実験的研究によれば、ケーブルのロスファクター η は0.06程度と推定され、これより対数減衰率を算出すると、1次モードが0.015、高次モードが平均で0.001 となり、Fig. 1 ～ Fig. 4 の実測データとの整合性は悪くない。

高次モードの対数減衰率の予測値が実測値より小さくなったが、その理由として、高次モードのエネルギー比が振幅に依存することが考えられる。 $(EA/H)^{1/2} = 25$ 、ケーブル傾斜角度 $= 30^\circ$ 、サグ比 $= 0.006$ として、Fig. 6 に振幅比とひずみエネルギー比との関係を示した。高次モードのひずみエネルギー比は振幅の影響を受けているが、1次モードのそれは振幅に対して独立であることがわかる。

Fig. 1 ～ Fig. 4 のケーブル減衰データは、全く同じ条件の下での振動実験結果ではないため、減衰測定の精度も斜張橋によって異なってくるはずである。さらに詳しい定量的な考察を行うためには、難しいことではあるが、データの均質性を確保することが必要となってくる。

5. まとめ 斜張橋ケーブルの減衰特性について、現地振動実験データとケーブルの減衰理論から考察をしたところ、1次のモード減衰が高次モードの減衰より大きく、ケーブルが長くなるとともに大きくなることが明らかとなった。このことは、例えば多々羅大橋クラスの長大斜張橋では、1次モード減衰が既存の斜張橋ケーブルのそれよりかなり大きくなり、1次モードでのレインバイブレーションに対する制振対策が不要になり得ることを示唆している。

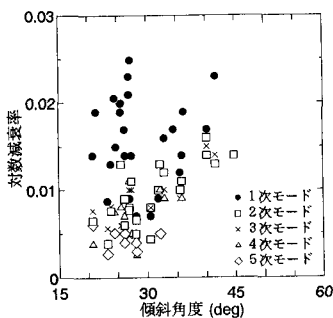
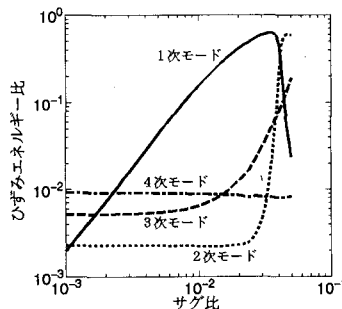
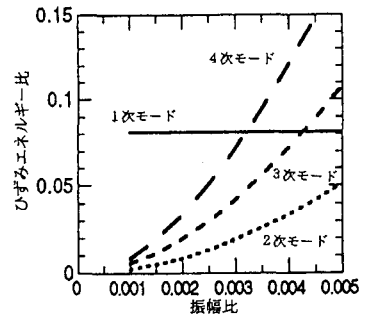


Fig. 4 傾斜角度-対数減衰率

Fig. 5 サグ比-ひずみエネルギー比
($EA/H)^{1/2} = 25$ 傾斜角度 30° 振幅比 0.001Fig. 6 振幅比-ひずみエネルギー比
($EA/H)^{1/2} = 25$ 傾斜角度 30° サグ比 0.006