

東京大学 正員 山口 宏樹
東京電力 正員 下川 洋司
東京大学 正員 伊藤 学

1. はじめに

長大吊橋の耐風安定性を問題とするとき、吊橋の構造から決定される動力学的特性が把握されていることとある程度前提となさうが、特に架設時を対象とする場合には構造上の複雑さからその動特性に未知なる点が多々あると思われる。本報告はこのことを踏まえ、吊橋の完成時および架設時の動力学的特性を再現し得る力学模型を用いて振動実験を行い、おじれ、横たわみ、鉛直たわみの連成振動について架設長等に着目し、考察を加えたものである。

2. 力学模型および実験手法

実験に用いた吊橋力学模型は北備讃瀬戸大橋設計画案の縮尺 $1/110$ のモデルを参考として、問題を単純化するため剛な主塔を有する単径間吊橋とした。模型は動力学的相似性を満足するように通常の教値解析モデルを参考として作製した。一般図を図-1に示す。実験対象とした架設段階は完成系、架設系A(80%架設)、架設系B(50%架設)の3ステップで、まず完成系について補剛桁が水平となるように模型を組み上げ、その後所定の補剛桁部分を切り落とすことにより架設時を再現している。これらの各架設段階に対し、おじれ、横たわみ、鉛直たわみの各変位方向に順次周期外力を加える加振を行い、応答を測定した。

3. 実験結果および考察

おじれ、横たわみ、鉛直たわみ加振のいずれの場合にも加振振動数によらず二つ以上の変位方向に有意な応答振幅を有し、連成振動の発現が種々認められた。これらの有意な連成振動について詳細に検討した結果、発生メカニズム等により数種の連成振動に分類され得ることが明らかとなった。その主たる連成振動を以下に示す。

(1) 連成性固有振動 線形自由振動としてのいわゆる固有振動そのものが連成するものであり、おじれと横たわみの連成振動の場合についての現象である。例として完成系おじれ対称1次、架設系Aおじれ対称1次の連成性固有モードを図-2に示した。モード形は最大振幅で正規化しており、連成振動での各変位成分の割合がわかるようにしてある。なお、おじれの振動モードについてはおじれ角をハンガー取付点での鉛直変位に換算して示した。この種の連成振動特性を補剛桁変位の回転中心をパラメータとして評価した結果、図-3の実線に示すようにその回転中心位置は振幅によらず一定となっている。

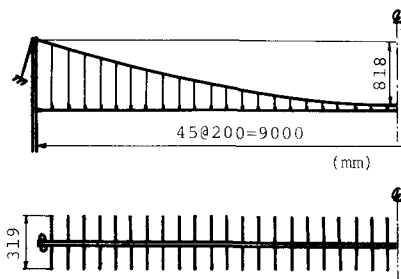


図-1 力学模型一般図

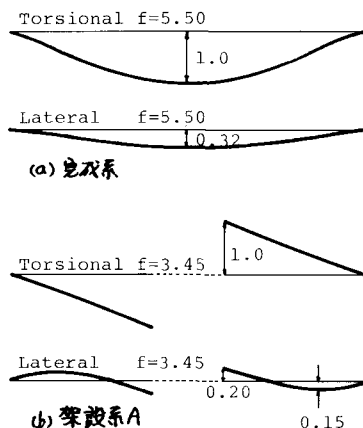


図-2 連成性固有振動モード

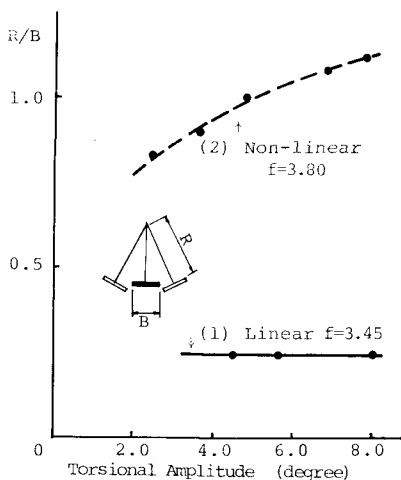


図-3 回転中心位置の振幅依存性

図4は架設系Aの場合の架設先端でのものを示しているが、この回転中心の橋軸方向の変化もみたものが図-4である。振動モード形は対称、非対称と異なるが、完全系と架設系とで回転中心分布が大きく異なり、連成固有振動特性の架設長依存性がうかがえる。

(2)非線形連成振動 振幅に依りその振動性状が変化する非線形性を有した連成振動である。おじれと横たわみの非線形連成振動の例として架設系Aおじれ加振(加振振動数3.80 Hz)を挙げ、そのときの連成振動モードの例を図-5に示す。モード形は図-2の連成固有モードとあまり変わらないものの回転中心に着目すると図-3の破線に示すように振幅に大きく依存してあり、性質の異なる連成振動であることがわかる。回転中心は振幅の増大とともに大きくなっており、大振幅の場合に横たわみ振動の占める割合が大きくなるという。この他非線形連成振動として種々の現象が認められたが、特徴的なものは振幅によって各振動数、各モードが変化する現象であり、おじれ横たわみ、鉛直たわみの連成振動として発現し、特に架設系で多く認められている。

(3)ケーブルに起因する連成振動 ケーブルに起因する連成振動にも種々の現象が観察されたが、特に興味深いものは架設系にみよフリーケーブル独自の非線形振動特性による連成振動であり、おじれ加振時に認められている。つまり、おじれの固有振動数に共振した場合、ケーブルは鉛直振動を主とするが、各振幅がある値以上に達するといわゆる動的不安定現象としての横振動(面外振動)を起し、これによって補剛桁に横たわみ振動を及ぼす現象で、おじれ振動と横たわみ振動とがうなりを有して連成するものである。架設系Aおじれ非対称1次固有振動数付近の振動数でこの種の不安定連成振動が発現する領域を図-6に示した。縦軸は架設先端でのおじれ限界振幅を、横軸は固有振動数に無次元化した加振振動数を表わしているが、限界振幅は固有振動数時に最小となつていくことがわかる。同一のおじれ振動モードに対する補剛桁同一点の限界振幅が架設長によりいかに変化するかをみたものが図-7である。完全系では今回の実験の振幅範囲内(上限0.0印で示した)でこの種の連成振動が認められないのに対し、架設系Bではすべてのおじれ固有振動に對して発現している。

4. まとめ

吊橋の力学模型による振動実験を行い、観察された種々の連成振動を分類整理して考察を加えた。その結果をまとめると、架設時の吊橋は剛性が極めて小さく、特異な動特性を呈し、未架設部のフリーケーブルの存在により連成振動が発生し易いといえる。ただし、それらの連成振動は非線形現象であることが多く、理論的検討は難しく今後の検討課題といえよう。

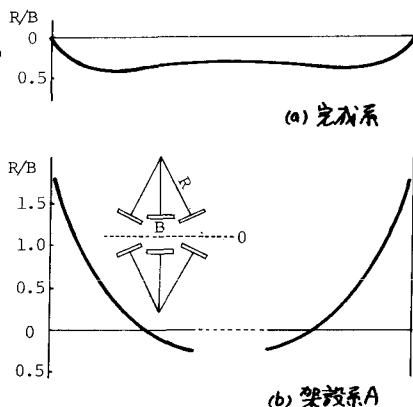


図-4 回転中心の橋軸方向の変化

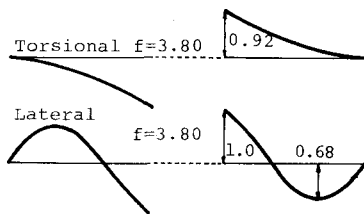


図-5 非線形連成モード(おじれ/横たわみ)

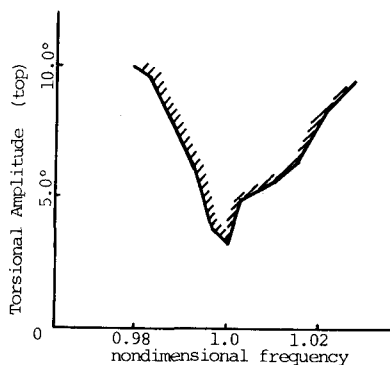


図-6 不安定連成振動発生領域

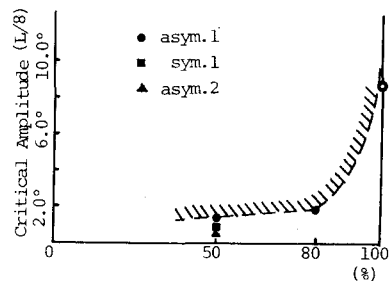


図-7 架設率に對する限界振幅