

山梨県 正員 横山晴生
埼玉大学 正員 山口宏樹
東京大学 正員 伊藤 学

1. はじめに

長大吊橋は一般にフレキシブルな構造であり、耐風安定性照査が設計上重要である。トラス補剛桁吊橋の風による動的不安定現象の中で最も問題となるわねじれフラッターを取扱う場合、吊橋構造の動力学的特性の把握が前提となるが、従来、その特性として無風時における構造特性を考えるのが普通である。しかし、強風を受けた場合、長大吊橋は他の形式の橋梁に比べて大きな静的変位を生じ、その形状変化による、力学的特性が有意に変わることが予想される。従ってわねじれフラッターのようにかなりの強風下で発生することの多い現象を対象とする際には、強風時の風圧により変形した状態での動力学的特性を把握し、その耐風性の影響を明確にすることが必要と思われる。

以上のような観点から、本研究では、風圧による変形の考慮の有無によって吊橋の構造動力学的特性にいくつもの差異が生ずるのかを数値解析により調べ、その差異の耐風性の影響を風洞実験により検討した。

2. 風圧により変形した吊橋の連成振動特性

解析に用いたモデルは従来、吊橋の構造解析に用いられることの多い立体骨組多質点モデルを基本とし、補剛桁の重心位置、せん断中心位置、ハンガー取付位置を正確に再現したものである。解析はまず、風を受けた吊橋の静的変形形状と幾何学的非線形性を考慮して荷重増分法により求め、その変形形状を初期状態として固有振動解析を行った。解析に用いた吊橋諸元は本州四国連絡橋因島大橋設計計画書を基本としており、風荷重としては設計風速に近い風速90 m/sの強風時における補剛桁三カ所およびケーブル抗力を用いた。

まず図-1に吊橋の強風時における静的変形形状を示す。これを見ると補剛桁横たわみそのものは強風時においてもあまり大きくないものの、ハンガー傾斜角が最大15度程度と大きく、強風時の吊橋の動力学的特性が無風時と異なることが予想される。図-2は風圧により変形した吊橋のわねじれ変位卓越1次モードであり、無風時の固有振動モードと比較して示したが、卓越変位であるわねじれモードおよび固有振動数 f_T は無風時と強風時とではほとんど同じであるものの、連成して水平変位モードおよび鉛直変位モードの大きさは強風時のほうが大

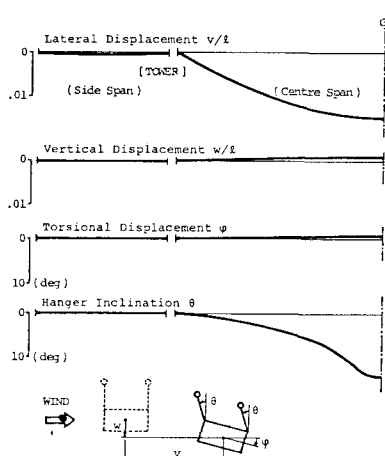


図-1 風圧による静的変形形状

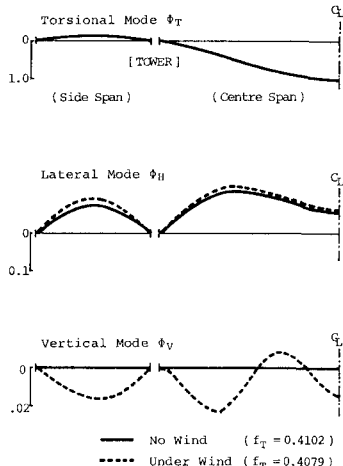


図-2 連成固有振動モード

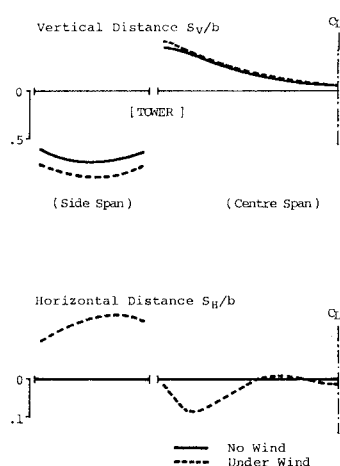


図-3 回転中心位置の分布

さい。特に無風時には全く存在しない鉛直変位成分が強風時には有意な大きさで存在しており、吊橋の固有振動は無風時においてねじれ変位と水平変位のみで連成するのに対し、強風時にはさらに鉛直変位が連成し、連成の度合いも大きいといえる。この連成固有振動はねじれ中心とは異なる回転中心まわりの振動として捉えることができ、回転中心のねじれ中心からの鉛直距離 S_v 、および水平距離 S_H は連成固有振動特性を表わすパラメータとなる。図-3は図-2に示した連成固有モードE回転中心位置を整理したものの2。回転中心位置はスパン方向に変化しているものの、強風時には水平方向に桁幅(2b)の10%程度移動する場合があることがわかる。

3. 吊橋の空力特性に及ぼす回転中心位置の影響

吊橋トラス補剛桁断面の空力特性に及ぼす回転中心位置の影響を調べるために、回転中心位置を断面中心から最大0.25bだけ変化させてバネ支持部で模型風洞実験を行った。実験条件としてはねじれおよび曲げの固有振動数、重量、極慣性モーメント、構造減衰を全2の実験ケースで一定とし、気流は迎角0°の一様流である。

図-4に回転中心の鉛直位置をパラメータとして換算風速 U とフラッター振幅 2ϕ との関係(V-A図)を示す。これを見ると回転中心位置によってV-A図にほとんど差がなく、回転中心の鉛直方向移動はトラス補剛桁断面の空力特性に有意な差異をもたらさないといえる。これに対し、回転中心の水平位置をパラメータとしたV-A図を図-5に示したが、水平方向の回転中心移動はフラッター発振風速を上昇させ、発振風速が3割程度も上昇する場合があることがわかる。この空力特性変化は図-6の風速-減衰図(V-S図)に顕著であり、回転中心が上流側($S_H/b > 0$)にあるか下流側($S_H/b < 0$)にあるかによって空力特性の変化の様子が異なることが見てとれよう。いずれにせよ、回転中心の水平方向移動はねじれフラッター発振風速を上昇させるといえる。



図-4 風速とフラッター振幅との関係 (鉛直移動)

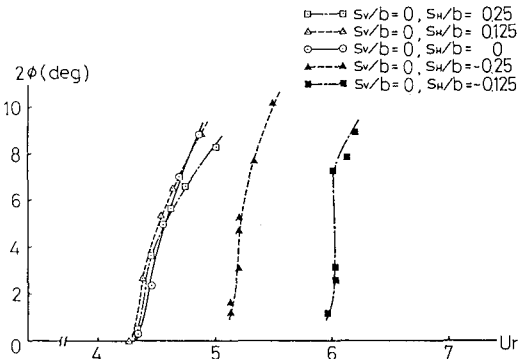


図-5 風速とフラッター振幅との関係 (水平移動)

4. 風圧により変形した吊橋の耐風性

風圧により変形した吊橋の動力学特性としての連成振動がその耐風性にいかに関与するかについて考えれば、回転中心位置の変化、極慣性モーメントの増大等、種々の要因が考えられよう。本研究では回転中心位置に着目したわけであるが、図-3より強風時に回転中心が水平方向に桁幅の3~10%程度移動する場合があり、この程度の移動でも図-6等から2~10%程度のフラッター発振風速上昇が考えられる。この発振風速の上昇量は必ずしも大きいとは言えないが、強風時の連成固有振動に起因する回転中心水平移動はねじれフラッター発振風速を上昇させ、耐風安定性を増大させる効果も有することは注目すべきことである。現在の耐風設計にあるフラッター照査においては風圧による変形を考慮に入れておらず、無風時の動力学特性を基に行っているわけで、より合理的な耐風設計にあたってはこのことを念頭に置く必要があると考えられる。

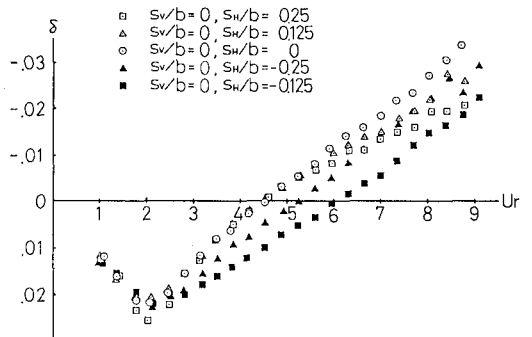


図-6 風速と減衰との関係 (水平移動)