

# 等価非定常空気力係数に着目した超長大吊橋のフラッター特性に関する基礎的研究

京都大学大学院  
鹿島建設㈱  
京都大学大学院

学生員 ○金 起男  
正会員 大窪 一正<sup>1)</sup>  
学生員 松宮 央登

京都大学工学研究科  
京都大学大学院

フェロー 松本 勝  
学生員 伊藤 靖晃  
<sup>1)</sup> 研究当時京都大学大学院

1. はじめに 海峡横断道路プロジェクト構想において活発に検討されている超長大吊橋の中央径間長は明石海峡大橋(1991m)を超えて、2500mから3000mに至る。その実現のためには補剛桁のフラッターに対する安定性を確保することが最重要課題であり、所要のフラッター限界風速を得るために、断面に作用する空気力を低減させる補剛桁形状を選定したり、ケーブルシステムを工夫して全体系のねじれ剛性を高めるなどの提案がなされている。前田らは中央径間長2500mの超長大吊橋を対象に、モード解析結果に基づいたフラッター解析を行い、従来形式吊橋の主ケーブルの張り方をかえたMono-Duo形式においては、対称モードの振動に対して高いフラッター安定性を示すことを明らかにした[1]。しかし、逆対象モードに対しては、それほど安定性の向上は見られない。本研究ではこれを受けて、中央径間長2800mのMono-Duo形式及び従来の平行形式の超長大吊橋を対象に、空力及び構造的、両者の性質を併せ持つ等価非定常空気力係数に着目してフラッター特性の検討を行う。

2. 等価非定常空気力係数 たわみ・ねじれ変位を一般化座標で表し、2自由度運動方程式を整理すると式(1),(2)のようになる。以下の式で、 $p/q$ はたわみ/ねじれ一般化座標、 $m_e/I_e$ は等価質量/等価質量慣性モーメント、 $\mu_\eta/\mu_\phi$ はたわみ/ねじれモード変位である。さらに、式(1),(2)を一般的なフラッター方程式と比較すると、式(3)の各項を非定常空気力係数として評価できる。以下これらを等価非定常空気力係数と呼ぶこととする。吊橋の振動モード形状を制御することで等価非定常空気力係数が制御でき、それに伴い連成フラッター特性の制御も行えることが期待できる。本研究では、等価非定常空気力係数を考慮して複素固有値(CEV)解析とStep-by-step(SBS)解析[2]を行う。

$$\ddot{p}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{p}_i + \omega_i^2 p_i = \frac{\rho b^2 \omega_F}{m_{ei}} \frac{\int \mu_{\eta i}^2 H_1^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx} \dot{p}_i + \frac{\rho b^3 \omega_F}{m_{ei}} \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} H_2^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx} \dot{q}_j + \frac{\rho b^3 \omega_F^2}{m_{ei}} \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} H_3^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx} q_j + \frac{\rho b^2 \omega_F^2}{m_{ei}} \frac{\int \mu_{\eta i}^2 H_4^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx} p_i \quad (1)$$

$$\ddot{q}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \frac{\rho b^3 \omega_F}{I_{ej}} \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} A_1^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx} \dot{p}_i + \frac{\rho b^4 \omega_F}{I_{ej}} \frac{\int \mu_{\phi j}^2 A_2^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx} \dot{q}_j + \frac{\rho b^3 \omega_F^2}{I_{ej}} \frac{\int \mu_{\phi j}^2 A_3^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx} q_j + \frac{\rho b^2 \omega_F^2}{I_{ej}} \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} A_4^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx} p_i \quad (2)$$

$$\frac{\int \mu_{\eta i}^2 H_1^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx}, \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} H_2^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx}, \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} H_3^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx}, \frac{\int \mu_{\eta i}^2 H_4^* dx}{\int \mu_{\eta i}^2 dx}, \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} A_1^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx}, \frac{\int \mu_{\phi j}^2 A_2^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx}, \frac{\int \mu_{\phi j}^2 A_3^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx}, \frac{\int \mu_{\eta i} \mu_{\phi j} A_4^* dx}{\int \mu_{\phi j}^2 dx} \quad (3)$$

3. 等価非定常空気力係数に着目したフラッター特性 検討対象とするモデルは、中央径間長2800m、側径間長1100mを有する3径間2ヒンジの吊橋で、塔頂におけるケーブル間隔を4mとしたMono-Duo形式及びケーブル間隔28mの従来の平行形式吊り橋(図1)である。サグ比は0.1、補剛桁の構造諸元には、幅28m、高さ4mの一箱桁を設定し、その面内曲げ剛性は $6 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 、ねじれ剛性は $8 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ である。Mono-Duo形式吊橋は、主ケーブルに関する極慣性モーメントが従来形式に比べて低減され、さらに、対称ねじれ振動に際して、従来形式に生じる主ケーブル両面の塔頂での橋軸方向相対変位が相殺され、塔頂変位が拘束されることによって、固有振動数が大きくなることが予測される。したがって、超長大吊橋において、対称モードの連成フラッターがクリティカルになるような場合には、耐風安定性を確保することが期待される[1]。しかし、逆対称振動では、ケーブル形式が変わっても固有振動数及びモード形状は大きく変化せず、さらに、補剛桁のねじれ剛性を小さくすると逆対称モードが対称モードに比べて先行して、フラッター発生に支配的なモードになる可能性もある。

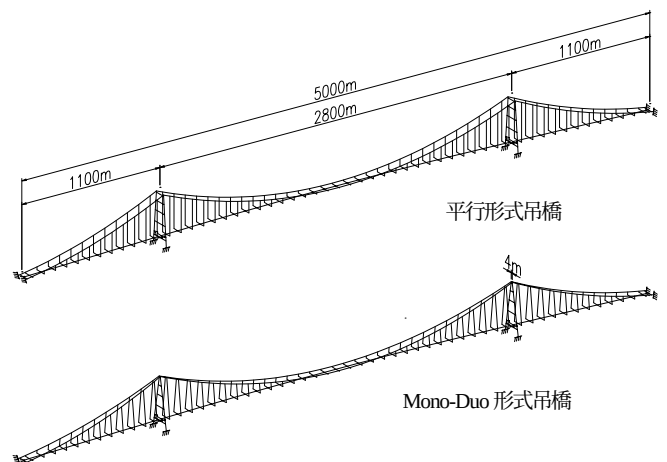


図1. 解析対象吊橋構造モデル

キーワード 等価非定常空気力係数, 連成フラッター, Mono-Duo形式, 振動モード

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-753-5093

Mono-Duo形式吊橋及び平行形式吊り橋の振動モード形状と解析諸元を図2に示す。なお本研究では、たわみ・ねじれ対称1次モード、逆対称1次モードについてのみ考察する。図3に示されるように、2次元平板の空気力を用いたケースにおいて、Mono-Duo形式吊橋の対称1次モードでは、特定の風速域で対数減衰率が若干負となっているものの、高風速域では安定化しており、平行形式吊橋に比べ高い安定性を有しているといえる。一方、逆対称1次モードでは風速30m付近でのフラッター発現が示唆されており、平行形式吊橋と同様、十分な安定性があるとは言えない。また図4に、解析により算出した、Mono-Duo形式吊橋と平行形式吊橋の等価非定常空気力係数を併せて示す。Mono-Duo形式吊橋の対称1次モードにおけるフラッターの安定化のメカニズムを考察すると、従来からその寄与が大きいとされている $[2]A_1^*$ 、 $H_3^*$ による項が、Mono-Duo形式の逆対称1次モード及び平行形式吊橋におけるそれと比較し、低減されていることが確認でき(図4)、これにより連成フラッターが安定化していると考えられる。

**4. 結論** 等価非定常空気力係数を考慮すると、Mono-Duo形式吊橋等により橋梁の振動モードを変化させることで、その積分により算出される等価非定常空気力係数を制御することができ、連成フラッターの安定化が図れることが示された。等価非定常空気力係数のうち、特に、連成項である  $A_1^*$ 、 $H_3^*$ を低減することが、より効果的であると言える。また、分枝のスイッチングを考慮すると、特に高風速域においては $H_1^*$ による安定化効果が重要であると考えられる。今後、より効果的な振動モード形状を持つ吊橋形式等について解析・検討を重ねる必要がある。

### 参考文献

- 1)前田研一 他：補助ハンガーシステムを併用した Mono-Duo 形式超長大吊橋の構造特性，構造工学論文集，土木学会，Vol. 42A, pp. 1049-1060, 1996.
- 2)松本 勝 他：非定常空気力係数に着目したフラッター安定化策についての考察，第13回風工学シンポジウム論文集，pp. 377-382, 1994.

**謝辞** 本研究の遂行にあたり、総合技術コンサルタント宮花邦宏氏に多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表させていただきます。

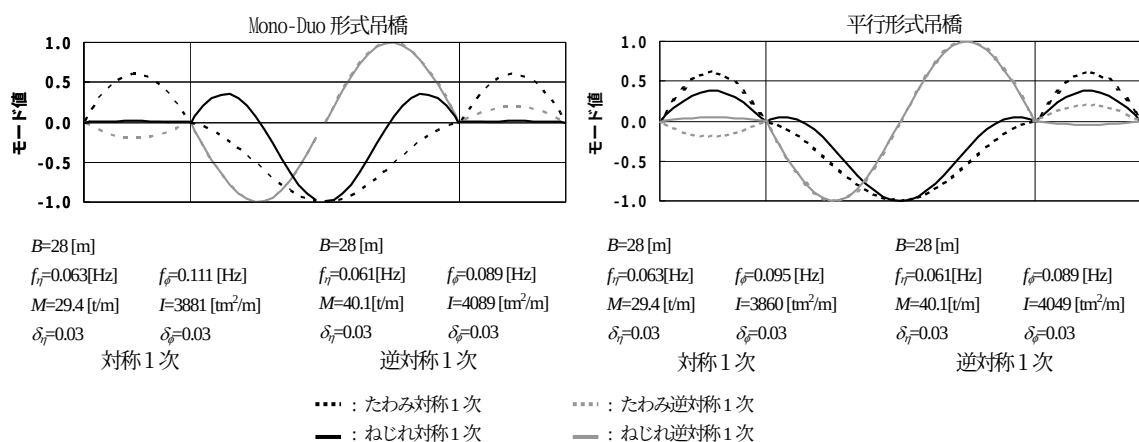


図2. 振動モード形状及び解析諸元

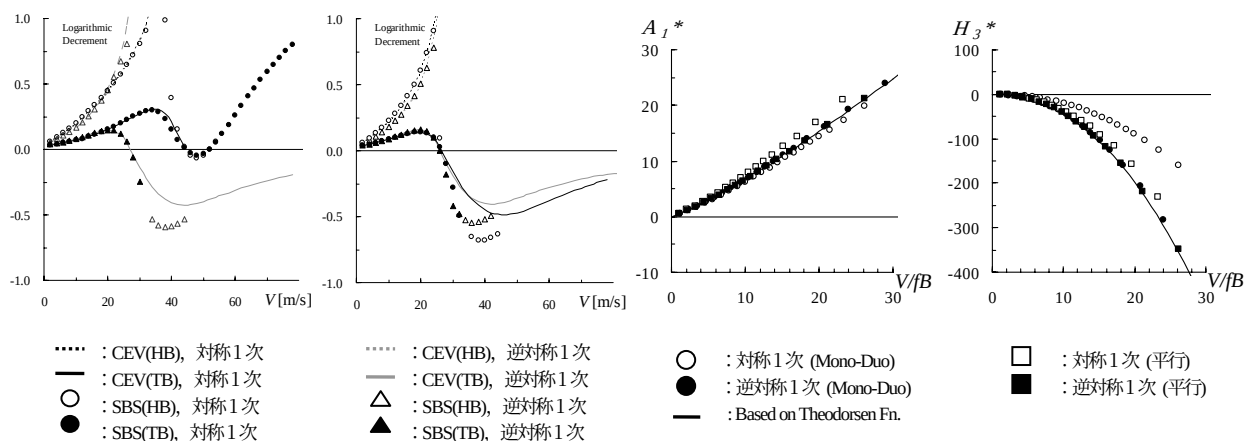


図3. フラッター特性 (2次元平板)

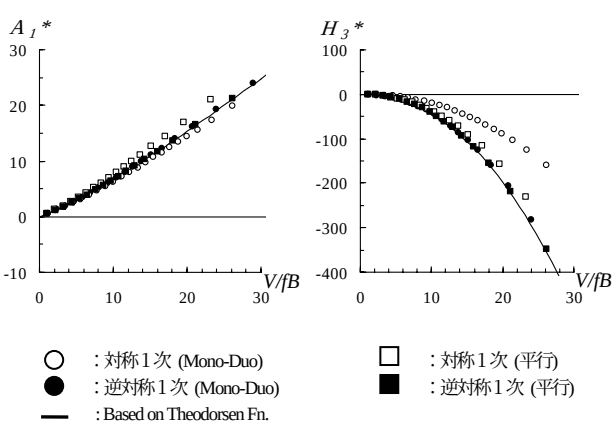


図4. 等価非定常空気力係数 (2次元平板)