

第I部門

等価非定常空気力係数に着目したフラッター安定化に関する基礎的研究

京都大学大学院
京都大学大学院
京都大学大学院

学生員 ○金 起男
学生員 大窪一正
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

1. はじめに Mono-Duo 形式吊橋はその中央径間長が明石海峡大橋 (1991m) を超えて、2500m から 3000m に至る次世代の超長大吊橋形式として期待されている。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る。前田らは Mono-Duo 形式吊橋を対象に、モード解析結果に基づいたフラッター解析を行い、特に対称モードの振動に対して高い耐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 形式吊橋の安定化のメカニズムについて検討を行う。

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、 μ_η/μ_ϕ 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、Mono-Duo 形式吊橋に対して、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. Mono-Duo 形式吊橋のフラッター特性と安定化策 検討対象とするモデルは、中央径間長 2800m、側径間長 1100m を有し、サグ比が 0.1、塔頂におけるケーブル間隔を 4m とした全長 5000m の 3 ヒンジの Mono-Duo 形式吊橋、及びケーブル間隔 28m の従来の平行形式吊り橋(図 1)で、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。従来の平行形式吊橋のケーブルの張り方を変えた 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も、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。Mono-Duo

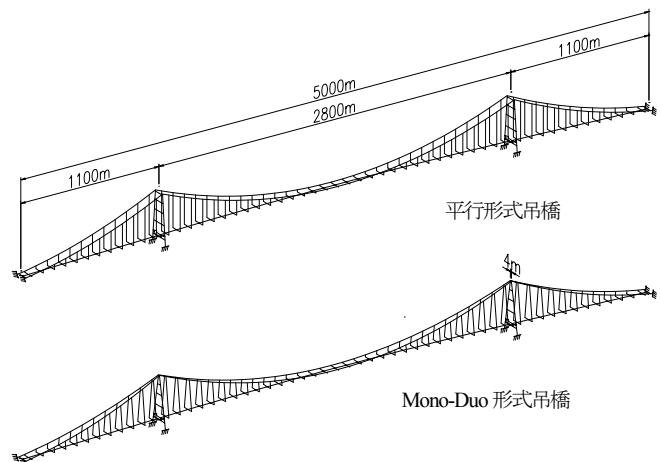


図 1. 解析対象吊橋構造モデル

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。図4から、平行形式吊橋に比べ高い安定性を示すMono-Duo形式吊橋の対称モードでは、通常不安定化効果を示す連成項 H_3^* が大きく低減されていることが確認され、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。

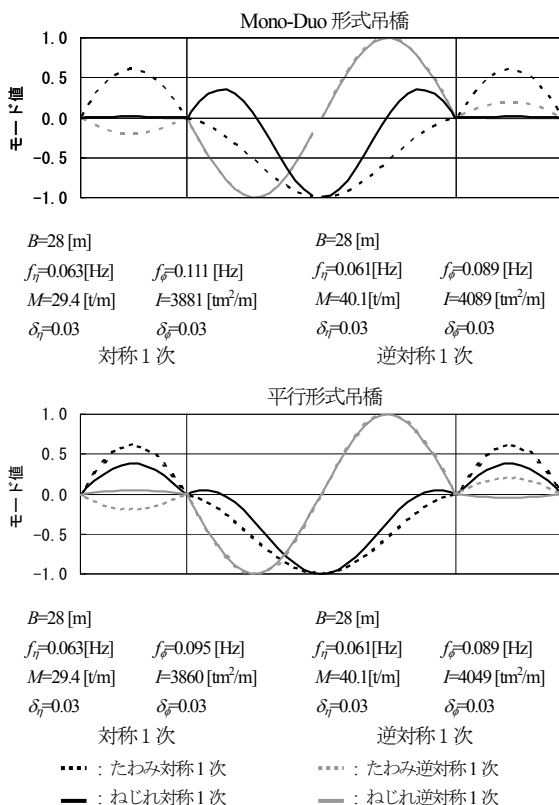


図2. 振動モード形状及び解析諸元

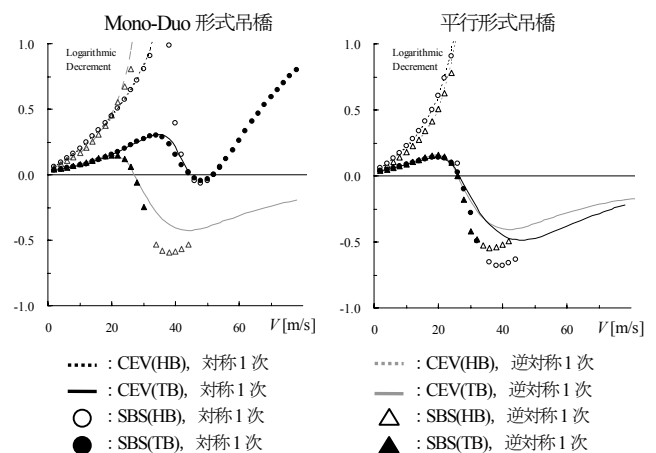


図3. フラッター特性 (2次元平板)

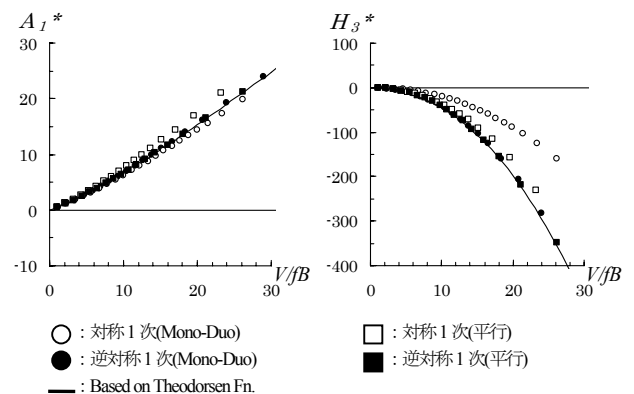


図4. 等価非定常空気力係数 (2次元平板)