

CFD を用いた非定常空気力の推定と迎角による吊橋のフラッター限界風速の変化

東京都立大学 正会員 ○岩下慎吾 パシフィックコンサルタンツ 正会員 中山晃佑
東京都立大学 正会員 中村一史

1. 目的

構造物に作用する風の影響を明らかにする手法として CFD (Computational Fluid Dynamics) が用いられる場面が増えており、計算時間や精度面で課題があるものの、精緻な模型、実験条件で制約を受ける風洞試験に替わる耐風安定性の照査手法として期待される。そこで、本研究では超長大吊橋を対象に、橋梁桁断面の非定常空気力を CFD で求め、モード重ね合わせ法によるフラッター解析¹⁾を実施することで、断面形状や迎角の違いが吊橋の耐風安定性に与える影響を評価した。

2. 解析手法と設計条件

本検討では図-1 に示す 2 種類の断面について耐風安定性を比較する。(a)は明石海峡大橋の設計検討²⁾で示された案で、フェアリング付きの大きな桁高が特徴である。一方、(b)は文献³⁾で検討された五角形断面であり、維持管理上不利なフェアリングをなくし、付加物として地覆がモデル化されている。この断面は、桁本体(1次剥離点)から発生した剥離流を地覆(2次剥離点)と干渉させることで耐風安定性を向上させる剥離干渉法と呼ばれる制振方法を応用したものである。

まず、CFD ではこれらの断面を横 19B、縦 16B の解析領域の中央に配置し、一様流中で鉛直方向に振幅 B/100、角振幅 1°で別々に強制振動させ、たわみ振動とねじり振動に対する非定常空気力を求めた。乱流モデルは k- ω SST モデル、レイノルズ数は 1.1×10^5 である。その後、フーリエ解析により強制振動数の成分を抽出し、式(1)より振幅と位相差から各非定常空気力係数を算出した。本検討では迎角 $\alpha = -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ$ (頭上げ正) の 3 ケースについて同様に求めた。

$$\tilde{L} = \pi \rho B^3 \omega^2 \left(L_{yR} \frac{y}{B} + L_{yI} \frac{\dot{y}}{B\omega} + L_{\theta I} \theta + L_{\theta R} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right)$$

$$\tilde{M} = \pi \rho B^4 \omega^2 \left(M_{yR} \frac{y}{B} + M_{yI} \frac{\dot{y}}{B\omega} + M_{\theta I} \theta + M_{\theta R} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right) \quad (1)$$

ここに、 \tilde{L}, \tilde{M} : 非定常空気力 (揚力, モーメント),
 ρ : 空気密度, B : 幅員, y : 鉛直変位, θ : 回転角,
 ω : 角速度である。

次に、図-2、図-3 に示す支間 3000m の 3 径間吊橋に、これら 2 種類の桁断面を適用したときのフラッター限界風速を求めた。橋の材料諸元を表-1、断面諸元を表-2 に示す。全橋の骨組モデルから固有値を求め、構造減衰定数を 0.02 としてマルチモード連成フラッター解析¹⁾を実施した。ここで、フラッター解析の基礎方程式は式(2)の通りであり、外力項 F に CFD で求めた非定常空気力を代入する。

キーワード 吊橋, フラッター, CFD, 非定常空気力, 補剛桁断面形状

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 9号館 670 室 Email: iwashita@tmu.ac.jp TEL : 042-677-2694

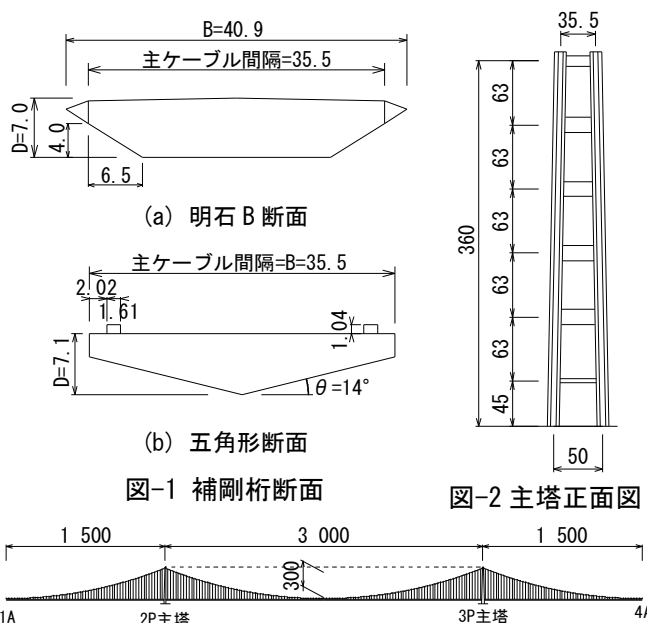


図-1 補剛桁断面

図-2 主塔正面図

図-3 3径間吊橋の一般図

表-1 材料諸元

部材	補剛桁	塔柱	ケーブル	ハンガー
鋼種	SM490Y	SM570	ST1770	ST1570
許容応力(MPa)	210	245-255	981	628
ヤング率(GPa)	200	200	195	195

表-2 主要部材断面諸元

	A(m ²)	I _{yy} (m ⁴)	I _{zz} (m ⁴)	J(m ⁴)
補剛桁	1.117	2.184	174.3	3.651
塔柱	5.495 ~2.804	99.422 ~47.733	223.522 ~46.890	135.835 ~49.406

$$M\ddot{u} + (C - F_I)\dot{u} + (K - F_R)u = 0 \quad (2)$$

ここに、 M ：質量行列、 C ：減衰行列、 K ：剛性行列、 F_I, F_R ：非定常空気力の実部と虚部、 u ：変位である。

3. 解析結果

図-4に、無次元風速40までの非定常空気力係数を示す。一般に、 C_{L0R} 、 C_{MyR} 、 C_{M0R} は絶対値が小さいほど、また C_{M0I} は負で絶対値が大きいほどフラッター限界風速が向上することが知られている⁴⁾。別途、実施した感度解析からは、図を略したが、 C_{MyR} が正で絶対値が大きいほど有利であることもわかった。ここでは、平板に比して有意な差が認められたか、または迎角の影響を受けた C_{L0R} 、 C_{MyR} 、 C_{M0R} 、 C_{M0I} について示す。図中の凡例の実線は、平板空気力を示すTheodorsen関数である。双方とも C_{L0R} 、 C_{M0R} 、 C_{MyR} については平板に比べて有利な傾向を示すが、 C_{M0I} は絶対値が小さいため、前者のフラッター限界風速向上の効果を妨げる可能性があると考えられる。迎角 0° のケースでは C_{MyR} のみ断面による明瞭な差が表れ、明石B断面より五角形断面の方が正側に大きく、有利な傾向となった。迎角別の傾向を見ると、 C_{MyR} について明石B断面は負迎角の方が有利である一方、五角形断面は正迎角で有利な傾向となった。また、五角形断面は $\alpha = -2^\circ$ のとき C_{L0R} 、 C_{M0I} がともに絶対値が減少しており、互いの効果は相反すると考えられる。

図-5に、迎角別のフラッター限界風速 U_{cr} を示す。平板空気力を適用した際の U_{cr} は48.9m/secである。 $\alpha = 0^\circ$ における U_{cr} は五角形断面(59.9m/sec)の方が明石B断面(54.4m/sec)を上回った。

明石B断面は負迎角側で U_{cr} が高く、 $\alpha = \pm 2^\circ$ の範囲で53.2~59.3m/secと迎角の影響は比較的緩やかである一方、五角形断面は正迎角側で U_{cr} が高く、50.9~67.7m/secと迎角に対してやや敏感な性質であることが示された。

4. まとめ

非定常空気力係数が U_{cr} に与える影響は既往の検討と同様であり、今回のケースでは特に C_{MyR} の傾向に左右される結果となった。また、フラッター限界風速に基づく空力性能は、迎角に対する感度が異なるものの両断面はほぼ同等であった。五角形断面については底面角 $10^\circ \sim 12^\circ$ がより耐風安定性に優れる³⁾とされており、今後この底面角がフラッター限界風速を向上させる可能性について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 岩本政巳：吊形式橋梁に関するフラッターを中心とした空力振動予測，東京大学学位論文，1995。
- 2) 保田雅彦，吉田好孝：明石海峡大橋における鋼構造物の設計施工，溶接学会誌，第60巻，8号，pp.642-650，1991。
- 3) 野田辰徳，久保喜延，木村吉郎，加藤九州男，大窪一正，吉田健太：五角形断面桁の静的空力特性に与える底面傾斜角の影響に関する研究，土木学会論文集A，Vol.65，No.3，pp.797-807，2009.8
- 4) 松本勝，小林裕輔，浜崎博：非定常空気力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。

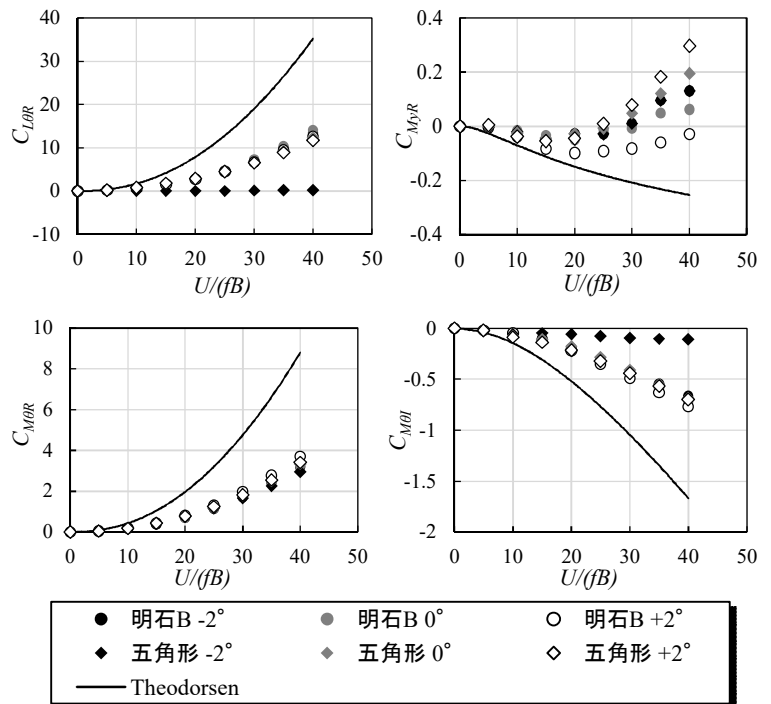


図-4 非定常空気力係数の比較

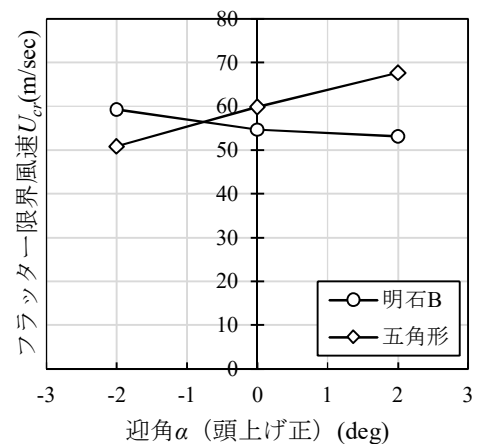


図-5 迎角別フラッター限界風速