

数値流体解析を用いた付加物を有する二箱桁断面橋梁の耐風安定性評価

中央大学大学院 学生員 川崎貴之 中央大学 正会員 平野廣和
中央大学 正会員 佐藤尚次

1. はじめに

フラッターは発散型現象であり、直接構造物の破壊につながるため、長大・超長大橋の耐風安定性断面の開発には、フラッター性能の向上が必要不可欠な課題である。これまで、断面形状や各種付加物をパラメータにした風洞実験や数値流体解析(CFD)による検討が行われており、一箱桁橋の静的空気力係数や非定常空気力係数は、概ね実験値と整合した CFD 結果が報告されている。しかし、耐風安定性に優れた断面である二箱桁断面は、流れの干渉により複雑な流れ場となるので実験結果と CFD が一致しない場合がある。このため、空力特性に与える影響について、十分な説明が必要であると指摘されている¹⁾。

このような背景より、今後は CFD と風洞実験の相互利用による断面開発が有効なツールになると考えられる。そこで、本研究では高欄や検査車レールなどを除去した二箱桁断面において、まず 2 次元及び 3 次元静的解析を行い、風洞実験結果との比較検討をする。次に、静的解析で精度が良好な範囲での 2 次元、3 次元動的解析を行い、非定常空気力係数を算出しその評価をする。そして、振動の発生原因の特定や耐風性能の向上要因を明らかにするとともに、二箱桁断面橋梁でのフェアリング・センターバリアなどの付加物の有効性を示唆することを目的とする。

2. 解析手法・解析条件

流れ場の支配方程式は、非圧縮 Navier-Stokes 方程式で記述する。乱流モデルは 2 次元解析には RANS の SA (Spalart-Allmaras) モデルを、3 次元解析には LES の SGS(Smagorinsky)モデルを採用する。数値流体解析には、丸岡ら²⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を適用する。

図-1 に本研究で用いた 3 種類の断面形状を示す。ここで断面¹⁾は、断面辺長比 $B/D=4$ (B : 桁幅, D : 桁高) と開口部幅 $4D$ を組合せた二箱桁であり、本研究ではこの断面を基本断面とする。断面²⁾は、断面¹⁾にフェアリングを付加したものであり、断面³⁾は断面¹⁾にセンターバリアを付加したものである。ここでの断面¹⁾・断面²⁾は、出野ら³⁾の研究グループが明石海峡大橋を超える長大橋を想定して行った風洞実験断面である。本研究では、この風洞実験との比較のため、同一の寸法を用いてモデル化を行っている。

表-1 に解析条件を、図-2 に解析領域を示す。解析領域は風上側断面から前方は $11.5D$ 、風下側断面から後方は $23.5D$ 、側方は $11.0D$ としている。境界条件は、流入境界で無次元流速である一様流速 1.0 、流出境界は移流境界条件とする。また、側方で slip、物体周りで no-slip 条件である。

表-1 解析条件

断面形状	断面 (2-D)	断面 (2-D)	断面 (2-D)	断面 (3-D)	断面 (3-D)	断面 (3-D)
Reynolds数 Re	3.0×10^6					
時間増分 Δt	$0.01D/U$	$0.01D/U$	$0.005D/U$	$0.02D/U$	$0.02D/U$	$0.01D/U$
最小要素幅	$0.00035D$	$0.00035D$	$0.00035D$	$0.0005D$	$0.0005D$	$0.0005D$
総節点数	58801	43119	46878	24049×33	20755×33	25744×33
総要素数	58264	42724	46460	23648×32	20448×32	25348×32
軸方向長さ				$3.2D$	$3.2D$	$3.2D$
軸方向分割				32	32	32
軸方向幅				$0.1D$	$0.1D$	$0.1D$
モデル定数 Cs				0.1	0.1	0.1

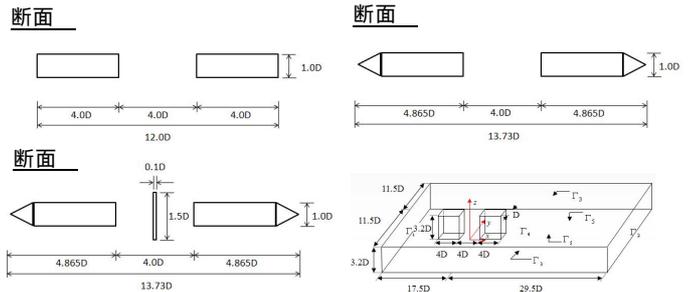


図-1 断面形状

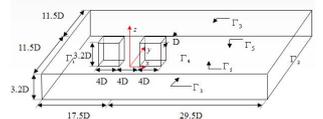


図-2 解析領域

3. 解析結果

3.1 静的解析

図-3 に平均抗力係数 C_d 、平均揚力係数 C_l 、平均空力モーメント係数 C_m の迎角静的解析結果及び実験結果を示す。まず、図-2(a)の平均抗力係数に着目すると、断面¹⁾、断面²⁾は断面³⁾に比べ、迎角を増加させても抗力が低く抑えられていることから、抗力低減効果のある断面であることが判る。さらに、図-2(b)・図-2(c)の平均揚力係数・平均空力モーメント係数に着目すると、断面¹⁾での両係数の勾配は、迎角を大きくしても断面²⁾のそれらより小さく抑えられているのがわかる。これより、断面¹⁾に比べて断面²⁾のほうが耐風安定性に優れた断面形状であることが言え、フェアリングとセンターバリアを同時に付加することで振動現象を発生させる空気力の低減効果が確認できる。

また、断面¹⁾の静的空気力の値と、実験値との整合性に関しては、2次元解析では迎角 $\alpha=4^\circ$ を超えると乖離の傾向が見られるが、基本設計で扱われることの多い迎角範囲内 ($\pm 3^\circ$) においては、概ね実験値と一致している。これに対し、3次元解析では全解析範囲で良好な精度が得られている。このことから、開口部の要素分割数を十分にとることで、基本設計段階における断面¹⁾の2次元解析の適用が、限定的ではあるが可能であると考えられる。一方、断面²⁾では、2次元解析は $\pm 3^\circ$ 以内でも実験値との乖離が見られるが、3次元解析は概ね整合している。これはセンターバリアのような大規模剥離を伴う現象には、2次元解析では複雑な流れによる渦を正しく再現することが難しいためであり、基本設計段階においても LES での3次元解析が必要であると考えられる。

3.2 動的解析

静的解析の結果より、断面の迎角 $\alpha=0^\circ$ 時において 1 自由度たわみ・ねじれ強制加振の 2 次元、および 3 次元動的解析をおこなった。なお、強制加振は、たわみ片振幅 $\eta=0.1D$ 、ねじれ片振幅 $\theta=1.0\text{deg}$ とした。たわみ・ねじれ振幅の振動時における非定常揚力 L と非定常空力モーメント M は、8 個の非定常空力係数を用いて次式のように表される。

$$L = \pi \rho B^2 \omega^2 \left(C_{L\eta R} \eta + C_{L\eta I} \frac{\dot{\eta}}{\omega} + C_{L\theta R} B \phi + C_{L\theta I} \frac{B \dot{\phi}}{\omega} \right) \quad (1)$$

$$M = \pi \rho B^3 \omega^2 \left(C_{M\eta R} \eta + C_{M\eta I} \frac{\dot{\eta}}{\omega} + C_{M\theta R} B \phi + C_{M\theta I} \frac{B \dot{\phi}}{\omega} \right) \quad (2)$$

一般的に非定常空力係数のうち、特に $C_{M\theta I}$ がフラッター風速に大きく影響を与えられており、 $C_{M\theta R}$ は連成フラッターに対する安定性を向上させる効果があると言われている。4)-5)

図 4 にねじれ強制加振の非定常空力係数の結果を示す。2 次元解析の結果は $C_{M\theta I}$ の整合性は良いものの、その他の係数に関しては乖離の傾向がみられる。しかし、3 次元解析の結果は $C_{M\theta I}$ の結果が良好であるに加え、 $C_{M\theta R}$ やその他の係数でも精度の良い結果となっている。このことから、2 次元解析はフラッター風速に影響を及ぼす $C_{M\theta R}$ の精度が良いため、フラッター風速の予測にも限られた条件の範囲であるならば適用可能であると考えられる。一方、3 次元解析は $C_{M\theta R}$ やその他の係数の精度も良好なため、フラッター風速の予想は広範囲で適用可能だと考えられる。

4. おわりに

本研究のまとめを以下に記す。

- (1) 断面のような流れがスムーズな断面においては、開口部の要素分割数を十分とることで、限定的に迎角 $\alpha = \pm 3^\circ$ 以内において 2 次元解析が一部適用できることがわかった。このことは、基本設計段階などの検討に利用可能である。
- (2) センターバリアのような大規模剥離を伴う現象には基本設計段階から 3 次元解析を行うことの必要性を示唆した。
- (3) 静的解析での結果が良好である範囲 ($\alpha = \pm 3^\circ$) であれば、2 次元動的解析でもフラッター風速に影響を及ぼす係数の整合性は得られた。
- (4) 3 次元動的解析ではどの非定常空力係数においても整合性が得られたことから、広範囲でのフラッター発現風速の予測への可能性を示した。

今後の課題として CFD の結果よりフラッター解析を行い、フラッター発現風速の実験値との比較をする。また、各断面の 3 次元動的解析を行い、付加物の有無によるフラッター性能の変化を定量的に検討していく。そして、フェアリングやセンターバリアといった付加物が振動状態の断面にどのような効果があるのかを可視的に検証する。

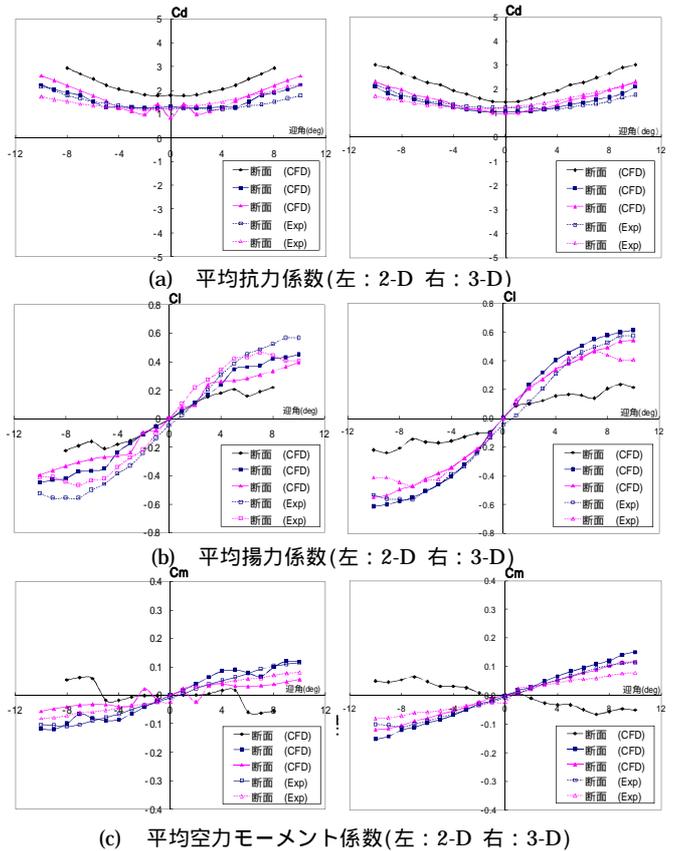


図 3 静的空力係数の解析結果及び実験結果

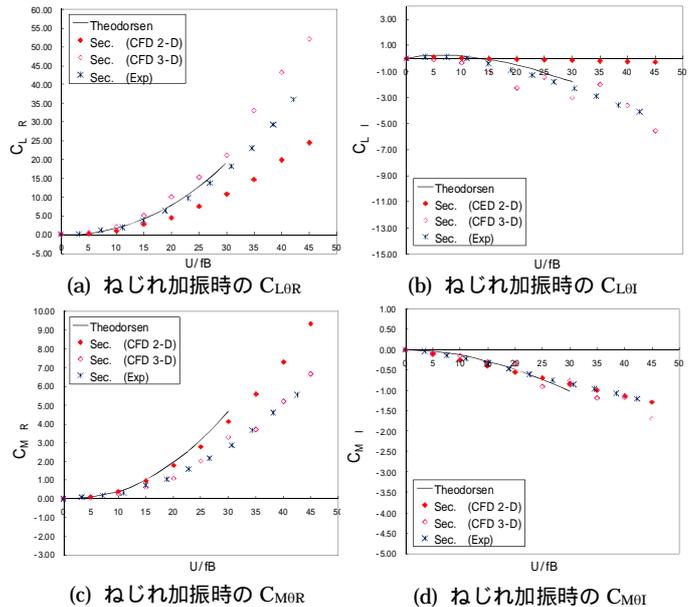


図 4 非定常空力係数の解析結果及び実験結果

参考文献

- 1) 松本勝, 白土博通他: 鉛直板付き分離箱桁のフラッター特性, 第 18 回風工学シンポジウム pp.311-316, 2004.
- 2) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原陸人: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮性粘性流れの解析, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp.383-394, 1997.
- 3) 出野麻由子, 吉住文太他: 付加物を有する二箱桁断面における耐風安定性の検討, 構造工学論文集, Vol. 53A, 2007.
- 4) 松本勝, 小林裕輔他: 構造基本断面における連成フラッターの発生機構に関する研究, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, pp.359-364, 1994.
- 5) 上島秀作, 黒田真一他: 数値流体解析による扁平な二箱桁断面の非定常空力特性の評価, 第 20 回風工学シンポジウム, pp.299-304, 2008.