

数値流体解析を用いた二箱桁断面橋梁におけるフラッター特性についての検討

○東海旅客鉄道(株) 正会員 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

明石海峡大橋を超える規模の超長大橋の検討において、経済性・耐風性に優れる桁断面として二箱桁断面が提案されている。このような橋梁断面の形状や付加物の決定には、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、二箱桁断面においては、流れの干渉により複雑な流れ場となることから、風洞実験結果とCFDが一致しない場合が報告されている。このため、空力特性に与える影響に関しては、十分な検討と現象の解明が必要であると指摘されている¹⁾。

また、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。これはフラッター現象が、発散型現象で直接構造物の破壊につながるためであり、二箱桁断面橋梁におけるフラッター特性に関しても十分な検討が必要となっている。

そこで、本研究では東京湾横断道路を想定した二箱桁断面を対象とし、高欄や検査車レールなどを除去したモデルで、3次元数値流体解析を行う。具体的には、静的及び動的解析、フラッター解析を行い、既往の実験値との定量的な精度比較や流れ場の可視的検討を行う。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・条件

流れ場の支配方程式は、非圧縮 Navier-Stokes 方程式で表され、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。また、乱流モデルには LES の Smagorinsky モデルを採用する。

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、 $B/D=4$ (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②にセンターバリアを付加したものである。ここでの断面②・断面③は、出野ら³⁾が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。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①(2-D)	断面②(2-D)	断面③(2-D)	断面①(3-D)	断面②(3-D)	断面③(3-D)
Reynolds数 Re	3.0×10^4	3.0×10^4	3.0×10^4	3.0×10^4	3.0×10^4	3.0×10^4
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 C_s				0.1	0.1	0.1

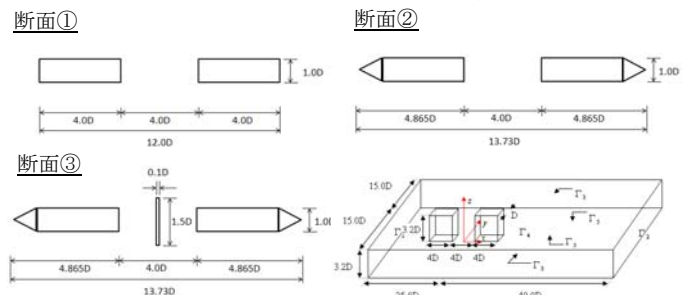


図-1 断面形状

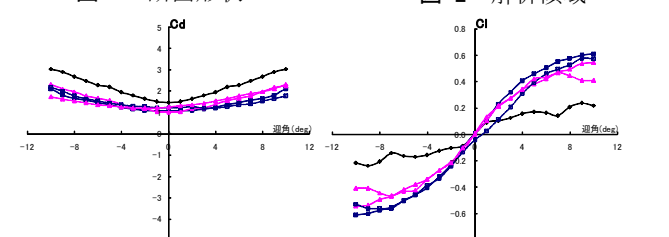


図-2 解析領域

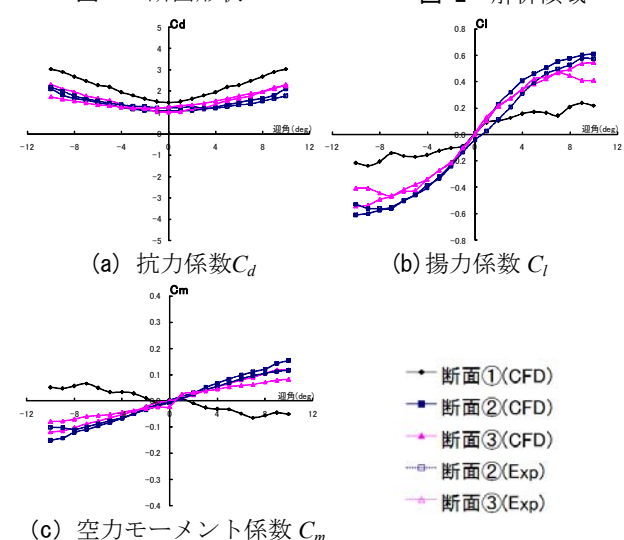


図-3 静的空気力係数の解析結果と実験結果の比較

3. 解析結果

3.1 静的空気力解析

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 の静的空気力解析結果及び風洞実験結果³⁾を併せて示す。

図-3(a)の C_d に着目すると、断面②、断面③は断面①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わかる。さらに、図-3(b)と図-3(c)の C_l と C_m に着目すると、両係数の勾配比較より、断面③が最も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の低減効果が推察される。また、解析結果と実験結果との整合性に関しては、全解析範囲で良好な精度が得られている。

3.2 非定常空気力動的解析

静的空気力解析の結果より、正確な流れ場の再現ができたと考えられ、静的解析結果を初期条件に1自由度たわみ・ねじれ強制加振の非定常空気力動的解析を行う。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、風洞実験値³⁾と同様の値を設定する。

図-4に非定常空気力係数のうち、フラッター性能に影響を及ぼすと言われている係数¹⁾の結果を示す。各係数を比較すると、無次元風速 $U/(fB)=15.0$ 以上でそれぞれの断面で特性が異なっている。また、実験値と解析結果を比較すると、断面②はよく整合した結果が得られている。しかし、断面③は高風速域において若干の乖離がみられる。これは、出野ら³⁾の実験断面③は高欄や検査車を考慮したものであったため、これらの付加物の影響だと考えられる。

次に図-5に流れ場の状態として、非定常空気力係数に変化が表れ始める $U/(fB)=15.0$ 時の瞬間圧力分布図と瞬間流線図を示す。図-5の瞬間圧力分布図より、断面①では上流断面の前縁より強い剥離剪断層がみられ、桁断面へ強い変動圧力が発生していると考えられる。一方、断面②・断面③ではフェアリング付加により剥離剪断層が小さく抑えられている。また、図-5の瞬間流線図より、断面③ではセンターバリアを付加することで下流断面の再付着位置が、断面①・断面②とは異なり側面へと変化している。このことが、下流断面の変動圧力を低く抑え、非定常空気力の低減に寄与していると考えられる。

3.3 フラッター解析

非定常空気力係数を用いてたわみ・ねじれ2自由度フラッター解析をおこなう。その際の構造諸元を表-2に示す。フラッター解析の結果、たわみ減衰率はどの形状においても常に正の値を示したため、ねじれフラッターのみが問題となる。

図-6にフラッター解析より算出された風速 U と対数減衰率 δ の関係を示す。図-6より、断面②の解析結果と風洞試験結果を比較すると、ほぼ同様の値となっている。これは非定常空気力係数が精度良く求められたためだと思われる。次に、表-3に断面形状の違いによるフラッター発現風速を示す。風洞実験と解析の結果を比較すると、ほぼ同程度の値を示し、断面②では約2%の差、断面③では約5%の差と良好な精度でフラッター発現風速を予測できている。各断面を比較すると、すべての断面がTheodorsen理論よりも高い結果となり、開口部を有する橋梁断面の耐風性の高さがうかがえる。特に、断面③のフラッター発現風速は断面①と比較して約1.3倍程度大きく、フェアリングとセンターバリア同時付加の有効性が確認できる。

4. おわりに

本研究では、各種付加物の異なる二箱桁断面を取り上げ、耐風安定性能やフラッター性能について定

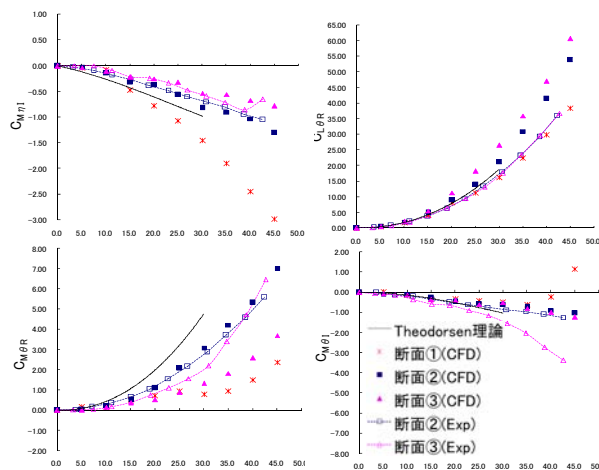


図-4 非定常空気力係数の解析結果と風洞実験結果

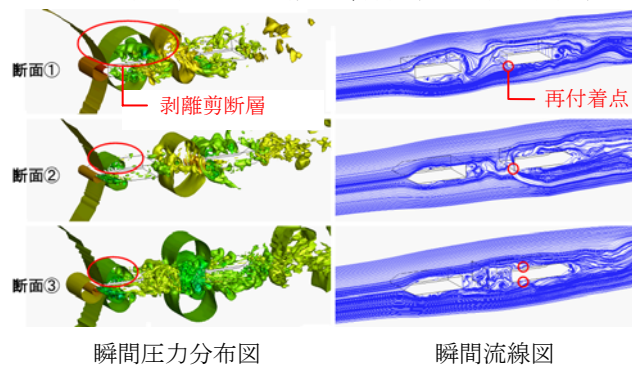


図-5 強制加振時の流れ場(たわみ加振 $U/fB=15.0$)

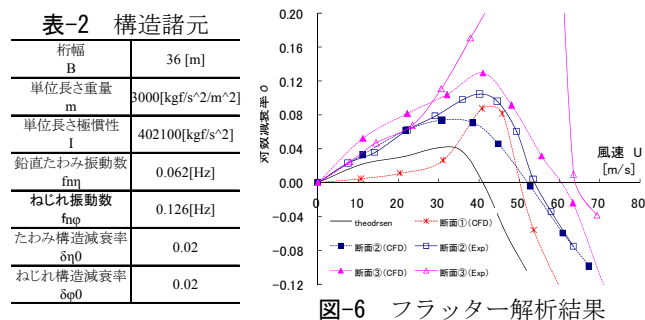


図-6 フラッター解析結果

表-3 フラッター発現風速の比較

	フラッター発現風速 U_{cr}		風速差 $\{(i)-(ii)/(i)\}$
	Exp (i)	CFD (ii)	
断面①		50.2 m/s	
断面②	53.4 m/s	52.1 m/s	2.43%
断面③	63.7 m/s	60.4 m/s	5.18%
Theodorsen	41.0 m/s		

量的、可視的に検討した。そして、高精度で各種空気力係数、フラッター発現風速を算出することができ、耐風安定化部材の有無によるフラッター性能も再現することができた。今後の課題としては、高欄や検査車レールといった付加物の形状や、設置位置の違いによるフラッター性能の違いも検討する。

〈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.