付加物を有する二箱桁断面における耐風安定性の検討

A study on the aerodynamic stability of 2-box girder with various attachments

出野麻由子* , 吉住文太**, 曽我明***, 井上浩男**** Mayuko Deno, Fumitaka Yoshizumi, Akira Soga, Hiroo Inoue

- * 三井造船株式会社 技術本部 CAE センター (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4)
- ** 三井造船株式会社 技術本部 CAE センター (〒706-0014 岡山県玉野市玉原 3-16-1)
- *** 三井造船株式会社 鉄構・物流事業本部 鉄構設計部 (〒870-0395 大分県大分市日吉原 3) **** 三井造船株式会社 技術本部 技術総括部 (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4)

Flutter stabilization is one of the most important engineering problems in wind-resistant design of long-span bridges, particularly constructed in a large strait crossing project. Previous investigations have shown 2-box girder sections get superior stability performances against flutter through various attachments. However the mechanism of flutter stabilization has not been cleared thoroughly. In this study, the aerodynamic characteristics and the flutter stability performance of 2-box girder sections with attachments are examined by wind tunnel tests and complex eigen value analyses. Tested attachment sets are combinations of three typical devices of the center barrier, the parapets and the rails for a maintenance carrier. The mechanism of stabilization in each attachment set is explained from the change of important components in unsteady aerodynamic derivatives.

Key Word: flutter, 2-box girder, unsteady aerodynamic forces キーワード: フラッター, 二箱桁断面, 非定常空気力

1. はじめに

次世代海峡横断道路プロジェクトの実現に向けて, 超 長大橋の耐風安定性、特にフラッター性能の向上が重要 な課題である. フラッター性能の向上に関して, これま でに、断面形状やガイドベーン、センターバリア等の付 加物の種類をパラメータとした実験的検討が行われてき た 1)-4)など、その中で、二箱桁断面は付加物の微妙な違い で耐風性が敏感に変化することからも、断面改良の余地 は大きいといえる. また, 超長大橋向けの箱桁は, 比較 的扁平であるものの、付加物の影響も含め平板翼理論の ような理論解析の適用は難しい. そこで, これまで, 各 種付加物は風洞試験により試行錯誤的に決定されてきた が, それらが空力特性に与える影響については, 不明確 な点が多い. 本研究では、高い耐風性を有する二箱桁断 面の開発を目的に、付加物をセンターバリア、検査車レ ール, 高欄の基本的な3種に限定して, これらの有無・ 位置をパラメータにした三分力試験,非定常空気力試験, 及び2次元フラッター解析を実施し、フラッター性能が 向上する理由を,非定常空気力係数の変化から考察した.

2. 試験概要

断面辺長比B/D=4 (B: 桁幅, D: 桁高)の矩形角柱を並列に置き、また桁幅と同じ長さの開口部を有する図-1に示すような二箱桁断面に三角形状のフェアリングを付けた断面を基本断面として製作した. なお、この断面は数値流体解析および実験による三分力特性から良好な耐フラッター性能が期待される断面であり5, 今回の検討は引き続き、動的空気力の確認と付加物による更なる耐風性の向上を目的として実施したものである.

付加物としては図-2に示すように、センターバリア、高欄、検査車レールとし、センターバリアの有無、検査車レール(二箱桁とも設置)の有無とその位置をパラメータとした。供試模型を写真-1に、試験対象断面の一覧表を表-1に示す。なお、以下の記述では表-1の断面名称を用いて、基本断面を A、高欄+センターバリアの断面に検査車レール位置 2、3、4 を組み合わせたものをそれぞれ BC1D2、BC1D3、BC1D4、高欄とセンターバリアのみの断面を BC1 と記す。風洞試験はいずれも、三井造船(株)昭島研究センター内にある構造物用低速風洞にて、大振幅非定常空気力測定装置 6を用いて実施し

た. 非定常空気力試験時の供試模型の設定迎角は、本研究が超長大橋を想定していることから、高風速時にはマイナス迎角(頭下げ)の静的ねじれ変形が生じることを想定し、迎角 $\alpha=0^\circ$ の他に、 $\alpha=-5^\circ$ でも試験を実施した。また、強制加振は、たわみ片振幅 $\eta=4.8$ mm(B/ 100^7): B はフェアリング無しの模型幅)、ねじれ片振幅 $\phi=1.0$ deg. $\eta=1.0$ 0 一定振幅とし、いずれのケースでも加振振動数 $\eta=1.0$ 1 とした。試験風速は、三分力試験では $\eta=1.0$ 1 とした。表の他、計測サンプリング周波数はいずれのケースにおいても全て $\eta=1.0$ 1 に設定した。

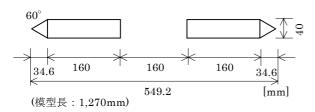
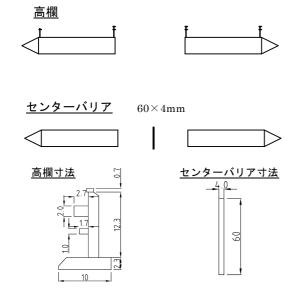


図-1.基本断面模型



検査車レール

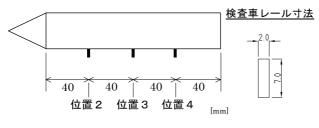


図-2.付加物の種類

写真-1.供試模型



表-1.試験対象断面一覧

断面数	断面名称	付加物
1	Α	なし(基本断面)
2	BC1D2	高欄+センターバリア+検査車レール位置2
3	BC1D3	高欄+センターバリア+検査車レール位置3
4	BC1D4	高欄+センターバリア+検査車レール位置4
5	BC1	高欄+センターバリア

3. 三分力特性

図-3(a)~図-3(c)に、三分力試験から算出した抗力係数 (Cd)、 揚力係数 (Cl)、 モーメント係数 (Cm) の結果を示す。三分力係数は、次式に基づき算出した.

$$Cd = rac{Pd}{rac{1}{2} \rho \ V^2 An}$$
 -(1) $Pd:$ 抗力 $Pl:$ 揚力

$$Cl = rac{Pl}{\displaystyle rac{1}{2}
ho \; V^2 BL}$$
 -(2) V : 風速 ho : 空気密度

An: 投影面積 $(An = 0.0508m^2)$

$$Cm = \frac{Pm}{\frac{1}{2}\rho \ V^2 B^2 L}$$
 $-(3)_{L}^{B}$: 模型幅 $(B = 480mm)$
 L : 模型長 $(L = 1270mm)$

また,表-2(a),表-2(b)には,迎角 0° 及び- 5° に おける Cd の値と Cl, Cm の勾配を示している. ここで, Cm の変化に注目すると、付加物を設置した断面の Cm は、付加物を設置しない基本断面 Aの Cm よりも小さな 値となっている. 特に 0° 付近の勾配 $dCm/d\alpha|_{\alpha=0}$ を比較 すると BC1 と BC1D3 では、その絶対値が小さくなって おり、迎角-15°~+15°で全体にわたって基本断面 A よ りも Cm の勾配は非常に小さくなっている. しかし、迎 角 0°で BC1 は負勾配, BC1D3 は正勾配であるという違 いがある. また、検査車レールを設置した場合のレール の設置位置による $dCm/d\alpha|_{\alpha=0}$ 及び、 $dCm/d\alpha|_{\alpha=-5}$ は、 BC1D2 は負勾配, BC1D3 では正勾配で勾配は非常に小 さくほぼフラットの状態, BC1D4 は正勾配であるという 顕著な変化が見られた. Cm の勾配だけで比較すると, -15°~+15°の間で BC1D3 の勾配はフラットに近い状 態で非常に小さく、迎角に対する Cm の変化が小さいこ とがわかる. Cl は-15° \sim 0° では基本断面 A と付加物を

設置した断面ではほぼ同様の特性を示しているが、 0° ~ +15°になるとCIの値,勾配は基本断面Aよりも付加物 を設置した断面の方が小さくなっていることがわかる. また $dCm/d\alpha|_{\alpha=0}$ と同様に、 $dCl/d\alpha|_{\alpha=0}$ も BC1D3 が最も 小さい値となっており、迎角に対する CI の変化が小さい ことがわかる.

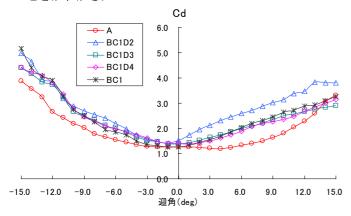


図-3(a). 抗力係数 Cd の迎角による変化

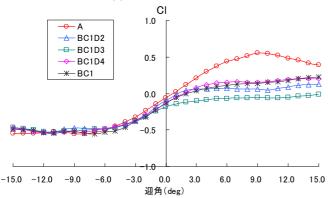


図-3(b). 揚力係数 Cl の迎角による変化

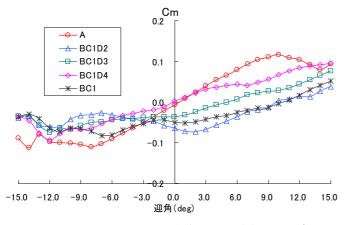


図-3(c). モーメント係数 Cm の迎角による変化

表-2(a). 迎角 0°における Cd の値, Cl, Cm の勾配比較

	$\operatorname{Cd} \mid_{\alpha=0}$	$dC1/d\alpha \mid_{\alpha=0}$	$dCm/d\alpha \mid_{\alpha=0}$
Α	1.27	4.87	0.88
BC1D2	1.53	4.98	-0.42
BC1D3	1.38	2.83	0.16
BC1D4	1.40	4.75	0.67
BC1	1.26	5.00	-0.20

表-2(b). 迎角-5°における Cd の値, Cl, Cm の勾配比較

	Cd $\mid_{\alpha=-5^{\circ}}$	$dC1/d\alpha\mid_{\alpha=-5^{\circ}}$	$dCm/d\alpha\mid_{\alpha=-5^{\circ}}$
BC1D2	1.98	1.38	-0.27
BC1D3	1.84	1.83	0.07
BC1D4	1.87	1.65	0.37
BC1	1.74	1.88	0.59

4. 非定常空気力係数

4.1 非定常空気力係数の定義

たわみとねじれの連成振動をする桁断面に作用する非 定常揚力,および非定常モーメントは,8個の非定常空 気力係数を用いて表される⁸⁾. 本報では非定常空気力係 数を以下のように定義する.

$$\begin{split} m \Big(\ddot{\eta} + 2\zeta_{\eta 0} \omega_{\eta 0} \dot{\eta} + \omega_{\eta 0}^{2} \eta \Big) &= L = \\ \pi \rho B^{2} \omega^{2} \Bigg(C_{L\eta R} \eta + C_{L\eta I} \frac{\dot{\eta}}{\omega} + C_{L\theta R} B \phi + C_{L\theta I} \frac{B \dot{\phi}}{\omega} \Bigg) \\ I \Big(\ddot{\phi} + 2\zeta_{\phi 0} \omega_{\phi 0} \dot{\phi} + \omega_{\phi 0}^{2} \phi \Big) &= M = \\ \pi \rho B^{3} \omega^{2} \Bigg(C_{M\eta R} \eta + C_{M\eta I} \frac{\dot{\eta}}{\omega} + C_{M\theta R} B \phi + C_{M\theta I} \frac{B \dot{\phi}}{\omega} \Bigg) \end{split} \tag{5}$$

ここに,

m:単位スパン長あたりの質量

I: 単位スパン長あたりの慣性モーメント

 $\zeta_{\eta 0} \cdot \zeta_{\phi 0}$: たわみ・ねじれの構造減衰定数

 $\omega_{n0} \cdot \omega_{\phi 0}$: たわみ・ねじれの固有角振動数

: 単位スパン長あたりの非定常揚力(上向き正)

: 単位スパン長あたりの非定常モーメント (頭上げ 正)

: たわみ変位(弦長中央点, 上向き正)

: ねじれ変位(頭上げ正)

U : 風速

: 空気密度

: 全弦長(B=480mm)

: 角振動数(ω=2πf , f: 振動数(Hz))

: 時間微分

4.2 非定常空気力試験結果

図-4~図-7に非定常空気力試験結果より算出した 非定常空気力係数の結果を示す。 図中の Theodorsen 理 論は平板翼理論値⁹⁾である。今回の対象断面のような扁 平な箱桁ではねじれ振動が卓越する連成フラッターが発 生すると考えられ, 橋梁断面のフラッター安定性に関し ては、一般的に非定常空気力係数のうち $C_{M_{\theta},I}$, $C_{L_{\theta,R}}$, $C_{M_{\pi^{\rm I}}}$ の寄与が大きく、 $C_{M_{\theta^{\rm I}}}$ が負でその絶対値が大きい

ほど、また $C_{L_{\theta,R}}$, $C_{M_{\pi,I}}$ はその絶対値が小さいほど、フ ラッターには安定型であることが知られている ¹⁰⁾⁻¹¹⁾. さらに C_{MeR} の絶対値が小さいほどねじれ振動数の低下 を防ぐことができ、たわみ振動と連成しにくくなるため、 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. 試験結果の図-3(c),図-5(d)からわかるように、ね じれ振動における減衰項である $C_{M_{\theta}I}$ は三分力試験の C_{m} の勾配に対応した結果を得ている. すなわち, BC1, BC1D2 の $C_{M_{\theta I}}$ はねじれ 1 自由度において不安定を示す 正値であり、一方 BC1D3、BC1D4 の CM & I は負値となっ ており、ねじれ1自由度において安定である. C_{Mel} の絶 対値の大きさも $dCm/d\alpha|_{\alpha=0}$ の絶対値の大きさと対応し て A と BC1D4 が大きいことがわかる. 迎角 0° における $C_{M_n,I}(\boxtimes -4(d))$ の絶対値は BC1 と BC1D3 が他の断面に 比べて小さい値を示している.次に、迎角 0° における $C_{L,\theta,R}(図-5(a))$ の絶対値を比較すると、BC1D3 は他の断 面に比べて半分程度の大きさであり特徴的な差異を示し ている. また, 他の断面は同程度の値を示している. ね じれ振動数の減少に関わる $C_{M\,\theta\,R}$ の値を比較すると, BC1D3 の $C_{M \theta R}$ は迎角 0° では、ねじれ振動数を低下さ せる正値を示しているが A, BC1D4 の 1/3 以下の値であ る(図 – 5(c)).

次に超長大橋では高風速時にはマイナス迎角の静的ね じれ変形が生じることを想定して実施した迎角-5°にお ける非定常空気力試験結果について考察する. 迎角 0° と-5°とでは-5°の方がいずれの断面も各係数の絶対値 は小さくなる傾向にある. C_{LAR} の絶対値は, 迎角 0° の ときは BC1D3 が他の断面に比べて小さく特徴的な傾向 を示したが、-5°ではどの断面も同程度の値を示してお り, 差異は小さかった(図-7(a)). $C_{M \in I}(\boxtimes -7(d))$ を比 較すると、迎角 0° のときと同様にBC1D2 はねじれ1 自 由度において不安定を示す正値であり、BC1D3 および BC1D4 は安定側の負値となっている. また, BC1 におい ては迎角0°と-5°で $C_{M_{\theta I}}$ の符号が逆転しており、迎角 -5°ではねじれ1自由度において安定である負値を示し た. $C_{M_n I}(\boxtimes -6 (d))$ は迎角 0° のときと同様に BC1D3 の 絶対値が他の断面よりも小さい. 一方, 迎角 0° のとき に他の断面に比べて最も小さい値を示した BC1 の $C_{M_n I}$ は迎角-5°では $C_{M_{\theta I}}$ の場合と同様に正負が逆転し、その 絶対値も他の断面よりも大きい値となっている. BC1 の 0°と-5°で正負が逆転する特徴は、迎角によってフラッ ター特性が大きく変化する可能性があることを表してい ると言える. C_{MAR} についても迎角 0° のときと同様に迎 角-5°でも BC1D3 は他の断面に比べて絶対値が小さく, ほぼゼロに近い非常に小さい値となっている(図-7(c)). 迎角-5°でも BC1D3 ではねじれ振動数の低下が抑制さ れ,たわみ振動と連成しにくい傾向にあることがわかる. また迎角 0° では小さい値を示した BC1 は、 -5° では値 が大きくなり正負も逆転するという $C_{M_{\theta}I}$, $C_{M_{\eta}I}$ と同様 の傾向となっている.

図-3の静的三分力係数をみると、BCID3 では迎角に対する CI、Cm の変化が少なく、BCI では迎角 0° と- 5° で CI、Cm の変化の特徴が大きく変わっている。このような静的三分力の傾向は、非定常空気力係数の傾向と対応している。

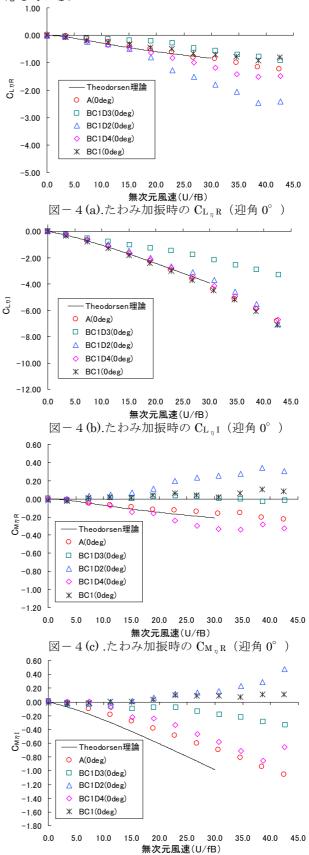
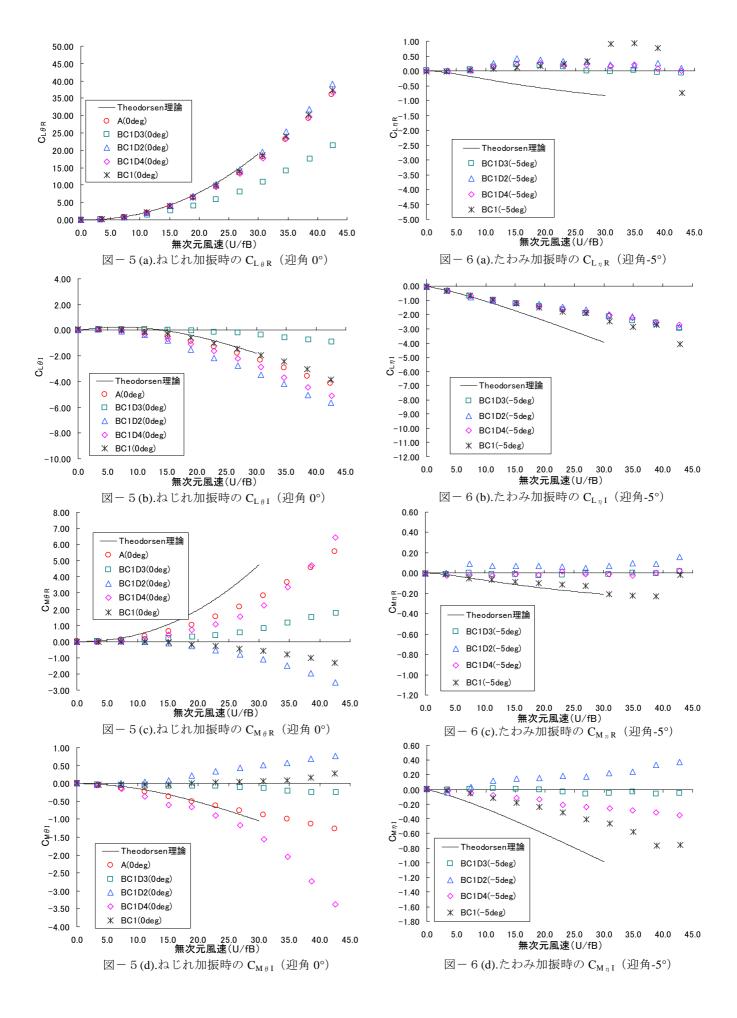


図-4(d).たわみ加振時の C_{M_nI} (迎角 0°)



50.00 45.00 40.00 35.00 Theodorsen理論 □ BC1D3(-5deg) 30.00 25.00 BC1D2(-5deg) BC1D4(-5deg) 20.00 15.00 10.00 5.00 0.00 10.0 20.0 25.0 30.0 0.0 5.0 15.0 35.0 40.0 45.0 無次元風速(U/fB)

図-7(a).ねじれ加振時の C_{L n R} (迎角-5°)

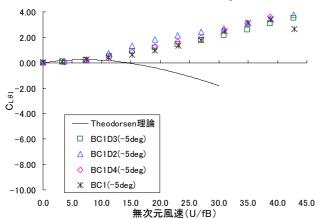


図 -7 (b).ねじれ加振時の $C_{L_{\theta}I}$ (迎角-5°)

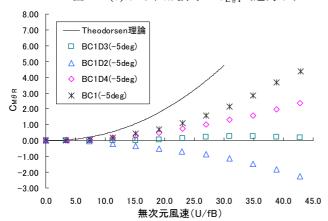


図-7(c).ねじれ加振時の $C_{M \theta R}$ (迎角-5°)

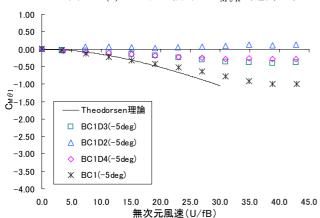


図-7(d).ねじれ加振時の $C_{M_{\theta}I}$ (迎角-5°)

5. フラッター解析結果

非定常空気力試験から得られた非定常空気力係数を用いて式(4),(5)の複素固有値問題を解くたわみ・ねじれ2自由度フラッター解析を実施した.解析では,実風速を仮定し,振動数について収束計算を行った.表-3にフラッター解析の際の構造条件を示す.この条件は支間2800mを想定した吊橋の鉛直曲げ,ねじれの各1次モードの諸元を基にしたものである¹⁾.

図-8~図-9に, 迎角 0° と -5° のときの, 風速 U と対数減衰率 δ の関係, および, 風速 U と振動数 f の関係を示す. また, 表-4はフラッター発現時の風速をまとめた一覧表である.

ねじれ振動における減衰項である CMeI が負の連成フ ラッタータイプでは、表-4のとおり C_{Mel} の大きさが フラッター性能と直接結びつかない結果となった. すな わち、負でその絶対値が大きい方が有利とされる CMai の絶対値が小さかった BC1 (迎角 0°) と BC1D3 (迎角 -5°) で,120m/sまでフラッターが発現しない結果を 得ている. これは、連成項 $C_{L_{\theta}R}$, $C_{M_{\eta}I}$ の改善に加え、 ねじれ剛性に関わる $C_{M\,\theta\,R}$ の改善が寄与しているといえ る. すなわち $C_{M
eta R}$ の絶対値を小さく抑えることができ た BC1 (迎角 0°), BC1D3 (迎角- 5°) では, 図-8 (b), 図-9(b)からもわかるとおり、ねじれ振動数の低下の度 合いが他の断面に比べると格段に小さく, その結果, た わみ振動と連成しにくくなり, フラッターが発生しない 結果を得たと考えられる. また, 非定常空気力係数の結 果から推察できるように、迎角によりモーメントの非定 常空気力係数の正負が逆転し絶対値の特徴も大きく変わ った BC1 は,0°では,前述したとおり120m/sでもフラ ッターは発生しなかったが、-5°では、65m/s でフラッ ターが発生し,迎角によりフラッター特性が大きく変化 する結果を示している.

迎角 0° の BC1D3 と BC1D4 は通常の連成フラッターであると考えられる. $C_{M\theta I}$ を見ると BC1D4 の方がねじれ 1 自由度では安定であるが、 $C_{M\theta R}$ が BC1D3 の方が小さくたわみと連成しにくいことと、連成空気力である $C_{L\theta R}$, $C_{M\eta I}$ も BC1D3 の方が小さく、トータルとしてBC1D3 の方が BC1D4 よりも連成フラッターに有利な条件となっている.

BC1D2 は迎角 0° 、-5° ともに $C_{M_{\theta 1}}$ に主導されるねじれフラッターであると考えられ、符号の変化に対応してフラッターが発現する結果となっている.迎角 0° の BC1 も、ねじれ振動数を変化させる $C_{M_{\theta R}}$ や連成空気力 $C_{M_{\eta I}}$ 、 $C_{L_{\theta R}}$ が迎角 0° の BC1D2 と同様の傾向であるが、BC1D2 と異なりフラッターは発生していない.これは、BC1 では、 $C_{M_{\theta I}}$ が不安定となるのは高風速域で、その風速域では連成空気力が安定側に働きトータルで安定化されていると考えられるが、一方で BC1D2 は連成空気力の影響が小さい低風速域で $C_{M_{\theta I}}$ が不安定となっており、

このことが BC1 のフラッター特性との違いをもたらしていると考えられる.

表一3.解析条件

Analysis conditions				
b(=B/2)=	18 [m]			
m=	3000 [kgf•s^2/m^2]			
I=	402100 [kgf·s^2]			
fη0=	0.062 [Hz]			
fφ0=	0.126 [Hz]			
δη0=	0.02			
δφ0=	0.02			

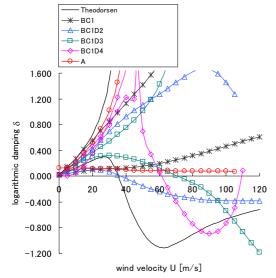


図-8(a).フラッター解析〈風速-対数減衰率の関係〉 (迎角 0°)

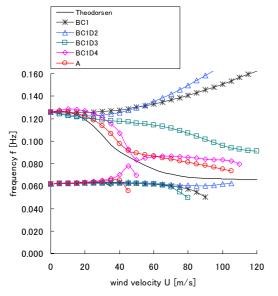


図-8(b).フラッター解析〈風速-振動数の関係〉 (迎角 0°)

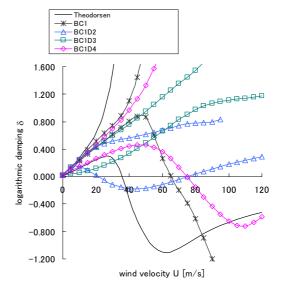


図-9(a).フラッター解析〈風速-対数減衰率の関係〉 (迎角-5°)

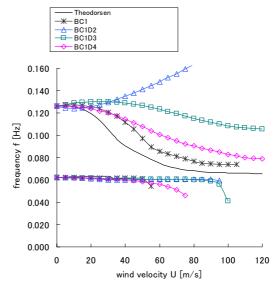


図-9 (b).フラッター解析〈風速-振動数の関係〉 (迎角-5°)

表-4.フラッター解析結果

Critical wind velocity, $lpha$ =0 $^{\circ}$					
Section	Ucr		U/(fB)cr		
	[m/s]	ratio κ			
Theodorsen	35.1	1.00	10.1		
Α	45.5	1.30	13.8		
BC1	120.0	↑ 3.42	↑ 20.5		
BC1D2	35.0	1.00	7.8		
BC1D3	70.0	2.00	17.5		
BC1D4	60.1	1.71	19.4		
Critical wind velocity, α =-5 $^{\circ}$					
BC1	65.0	1.85	21.7		
BC1D2	20.0	0.57	4.4		
BC1D3	120.0	↑ 3.42	↑ 31.6		
BC1D4	70.1	2.00	20.5		

↑: 表示以上であることを示す.

6. まとめ

高い耐風性を有する二箱桁断面の開発を目的に,付加 物をセンターバリア、検査車レール、高欄の基本的な3 種類に限定した二箱桁断面に対して, 三分力試験, 非定 常空気力試験、2次元フラッター解析を実施した. その 結果, 限定された3種類の付加物だけで, 迎角 0°のフ ラッター発現風速が 70m/s, 迎角-5° では風速 120m/s ま でフラッターが発生しない耐風安定断面を確認した. ま た,付加物によりフラッター性能が向上した理由を,非 定常空気力係数の変化から考察した. 連成フラッター特 性には、 $C_{M \theta I}$ 、 $C_{L \theta R}$ 、 $C_{M \eta I}$ $C_{M \theta R}$ が複雑に影響を及ぼ し合うが、本研究で対象とした断面では $C_{M_{\theta}I}$ の影響は 小さく,連成空気力 $C_{L_{\theta,R}}$, $C_{M_{\eta,I}}$ の低減に加え,ねじれ 剛性に関わる CMAR がフラッター特性に大きく影響して いることが明らかとなった. すなわち, $C_{M\theta R}$, を小さく 抑えることができた BC1(迎角 0°)と BC1D3(迎角-5°) では、ねじれ振動数の低下を回避でき、たわみ振動と連 成しにくくなった結果, フラッター安定性に優れた断面 になったものと考えられる.

なお、本研究は、ねじれ、たわみの各1自由度加振で 計測した非定常空気力係数に基づきフラッター特性を検 討したものであるが、今後は2自由度のバネ支持試験に て実際の応答を確認する必要があると考える.

参考文献

1) 佐藤,楠原ら:超長大橋の一様流中における耐風性, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp. 351-356, 2000

- 2) 佐藤, 萩原ら:開口部付箱桁を有する超長大橋の耐 風性に関する検討,第14回風工学シンポジウム論文 集,pp. 407-412,1996
- 3) 楠原, 佐藤ら: 開口部を有する箱桁断面の非定常空 気力に及ぼす迎角の影響, 第54回年次学術講演会, pp. 684-685, 1999
- 4) 佐藤,萩原ら:開口部を有する偏平箱桁の非定常空 気力特性に関する考察,構造工学論文集,vol. 44A, pp. 937-942, 1998
- 5) 渡邊, 井上, 丸岡: 3次元数値流体解析による箱桁 基本断面の静的空気力特性の検討,第58回年次学術 講演会 pp. 235-236, 2003
- 6) 森島,井上ら:大振幅非定常空気力測定装置の開発 (第一報),日本風工学会誌,第78号,1999
- 7) 橋梁の耐風設計-基準と最近の進歩-, 土木学会, pp. 31, 2003
- Scanlan R.H., Beliveau J.G., and Budlong K.S.: Indicial Aerodynamic Functions for Bridge Decks, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of ASCE., vol. 100, EM4, August, pp. 657-672, 1974
- Theodorsen, T.: General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter, NACA TR No. 496, 1934
- 10) 松本,新原ら:構造基本断面のフラッター発生機構 に関する研究,構造工学論文集,vol.40A,pp. 1019-1024,1994
- 11) 松本,小林ら: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

(2006年9月11日受付)