

センターバリア付一箱桁断面の有迎角時非定常空気力特性に関する一考察

Investigation on flutter derivatives of mono-box girder section with center barrier

村上琢哉*

Takuya Murakami

*: 工修 JFE 技研 土木・建築研究部 (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1)

This paper deals with the flutter derivatives of mono-box girder sections at some angles of attack. Firstly, The wind tunnel tests for measurement of flutter derivatives were carried out for a mono-box girder section with B/D ratio of 6.74. Next flutter analyses were conducted by using measured flutter derivatives. It is found that the flutter derivatives is less affected by the direction of bending motion between angles of attack -9 and 9 deg.. The mono-box girder section with center barrier, whose height is the same as the standard central guard fence, keeps good flutter performance between the angle of attack -6 deg. and 6 deg., compared with the standard mono-box girder section. The height of center barrier has different flutter performance in large angle of attack. The effectiveness of center barrier can be explained by the flutter derivatives of $M_{\theta i}$.

Key Words: flutter derivatives, angle of attack, mono-box girder, flutter analyses

キーワード: 非定常空気力係数, 迎角, 一箱桁断面, フラッター解析

1. まえがき

近年の長大橋では、維持管理を含んだコスト削減の観点から偏平箱桁断面が多く採用されている。その傾向は今後も継続されるであろう。

わが国の海峡横断プロジェクトで計画されている中央径間 2,000m を超える超長大橋についても箱桁断面を中心に検討がすすめられており、例えば、二箱桁断面¹⁾、開口一箱桁断面²⁾などの新形式箱桁断面が検討されている。一方、中央径間 1,000m 程度の長大吊橋においても従来形式の一箱桁断面が採用されている。しかしながら、今後に向けて、効率的な社会資本整備を目指した場合には、現在の桁断面よりも狭い幅員が必要となる可能性が高い。この場合、桁高は桁内部の維持管理上の面から下限値が決定されるため、断面辺長比 B/D (B: 幅員, D: 桁高) は小さくなることから、耐風性は悪化する傾向にある。さらに、桁のねじれ剛性が小さくなるため、暴風時のねじれ変形が大きくなることから、有迎角時のフラッター性能の確保が重要となる。

一箱桁断面のフラッター対策については、センターバリアが簡便な方法として知られている。その効果は、センターバリアの高さによっても変化するが、概ね迎角 0° 、 $\pm 3^\circ$ の範囲で 5~10% 程度の発現風速の上昇が期待できる³⁾が、大迎角時のセンターバリア付箱桁断面の空力特性を扱った検討事例は多くない。

フラッター解析に必要な非定常空気力係数を用いてフラッター性能を考察する研究も近年活発に行われている。松本らは、様々な断面について、非定常空気力係数がフラッター安定性に及ぼす影響を検討しており、フラッター安定性の向上につながる非定常空気力係数を明確にし

ている⁴⁾。

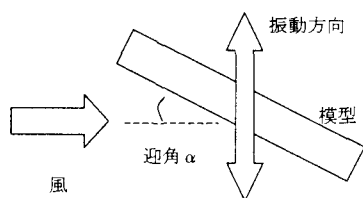
有迎角時の非定常空気力特性を議論する上では、迎角を持つ場合のたわみ振動の与え方が非定常空気力特性に与える影響が山田らによって指摘されている⁵⁾。すなわち、たわみ振動の与え方として、図-1に示すように、振動軸を迎角の有無と無関係に風洞軸と直交する気流軸を直角にとる場合 (同図(1)) と振動軸も風洞模型回転に従い回転させる場合 (同図(2)) があり、非定常空気力試験の測定上の問題が生じる。そこで、トラス断面を対象に自由振動応答を逆解析する手法により非定常空気力係数を計測した結果、迎角 $\pm 3^\circ$ の範囲でも少なからず違いが認められており、振動方向の違いを考慮して変換を実施しても説明がつかないことが報告されている。

以上より、本論文では、有迎角における一箱桁断面の非定常空気力特性について議論する。対象とする断面は、比較的小さい B/D=6.74 のフェアリングを有する一箱桁断面を選定し、迎角は $\pm 9^\circ$ までの従来よりも大きい範囲における非定常空気力特性を検討した。具体的には、たわみ振動の与え方が非定常空気力特性に与える影響を検討した上で、一箱桁断面の有迎角時の非定常空気力特性を、中央防護柵、路肩防護柵の存在、特にセンターバリアの効果、センターバリアの高さにおける迎角特性に着目して検討した。

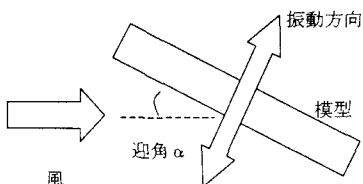
2. 検討概要

2. 1 検討断面

対象とした断面は、図-2に示す B/D=6.74 のフェアリング付一箱桁断面を基本とした。模型の弦長は B=311.4mm、桁高は D=46.2mm である。試験断面は、中



(1) 模型を回転させる方法



(2) 加振軸を回転させる方法

図一 1 迎角の与え方と振動方向

中央防護柵、路肩防護柵の有無による影響を調べるために、幾つかの断面を対象とした。中央防護柵は、高さ $h=12.3\text{mm}$ の通常の柵状に加えて、同じ高さのセンターバリア ($h/D=0.27$)、 $h=23.1\text{mm}$ のセンターバリア ($h/D=0.54$) とした。本模型は、幅員 20.2m 、桁高 3m の一箱桁断面を想定している。

2. 2 非定常空気力試験

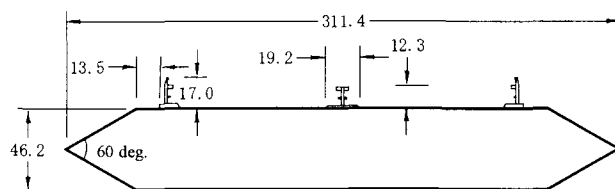
本研究では、強制加振試験を実施した。主とした試験方法は文献⁶⁾に準拠している。加振振動数 $2\sim 2.5\text{Hz}$ 、たわみ振幅は弦長の 1% 、ねじれ振幅 1deg として、無次元風速 24 まで計測した。試験迎角 α については、 $\alpha=0^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 6^\circ$ 、 $\pm 9^\circ$ とした。迎角の設定方法は、たわみ加振については、模型を回転させる方法 (図一1(1)に相当)、加振軸を回転させる方法 (図一1(2)に相当) の2通りで実施し、ねじれ加振は模型を回転させる方法で計測した。試験ケースについては、たわみ振動の与え方の影響については、主に迎角 $\pm 6^\circ$ 、 $\pm 9^\circ$ を中心に検討した。計測された非定常空気力係数は、以下の式で定式化した。

$$D = \pi \rho B^3 \omega^2 \left[D_{zr} \frac{Z}{B} + D_{zi} \frac{\dot{Z}}{B\omega} + D_{\theta r} \theta + D_{\theta i} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right]$$

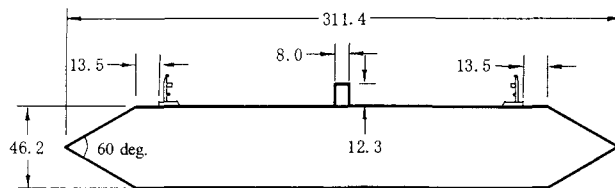
$$L = \pi \rho B^3 \omega^2 \left[L_{zr} \frac{Z}{B} + L_{zi} \frac{\dot{Z}}{B\omega} + L_{\theta r} \theta + L_{\theta i} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right]$$

$$M = \pi \rho B^4 \omega^2 \left[M_{zr} \frac{Z}{B} + M_{zi} \frac{\dot{Z}}{B\omega} + M_{\theta r} \theta + M_{\theta i} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right]$$

D, L, M は非定常空気力 (抗力, 揚力, 空力モーメント), $D_{zr}, D_{zi}, D_{\theta r}, D_{\theta i}, L_{zr}, L_{zi}, L_{\theta r}, L_{\theta i}, M_{zr}, M_{zi}, M_{\theta r}, M_{\theta i}$ は非定常空気力係数, ω は加振円振動数 ($=2\pi f$), f は加振振



(a) 断面 B1



(b) 断面 B2 ($h/D=0.27$)

断面名	中央防護柵	路肩防護柵
断面 O	なし	なし
断面 A1	標準 ($h/D=0.27$)	なし
断面 A2	C.B. ($h/D=0.27$)	なし
断面 A3	C.B. ($h/D=0.54$)	なし
断面 B1	標準 ($h/D=0.27$)	あり
断面 B2	C.B. ($h/D=0.27$)	あり
断面 B3	C.B. ($h/D=0.54$)	あり

(備考) C.B.: センターバリアを示す。

h : 中央防護柵高さ, D : 桁高 (46.2mm)

図一 2 検討断面

動数, Z, θ は各々のたわみ変位, ねじれ変位を示す。本研究では、揚力, 抗力の定義は、構造軸基準とした。すなわち、図一1(2)の振動方向が揚力となり、迎角とともに定義する揚力, 抗力方向は変化する。また、定義した加振振幅は、構造軸上の振幅ではなく、振動方向の振幅をとった。したがって、図一1(1)の場合では、構造軸上の移動量は図一1(2)に比べて $\cos \alpha$ 倍 (α は迎角) となる。

表一 1 フラッター解析条件

質量	15.5 t/m
極慣性モーメント	568 t・m ² /m
たわみ振動数	0.080 Hz
ねじれ振動数	0.279 Hz
対数減衰率	$\delta=0.02$ (たわみ, ねじれ)
桁幅	20.2m
空気密度	$1.225 \times 10^{-3} \text{ t/m}^3$

2. 3 フラッター解析

計測された非定常空気力係数をもとに、2自由度のフラッター解析を実施した。すなわち、計測された空気力係数のうち、揚力 L と空力モーメント M の項のみを用いて鉛直たわみ, ねじれの運動方程式を複素固有値問題として解く手法⁶⁾である。今回計算した解析条件を表一1

に示す。これは、中央径間 1,500m 程度の吊橋を想定したものである。算定したフラッター発現風速は、Selberg 式で計算されるフラッター発現風速との比で定義される κ でまとめた。なお、上記条件下による Selberg 式の計算値は 61.8m/s である。

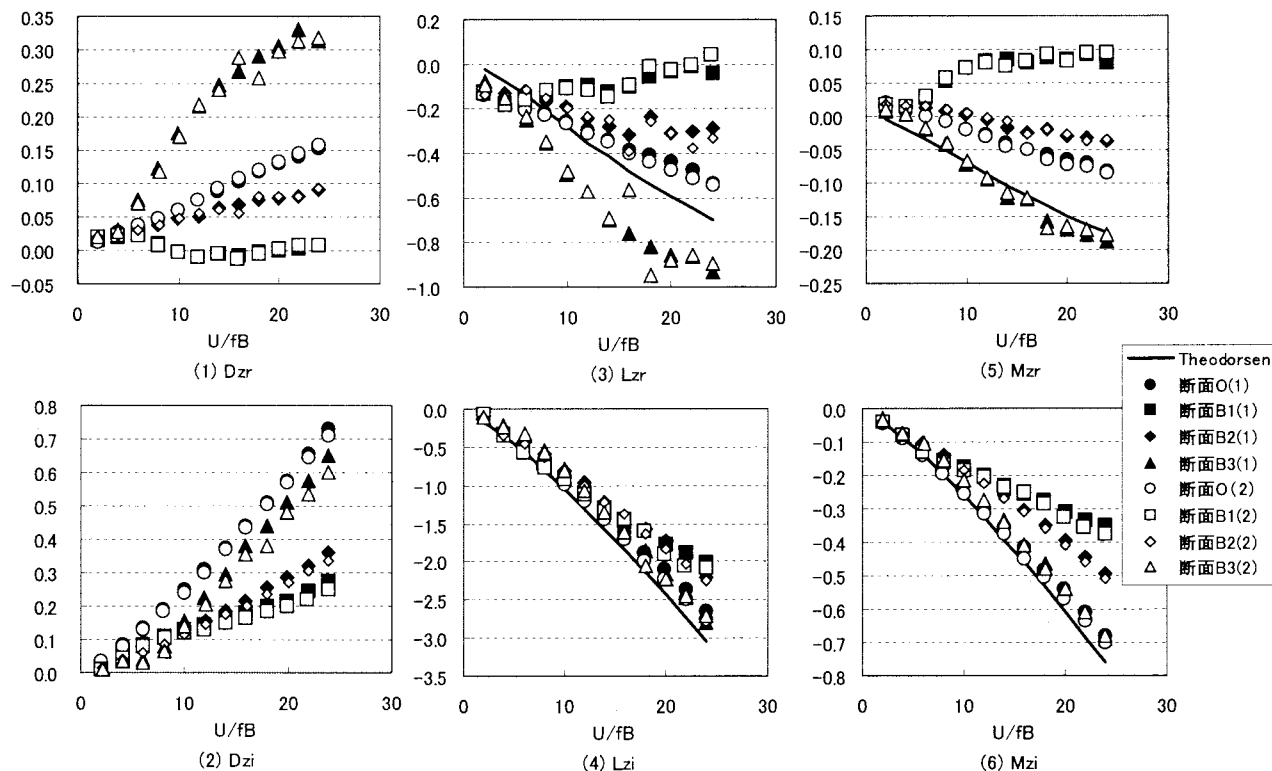
3. 試験結果

3. 1 たわみ加振方向の影響

代表的な断面として、断面 O、断面 B1、断面 B2、断面 B3 の迎角+9° の非定常空気力係数を比較して、図-3 に示す。同図中の凡例は、模型を回転させる方向を(1)、加振軸を回転させる方法を(2)として示し、比較のために平板翼の理論値を載せた。これより、多少のばらつきは認められるものの、どの断面においても、揚力、空力モーメント、抗力ともに、加振方向の違いにもかかわらず、非定常空気力係数、すなわち振動中の空気力の顕著な違いが生じていないことがわかる。厳密に見ると、 L_{zi} 、 M_{zi} については、模型を回転させた場合の方が、加振機を回転させた場合よりも無次元風速 16 以上でわずかに小さくなっていることがわかる。さらに、無次元風速 20 における各断面の加振方法の違いによる空気力係数の違いを係数比で表示して表-2 に示す。これより、揚力、空力

モーメントの速度比例成分である L_{zi} 、 M_{zi} では、模型を回転させた場合は、加振機を回転させた場合よりも 0~6% 小さいことがわかる。これは、模型回転させる場合は、空気力の定義方向と加振振幅方向がずれているため、空気力定義方向の加振振幅が小さいことも一因であると判断される。すなわち、迎角+9° の場合、模型を回転させる方法では、構造軸方向には $\cos 9^\circ = 0.988$ 倍 (-1.2%) の振幅となる。今回の計算上は加振振幅をそのまま適用したため、結果として得られる非定常空気力係数は約 1% 小さくなるが、その影響は定性的に一致している。一方、抗力成分の D_{zi} では、模型を回転させた場合に大きくなり、無次元風速 20 で 1~6% 大きい値をとるが、これも、模型を回転させた場合では構造軸の水平方向に加振成分があるため、その影響が現れたものと考えられる。これらの非定常空気力係数は、いずれも速度比例成分であるが、これらは変位比例成分に比べて大きい空気力係数であること、無次元風速が高い方がその傾向が明確に現れていること、表-2 が示すように変位比例成分では空気力係数が小さく係数比がばらついていることを勘案すると、迎角+9° という大迎角でも振動方向の違いは微小であり、両者の差異は計測誤差の範囲という見方もできる。

以上の結果から、今回試験した箱桁断面に関しては、迎角+9° でも、検出される空気力は大きく変わるこ



(注) 凡例の(1)は模型回転, (2)は加振軸回転を示す。

図-3 たわみ振動の与え方の影響 (迎角+9°)

表－2 加振方法の違いにおける計測値と比率の代表例（迎角+9°：無次元風速 20）

断面	加振方法	非定常空気力係数						比率 ((2)/(1))					
		D_{zr}	D_{zi}	L_{zr}	L_{zi}	M_{zr}	M_{zi}	D_{zr}	D_{zi}	L_{zr}	L_{zi}	M_{zr}	M_{zi}
断面O	(1)	0.129	0.575	-0.436	-2.100	-0.064	-0.542						
	(2)	0.131	0.570	-0.475	-2.236	-0.072	-0.568	0.98	1.01	0.92	0.94	0.89	0.95
断面B1	(1)	-9.2E-5	0.217	-0.034	-1.781	0.084	-0.310						
	(2)	0.002	0.202	-0.023	-1.901	0.083	-0.324	-0.04	1.07	1.44	0.94	1.01	0.96
断面B2	(1)	0.076	0.284	-0.311	-1.731	-0.029	-0.395						
	(2)	0.081	0.271	-0.308	-1.835	-0.028	-0.410	0.94	1.05	1.01	0.94	1.04	0.96
断面B3	(1)	0.304	0.509	-0.856	-2.175	-0.171	-0.540						
	(2)	0.297	0.480	-0.882	-2.228	-0.165	-0.542	1.02	1.06	0.97	0.98	1.03	1.00

（備考） 加振方法の(1)は模型回転，(2)は加振機回転を示す。

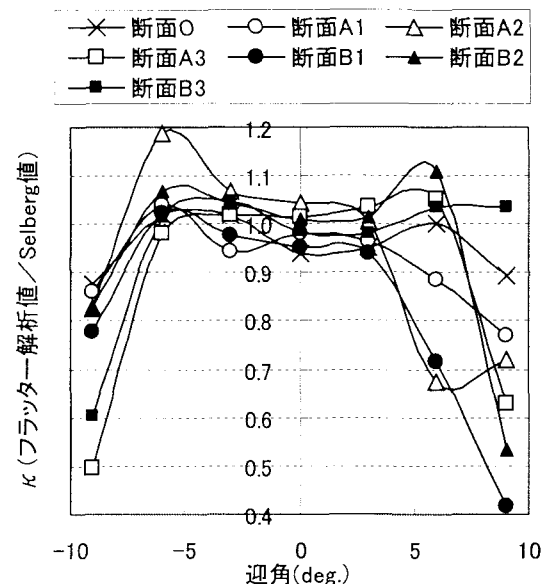
はないことが示された。また、ここでは示していないが、他の迎角についても同様な傾向であった。他の過度のねじれ変形が無い限りは、今回の一箱桁断面の振動方向の影響は小さいと考えて良いと判断される。

以下、模型を回転させる方法により計測された非定常空気力係数を用いて検討を行なった。

3. 2 フラッター解析結果

各断面におけるフラッター解析結果を図－4に示す。これより、中央防護柵と路肩防護柵が無い断面Oでは、迎角±9°ではフラッター発現風速が低下するものの、それ以外の迎角では概ね $\kappa=0.9\sim1.05$ 程度の値をとっていることがわかる。一方、中央防護柵、路肩防護柵を設置した断面では、迎角±3°の範囲では、断面Oと同等程度かそれ以上の κ 値をとっているが、それ以上の迎角では特性が大きく異なる。

負迎角に着目すると、迎角－6°では、断面A2が $\kappa=1.2$ 程度の高い値を示すが、それ以外の断面では断面Oと同程度であり、迎角－9°では、全ての断面が断面Oより κ 値が小さくなり、路肩防護柵、中央防護柵を設置することによって、フラッター性能が大きく悪化することがわかる。これは、負迎角では、路肩防護柵の存在により、桁前縁からの剥離渦が大きく影響を受けていると考えられるが、詳細は今後の課題としたい。一方、正迎角では、迎角+6°における路肩防護柵の有無による影響が興味深い。すなわち、路肩防護柵を設置しない断面（図中白抜き印）では、中央防護柵の設置により κ 値は悪化し、標準タイプ中央防護柵の断面A1で $\kappa=0.9$ 程度、センターバリア（ $h/D=0.27$ ）付の断面A2では $\kappa=0.67$ に低下する。しかし、路肩防護柵を設置した断面では、通常タイプの中央防護柵との組合せでは $\kappa=0.7$ 程度であるのに対し、センターバリア（高さ： $h/D=0.27$ ）との組合せの断面B2では、 $\kappa=1.1$ 程度となり、路肩防護柵の存在により、センターバリア（高さ： $h/D=0.27$ ）付断面のフラッター性能は大きく異なることがわかる。迎角+9°では、高いセンターバリア（ $h/D=0.54$ ）を有する断面B3のみ $\kappa=1.0$ を超える良好な特性を示しているが、その他の断面は、迎角－9°と同様に路肩防護柵の有無



図－4 フラッター解析結果

にかかわらず、断面Oより κ 値は小さく0.8以下となる。

路肩防護柵が設置されたセンターバリア付断面（断面B2, B3）の迎角特性は、通常タイプ中央防護柵断面（断面B1）と比べると、迎角－6°～+6°の範囲では概ね良好であり、センターバリア付断面（高さ： $h/D=0.27$ ）の断面B2は、迎角－6°～+3°では5～8%、迎角+6°では50%高い数値を示している。また、 $h/D=0.54$ の断面B3では、迎角－3°では同程度であるが、迎角+6°，+9°で40%以上の大幅な改善が見られる。本断面だけの検討結果ではあるが、センターバリア対策は迎角±6°の大迎角でも有効な手段になり得ることが明らかとなった。

4. 非定常空気力特性からの考察

4. 1 迎角+6°における非定常空気力特性

迎角+6°における通常タイプの中央防護柵、センターバリア付断面の非定常空気力特性を、路肩防護柵の有無を比較して、図－5に示す。同図には、フラッター解析結果に用いた揚力、空力モーメントに関わる項だけを示し、平板翼の理論値と比較して表記した。

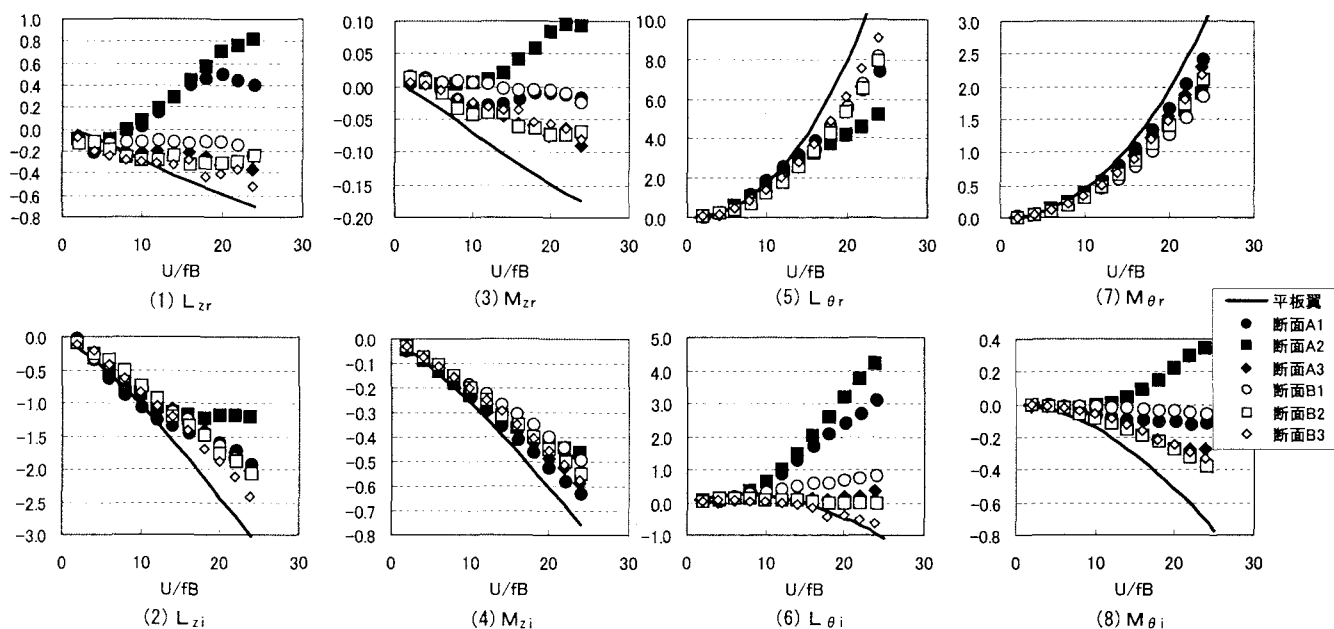


図-5 迎角+6° の非定常空気力係数の比較

松本らの研究によれば、連成フラッターの安定化については、Scanlan が定式化した非定常空気力係数の A_2^* , A_1^* , H_3^* の寄与が大きく、 A_2^* の負の絶対値を大きくし、 A_1^* , H_3^* の絶対値を小さくすることが、フラッター安定性の向上につながるということが知られている⁴⁾。これらの係数は、本研究の定式化では、それぞれ $M_{\theta i}$, $M_{z i}$, $L_{\theta r}$ に相当する。このうち、 $M_{z i}$, $L_{\theta r}$ については、断面 A2 における $L_{\theta r}$ 以外はほぼ同じ値であるが、翼理論値よりも小さく、安定化する傾向を示している。一方、 $M_{\theta i}$ については、断面 A2 では正の値をとっていることから、これが断面 A2 のフラッター性能の低下につながっている。また、 $M_{\theta i}$ の負の値を大きい順に並べると、断面 B2, 断面 B3, 断面 A3 が比較的大きく、断面 A1, 断面 B1 がそれに続いている。これは、フラッター解析結果 (図-3) の順番とほぼ一致していることから、迎角+6° におけるフラッター性能は $M_{\theta i}$ で決定されていると言える。B/D=6 程度の一箱桁断面において、センターバリアがフラッター安定化に及ぼす効果は、 $M_{\theta i}$ の効果によるものであることは一般に知られている (例えば文献 7)) が、迎角+6° においても同様な効果であることが明らかとなった。

他の非定常空気力係数を見た場合には、路肩防護柵のない断面 A1, A2 の $L_{z r}$, $L_{\theta i}$, 断面 A2 の $M_{z r}$ が他の断面と異なる特性を示しているが、この係数はフラッター性能には大きな影響を及ぼさないとされている。しかしながら、断面 A2 からセンターバリアの高さを上げた断面 A3 では、断面 A2 と大きく異なり、平板翼理論値に近い特性を示している。これは、センターバリアの高さは非定常空気力特性に敏感であることを示している。

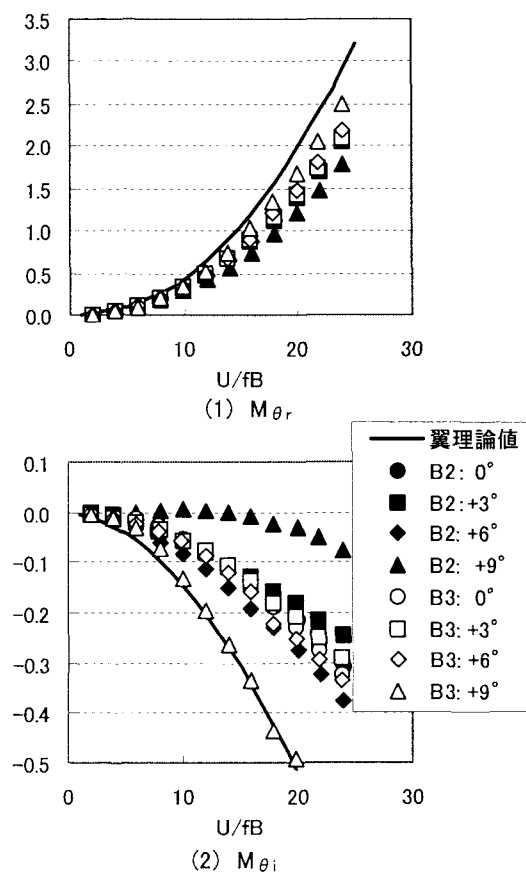


図-6 センターバリア付断面の迎角特性

4. 2 センターバリア付断面の迎角特性

断面 B2 ($h/D=0.27$), 断面 B3 ($h/D=0.54$) の迎角 0° , $+3^\circ$, $+6^\circ$, $+9^\circ$ における $M_{\theta r}$ と $M_{\theta i}$ を比較して図-6 に示す. これより, $M_{\theta r}$ はいずれの迎角において平板翼理論値よりも小さいことがわかる. また, 断面 B2 では, 迎角 $0^\circ \sim +6^\circ$ に比べて, 迎角 $+9^\circ$ の係数が小さくなっている. 一方, 断面 B3 では, 迎角 $+9^\circ$ で大きな値をとっていることがわかる. また, $M_{\theta i}$ においても, 断面 B2 が迎角 $0^\circ \sim +6^\circ$ に比べて, 迎角 $+9^\circ$ における負の値が小さく, 一方, 断面 B3 では負の値が大きくなり, ほぼ平板翼理論値と一致していることがわかる. 迎角 $+6^\circ$ までのセンターバリア付断面の非定常空気力特性は, 多少の変化はあるものの, 迎角 0° の特性を保っていることがわかる. また, 迎角 $+6^\circ$ までのセンターバリアの高さの違いも大きくない.

一方, 迎角 $+9^\circ$ における非定常空気力特性を空気力とねじれ振動との位相差から考える. この場合, それぞれ $M_{\theta r}$ と $M_{\theta i}$ の平方和, $M_{\theta r}$ と $M_{\theta i}$ の比を見れば良い. 本断面では, $M_{\theta r}$ が $M_{\theta i}$ に比べて大きいことから, $M_{\theta r}$ が空気力の大きさ, $M_{\theta i}$ に比べて $M_{\theta i}$ の大きな変化は位相差の変化と考えれば良い. 迎角 $+9^\circ$ の非定常空気力特性を, 空気力と位相差の形で比較すれば, 断面 B2 では空力モーメントが減少し, 位相遅れが小さくなり, その結果, フラッターは不安定化するが, 断面 B3 では, 空力モーメントが増大し, 位相遅れが増大して, 翼断面に近づく特性を示し, フラッターが安定化することとなる. この傾向は, 路肩防護柵を設置しないセンターバリア付断面 (断面 A2, A3) の迎角 $+6^\circ$ でも見られている (図-5(7), (8)). この理由については, 現段階では明確に説明できないが, センターバリアの剥離渦が路肩防護柵を含む箱桁後流端部近傍の影響で流れが変化していると考えられる.

5. まとめ

$B/D=6.74$ のフェアリング付一箱桁断面を対象に, 強制加振による非定常空気力試験ならびにフラッター解析を実施し, 有迎角時の非定常空気力特性について検討した. 本研究で得られた知見を以下に示す.

- (1) 今回検討した一箱桁断面では, 迎角 $+9^\circ$ の大迎角でも有迎角時におけるたわみ振動の振動方向による非定常空気力の違いは顕著に見られない. わずかに見られる空気力係数の違いは, 構造軸方向の加振振幅の違いと定性的に一致する.
- (2) 路肩防護柵が設置されていない断面では, 中央防護

柵の存在により, 正迎角のフラッター特性は低下する. 中央防護柵と同じ高さのセンターバリアを設置した方がフラッター特性は悪化する.

- (3) 路肩防護柵が設置された断面においては, センターバリアの設置はフラッター性能を向上させる. 通常の中央防護柵と同じ高さ ($h/D=0.27$, h : センターバリア高さ, D : 桁高) では, 迎角 $\pm 6^\circ$ の比較的大きな迎角まで, 迎角 0° と同等以上のフラッター性能を確保できる. 一方, 通常の中央防護柵では路肩防護柵の存在により迎角 $+6^\circ$ でフラッター発現風速は低下する.
- (4) センターバリア付断面は, 非定常空気力係数 $M_{\theta i}$ の負の値を増大させる効果があり, 迎角 0° のフラッター特性を迎角 $\pm 6^\circ$ まで保っている.
- (5) センターバリアの高さは, 迎角特性に大きく影響する. 路肩防護柵が設置された一箱桁断面において, センターバリアの高さを高くした ($h/D=0.54$) 断面では, 迎角 $+9^\circ$ のフラッター性能を迎角 0° と同等以上に維持する.

参考文献

- 1) 佐藤弘史, 楠原栄樹, 大儀健一, 北川信, 伊藤進一郎, 大廻聡: 超長大橋の一樣流中の耐風性, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.351-356, 2000.11.
- 2) 村上琢哉, 由井陸粹, 武田勝昭, 村越潤, 麓興一郎: 中央開口一箱桁断面を有する超長大吊橋の耐風安定性検討, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, pp.393-398, 2002.12.
- 3) 村上琢哉, 武田勝昭, 藤澤伸光, 高尾道明: 超長大吊橋 1 箱桁断面の空力特性, 日本風工学会誌, 第 71 号, pp.85-86, 平成 9 年 4 月.
- 4) 松本勝, 小林裕輔, 浜崎博: 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.
- 5) 山田均, 勝地弘, 鈴木猛: 有迎角時加振方向差により非定常空気力とフラッター推定応答に生じる影響, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.1023-1028, 2000 年 3 月.
- 6) 本州四国連絡橋公団: 本州四国連絡橋耐風設計基準 (2001)・同解説, 2001 年 8 月.
- 7) 村上琢哉, 武田勝昭, 高尾道明: 1 箱桁断面を有する超長大 3 本ケーブル吊橋の耐風性検討, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, pp.329-334, 1998.

(2004 年 9 月 17 日受付)