

構造基本断面の非定常空気力に及ぼす乱流効果

Effects of Upstream Gusting on Flutter Derivatives of Structural Fundamental Sections

畑中章秀*, 田中 洋**

Akihito HATANAKA, Hiroshi TANAKA

*工博 (株)ニチゾウテック技術コンサルティング本部 (〒551-0023 大阪市大正区鶴町 2-15-26)

** 工博 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 防災事業推進室 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北 1-7-89)

This paper describes effects of upstream gusting on flutter derivatives of structural fundamental cross sections (i.e., NACA0012 airfoil section, rectangular cylinders etc.). Taking consideration into similarity requirement of turbulent scale, wind gusts were simulated by active gust generator. From comparison between flutter derivatives in smooth and turbulent flows, it was found that effects of upstream gusting on flutter derivatives have differences according to sectional shape. Especially, flutter derivatives of bluff structure with larger vortex separation from the leading edge were subjected to effects of upstream gusting.

Key Words: active gust generator, bluff body, flutter derivatives, turbulent effects

キーワード: アクティブガストジェネレータ, ブラフボディ, 非定常空気力, 乱流効果

1. はじめに

長大橋の耐風設計において、橋桁の非定常空気力を用いた立体骨組フラッター解析は有力な設計ツールとして定着している¹⁾。解析で用いる非定常空気力は一様流中での計測値を用いるケースが多い。橋桁に生じる空力不安定振動は接近流の乱れの影響により安定化する傾向にあることから、一様流中の非定常空気力を用いることは安全側評価を与えるものと考えられる。しかし、本来、自然風乱流下で生じる空力不安定振動を精度良く評価するのに、自然風に相似な乱流中での非定常空気力を解析に用いることはより合理的と考える。

また、最近では、時刻歴応答解析により自然風下における橋梁全体の耐風挙動を忠実に再現しようとする試みも認められる²⁾。このような解析を行う場合には乱流中での非定常空気力を解析に用いることは不可欠なことを考える。

乱流中で非定常空気力を計測した研究例として W. H. Lin³⁾、松本、白石、白土ら⁴⁾、上島、松田、杉本⁵⁾の研究が挙げられる。

Linの研究では溝型断面模型を用いて格子乱流中での非定常空気力の計測を行っているが、顕著な乱流効果は認められないとの結論を得ている。松本・白石・白土らの研究では、幅高さ比の異なるH型断面の非定常空気力の乱流効果について考察を加えている。幅高さ比に応じてフラッター特性が限定型、発散型、

安定型に分類され各々のフラッター特性に応じて非定常空気力の乱流効果に変化することを指摘している。特に、限定型フラッターに属する幅高さ比3の断面は乱流中で逆に不安定化するとの興味ある結果を得ている。

上島、松田、杉本の研究は幅高さ比10の矩形断面と流線形断面を対象として格子乱流中で非定常空気力を計測している。流線形断面についてはほとんど乱流効果が認められないが、矩形断面については乱流効果が認められるとの結論を得ている。

矩形断面の非定常空気力は概して乱れによる影響を受けやすいものと予想されるが、その理解はまだまだ不十分と考えられる。

そこで、本論文では、アクティブガストジェネレータにより生成された乱流中で非定常空気力を計測し、構造基本断面の非定常空気力に及ぼす乱流効果について検討を行った。実験に用いた模型は、NACA0012翼断面、矩形断面(幅高さ比6, 7.5, 10)および矩形断面の上流側あるいは下流側にフェアリングを設置した断面である。

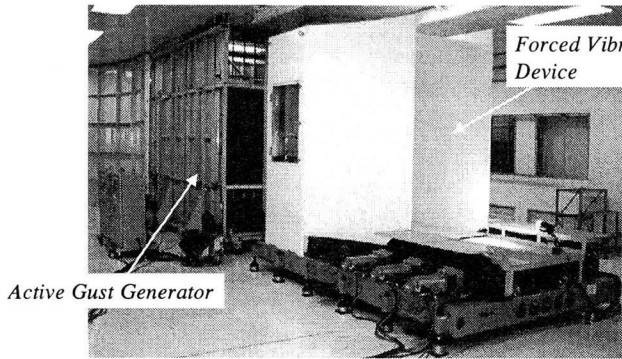
以下、実験概要、実験結果および考察を述べる。

2. 実験概要

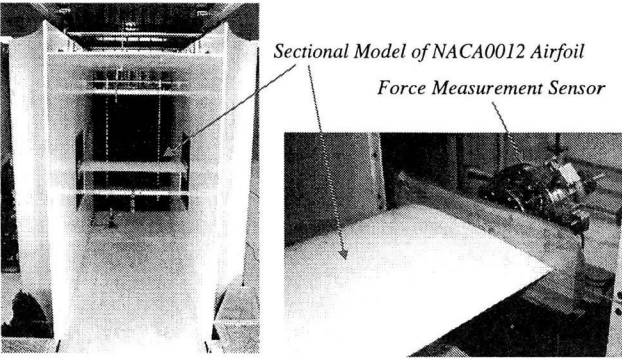
風洞実験は日立造船(株)の大型汎用低速風洞の2次元モード(測定断面寸法: 幅2m×高さ3m)にて実施した。2次元風路下流側に非定常空気力測定装置を設置して、上

下・回転の単独加振時の揚力および空力モーメントを計測した。また、非定常空気力測定装置の上流側にアクティブガストジェネレータ⁶⁾を設置し(図-1)、アクティブ制御乱流下での非定常空気力を計測した。

アクティブガストジェネレータは主流方向変動気流制御用の平板列と鉛直方向変動気流制御用の翼列から構成されており、各々ACサーボモーターにより個別に駆動される。乱流生成では、主流方向・鉛直方向成分ともに *Kármán* 型のスペクトル形状に適合するようにガストジェネレータをコンピュータ制御した。装置の構成や乱流生成の詳細は文献6)に記載しているので参照されたい。



(a) 実験装置全体写真



(b) 模型の設置状況(風路下流側からの撮影)

図-1 非定常空気力測定装置とガストジェネレータ

また、実験に用いた構造基本断面はNACA0012翼(弦長:400mm,高さ:48mm,模型長さ:1800mm),幅高さ比が6,7.5および10の矩形断面と幅高さ比7.5の矩形断面の上下流端に三角フェアリングを設置した断面である(図-2)。

上・下流端に三角フェアリングを設置したのは、三角フェアリングを設置することで前縁剥離渦の影響を変化させたかったためである。

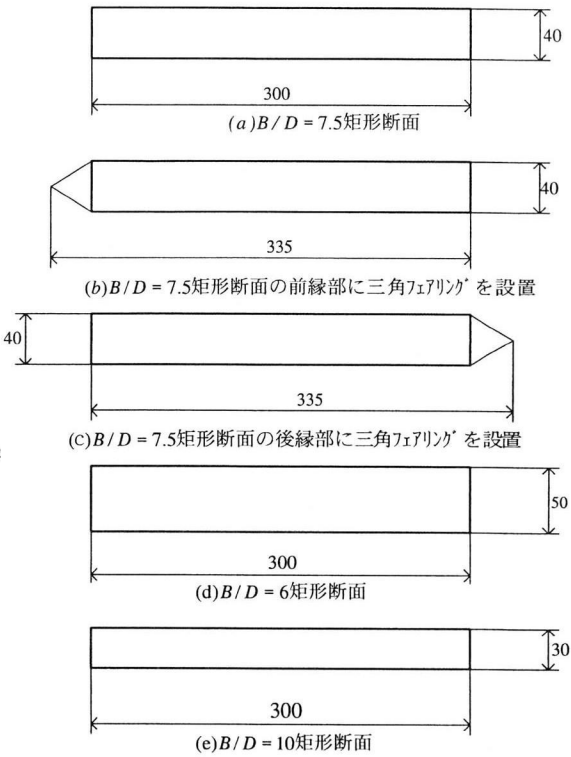


図-2 実験に用いた模型断面
(NACA0012 翼断面を除く)

3. 実験結果および考察

3.1 乱流シミュレーション

主流方向および鉛直方向成分ともに *Kármán* 型パワースペクトルを目標に乱流シミュレーションを行った。気流の計測は模型中心位置(翼列下流端から1680mm下流位置)で行った。

また、目標とした乱流特性値を表-1に記載する。表中には計測値も記す。また、図-3に風洞内にシミュレートされた乱流のパワースペクトルを示す。図中には計測された乱流特性値および目標とする *Kármán* 型パワースペクトルを併記している。

表-1 目標とする乱流特性値と計測値

項目	目標値	計測値
平均風速 (m/s)	4.0	4.0
主流方向乱れ強さ $I_u(\%)$	10.0	10.0
鉛直方向乱れ強さ $I_w(\%)$	5.0	5.2
主流方向乱れスケール $L_u(m)$	1.5	1.56
鉛直方向乱れスケール $L_w(m)$	0.75	0.78

主流方向成分および鉛直方向成分ともに、10Hz 以下の周波数領域においてはほぼ目標とするスペクトル形状に適合する計測スペクトルが得られている。また、乱流特性値はいずれも 4% 程度の誤差範囲に入っている。

なお、主流方向乱れスケールは模型代表幅の 5 倍程度の値となっており、自然風との相似性をほぼ満足するものであった。また、本乱流は 3Hz 付近までは橋軸方向の相関がほぼ 1 に近い 2 次元的な変動風である。

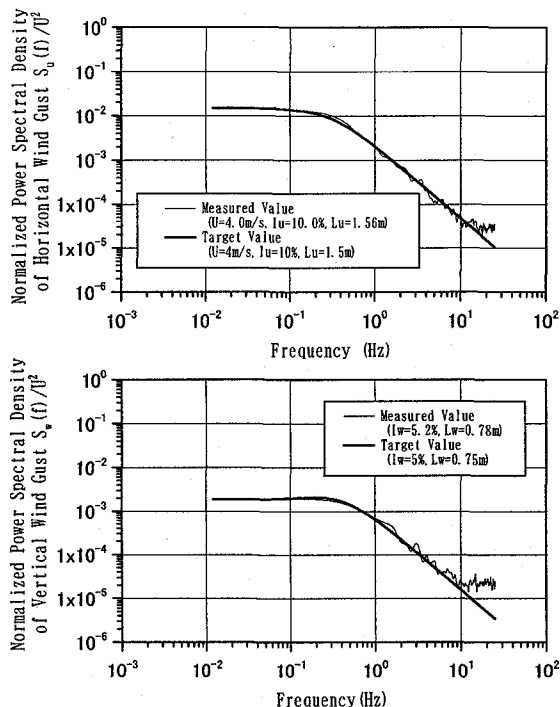


図-3 変動気流パワースペクトル密度関数

3.2 乱流中での非定常空気力の計測方法

アクティブガストジェネレータにより生成される乱流時系列に再現性があることを利用して⁷⁾、強制振動法により乱流中の非定常空気力を抽出する方法を考えた。以下、その要領を説明する。

- 1) 模型を定常加振した状態と静止させた状態で 2 回空気力を計測する。
- 2) 2 回の計測でほぼ等しい時刻歴を有するアクティブ制御乱流を模型に作用させるため、ほぼ同じ時刻歴の強制空気力が計測される。
- 3) 風の乱れに起因した強制空気力は風速変動のみに依存し、物体の振動による影響は小さいものと仮定すると、定常加振状態と静止状態で計測された空気力の差を取ることにより、強制空気力が除去されて非定常空気力のみが抽出されることになる。

以上の手順は乱流中の動的応答を多数重ね合わせることで強制振動成分を除去し、自由振動成分のみを抽出

する RD 法⁸⁾ と類似している。

図-4 は模型を鉛直たわみ加振した状態 ① と静止した状態で計測された空気力 ② とその両者の差 ③ を示したものである。図では加振状態の空気力に静止状態の空気力を重ねて示している。

加振状態の空気力をみると、静止状態の強制空気力に加振成分の周期的な変動空気力が重畳する形で計測されている(図-4 の 2 段目)。両空気力の差をみると、強制空気力が除去されて加振成分による非定常空気力がきれいに残されていることが分かる(図-4 の 3 段目)。

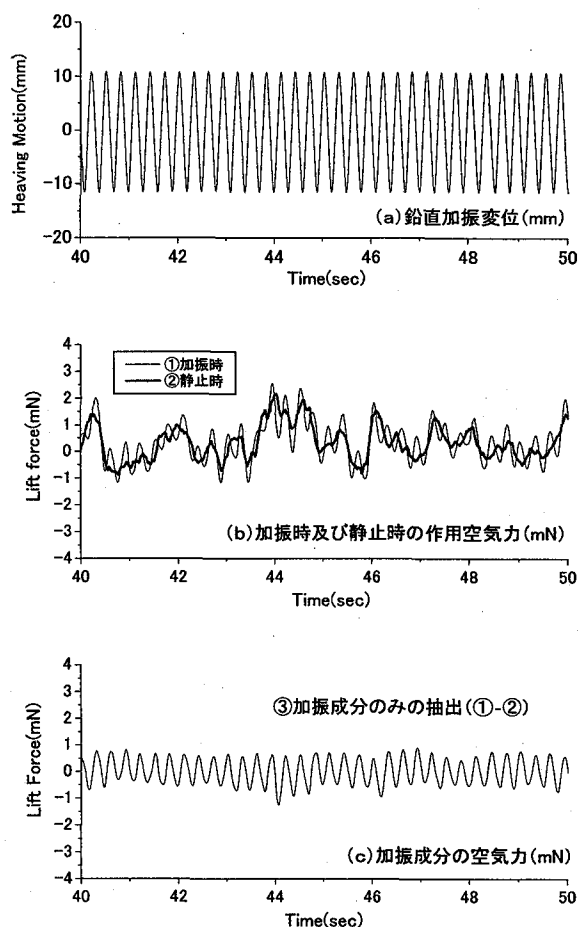


図-4 加振空気力の抽出

図-5 は加振時の空気力 ① と強制空気力除去後の加振成分空気力 ③ の周波数分析結果を示したものである。低周波数領域の強制空気力成分が除去されて、加振成分の空気力のみが抽出されている様子が伺える。

本研究では、このようにして計測された加振成分空気力を Scanlan が提案した H_i^* と A_i^* ($i=1\sim4$) の表記に従い整理した⁹⁾。

$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B \alpha}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad (1)$$

$$M_{\alpha} = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[K A_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^*(K) \frac{B \alpha}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad (2)$$

ここに、 ρ ：空気密度、 U ：平均風速、 B ：模型代表幅、 $K=B\omega/U$ ：換算振動数、 ω ：円振動数、 h ：鉛直たわみ、 α ：回転変位、 $(\dot{}) = d()/dt$

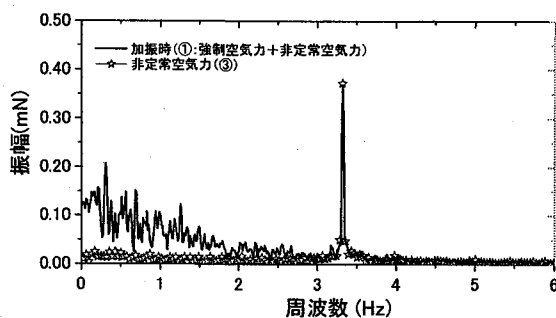


図-5 加振時の空気力(①)と加振成分空気力(③)の周波数分析結果

3.3 構造基本断面の非定常空気力係数

上述の方法により、各断面の一樣流中と乱流中の非定常空気力を算定した。なお、本実験では風速一定とし、加振周波数を変化させることで無次元風速 15 あるいは 25 までの非定常空気力を計測した。加振振幅は鉛直たわみ加振が $\pm 10\text{mm}$ 、ねじれ加振が $\pm 3^\circ$ である。

(1) NACA0012 翼断面の計測結果

図-6に NACA0012 翼断面の一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を示す。図中には薄翼の理論空気力(R. T. Jones 近似式)も併記している。計測された非定常空気力係数を見ると、一樣流中の値は若干理論値との乖離が認められるものの乱流中の値は理論値に良く一致している。一樣流中の値の方が理論値と乖離する理由として翼表面の層流境界層の影響が考えられる。また、一樣流中と乱流中での計測値にはあまり大きな違いは認められず、乱れによる影響は小さい。

(2) フェアリングあり・なしの比較

図-7に幅高さ比 7.5 の矩形断面とその上・下流端に三角フェアリングを設置した断面についての計測結果を示す。矩形断面とその下流側に三角フェアリングを設置した断面の非定常空気力係数は非常によく合致している。一方、上流側に三角フェアリングを設置した場合には、薄翼の理論空気力と傾向が良く一致している。

一樣流中と乱流中の違いをみると、矩形断面と下流側に三角フェアリングを設置した断面についてはいずれの係数も差が認められる。特に、ねじれの不安定性を示す A_2^* に注目すると、乱流中の値は正の値を示すものの絶対値が

小さくなる傾向にあり、フラッターの安定化効果が認められる。しかし、上流側に三角フェアリングを設置した断面については一樣流中と乱流中の差は小さい。

(3) 幅高さ比の異なる矩形断面の比較

図-8は幅高さ比の異なる 3 種類の矩形断面の一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を示したものである。

H_i^* をみると、一樣流中では断面によりばらつきが認められるものの、乱流中ではある値に収束する傾向が認められる。 A_i^* については、幅高さ比 10 の矩形断面を除いて乱流効果が顕著であり、特に、 A_2^* に注目すると、幅高さ比 6, 7.5 の矩形断面ともに、乱流中の値は正の値を示すものの絶対値が小さくなる傾向にあり、フラッターの安定化効果が認められる。

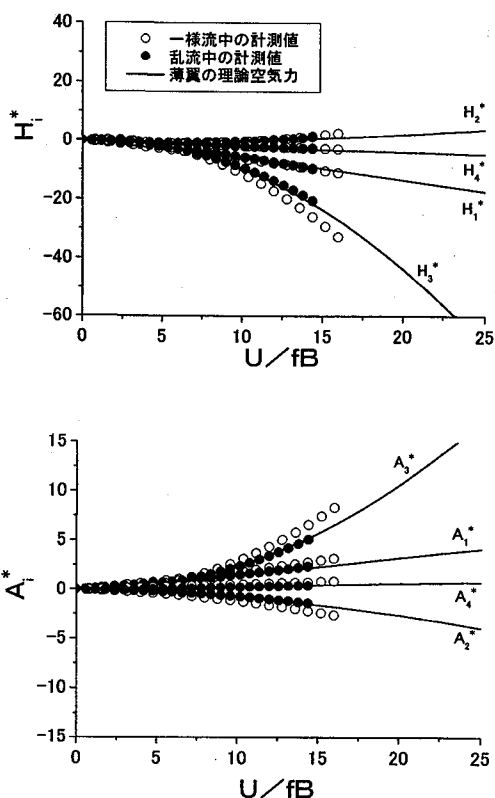


図-6 NACA0012 翼断面の一樣流中と乱流中の非定常空気力係数

3.4 フラッター解析

上述の矩形断面の一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を用いて 2 次元フラッター解析を行った。フラッター解析に用いた実橋諸元は以下の通りであり、中央径間 1000m 級の吊橋の諸元を参考とした。なお、模型縮尺を 1/50 として実橋の空気力に換算している。

- ① 鉛直たわみ固有振動数 = 0.25Hz
- ② ねじれ固有振動数 = 0.85Hz
- ③ 単位長当りの質量 = 81.83kN/m
- ④ 単位長当りの極慣性モーメント = 1823.78kN・m²/m
- ⑤ 無風時構造減衰率 = 0.02

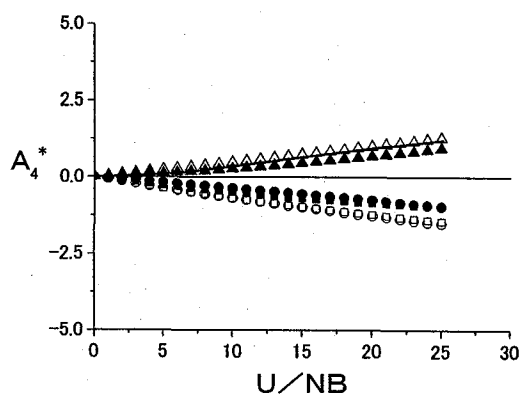
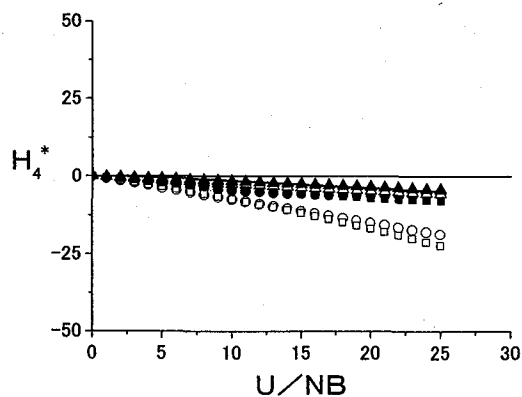
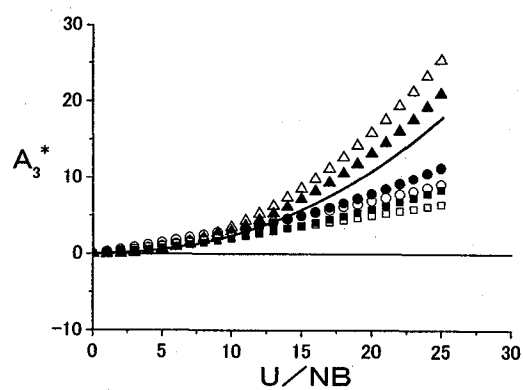
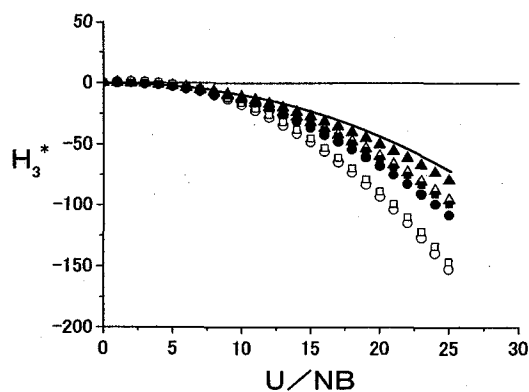
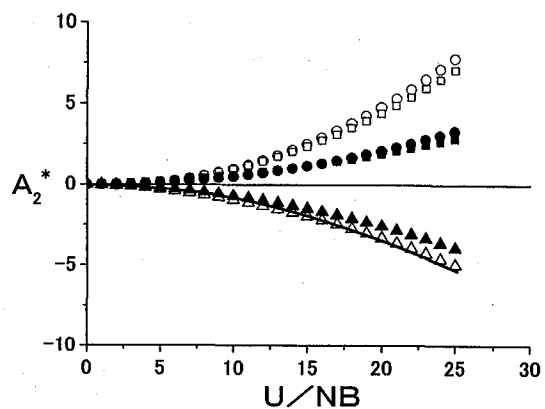
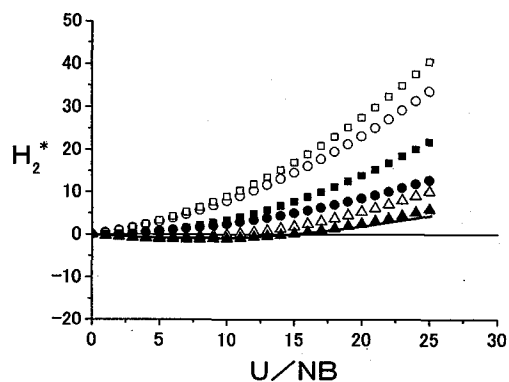
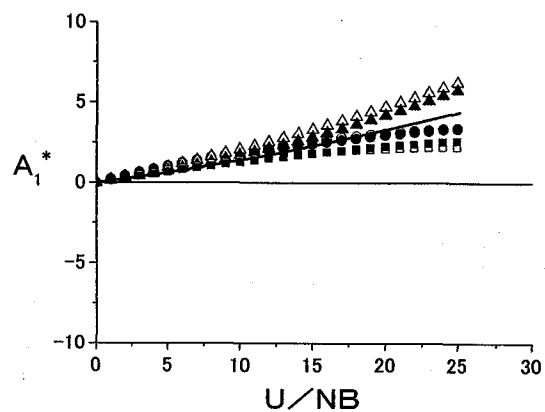
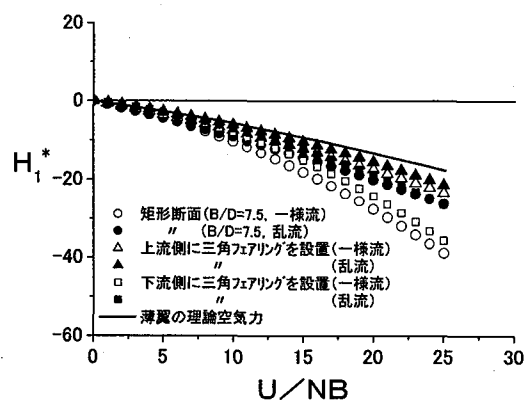


図-7 矩形断面の一様流中と乱流中の非定常空気力係数 (フェアリングあり・なしの比較)

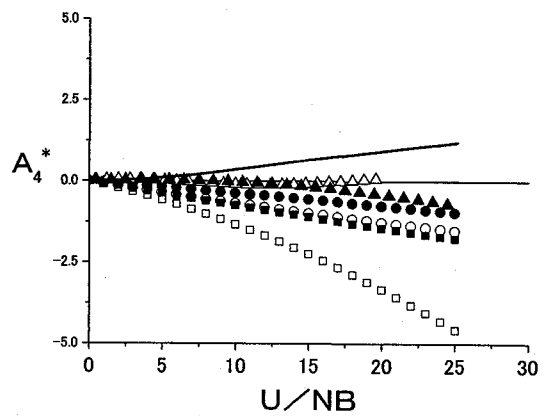
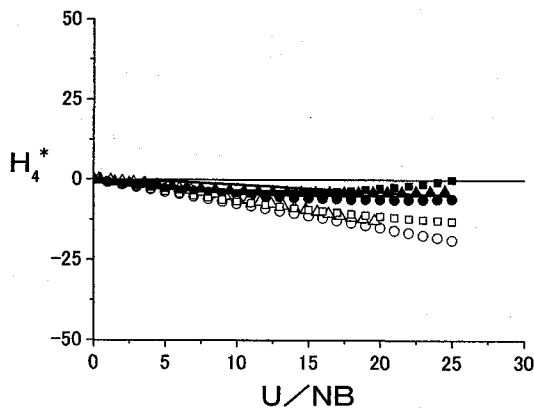
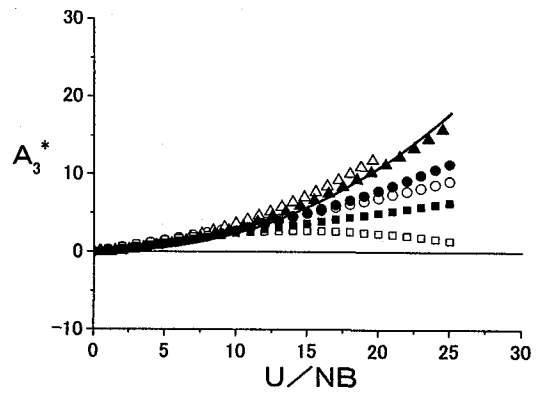
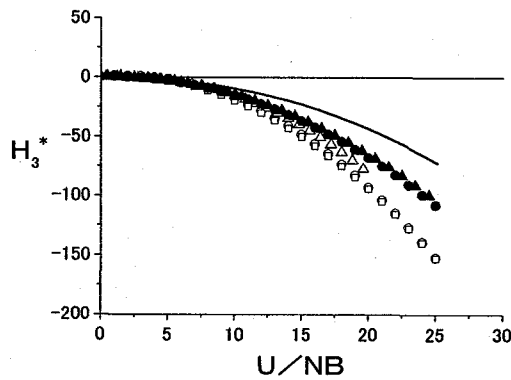
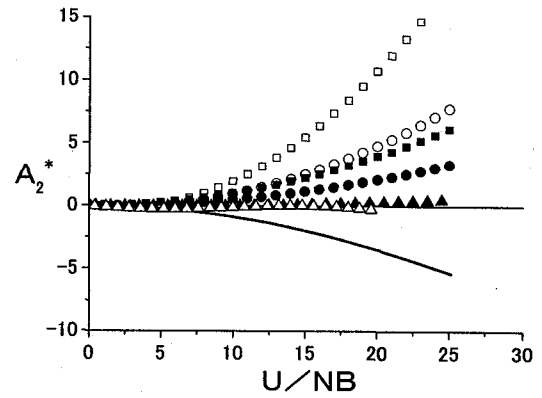
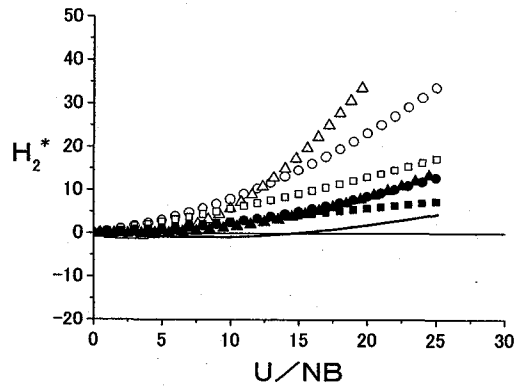
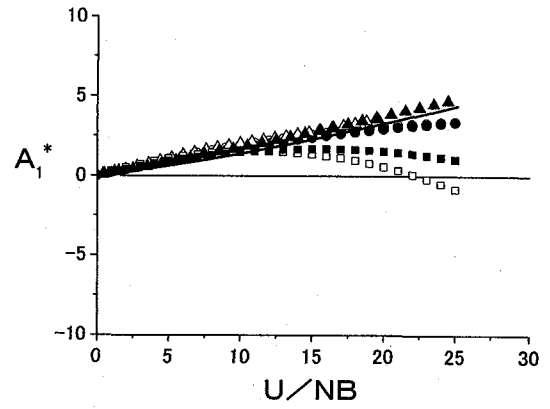
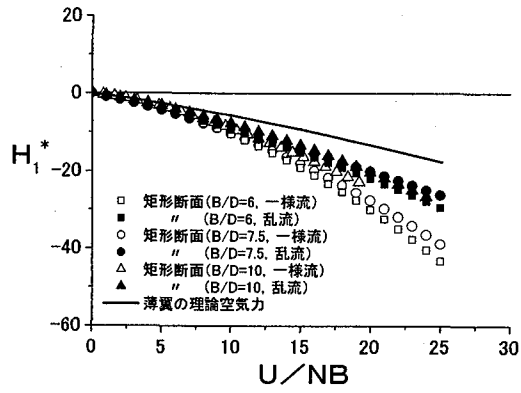


図-8 矩形断面の一様流中と乱流中の非定常空気力係数 (幅高さ比の異なる矩形断面の比較)

(1) フェアリングあり・なしの比較 (図-9)

幅高さ比7.5の矩形断面と下流側に三角フェアリングを設置した断面では、一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を用いた場合で対数減衰率の軌跡が大きく異なっている。乱流中の方が負減衰に向かう傾向が小さく、安定化効果が認められる。本解析ケースの場合、矩形断面のフラッター発現風速(対数減衰率がゼロとなる風速、表-2参照)は乱流中の方が8m/s程度高くなった。

一方、上流側に三角フェアリングを設置した断面は一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を用いた場合で対数減衰率の軌跡がほぼ等しくなっている。

(2) 幅高さ比の異なる矩形断面の比較 (図-10)

幅高さ比6と7.5の矩形断面については一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を用いた場合で対数減衰率の軌跡が大きく異なっている。乱流中の方が負減衰に向かう傾向が小さく、安定化効果が認められる。また、幅高さ比6の矩形断面の場合、一樣流中と乱流中でフラッター発現風速に大きな差は認められないが、無風時の減衰率を0.04と仮定した場合には一樣流中の40.8m/sに対し、乱流中が49.2m/sとフラッター限界風速が上昇する結果となる。

幅高さ比10の矩形断面は一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を用いた場合で対数減衰率の軌跡がほぼ等しく、顕著な乱流効果が認められなかった。フラッター発現風速は乱流中の非定常空気力を用いた場合の方が3m/s程度高くなった。

表-2 フラッター解析結果(フラッター発現風速)

断面形状		フラッター発現風速 (m/s)	
B/D	フェアリングの有無	一樣流	乱流
6	なし	34	35
7.5	なし	39	47
	下流側	36	38
	上流側	113	120以上
10	なし	65	68

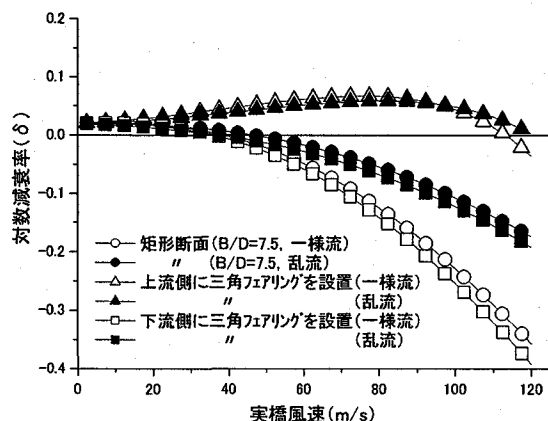


図-9 矩形断面のフラッター解析結果
(フェアリングあり・なしの比較)

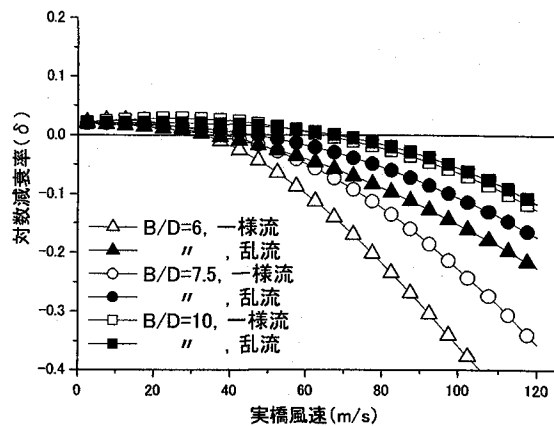


図-10 矩形断面のフラッター解析結果
(幅高さ比の異なる矩形断面の比較)

3.5 考察

上述の計測結果およびフラッター解析結果から「前縁剥離渦の影響が大きな断面」の方が乱れの影響を強く受け、非定常空気力の変化も大きいことが分かった。

各断面の非定常空気力に及ぼす乱流効果の違いは空気力の生成メカニズムの違いによるものと推察される。そこで、各断面の等価 Wagner 関数を算定し、過渡空気力特性の違いについて検討した。等価 Wagner 関数とは、薄翼の相対鉛直速度の急変に伴う揚力の過渡応答特性を表す Wagner 関数を橋梁断面に拡張した関数である。

橋梁断面は薄翼と異なり揚力の作用点が一定でないの、等価 Wagner 関数は次式のように揚力とモーメントに対して定義した¹⁰⁾。

1) 揚力に関する等価 Wagner 関数

$$\Phi_{eq,L}(\tau) = 1 - c_1 e^{-c_2 \tau} - c_3 e^{-c_4 \tau} \quad (3)$$

2) 空力モーメントに関する等価 Wagner 関数

$$\Phi_{eq,M}(\tau) = 1 - d_1 e^{-d_2 \tau} - d_3 e^{-d_4 \tau} \quad (4)$$

ここに、 $c_1 \sim c_4$ および $d_1 \sim d_4$ は未知パラメータであり、各橋梁断面固有の値である。未知パラメータ $c_1 \sim c_4$ および $d_1 \sim d_4$ は一樣流中と乱流中の非定常空気力係数を用いてシステム同定手法により算定することができる。詳細は文献10)を参照されたい。

図-11は幅高さ比7.5の矩形断面とその上流側に三角フェアリングを設置した断面の揚力と空力モーメントに関する等価 Wagner 関数を示しており、各々の一樣流中と乱流中の非定常空気力を用いた算定結果を示す。

揚力に関する等価 Wagner 関数をみると、断面により若干の違いは認められるものの、概ね薄翼の理論関数に近い関数形状になっている。また、一樣流中と乱流中の違いも顕著ではない。

一方、空力モーメントに関する等価 Wagner 関数をみると、幅高さ比7.5の矩形断面が特徴的な関数形状になって

おり、一様流中と乱流中の違いも顕著となっている。いずれも一旦準定常値(=1)を越えてピークを迎え、その後準定常値に漸近する傾向にあるが、ピーク値は一様流中よりも乱流中の方が小さくなる傾向にある。

幅高さ比 10 の矩形断面については一様流中の値がやや準定常値を上回り、ピークを迎える傾向にあり、乱流中ではそのピークがやや低下している。しかし、幅高さ比 7.5 の矩形断面ほど一様流中と乱流中の差が顕著ではない。

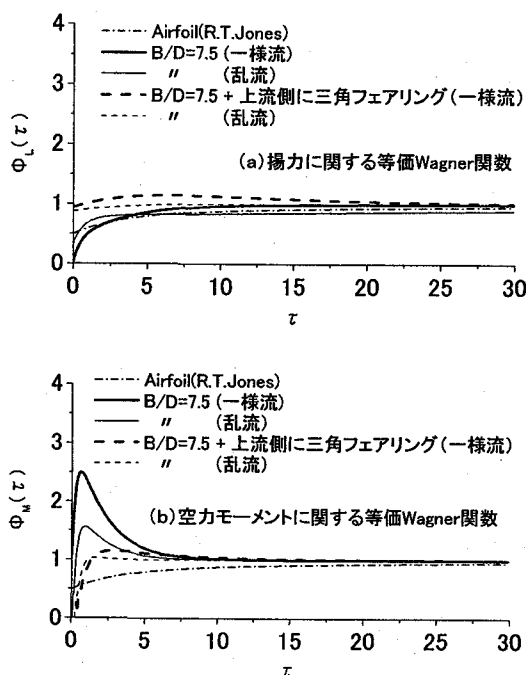


図-1.11 等価 Wagner 関数

上述の幅高さ比 7.5 の矩形断面の空力モーメントに関する等価 Wagner 関数に見られる特徴的な関数形は物体の運動に伴う前縁剥離渦の発生およびその後の成長過程と関係があることは、吉村・中村¹¹⁾により指摘されている。乱流中では前縁剥離渦の再付着が促進され、剥離渦が縮小すると考えられ、空力モーメントに関する等価 Wagner 関数のピーク値が一様流中よりも乱流中で低下することはこの剥離渦の縮小と関連があるものと推察される。

このように空気力の生成メカニズムと非定常空気力に及ぼす乱流効果との関連をみると、空気力の生成過程において前縁剥離渦の寄与の大きい断面については非定常空気力に及ぼす乱流効果が大きいと言える。しかも、その影響は空力モーメントに顕著に現れており、揚力については空力モーメントほど顕著に現れていない。この原因の詳細は不明であるが、今後、断面周りの圧力計測や数値流体解析 (CFD) 等を行い、原因究明したいと考えている。

4. まとめ

本論文ではアクティブ制御された乱流下で種々の構造基本断面の非定常空気力に及ぼす乱流効果を調査した。得

られた知見を以下に列挙する。

- (1) アクティブガストジェネレータにより生成される乱流時系列に再現性があることを利用して、強制振動法により乱流中の非定常空気力を抽出する方法を提案した。
- (2) 一様流中と乱流中の非定常空気力係数の比較およびそれらの空気力を用いたフラッター解析から前縁剥離渦の影響が大きな断面の方が乱れの影響を強く受けることが分かった。
- (3) 空気力の生成メカニズムと非定常空気力に及ぼす乱流効果との関連について、等価 Wagner 関数により考察し、空気力の生成過程において前縁剥離渦の寄与の大きい断面については非定常空気力に及ぼす乱流効果が大きく、その影響は空力モーメントに顕著に現れることを指摘した。揚力については空力モーメントほど影響が現れないが、今後、圧力計測や数値流体解析 (CFD) 等を行い、原因究明したいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、植田利夫、田中 洋、三河克巳、山口映二：内側 2 車線をグレーチング構造とした偏平箱桁の空力特性、土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集、I-B060、平成 12 年
- 2) 松本 勝、陳 新中：長大橋のガスト時刻歴応答解析、第 14 回風工学シンポジウム論文集、pp.515-520、1996.12
- 3) W. H. Lin : Forced and Self-Excited Response of a Bluff Structure in a Turbulent wind, Doctoral Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Princeton Univ., 1977.
- 4) 松本 勝、白石成人、白土博通、平井滋登、伊藤祐一、重高浩一：H 型断面柱のねじれフラッター特性に関する研究、第 11 回風工学シンポジウム論文集、1990.12., pp.251-256
- 5) 上島秀作、松田一俊、杉本高志：乱流中における橋桁の非定常空気力特性、土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集、I-B050、平成 12 年
- 6) H. Kobayashi, A. Hatanaka and T. Ueda : Active Simulation of Time Histories of Strong Wind Gust in a Wind Tunnel, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 53, 1992., pp.315-330
- 7) 小林紘士、畑中章秀、松田健一、奥村 学：乱流中の橋梁断面の空力減衰に関する実験的研究、第 14 回風工学シンポジウム論文集、1996., pp.509-514
- 8) 田村幸雄、佐々木 淳、塚越治夫：RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価、日本建築学会構造係論文、第 454 号、1993.12., pp.29-38
- 9) E. Simiu and R. H. Scanlan : Wind Effects on Structures 3rd Edition, John Wiley & Sons, INC., 1996.
- 10) 田中 洋、畑中章秀：非定常空気力を用いた空力アドミッタンスの推定法、日本風工学会論文集、第 83 号、平成 12 年 4 月、pp.141-160
- 11) 吉村 健、中村泰治：インディシャル応答による橋梁断面のねじりフラッタの研究、土木学会論文集、No.234、1977., pp.33-40

(2002年9月13日受付)