

# CFD を用いた構造物の耐風設計法の研究

## Development of Wind-Resistant Design for Structures by Applying CFD

上 島 秀 作 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主査 博士（工学） 技術士（建設部門）  
 黒 田 眞 一 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主査 博士（工学）  
 山 内 邦 博 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 技術士（建設部門）

橋梁や高層ビルなどに作用する風荷重は静荷重としての取扱いのみならず、動的な効果、つまり風速が変動する効果や構造物が振動する効果などを考慮する必要がある。これらは従来、風洞試験を実施して評価されてきたが、数値流体解析（CFD）を用いた評価法についても各機関で研究が進められている。筆者らも二次元 CFD を橋梁の耐風設計に適用することを目指して、適用手法について基本的な検討を行った。大型吊橋に作用する動的風荷重の解析の評価を試みた結果、風洞試験結果と整合する結果が得られた。

On large structures such as bridges and high-rise buildings, it is important to take account the dynamic effects of wind loadings, buffeting force due to the fluctuation of wind velocity, and self-excited wind force due to their own motions. In recent years much effort has been made to apply CFD to the aerodynamic and aeroelastic problems of large structures. Using two-dimensional CFD code, the authors tried to estimate the dynamic wind load acting on the basic cross-section for large bridges, and as a result, they obtained accurate calculation results consistent with wind tunnel test results.

### 1. 緒 言

強風や同時に発生する水害による社会的な損失は地震災害と並び大きなものである。従来の台風被害に加えて、最近では突風や竜巻などの被害が多く報告されており、今後も気候変動などの影響を踏まえた継続的な防災関連研究が必要である。

橋梁に関しては、吊橋など長大橋の場合、個々の橋梁に対して風洞試験を実施し耐風安定性が照査される。一方で数値流体解析（CFD）も耐風設計への本格的な適用に向けて、多数の検討がなされている。筆者らも、橋桁に作用する動的空気力を CFD で計算する手法について検討を実施してきた<sup>(1), (2)</sup>。

CFD が耐風設計ツールとして用いられるようになるには、橋桁に作用する静的・動的風荷重を十分な精度で評価できなければならない。現状では、CFD は構造物の対風応答を非常に精度良く解析できる場合もあれば、条件によってはうまく再現できない場合もある。すなわち、適用可能な領域に関する検証が十分行われているとはいえ、CFD だけによる照査については不安が残る。風洞試験に代わる設計ツールと位置付けるためには、さらに広い範囲の精度検証が必要である。

本稿では、長大橋の耐風設計で注意すべき二つの空力振

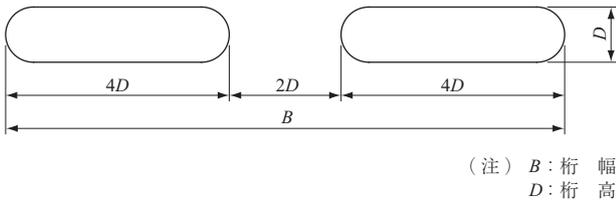
動現象であるフラッタとガスト応答に対する検討結果を述べる。フラッタは橋桁自身の振動に起因する非定常空気力（自励空気力）、ガスト応答は風速の変動に起因するガスト空気力（強制空気力）による空力振動現象である。それらの動的空気力を CFD で評価し、得られた空気力を用いた応答解析結果について精度の検証を行った。

### 2. フラッタの検討

長大橋に生じるフラッタを設計段階で検討する場合、フラッタ解析を用いて発現風速の推定を行う場合がある<sup>(3)</sup>。フラッタ解析では、吊橋全体の三次元骨組みモデルを構築し、その桁部分にフラッタを生じさせる非定常空気力を載荷して不安定応答が生じる風速を求める。通常、桁の非定常空気力は二次元風洞試験で計測されるが、ここでは、その代わりに CFD を用いた手法を用いた検討結果について述べる。

#### 2.1 検討対象断面

第 1 図に示す断面形状について非定常空気力特性を評価した。設計風速が高い地点に建設される長大吊橋で、断面中央部に通風部を設けた二箱桁形式が採用される場合がある。二箱桁断面は通常の一箱桁断面に比べてフラッタ耐風性に優れるといわれている。本来、橋桁断面は高欄などの付属物が設置されるが、本断面はそれらを除去し単純化



第 1 図 検討対象断面  
Fig. 1 Cross-sectional shape

した断面である。

## 2.2 非定常空気力の定義

第 2 図に示す断面の振動に伴う非定常空気力は (1) および (2) 式で定義される非定常空気力係数を用いて表される。

$$L = \pi \rho B^3 \omega^2 \left\{ (C_{L\eta r} + i \cdot C_{L\eta i}) \cdot \eta / B + (C_{L\theta r} + i \cdot C_{L\theta i}) \cdot \theta \right\} \dots\dots\dots (1)$$

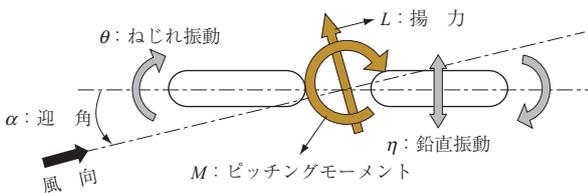
$$M = \pi \rho B^4 \omega^2 \left\{ (C_{M\eta r} + i \cdot C_{M\eta i}) \cdot \eta / B + (C_{M\theta r} + i \cdot C_{M\theta i}) \cdot \theta \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- $L$  : 揚力 (N/m)
- $M$  : ピッチングモーメント (N・m/m)
- $\eta$  : 鉛直振動の振幅 (m)
- $\theta$  : ねじれ振動の振幅 (rad)
- $B$  : 断面幅 (m)
- $C_{**}$  : 非定常空気力係数
- $\rho$  : 空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\omega$  : 角振動数 (rad/s)
- $i$  : 虚数

## 2.3 CFD 解析法<sup>(4)</sup> および風洞試験法

CFD に関しては、支配方程式として二次元非圧縮 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (以下, RANS と呼ぶ) 方程式とし, 乱流モデルには Menter<sup>(5)</sup>  $k-\omega$  SST モデルを採用した。対流項の差分スキームには五次精度風上差分, 時間積分は二次精度陰解法を用いている。数値解析法の詳細については文献 (4) を参照願いたい。



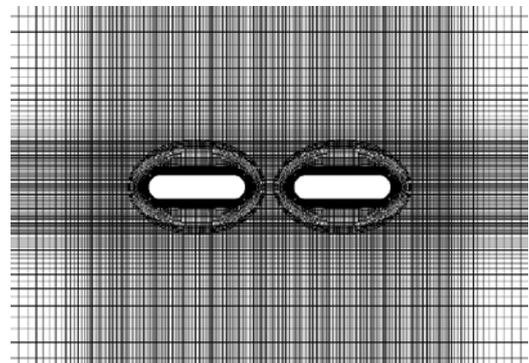
第 2 図 非定常空気力の定義  
Fig. 2 Definition of unsteady aerodynamic force

解析格子は第 3 図に示すような H 型の背景格子 (矩形直交格子) と物体近傍の O 型格子を組み合わせる複合格子を用いた。非定常空気力を評価するためには鉛直並進 ( $\eta$ ) および回転 (ねじれ) ( $\theta$ ) 運動をさせなければならない。本手法では格子は変形させず二箱桁断面の運動に従い剛体的に運動させた。物体周りの O 型格子は 201 × 50 (周 × 径), 背景格子の H 型格子には 299 × 150 (流れ方向 × 垂直方向) を用いた。壁面最小格子幅は構造幅  $B$  の  $5.0 \times 10^{-5}$  倍, 時間積分の無次元時間刻みとして無限遠での風速  $U$  を用いて  $\Delta t \cdot U/B = 0.01$  とした。

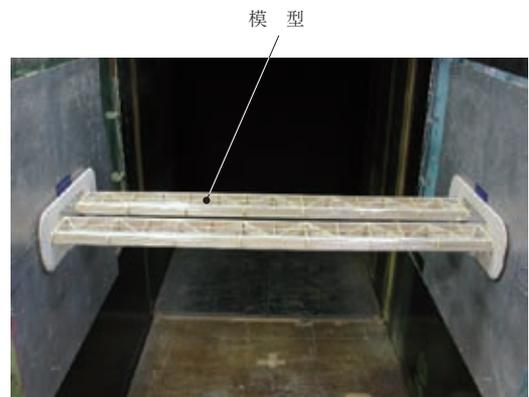
風洞試験では第 4 図に示すような二次元模型を製作し, 強制振動時に作用する非定常空気力をロードセルで計測した。第 1 表に解析と風洞試験の条件を比較して示す。

## 2.4 非定常空気力の特性

第 5 図に CFD と風洞試験で得られた非定常空気力係数の比較を示す。図には Theodorsen の平板翼理論値を併記した。迎角  $\alpha = 0$  度の場合, 解析結果と風洞試験結果は良い精度で一致している。しかし, 迎角  $\alpha$  が大きくなるにしたがって両者の偏差が大きくなる傾向にある。迎角  $\alpha = 5$  度については,  $C_{L\eta r}$ ,  $C_{L\theta i}$  などの一部の非定常空気



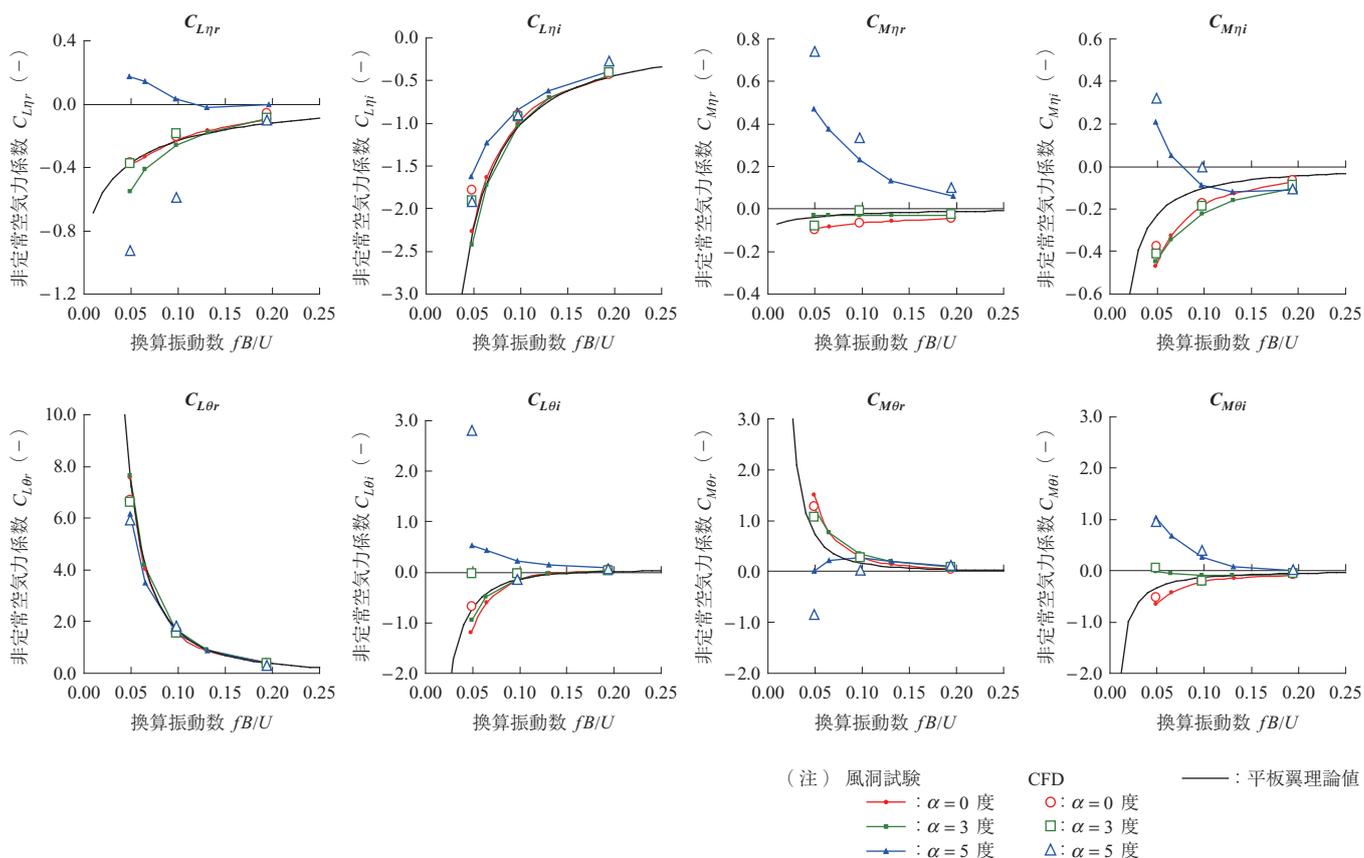
第 3 図 解析格子 (断面周辺のクローズアップ)  
Fig. 3 Grid for numerical analysis (Close-up of the cross-section area)



第 4 図 風洞試験模型 (二次元模型)  
Fig. 4 Sectional model for wind tunnel test (Two-dimensional model)

第 1 表 解析および風洞試験条件  
Table 1 Experimental and analysis condition

項目	記号	単位	風洞試験	CFD
桁幅	$B$	m	0.4	同断面形状
桁高	$D$	m	0.04	
換算振動数	$k = fB/U$ $f$ : 振動数	-	0.05 ~ 0.2	0.049, 0.098, 0.19
レイノルズ数	$Re = UB/\nu$ $\nu$ : 動粘性係数	-	$1.1 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^5$	$2.3 \times 10^5, 4.5 \times 10^5$
鉛直たわみ振幅	$\eta/B$	-	0.025	0.025
ねじれ振幅	$\theta$	度	2	2
迎角	$\alpha$	度	0, 3, 5	0, 3, 5



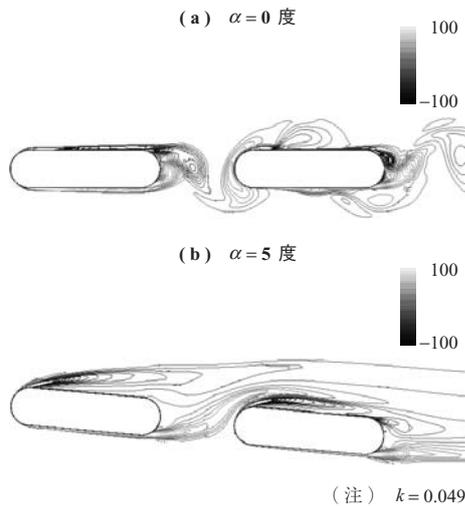
第 5 図 非定常空気力係数  
Fig. 5 Unsteady aerodynamic force coefficients

力係数において、解析結果と風洞試験の間に大きな差異が生じている。これは、架橋地点の地形によって風が吹上げあるいは吹下げの特性をもつ場合、また、強風時に橋桁に大きなねじれ変形が生じる場合は解析精度が低下することを示している。

第 6 図に  $k = 0.049$  での鉛直振動時の瞬間の流れ場を示す。第 5 図において非定常空気力特性が迎角  $\alpha = 0$  度と迎角  $\alpha = 5$  度で異なるが、断面周りの流れ場も大きく異なっていることが分かる。

流れ場について比較するため、風洞試験で簡単な流れ

の可視化を行った。中央の通風部を通過するギャップフローは第 6 図 - (b) のように強く明確なものでなく、迎角  $\alpha = 5$  度では風洞試験と CFD とで流れ場も正確に一致していない。複雑な流れ場を示す二箱桁断面の空力特性は今までも CFD で精度良く解析することが難しいとされていた<sup>(6)</sup>。本手法では迎角  $\alpha = 0$  度については精度の高い非定常空気力の推定は可能であるが、迎角  $\alpha = 5$  度については明確な分離がみられた。はく離流れの特性は CFD で用いる乱流モデルに強く影響を受ける。二次元 RANS を前提とした CFD 解析の精度を今以上に向上



第 6 図 鉛直振動時の瞬間の流れ場  
Fig. 6 Momentary flow patterns during vertical vibrations

させるためには、優れた乱流モデルの開発に期待するか、LES ( Large Eddy Simulation ) など、ほかの解析法の適用を進める必要がある。

### 2.5 フラッタ解析例

数値解析および風洞試験で得られた非定常空気力係数をを用いて鉛直振動・ねじれの 2 自由度系の構造系を対象にフラッタ解析を実施した。振動諸元は支間長 1 500 m クラスの実橋の振動諸元であり、第 2 表のように設定した。風洞試験と CFD との非定常空気力特性の差異を反映して、得られたフラッタ限界風速の偏差は迎角の増加に伴って大きくなる傾向にある。最も差異が顕著であった迎角  $\alpha = 5$  度では、フラッタ風速の偏差は 6 m/s になった。フラッタの照査風速には 1.2 の安全率を見込まれていることを勘案すると、基本設計段階での検討には実用に足る精度をもっていることが分かった。

### 3. ガスト応答の検討

ガスト応答は、自然風がもつ風速変動が強制的な動的風

第 2 表 フラッタ解析例  
Table 2 Example of flutter analysis

項 目	単 位	CFD	風洞試験	
桁 幅	m		29.1	
死 荷 重	kN/m		209	
極 慣 性 モ ー メ ン ト	kN·m <sup>2</sup> /m		1.85 × 10 <sup>3</sup>	
鉛直曲げモード固有振動数	Hz		0.111	
ねじれモード固有振動数	Hz		0.254	
構造減衰 (対数減衰率)	-		0.02	
フラッタ風速	$\alpha = 0$ 度	m/s	85.5	83.0
	$\alpha = 3$ 度	m/s	78.5	74.0
	$\alpha = 5$ 度	m/s	32.0	38.0

荷重として作用し、その結果生じる不規則振動である。風速の増加とともに振幅も増加するので、静的荷重に準じたものとして扱われる。

応答を評価するための解析法として、時間領域と周波数領域<sup>(7)</sup>のガスト応答解析法があるが、後者の方が広く用いられている。実際のガスト応答挙動は鉛直曲げ、水平曲げおよびねじれ振動が同時に生じる不規則振動であるが、各振動自由度の線形重ね合わせを前提に、各振動成分に分解し議論される。本検討では鉛直方向のガスト応答を取り上げる。扁平な箱桁形式の長大橋では鉛直方向のガスト応答が卓越する場合が多い。

本検討では最も簡単な構造モデルとして、橋桁断面が鉛直方向に 1 自由度で振動するモデルを想定する。周波数領域では、風速変動のパワースペクトル  $S_w(K)$  から (3) 式を用いてガスト空気力のパワースペクトルが与えられる。

$$S_L(K) = \left( \frac{1}{2} \rho U^2 B \right)^2 \left[ \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right]^2 |X_L^w(K)|^2 \frac{S_w(K)}{U^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- $S_L(K)$  : ガスト揚力のパワースペクトル (N<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>·s)
- $S_w(K)$  : 風速変動のパワースペクトル (m<sup>2</sup>/s)
- $K$  : 無次元振動数 (=  $\omega b/U$ )
- $B$  : 桁幅 (m)
- $b$  : 桁幅の半分 ( $b = \frac{B}{2}$ ) (m)
- $C_D$  : 抗力係数
- $C_L$  : 揚力係数
- $U$  : 風速 (m/s)
- $\rho$  : 空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\alpha$  : 迎角 (rad)
- $|X_L^w(K)|^2$  : 空力アドミッタンス

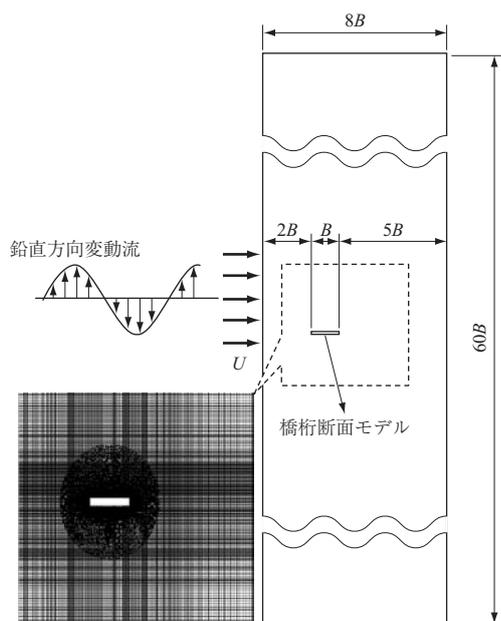
(3) 式において風速変動のパワースペクトルは架橋地点の気流変動特性を踏まえた設計条件として与えられる場合が多い。一方、抗力係数および揚力係数勾配 ( $dC_L/d\alpha$ ) は橋桁断面固有の値であるため、風洞試験で実測するか、あるいは良く似た断面形状の値が用いられる。空力アドミッタンスは変動風速から変動揚力への伝達関数であり、橋桁断面に固有の周波数特性をもつ。空力アドミッタンスも風洞試験結果での実測値を適用するべきであるが、比較

的計測に労力を要するため平板理論値で代用されることも少なくない。本検討では風洞試験によらずに CFD で抗力係数、揚力係数勾配および空力アドミッタンスを含めたガスト空気力特性を評価する。

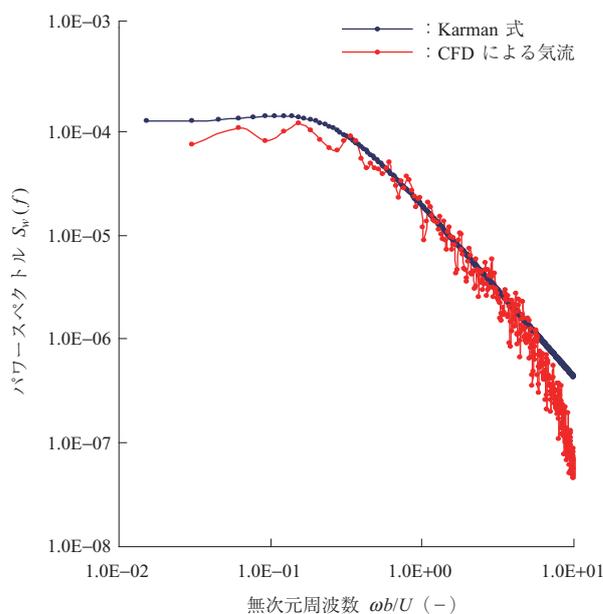
### 3.1 解析法

本検討で用いた CFD によるガスト空気力の推定手法は風洞試験によるガスト空気力計測法を模したものである。第 7 図に示すように解析領域から鉛直流速変動を含む気流を流入させ、静止した橋桁断面モデルに作用するガスト空気力を算出した。このとき、流速の主流方向成分は一定となるように設定した。CFD の解析手法は 2.3 節で述べたものと同様である。本検討での解析条件を第 3 表に示す。

流入させる風速変動として、単一振動数成分のみの正弦波ガストと自然風のパワースペクトルを模した不規則波ガストの 2 種類を準備した。第 8 図に不規則ガスト



第 7 図 ガスト空気力評価法  
Fig. 7 Evaluation method of gust force



第 8 図 風速変動のパワースペクトル  
Fig. 8 Power spectrum of wind velocity fluctuation

のパワースペクトルの比較を示す。目標値として自然風のパワースペクトルを近似する Karman 式を用いた。 $\omega b/U > 6$  の高周波領域では風速変動のパワーが不足する傾向にあるが、高周波領域は大型橋梁の固有振動数に該当する無次元周波数から外れるため、重要性は低い。一方、低周波の領域についてはターゲットと良く一致しており、自然風と相似なパワースペクトル特性が再現できている。

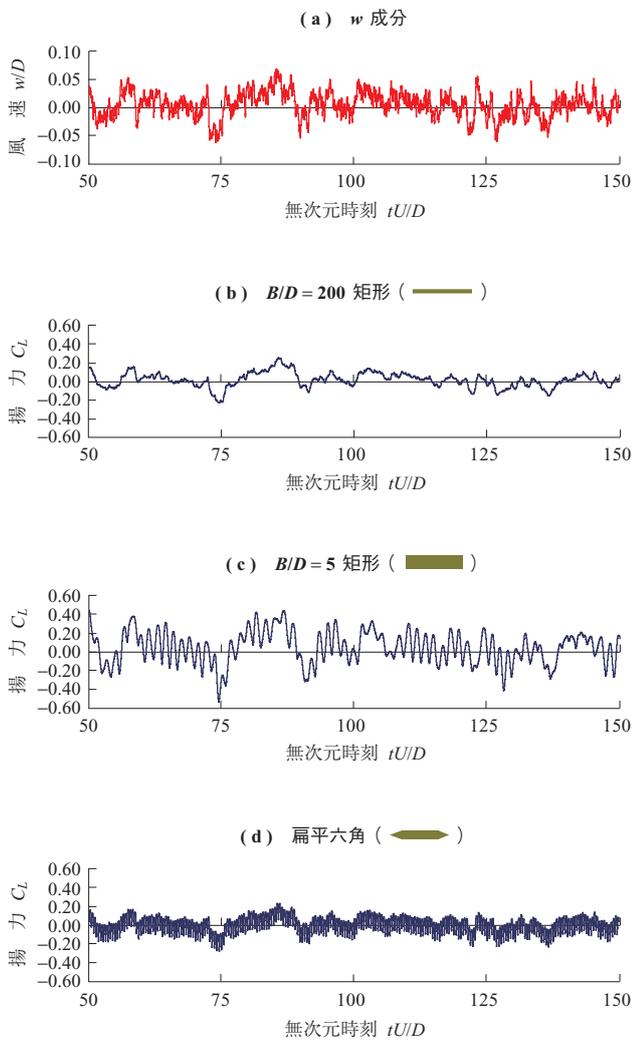
### 3.2 ガスト空気力の解析結果

不規則乱流中における変動揚力の時刻歴波形の一例を第 9 図に示す。第 9 図 - (a) は流速変動 ( $w$  成分) の時刻歴波形、- (b)、- (c)、- (d) は同じ時間帯における各断面の揚力変動である。同じ風速変動でも断面形状の影響を受け、ガスト空気力特性が異なっていることが分かる。

鉛直方向の風速変動に同調した変動成分 (準定常成分) に断面後流渦によるストローハル成分が重なり合った揚力変動を示す。準定常変動成分も  $B/D = 5$  矩形断面 (第 9

第 3 表 解析条件  
Table 3 Analysis conditions

項目		$B/D = 200$ 矩形	$B/D = 5$ 矩形	扁平六角
断面形状				
解析格子	断面近傍	285 × 83	293 × 45	263 × 43
	背景	294 × 459		
解析時間刻み ( $\Delta t U/B$ )		0.01		
レイノルズ数 ( $UB/\nu$ )		$1.4 \times 10^5$		



第 9 図 風速とガスト揚力の時刻歴  
Fig. 9 Time records of lift forces and wind velocity

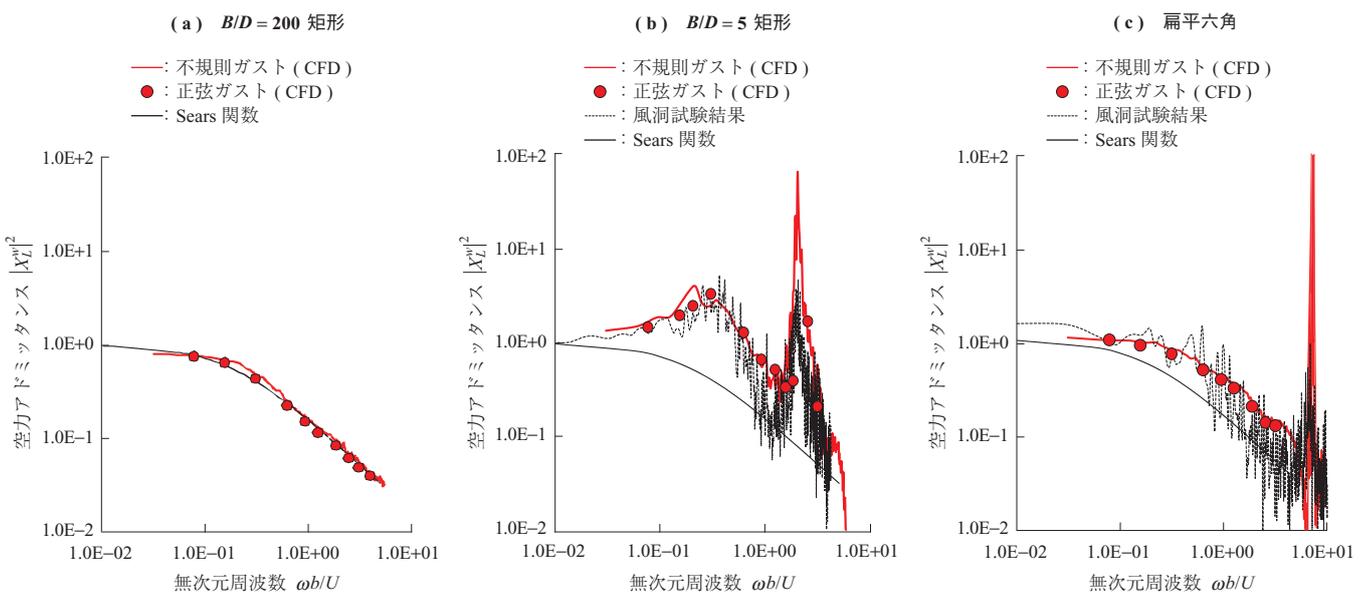
図 - (c) ) では平板  $B/D = 200$  ( - (b) ) および扁平六角断面 ( - (d) ) の場合に比べて大きく、断面によって増幅される場合がある。

(3) 式を用いて、第 7 図で示した風速のパワースペクトル、別途 CFD を用いて評価した抗力および揚力係数勾配を用いて、空力アドミッタンス  $|X_L^w(K)|^2$  を算出した。第 10 図に空力アドミッタンスの解析値と風洞試験による実測結果との比較を示す。風洞試験結果は主流方向と鉛直方向の乱れ成分をもつ二次元乱流中で変動風力を実測し算出したものである。平板の空力アドミッタンスの理論解である Sears 関数も図に併記した。長大橋梁の補剛桁は幅に比べて高さが低い扁平な断面形状が多いので、空力アドミッタンスとして Sears 関数が代用される場合が少なくない。しかし、図から分かるように、空力アドミッタンスは断面形状に依存して周波数特性が異なる。 $B/D = 5$  矩形断面 (第 10 図 - (b) ) では  $K (= \omega b/U) = 0.3$  を中心とするなだらかなピークが存在し、Sears 関数から大きく上回っている。これとは対照的に扁平六角断面 (第 10 図 - (c) ) は Sears 関数と類似の周波数特性をもつ。 $1 < K < 10$  に存在する鋭いピークは後流渦によるストローハル数に相当するピークである。

CFD による解析結果は、それぞれのガスト空力力の周波数特性を良く表現しており、風洞試験における実測値と良く一致している。

### 3.3 ガスト応答解析例

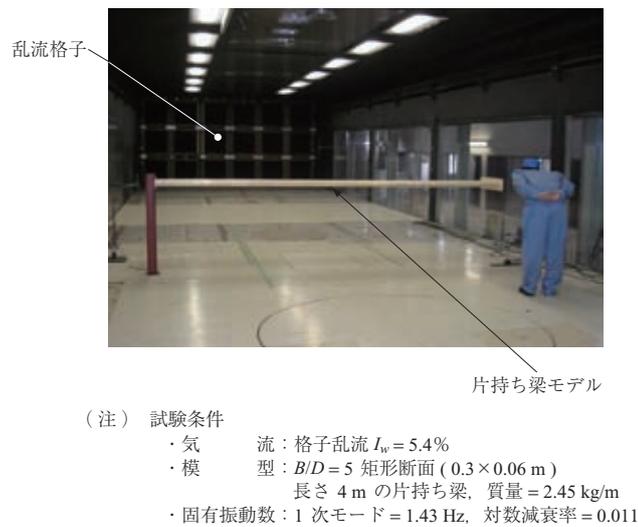
簡単な片持ち梁モデルの風洞試験を実施し、CFD で得



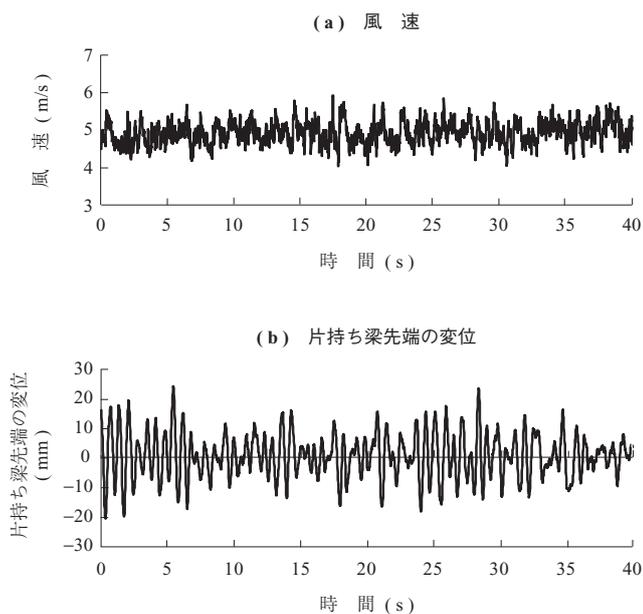
第 10 図 空力アドミッタンス  
Fig. 10 Aerodynamic admittance functions

られたガスト空気力特性を用いた解析法の精度を調べた。風洞試験の状況・条件を第 11 図に示す。  $B/D = 5$  矩形断面をもち、長さ 4 m の片持ち梁の弾性模型を風洞内に設置した。風洞の入り口に乱流を生成するための格子を設置して、乱流中における片持ち梁先端の鉛直方向のガスト応答変位を計測した。一方で、第 10 図で得られた  $B/D = 5$  矩形断面の空力アドミッタンス特性を用いてガスト応答解析を実施した。

第 12 図に平均風速  $U = 5 \text{ m/s}$  における風速変動とガスト応答の時刻歴波形の一例を示す。ガスト応答は 1 次



第 11 図 片持ち梁のガスト応答風洞試験  
Fig. 11 Wind tunnel test on gust response of a cantilever

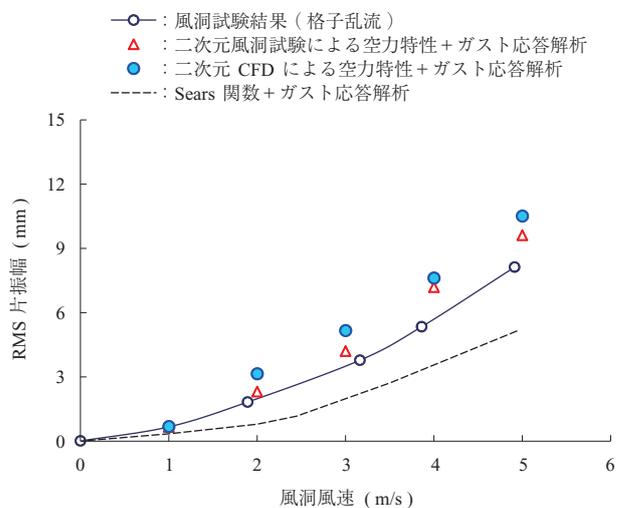


第 12 図 風速変動とガスト応答の時刻歴  
Fig. 12 Time records of wind velocity and gust response amplitude

モードのみが卓越した応答特性を示す。したがって、変動揚力の周波数域の中で 1 次モードの固有振動数に相当する領域のパワーの大きさが応答振幅を支配する。風速  $U = 5 \text{ m/s}$  の場合、1 次モードの固有振動数に相当する無次元周波数は  $K = \omega b / U = 1.43 \times 3.14 \times 0.3 / 5 = 0.27$  となる。第 10 図より  $B/D = 5$  矩形断面の空力アドミッタンスはなだらかなピークの領域で Sears 関数を大きく上回る。

第 13 図に平均風速とガスト応答振幅 (RMS 値) の比較を示す。第 10 図において CFD と風洞試験結果に基づく空力アドミッタンスが一致しているのを反映し、両者を用いたガスト応答推定値もほぼ整合している。一方で、格子乱流中での応答はこれらの解析値に対して小さい応答振幅を示している。また、Sears 関数を用いた解析値は計測結果を大きく下回り  $K = 0.27$  付近における空力アドミッタンスの違いが応答値に表れている。

第 10 図に示す断面のガスト空気力特性をとらえた空力アドミッタンスを用いた場合でも、風洞試験の実測値とガスト応答解析結果は精度良く一致しているとは言えない。第 10 図では構造軸方向の乱れ強さ ( $I_v$ ) が主流成分 ( $I_w$ ) や鉛直成分 ( $I_u$ ) に比較して 1 オーダ小さい二次元乱流を用いているが、片持ち梁応答試験で用いた乱流は構造軸方向の乱れ強さ ( $I_v$ ) が大きい格子乱流である。これらの乱流特性の違いが  $B/D = 5$  矩形断面のガスト空気力特性に影響を及ぼしている可能性があり、本研究で検討の及ばなかったほかのパラメータを精査する必要がある。また、今後の精度向上のためには三次元解析の適用を含めた検討が必要であろう。



第 13 図 風速とガスト応答振幅の関係  
Fig. 13 Wind velocity vs. gust response amplitude

## 4. 結 言

橋桁に作用する非定常空気力およびガスト空気力を二次元 RANS に基づく CFD によって評価する手法を示した。さらに、幾つかの断面についてフラッタ風速とガスト応答振幅を解析的に評価し、風洞試験結果と比較して適用精度を検証した結果、試験結果とかい離する条件も存在するが、従来の机上検討に比べると十分に精度の高い応答評価が可能であることが明らかになった。

特に、橋梁のガスト応答については今までに CFD を用いて評価を試みた例がほとんどなく、本検討によってガスト空気力特性を評価することが可能であることが分かった。

### — 謝 辞 —

本検討を遂行するに当たり、立命館大学の小林紘士名誉教授には多大なるご指導をいただきました。また、株式会社 IHI インフラシステムの杉本高志氏にはフラッタに対する検討において多大な貢献をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- ( 1 ) 杉本高志, 黒田眞一, 市東素明, 松田一俊, 上島秀作: 風洞実験と数値計算による二箱桁断面の非定常空気力に関する研究 構造工学論文集 Vol. 51A 2005 年 3 月 pp. 933 - 943
- ( 2 ) 上島秀作, 黒田眞一, 小林紘士: 数値流体解析によるガスト空気力の推定 第 19 回風工学シンポジウム論文集 2008 年 12 月 pp. 331 - 336
- ( 3 ) 樋上琇一, 松田一俊: 長大橋の多自由度フラッター解析 石川島播磨技報橋梁特集号 1995 年 4 月 pp. 34 - 39
- ( 4 ) S. Kuroda : Numerical Computations of Unsteady Flows for Airfoils and Non-airfoil Structures AIAA 2001-2714 ( 2001. 6 )
- ( 5 ) F. R. Menter : Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications AIAA Journal Vol. 32 No. 8 ( 1994 ) pp. 1 598 - 1 605
- ( 6 ) H. Sato, J. Murakami, K. Fumoto and M. Miyazaki : Calculation of Unsteady Aerodynamic Force by CFD and their Comparison with Measured Values Proceedings of 11th ICWE ( 2003. 6 ) pp. 381 - 388
- ( 7 ) 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