

長周期変動風中で $B/D = 2$ 矩形断面に作用する非定常圧力特性Unsteady Pressure of Vortex-induced Oscillation of $B/D = 2$ Rectangular Cylinder
in Slowly Fluctuating Wind

野田 稔*・長尾文明**・岩田晃周***・森田尚樹****・宇都宮英彦†

Minoru NODA, Fumiaki NAGAO, Akihiro IWATA,
Naoki MORITA and Hidehiko UTSUNOMIYA

*正会員 工博 徳島大学助手 工学部 建設工学科 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

**正会員 工博 徳島大学助教授 工学部 建設工学科 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

***学生会員 徳島大学大学院 工学研究科 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

****学生会員 徳島大学大学院 工学研究科 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

†フェロー 工博 徳島大学名誉教授 工学部 建設工学科 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

The effects of the slowly sinusoidal fluctuating wind on the vortex-induced oscillation of a $B/D=2.0$ rectangular cylinder were investigated by the wind tunnel test and the numerical simulation of the response. Furthermore, the unsteady pressure distributions on the model surface were measured by the forced oscillation method. As the results of the free vibration test and the numerical simulation, the vortex-induced oscillation in the slowly fluctuating wind had a time lag between the velocity and the response amplitude. The relation between the velocity and the response amplitude formed a Lissajous curve, which didn't trace along the V-A curve in uniform flow. The damping force and the excitation force in the slowly fluctuating wind were stronger than those in uniform flow. As the results of the pressure measurement test, it was clarified that this phenomenon was caused by the change of the strength and of streaming speed of vortices.

Key Words : *oscillation due to motion-induced vortex, forced vibration method, unsteady pressure*

キーワード：自己励起型渦励振，強制加振法，非定常圧力

1. はじめに

古くより気流の乱れが構造物の空力安定性に及ぼす影響については様々な研究者によって検討されており，気流の乱れが構造物に作用する空気力に強く影響し^{1),2)}，渦励振やギャロッピング，フラッターなどの空力応答特性を変化させることは広く知られている^{3),4),5)}．ここで，従来より風洞試験で取り扱われてきた気流の乱れとは，平均風速という名の中心風速を時間的に一定に保ち，パワースペクトルなどの変動特性も同じく時間的に一定に保たれるいわゆる定常状態の乱流を指すものである．

しかし，励振力が比較的弱くその成長に数十から数百サイクルという多大な時間を要する渦励振応答のような現象の場合，従来より指摘されてきた乱れによる再付着の促進，渦形成の阻害などの影響の他に，成長に時間を要するがゆえに無視できない中心風速の影響の存在も懸念されるべきである．すなわち，渦励振応答などについては，平均風速を U とするとき，従来の考え方では暗黙のうちに $\partial U / \partial t = 0$ とされてきたが，構造物の固有周期の数十倍から数百倍の周期で平均風速が変動し $\partial U / \partial t$ が値をもっているという状況について，そのような風速変動が構造物の応答特性に及ぼす

影響も把握しておく必要があると考えられる．

この考えに基づき，宇都宮らは逆台形1箱桁の橋梁断面に発生する自己励起型渦励振に対して，スケールの小さいいわゆる乱流を含まない一様流の状態で中心風速を変動させ，その応答特性に対する風速の時間変化の影響について検討し，その結果として，構造物の固有周期の百倍におよぶ長い変動周期を有する非常にゆっくりとした風速変動であっても，渦励振応答はその影響を受け，風速変動下における時々刻々の風速と応答の関係は中心風速一定の一様流中で得られた風速(V)-応答(A)関係を辿らないことを示した⁶⁾．

また，同じ橋梁断面について野田らは準定常的な視点に基づいて中心風速一定の一様流中で得られた風速(V)-応答(A)-空力減衰(δ)関係を用いて長周期変動風中の渦励振応答の時刻歴変化を計算し，風速変化の伴う一様流中では，メカニズムは不明であるものの風速変動の影響によって，作用している励振力が風速一定下の励振力と異なっており，準定常的な考え方では渦励振応答の時刻歴変化を完全には再現できないことを示した⁷⁾．

さらに，野田らはより基本的な断面として円形断面，辺長比 2:1 の矩形断面を対象にその渦励振応答に対する長周期風速変動の影響を検討した結果，模型の固有

周期の200倍近い周期の風速変動であっても渦励振応答は影響を受け、時々刻々の風速に対する応答振幅は、一様流中のV-A関係に沿わず、周辺気流の渦の流下に伴う風速変動の計測から、長周期変動風下における渦の流下速度が変化し、その結果として励振力が変化している可能性を示唆した⁸⁾。

ここでは、辺長比2:1の矩形断面の渦励振応答に対する長周期変動風の影響について、再度ばね支持応答実験と準定常的な視点に基づく応答予測によって検討し、加えて風速変動とそれに伴う振幅変化を同時に再現する強制加振法による非定常圧力の計測を実施し、その結果に基づいて長周期変動風下の渦励振応答に何が起きているのかについて検討する。

2. ばね支持応答試験および応答予測による長周期風速変動の渦励振応答への影響

2.1 実験概要

(1) 供試模型

本研究では、図-1に示すような幅 $B=140\text{mm}$ 、高さ $D=70\text{mm}$ の辺長比2:1の二次元矩形断面を検討対象とした。ばね支持応答試験では、この模型を8本のコイルばねによって1自由度で支持し、実験を行った。この振動系に与えた構造諸元は表-1に示す通りであり、模型の固有周期 T は、0.222秒である。

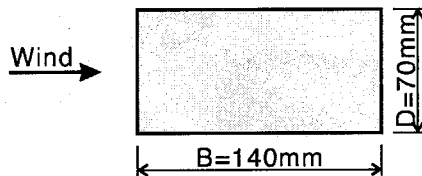


図-1 供試模型の断面

表-1 ばね支持モデルの構造諸元

固有振動数 f [Hz]	4.51
単位長さ当たりの質量 m [kg/m]	2.00
構造対数減衰率 δ	0.0196
質量減衰パラメータ $S_c = 2m\delta/\rho BD$	6.54

(2) 試験風洞

ばね支持応答試験は、幅1.0m、高さ1.5m、長さ4.0mの測定胴を有する押し込み型室内還流式風洞によって実施した。本風洞は、軸流ファンをDCモーターによって駆動する形式であり、本研究では、このDCモータードライバに与える制御電圧を時間的に変化させることで風速変動を生成した。

(3) 渦励振応答の基本特性

ここで、使用した模型の基本的な渦励振応答特性を把握するために、中心風速一定の一様流中における風速

(V)-応答(A)関係および風速(V)-応答(A)-対数減衰率(δ)関係を求めた。図-2にV-A図を示すが、この結果より、渦励振応答は換算風速 U/fD が2.5から5.75の間で発生しており、渦励振発生領域の幅 ΔV_{width} は3.25におよんでいる。また、発生風速がおおよそ $1.67B/D$ に相当する3.3付近であること、 U/fD が3.75から5.75の間では不安定なリミットサイクルが存在し、V-A曲線が非対称な形状を有していることを考慮すれば、ここで生じている渦励振は前縁剥離渦による自己励起型渦励振⁹⁾である。

次に図-3に自由振動法によって求めた対数減衰率によるV-A- δ 図を示す。ここで、図中の対数減衰率には構造減衰 $\delta_{\text{st}}=0.0196$ が含まれている。

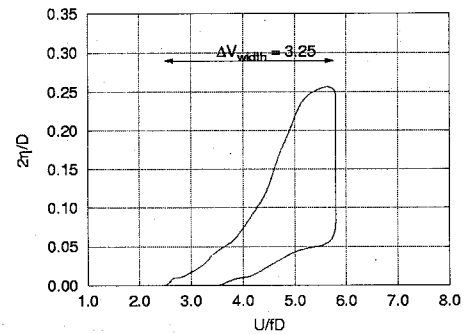


図-2 中心風速一定の一様流中における渦励振応答

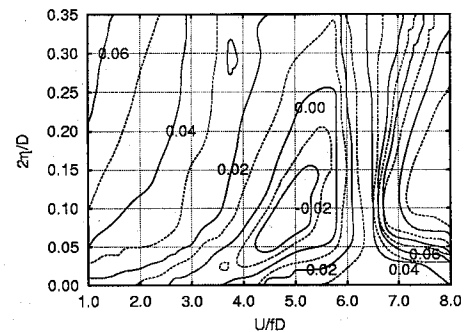


図-3 中心風速一定の一様流中における対数減衰率分布

(4) 長周期変動風の生成

本研究では、長周期変動風として次式で表されるような正弦波的に風速が変化する流れを生成した。

$$V(t) = \frac{U(t)}{fD} = V_c + \Delta V \sin \frac{2\pi t}{T'} \quad (1)$$

ここで、 f は模型の固有振動数、 V_c は中心風速、 ΔV は風速変動振幅、 T' は風速変動周期を表している。実際の風洞では、送風ファンの慣性が大きくモーターの制御電圧を単純に正弦波で変化させるだけでは目標の風速変動は得られないため、実際に得られた風洞風速をモーター制御電圧にフィードバックし、上式の風速変動となるように送風ファンの駆動モーターの回転数を制御した。

本研究で生成した変動風は、 ΔV が $0.1\Delta V_{\text{width}}$ から $0.4\Delta V_{\text{width}}$ 、 V_c が 3.5 から 5.75 の間でそれぞれ変化させ、 T' については模型の固有周期の 180 倍に相当する 40 秒に固定した。

2.2 準定常的見地に基づく応答予測方法

本研究では、渦励振応答に対する風速変動の影響を把握するために、風速変動が空力減衰には影響しないとの仮定すなわち準定常的に導かれる次式を用いて、風速変動下における時々刻々の応答振幅の変化を予測した。

$$\eta(t+dt) = \exp \left\{ -\frac{dt}{T} \cdot \delta[V(t), \eta(t)] \right\} \eta(t) \quad (2)$$

この関係式は、振動波形より対数減衰率を求める式の逆関数として定義したものであり、式中の $\delta[V(t), \eta(t)]$ は風速 $V(t)$ 、振幅 $\eta(t)$ に対する対数減衰率、 T は模型の固有周期である。実際の計算では、この $\delta[V(t), \eta(t)]$ は風速変動が空力減衰には影響しないという前提に基づいて図-3 に示した $V-A-\delta$ 関係より与えた。また、ここでは計算結果に影響が出ないことを確認した上で時間間隔 dt として風速の変動周期 T' の 0.125% に相当する 0.05 秒を与え、 $t=0$ における応答振幅の初期値 $\eta(0)$ は $0.2D$ とした。

2.3 長周期変動風中の渦励振の基本的な性質

図-4 に $V_c=4.0$ 、 $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.1$ の長周期変動風下で得られた渦励振応答の時刻歴波形の例を示す。この図より、長周期変動風下では応答振幅が風速変動に同期して変化していることがわかる。また、風速変動に対して、応答振幅の変動にはタイムラグが存在することがわかる。ここで、風速変動と応答振幅の変動の関係を図化すると図-5 に示すような風速-応答履歴曲線を描くことができる。この実験条件の場合、図中の曲線は、反時計回りに回転している。この結果より、模型の固有周期の 180 倍という非常にゆっくりとした風速変動であっても、渦励振応答の振幅は風速一定の一樣流中で得られる $V-A$ 曲線には一致しないことがわかる。

次に、図-5 と同じ条件に対して、式-(2) によって予測された応答の時刻歴変化を図-6 に示す。この計算では、先にも述べたように応答振幅の初期値 $\eta(0)$ は $0.2D$ としているが、2 周期程度の風速変動の間に風速-応答履歴曲線は最終的な形に収束した。

図-5 と図-6 を比較すると、図-6 では計算の元となる $V-A-\delta$ 関係からも容易に予想できるように減衰域では振幅は減少し、励振域では振幅が増加しているのだが、図-5 では励振域から減衰域へ入ったところで振幅は増加し続けている。また、振幅の範囲も実験では 0.05 から 0.12 であるのに対して、計算では 0.06 から 0.10 であり、計算に対して実験では振幅の変化の幅も大きくなっている。同じ時間に対する応答の成長、減

衰の幅が増加していることから、風速変動に伴う渦励振では風速一定の一樣流中における空力減衰に比べて励振力も減衰力も強まっていると考えることができる。

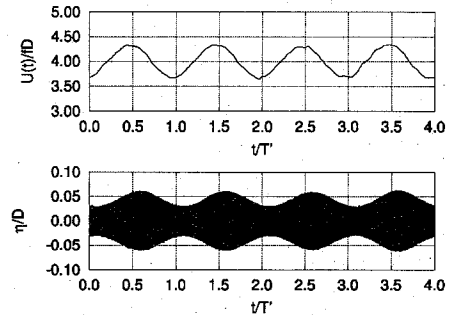


図-4 長周期変動風中で得られた渦励振応答波形の一例 ($V_c=4.0$, $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.1$)

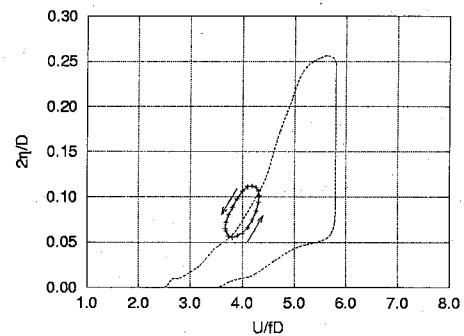


図-5 長周期変動風中で得られた風速-応答履歴曲線の一例 ($V_c=4.0$, $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.1$)

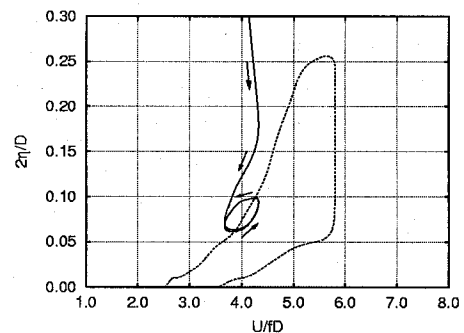


図-6 準定常的な応答予測計算より得られた風速-応答履歴曲線の一例 ($V_c=4.0$, $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.1$)

2.4 渦励振応答に対する中心風速の影響

長周期変動風の中心風速が渦励振応答に及ぼす影響を検討するため、ここでは風速変動振幅 ΔV を一定に保ったまま、中心風速 V_c を 3.5 から 5.75 の範囲で変化させた結果について検討する。

はじめに、図-7 に $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.1$ とした場合に風速応答履歴曲線を示す。図中の (a) と (b) はそれぞれ実験結果と応答予測結果を示している。この風速変動

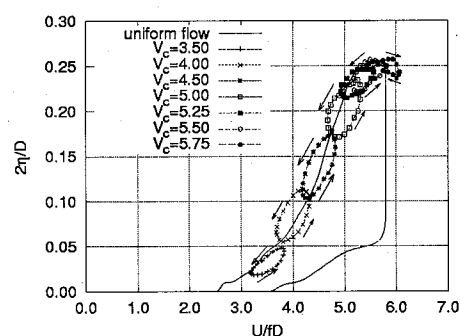
振幅の条件では、実験結果と計算結果はよく似た結果となっている。また、それぞれの中心風速における風速応答履歴曲線の中心すなわち時間平均応答量は、風速変動の伴わない一様流中における応答量とほぼ等しい。風速応答履歴曲線の回転方向は、風速の低い領域では反時計回りとなっており、風速の増加に伴って ∞ の形を示し、さらに風速が増加すると時計回りへと変化している。これは、励振域と中心風速の位置関係で決まっていると考えることができ、例えば中心風速に対して励振域が高風速側にあれば風速が高まったときに応答は成長し、風速が下がったときに応答は減衰するために反時計回りとなっている。

ここで、実験結果と計算結果の間で、風速応答履歴曲線の最大応答量 $\eta_{\max}$ と最小応答量 $\eta_{\min}$ の差 $\Delta\eta$ を比べると、 $V_c=3.5, 4, 4.5$ のケースでは計算結果の $\Delta\eta$ の方が実験結果より小さくなっていることがわかる。励振力、減衰力に風速変動の影響がないと仮定している計算結果に比べて、実験結果では応答の増減が大きくなっているということは、風速変動の伴う流れの中では励振力、減衰力は風速一定の流れの中に比べて強められていると考えることができる。また、 $V_c=5.75$ のケースでは、計算結果では応答が消失しているのに対して実験では一様流中における最大応答量と同程度の振幅を維持しているが、この結果も風速変動によって励振力が強められたためと考えることができる。

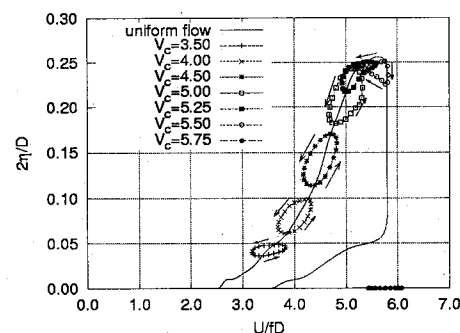
次に、 $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.3$ とした場合の結果を図-8に示す。風速応答履歴曲線の回転方向については、 $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.1$ の時と同様の変化を示しており、風速の増加に伴って反時計回りから ∞ 、そして時計回りへと変化していることがわかる。そして、各 V_c における $\Delta\eta$ を見てみると図-7よりもより顕著な違いが認められ、実験結果の方が計算結果よりも $\Delta\eta$ が大きくなっている。また、実験結果をより詳しく見てみると、 $V_c=5.25$ および 5.5 の風速応答履歴曲線では、風速が増加していく際に、励振域から減衰域に移ったにも拘らず応答は成長を続け、風速が最大値に近づいてようやく減衰に転じ、急激な応答の減少が起こっていることがわかる。そして、風速が減少に転じたところでは励振域に入る前から既に応答が増加し始めていることがわかる。風速変動の影響を無視した計算結果では当然このような現象は再現されることはなく、ここで示された実験結果もまた風速変動が励振力、減衰力を変化させていることを示唆している。特にこのケースでは風速一定下では減衰領域であった部分が励振域に転じている点が興味深い。

2.5 渦励振応答に対する変動風速振幅の影響

ここでは、風速変動振幅が渦励振に及ぼす影響を検討するために、中心風速 V_c を一定に保ったまま、風速変動振幅 ΔV を変化させた場合について検討する。図-9



(a) 風洞実験



(b) 応答予測計算

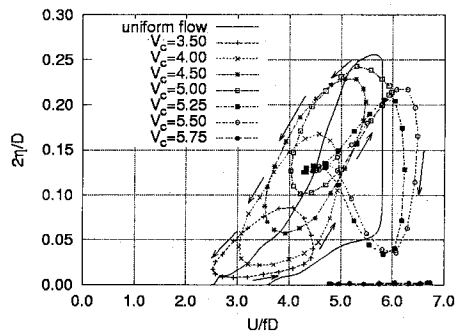
図-7 風速-応答履歴曲線に対する中心風速の影響 ($\Delta V/\Delta V_{\text{width}}=0.1$)

に $V_c=4.0$ を保ったまま、 $\Delta V/\Delta V_{\text{width}}$ を0.1から0.4まで変化させた場合の風速応答履歴曲線を示す。図中の(a), (b)は前項と同様、実験結果と計算結果を表している。これらの結果は比較的良く似たものとなっているが、風速変動一周期中の最大振幅と最小振幅の差 $\Delta\eta$ を比べると、実験結果の方が計算結果より大きくなっていることがわかる。このことから、風速変動を付加することで励振力、減衰力は強められていると考えることができる。

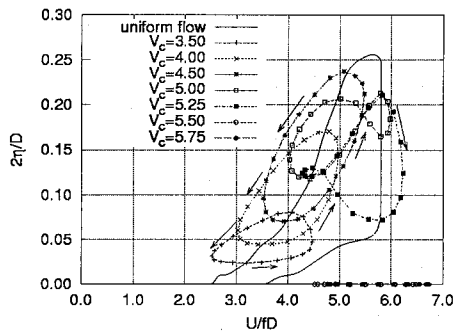
3. 強制加振法を用いた長周期風速変動が渦励振の非定常圧力に及ぼす影響の検討

3.1 実験概要

前節において示されたように、風速変動が伴った気流中では、励振力または減衰力が強められている可能性が高い。そこで、模型に作用している非定常圧力を実際に計測し、励振力、または減衰力に対して、風速変動が如何なる影響を与えているのかを検討することにした。この検討をするためには、時々刻々風速が変化する上に、同時に変化する応答振幅も再現する必要が生じる。このため、一定振幅の調和振動しか生成できない従来の加振機ではこのような応答変位の時刻歴を再現することはできないため、新たに任意の応答変位時刻歴を再現できる加振機を作製し、強制加振法による非定常空気力の計測を行った。本節ではその試験

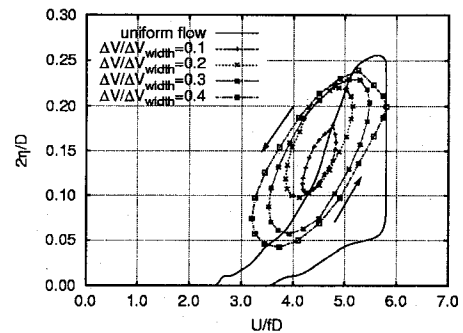


(a) 風洞実験

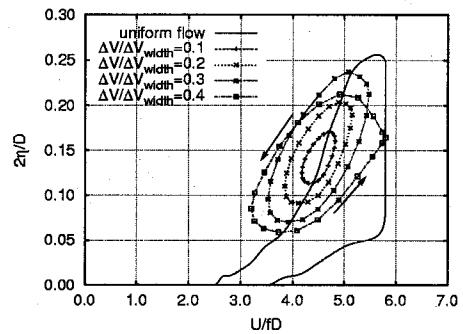


(b) 応答予測計算

図-8 風速-応答履歴曲線に対する中心風速の影響 ($\Delta V/\Delta V_{width}=0.3$)



(a) 風洞実験



(b) 応答予測計算

図-9 風速-応答履歴曲線に対する風速変動振幅の影響 ($V_c=4.5$)

内容について述べる。

(1) 任意の応答変位時刻歴を再現する強制加振装置

はじめに新たに作製した任意の応答変位時刻歴を再現できる強制加振装置を図-10に示す。本装置は、ACサーボモータとボールねじで駆動するリニアアクチュエータを2基使って後述する圧力模型を両端で支持し、鉛直1自由度の任意の時刻歴変位を発生させるものであり、このリニアアクチュエータの他に、再現する応答変位時刻歴に対応する電圧信号を受けてACサーボモータの回転角を制御するコントローラおよびコントローラに応答変位時刻歴の電圧信号を与えるD/A変換器付きのパーソナルコンピュータによって構成されている。コントローラはA/D変換器内蔵のマイクロコンピュータで作製され、与えられた電圧に見合った変位を常に再現するようにACサーボモータに駆動信号を送り続けるようにプログラムされている。また、コントローラに与えられる電圧信号は、ばね支持応答試験であらかじめ計測された応答変位時刻歴データを元にサンプリング周波数200HzのD/A変換で生成され、ここではさらに別のD/A変換出力で風洞ファンの駆動信号を出力し、これを風洞ファンの駆動モータドライバに入力することで加振機と風洞を同時に制御した。

(2) 供試模型および非定常圧力計測

図-11に、圧力模型の圧力孔の配置状況を示す。圧力孔は直径1mmであり、長さ2m、内径1mmの塩化ビニル製の導圧チューブを経由して多点同時微風圧計

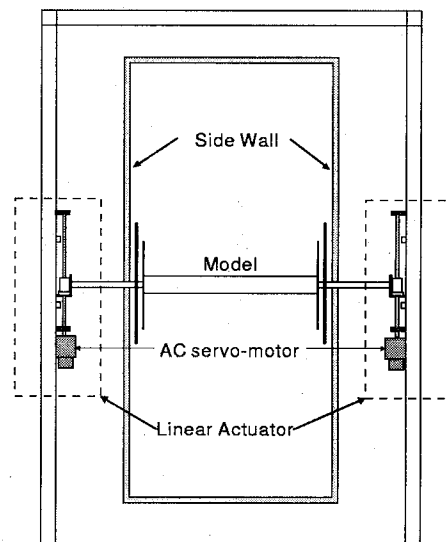


図-10 強制加振装置概略図

測装置（共和電業製）に接続された。ここでは、圧力計測の精度向上を目的に、加振振動数をばね支持応答試験の時の固有振動数の2倍の9Hzに設定することで風洞風速も2倍とし、ばね支持応答時と換算風速を一致させながら圧力を本来の4倍となるようにした。また、これに合わせて風速の変動周期も半分となり、ここでは $T'=20$ 秒とした。圧力計測のサンプリング周波数は200Hz、サンプリング時間は風速変動6周期分に相当する120秒とした。

計測された非定常圧力データは中心風速 V_c に相当す

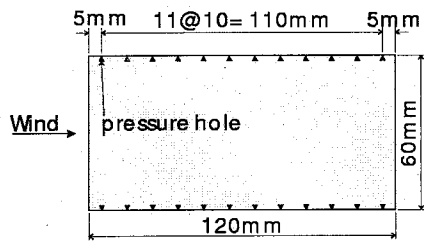


図-11 圧力孔配置図

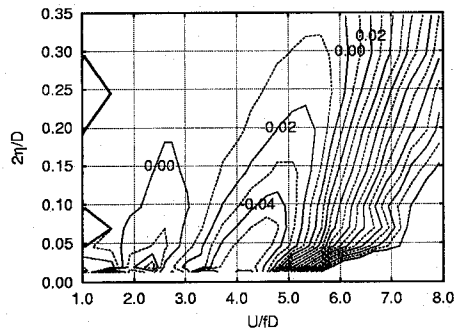


図-12 一定風速下で強制振動法によって得られた空力減衰

る速度圧によって無次元化された後、短時間フーリエ変換が施され、加振振動数成分の振幅 C_p' および変位に対する位相差 ϕ を求め、同時に平均風圧係数 C_p も求めるようにした。ここで、ある時刻 t における1回の短時間フーリエ変換は t を中心に前後 512 個ずつの時刻歴データ (計約 5 秒分) を対象に実施され、中心となる時刻は 0.5 秒 ($0.025T'$ 相当) ずつ変化させた。

(3) 一定風速下における空力減衰分布

図-12 に、風速一定、振幅一定の元で計測された励振力を対数減衰率に換算した結果を V-A- δ 図として示す。図-3 と比べると完全に同じとは言えないが、渦励振発現域付近の分布状態は同様の傾向を持っており、また $U/fD=5$ 付近の振幅の低い部分では振幅が小さくなる程減衰が大きくなる領域が存在することから不安定なリミットサイクルの発生を予想させる分布ともなっており、ばね支持応答試験時と類似の状況が再現できているものと思われる。

(4) 風速変動および応答変位の時刻歴の再現

ここでは、ばね支持応答試験時に風速-応答履歴曲線の差が認められた $V_c=4.5$, $\Delta V/\Delta V_{width}=0.4$ のケースを再現することとした。図-13 に強制加振によって再現された風速-応答履歴曲線を示す。図中の強制加振による風速-応答履歴曲線とばね支持応答実験時のものとを比べると、風速の低い側で応答変位の振幅に差異が存在するが、ほぼ風速変動と応答変位の時刻歴を再現することができていると判断できる。

今回の試験では、風速の時間的変化および振幅の時間的変化が非定常圧力に与える影響を評価できるように、風速を一定に保って強制的に応答振幅のみが時間的に変化するケースと応答振幅を一定に保って風速の

みが時間的に変化するケースについても非定常圧力の計測を実施した。

以後の検討では、図-14 に示すような風速と応答振幅が時間的に変化する風速-応答履歴曲線 (FV-FA) と、風速が一定で応答振幅のみが時間的に変化する場合の風速-応答履歴曲線 (SV-FA) が交わる A 点と C 点、または応答振幅が一定で風速のみが時間的に変化する場合の風速-応答履歴曲線 (FV-SA) が交わる B 点と D 点のタイミングで計測された非定常圧力について検討を加えていく。ここで、FV-FA の曲線と SV-FA または FV-SA の曲線が交わるタイミングはそれぞれの点において 2 回存在するが、風速または応答振幅の時間的変化の同じもののみを抽出した。各点における風速の時間的変化 (dU/dt) および応答振幅 (dY/dt) の状況についてまとめると表-2 となる。つまり、A, C 点では、風速の時間的変化がある場合とない場合、B, D 点では応答振幅の時間的変化がある場合とない場合を比較することができることになる。

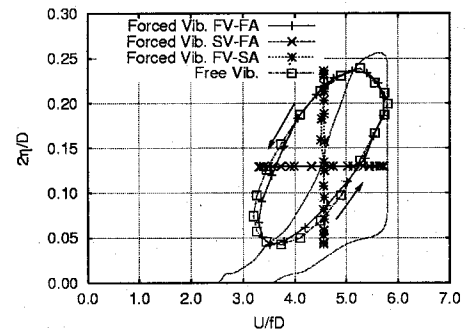


図-13 強制加振法によって再現された風速-応答履歴曲線

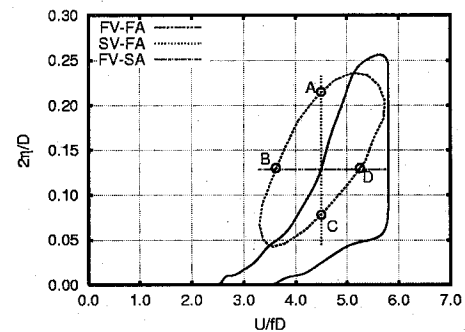


図-14 検討対象とした風速-振幅位置

3.2 風速の時間的変化が非定常圧力に及ぼす影響

図-15 に A 点と C 点において得られた模型下面における平均圧力 C_p 、変動風圧係数 C_p' 、変位に対する位相差 ϕ 、 C_p' と ϕ より求められる各非定常圧力がなす仕事 $C_p' \sin \phi$ を示す。ここで、変位は上向きを正ととっている。

はじめに A 点における速度変動のある場合とない場合を比べると、 $dV/dt < 0$ の速度変動がある場合

表-2 検討対象の風速および応答振幅の時間的変化の状況

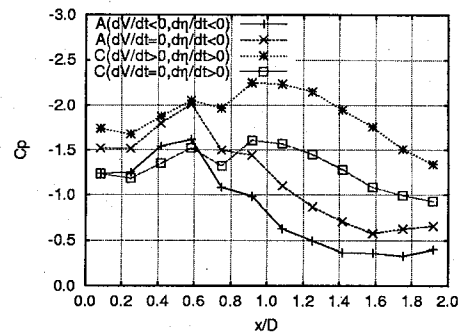
Case	dV/dt	$d\eta/dt$
A(FV-FA)	< 0	< 0
A(SV-FA)	$= 0$	< 0
B(FV-FA)	< 0	< 0
B(FV-SA)	< 0	$= 0$
C(FV-FA)	> 0	> 0
C(SV-FA)	$= 0$	> 0
D(FV-FA)	> 0	> 0
D(FV-SA)	> 0	$= 0$

の方が無い場合に比べて平均圧力係数は弱まる結果となっている。一方、C点について見てみると、ここでは $dV/dt > 0$ の速度変動がある場合の方が無い場合に比べて負圧が高まっていることがわかる。いずれの場合についても圧力分布形状はあまり変化せずに負圧の強さのみが変化するという傾向を示している。A点とC点の間については励振域と減衰域ということもあり、それぞれで異なる圧力分布形状となることについては再付着性状の変化によるものと解釈できる。

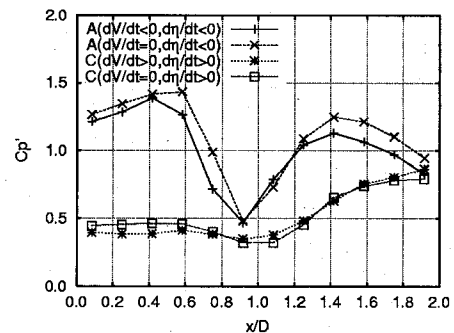
次に、A点における変動圧力係数について見てみると、 $dV/dt < 0$ の速度変動がある場合はない場合よりもわずかに弱まっており、C点では $dV/dt > 0$ の速度変動が加わった場合にはほとんど変化しない傾向にある。また、A点とC点での差については平均風圧係数と同様に再付着の有無によるものと考えることができる。一方、変位に対する位相差については、A点では $dV/dt < 0$ の速度変動がある場合には位相は遅れる方向に変化しており、C点では $dV/dt > 0$ の速度変動の存在で風速変動のない場合に比べて位相進んでおり、後縁に近づく程その変化量は大きくなっている。これは、その瞬間の流速としてはすべて同じにも拘らず、渦の流下速度が増減していることを反映したものと考えられる。

これらを非定常圧力がなす仕事という形で評価すると、図-15(d)に示すように、A点では $dV/dt < 0$ の速度変動の付加によって後縁側の仕事が弱まっており、減衰が大きくなっている。一方で、C点では $dV/dt > 0$ の風速変動の付加によって前縁の負の仕事の領域が大きく減少する代わりにその領域が広がり、後縁側では正の仕事が強められている。

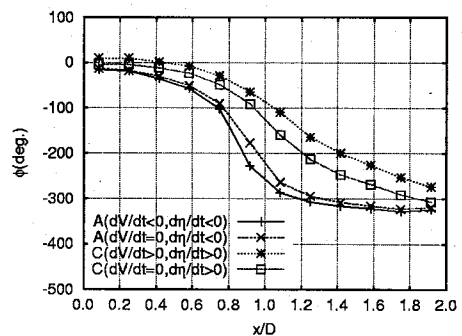
以上をまとめると、風速変動の作用としては、自己励起渦の流下速度を変化させているものと考えられ、 $dV/dt < 0$ では渦の流下速度を遅らせるような効果を持ち、 $dV/dt > 0$ では渦の流下速度を速める効果があると考えることができ、これによって励振力および減衰力が変化しているものと判断できる。このことは、渦の流下に伴う周辺気流の変動風速の計測結果より推測された渦流下速度の変動現象⁸⁾をより明確に示した結



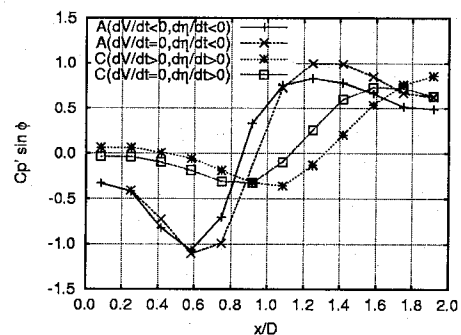
(a) 平均風圧係数分布



(b) 変動風圧係数分布



(c) 変位に対する圧力変動の位相差分布



(d) 圧力がなす仕事量の分布

図-15 A点およびC点における圧力特性

果といえる。

3.3 応答振幅の時間的変化が非定常圧力に及ぼす影響

図-16に応答振幅の時間的変化がある場合とない場合について計測された C_p , C_p' , ϕ , $C_p' \sin \phi$ を示す。B点においては、 $d\eta/dt < 0$ の応答振幅の変化がある場合、全体的な負圧の減少が認められるが、D点では $d\eta/dt > 0$

の応答振幅変化の有無の影響はほとんど受けていない。また、変動圧力係数については、風速変動の有無による変化に比べると応答振幅の変化の有無による変化は特に目立ったものではない。さらに、位相差についても風速変動の有無による変化に比べれば、応答振幅の変化の有無による値の変化はほとんどないといえることができる。結果的に、仕事量の分布についても大きな差は認められず、応答振幅の時間的変化は非定常空気力に対してほとんど影響していないということがわかる。

4. まとめ

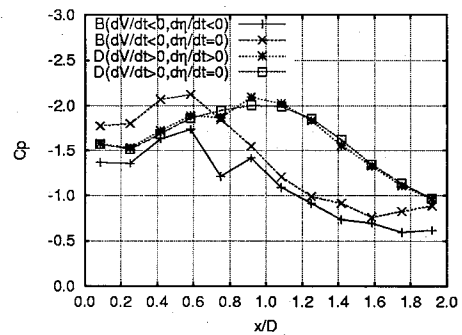
本研究では、ばね支持応答試験、準定常的視点による応答予測、強制加振試験を通じて長周期変動風が自己励起型渦励振に対していかなる影響を及ぼすのかという点に注目して検討を行ってきた。以下にその結果についてまとめる。

- (1) たとえ風速の変動周期が模型の固有周期の180倍という場合であっても、励振力や減衰力は流速変動の影響を強く受け、結果として一様流のV-A図には沿わない。
- (2) 速度変化の効果としては、時間的に風速が増加する場合 ($dV/dt > 0$) には、自己励起渦の流下速度を速める効果を持っており、逆に時間的に風速が減少する場合 ($dV/dt < 0$) には、自己励起渦の流下速度を遅らせる効果のあることが確認された。
- (3) 応答振幅の時間的変化 ($d\eta/dt$) は、非定常圧力にほとんど影響しない。

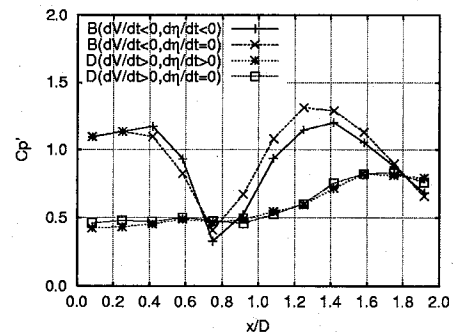
今回の検討結果で、概ね自己励起型渦励振に対する長周期風速変動の影響を明らかにすることができたと考えられるが、風速の時間的な変化率と位相変化、変動圧力係数の変化との関係などを定量評価するためにはより多くのケースについて検討する必要がある。今回、時間的に変化する風速変動と応答変位を同時に再現して非定常圧力を計測する基本的な手法が確立できたため、今後、他の断面形状も含めたより多くの条件について検討を進め、風速の時間変化の影響について明らかにしていく予定である。

参考文献

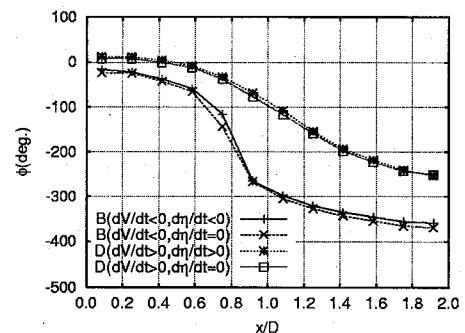
- 1) Vickery, B. J. : Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, No. 3, pp.481-494, 1966.
- 2) Laneville, A., Gartshore, I. S. and Parkinson, G. V. : An explanation of some effects of turbulence on bluff bodies, *Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, pp.333-441, 1975.
- 3) Nakamura, Y. and Ohya, Y. : The effects of turbulence on the mean flow of two-dimensional rectangular



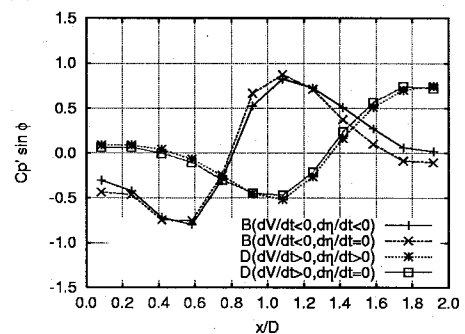
(a) 平均風圧係数分布



(b) 変動風圧係数分布



(c) 変位に対する圧力変動の位相差分布



(d) 圧力がなす仕事量の分布

図-16 B点およびD点における圧力特性

- lar cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 149, pp.255-273, 1984.
- 4) Kobayashi, H., Kawatani, M. and Nakade, O. : Vortex-induced oscillation of two dimensional rectangular cylinder in large scale turbulence, *Journal of Wind Engineering*, No. 37, pp.19-24, 1988.
- 5) Matsumoto, M., Shiraishi, N. and Shirato, H. : Bluff body aerodynamics in pulsating flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 28, pp.261-270, 1988.

- 6) Utsunomiya, H., Nagao, F., Noda, M. and Tanaka, E. : Vortex-induced oscillation of a bridge in slowly fluctuating wind, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp.1689-1699, 2001.
- 7) 野田稔, 宇都宮英彦, 長尾文明, 田中映子, 和田真穂 : 逆台形 1 箱桁橋の渦励振応答に対する長周期風速変動の影響, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.363-358, 2000.
- 8) 野田稔, 宇都宮英彦, 長尾文明, 有馬栄一, 守田達哉 : 長周期風速変動の渦励振応答に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 50A, pp.629-636, 2004.
- 9) 白石成人, 松本勝 : 充腹構造断面の渦励振応答特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 322 号, pp.37-50, 1982.

(2005 年 9 月 10 日 受付)