

長周期風速変動の渦励振応答に及ぼす影響

Effects of long-period wind fluctuation on the response of vortex-induced oscillations

野田稔*, 宇都宮英彦**, 長尾文明***, 有馬栄一****, 守田達哉****
Minoru Noda, Hidehiko Utsunomiya, Fumiaki Nagao, Eichi Arima Tatsuya Morita

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

**工博, 徳島大学教授, 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

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

****徳島大学大学院生, 工学研究科建設工学専攻 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

ABSTRACT

The effects of slowly fluctuating wind on 2 kinds of vortex-induced oscillations, such as the Karman vortex induced oscillation and the motion-induced vortex oscillation, were investigated by wind tunnel tests using a bridge deck, a circular cylinder and a rectangular cylinder with a 2:1 thickness ratio. As results of these investigations, it was clarified that the mechanism of influences of slow wind fluctuation differs between the Karman vortex induced oscillation and the motion-induced vortex oscillation. In the case of Karman vortex induced oscillation, the changing of frequency of vortex shedding by slow wind fluctuation mainly controls the response. The response of the motion-induced oscillation is controlled by changing of the phase of flowing down of motion-induced vortex by wind fluctuation.

Keywords: Karman vortex induced oscillation, Motion-induced vortex oscillation, long-period wind fluctuation

キーワード: 強制振動型渦励振, 自己励起型渦励振, 長周期風速変動

1. まえがき

風洞実験では渦励振の発生が確認されていた橋梁が実際に完成してみると目立った渦励振応答を示さないといったことは希に起こることである。このような場合、その理由としては、自然気流の乱れや水平偏角の存在を挙げられることが一般的である。特に自然気流の乱れの影響については、数多くの研究者¹⁻⁵⁾によって検討がなされており、平均風速一定の条件下における風速変動についての現象についてはほぼ解明されていると考えられる。

しかし、渦励振、特に橋梁断面に多く見られる自己励起型の渦励振は、励振力があまり大きいとは言えず、もっとも揺れやすいと考えられる一様流中の場合でさえ、揺れはじめてから応答が定常状態になるまでには数百サイクルを要することも珍しくない。自然風の風速変動について考えてみれば、応答の発達に時間を要する渦励振が、定常状態に達するまでの間にほとんど平均風速が変化しないということは、周辺地物の影響もなく気象的にも非常に安定した流れの状態が維持された特殊な状態と考えられ、通常は大なり小なりの風速変動が伴っていると考えの方が自然である。特に、平均風速そのものが時

間的に変動するような非常に周期の長い風速変動を対象に気流の風速変化と渦励振応答との関係を検討した例は宇都宮らの研究^{6,7)}を除いてほとんど存在しない。そこで、本研究では従来ほとんど注目されていない平均風速そのものが変動するような長周期風速変動に着目し、そのような風速変動が伴う流れ場において、渦励振応答に対する風速変化の影響について検討することにした。

ここでは、2つの段階を経て風速の長周期変動が渦励振応答に及ぼす影響について検討を進めていく。ひとつ目の段階では、実橋断面を使った風洞試験によって、長周期風速変動を発生させ、その流れ場において生じる渦励振応答特性を検討する。また、この段階で一様流中で得られた対数減衰率の分布が変動風速流中でも保たれているとの仮定に基づいた応答振幅の時刻歴変化の数値計算結果と実測結果を比較し、風速変動の存在によって生じる現象について検討する。次の段階では、現象をより基本的に理解するため、供試断面として円形断面と2:1矩形断面を採用し、強制振動型渦励振、自己励起型渦励振、それぞれの励振機構による渦励振応答に対する風速変動の作用メカニズムについて模型周辺の流れ場の形成状況などから検討していく。

2. 長周期変動風下における実橋断面の渦励振応答⁷⁾

本節では、風洞実験および風洞実験結果を使った渦励振応答振幅の時刻歴変化の数値計算を通じて、実橋断面を対象に長周期変動風がその渦励振応答特性に及ぼす基本的な影響について検討する。特に、長周期風速変動風の中で生じる渦励振応答の特徴、変動風の基本的なパラメータである中心風速、風速変動周期、風速変動幅が渦励振応答に及ぼす影響を明らかにしていく。

2.1 実験概要

(1) 模型諸元

本節では、図-1に示すような逆台形1箱桁断面を有する実橋を想定し、その80分の1縮尺の2次元剛体模型を用いて風洞実験を行った。問題を単純化するため、模型は鉛直曲げ1自由度でばね支持され、鉛直曲げの渦励振のみを検討対象とした。表-1にここで想定された実橋および縮尺模型の構造諸元を示す。模型の構造対数減衰率は0.015であり、質量減衰パラメータ ($2m\delta/\rho BD$) は3.56である。また、渦励振が起こりやすい条件として迎角を頭上げ5°に設定した。

(2) 一様流中における渦励振応答特性

図-2に一様流で得られた鉛直曲げに対する風速-振幅曲線と、ばね支持模型を静止または一定振幅に加振した後の応答の成長、減衰波形より求めた対数減衰率の分布を示す。渦励振は換算風速14から23.5の間、換算風速幅で $\Delta V_0=9.5$ の範囲に発現し、換算風速23付近のごく狭い風速範囲に不安定なリミットサイクルの存在が確認された。ここで確認された応答特性および断面比が $B/D=8.4$ であることから、ここで発生した渦励振は前縁剥離渦で励振されている自己励起型渦励振であると考えられる。

(3) 風速変動特性

本研究では、幅0.7m、高さ1.5mの測定断面を有する吹込み式N.P.L.型風洞を用いて実験を行った。この風洞の送風ファンはACサーボモーターで駆動されているため、モーターの駆動電流の周波数を変化させることで自由に回転数を変動させることが可能である。駆動周波数はインバーターに与える電圧で制御できるため、D/A変換ボードを備えたパーソナルコンピュータで任意の制御信号を生成し、目標となる風速変動を生成した。本研究で与えた風速変動は、できる限り問題を単純化するため、次式のような正弦波的なものとした。

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

ここで、風速の変動幅は図-2(a)で示した渦励振発現風速域の幅 ΔV_0 を基準に $\Delta V=0.1\Delta V_0 \sim 0.8\Delta V_0$ の範囲で変化させた。また、風速変動周期 T' は模型の固有周期 T を基準に $T'=8.4T \sim 84T$ の範囲に設定した。これは実橋換算で22秒～225秒に相当する。

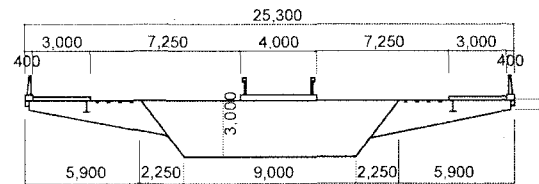
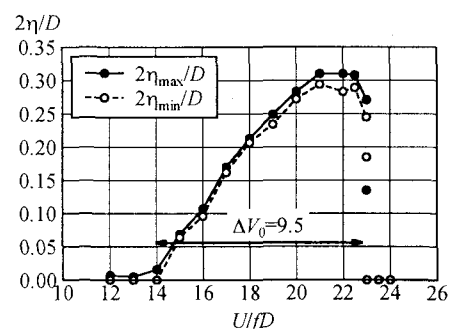


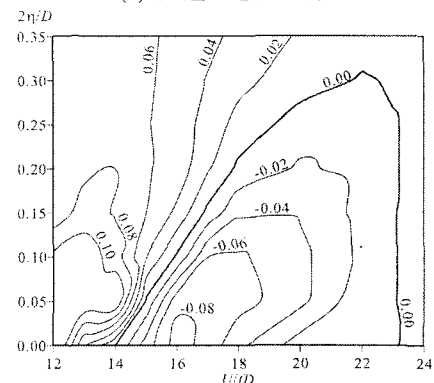
図-1 検討対象断面 (単位: mm)

表-1 実橋および供試模型の構造諸元

	実橋	1/80模型(実測)
幅員 (B)	25.3 m	0.316 m
桁高 (D)	3.25 m	0.041 m
等価質量 (m)	19.35 t/m	1.885 kg/m
固有振動数 (f)	0.373 Hz	2.800 Hz



(a) 風速-応答曲線



(b) 対数減衰率分布

図-2 一様流中における渦励振の基本応答特性

(4) 準定常的視点に基づく渦励振応答の数値計算

本節での検討では、風速変動の存在で応答特性がどのように変化しているのかを判断するため、一様流中で得られた対数減衰率分布を使って実験と同じ風速変動を与えた場合の応答の時刻歴変化を数値計算によって求めた。これは、図-2(b)に示された一様流中における対数減衰率の分布が風速変動時にも変化しないと仮定して、対数減衰率を風速と応答振幅の関数 $\delta(U, \eta)$ として扱うことで準定常的に現象を捉え、 dt 秒後の時刻における渦励振応答振幅を求めるものであり、次式のような計算となる。

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

ここで、 dt は風速の時刻歴変化の時間分解能であるが、

もっとも荒い分解能となる場合でも風速の変動周期に対して $dt/T=0.02$ となり、十分な分解能を確保した。また、全てのケースにおいて、振幅の初期値は $\eta(0)/D=0.25$ とした。

2.2 長周期変動風下における渦励振応答

(1) 長周期変動風下における渦励振応答の基本特性

図-3(a)に正弦波的な長周期風速変動に対して得られた渦励振応答の代表的な時刻歴波形の一例を示す。これは中心風速 $V_m=18$ 、風速変動振幅 $\Delta V/\Delta V_0=0.4$ 、風速変動周期 $T'/T=28$ のケースであるが、長周期変動風下における渦励振の応答振幅は風速の変動に同期して増減し、風速が最大となる時刻と応答量が最大となる時刻には時間差が存在している。また、同じ風速変動の条件に対する数値計算の結果が図-3(b)に示すが、数値計算で得られた渦励振応答の時間変化は実験で得られた時刻歴変化と同じような挙動を示しているが、応答振幅は実験値に比べて15%ほど小さな結果となっている。

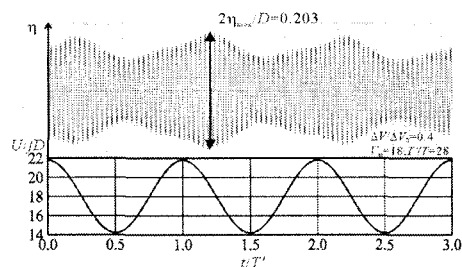
(2) 中心風速が渦励振応答に及ぼす影響

ここで、中心風速 V_m を変化させながら瞬間風速と応答振幅の関係に注目すると、それぞれの中心風速に対して図-4に示すような風速-振幅履歴曲線が得られる。これらの風速-振幅履歴曲線は中心風速によって回転方向が変化し、一様流中における渦励振発現風速域の低風速または中風速付近が変動風速の中心風速になっている場合には反時計回り、一様流中における渦励振発現風速域の高風速側が変動風速の中心風速となっている場合には時計回りとなる。この原因は、図-2(b)に示した対数減衰率の分布を見ても明らかに風速の変動範囲と対数減衰率の位置関係によって決定されている。すなわち、中心風速に対して高風速側に励振域があれば反時計回り、低風速側に励振域があれば時計回りとなると考えられる。

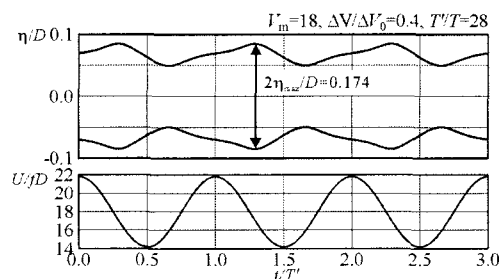
図-4(b)に示した計算結果を見ても定性的には実験結果と同じものとなっている。しかし、風洞実験では風速が増加から減少に転じたところで応答が大きく成長しているのに対して、数値計算ではあまり大幅には成長していない。さらに、風速が低下する部分で応答が減衰する部分についても、風洞実験で示される減衰量の方が大きくなっている。これらの結果から長周期変動風下で模型に作用する励振力、減衰力は、いずれもが一様流中で得られた対数減衰率分布で示されるものに比べて強められていると考えられる。

(3) 風速変動周期が渦励振応答に及ぼす影響

図-5に、変動風速の中心値を $V_m=18$ 、風速変動幅を $\Delta V/\Delta V_0=0.4$ と固定し、風速の変動周期を $T'/T=14\sim 84$ に変化させた際の風速-応答履歴曲線を示す。ここで、風速-応答履歴曲線を楕円に見立てると、風速変動周期が小さい場合にはほとんど長軸が水平となっているが、風速変動周期の増加に従って、一様流中の風速-応答曲線

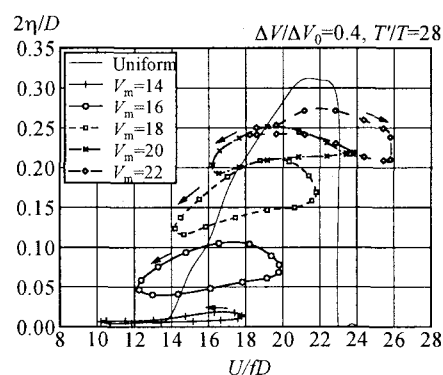


(a) 風洞試験で観測された渦励振の応答時刻歴

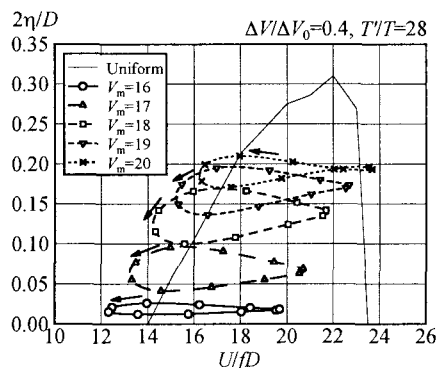


(b) 数値解析で得られた渦励振の応答時刻歴

図-3 長周期変動風下における渦励振の応答時刻歴
($V_m=18$, $\Delta V/\Delta V_0=0.4$, $T'/T=28$)



(a) 風洞実験



(b) 数値計算

図-4 各中心風速に対する風速-応答履歴曲線
($\Delta V/\Delta V_0=0.4$, $T'/T=28$)

に近づいていることがわかる。これは、風速の変動周期が大きくなるにつれて励振域、減衰域に留まる時間が長くなることで、応答の成長、減衰に十分な時間が与えられるようになったためと考えられる。しかし、風速の変動周期が模型の固有周期の84倍となっても風速-応答履

歴曲線が一樣流中における風速－応答曲線と一致することはなく、ここで設定した最大の風速変動周期でもなお一樣流中とは同じと言えない状態であることがわかる。

一方、実験結果と計算結果を比較すると、実験で得られた風速－応答履歴曲線の楕円の方が、計算で得られたものに比べてより扁平なものになっており、風速の増加に対する応答の成長、または風速の減少に対する応答の減衰のいずれの大きさも実験の方が強いものになっている。ここで得られた結果から判断しても、風速変動時に作用している励振力や減衰力は一樣流中で示された対数減衰率よりも強くなっていると考えることができる。

(4) 風速変動幅が渦励振応答に及ぼす影響

図－6に風速変動の中心風速を $V_m=18$ 、風速の変動周期を $T'/T=28$ に固定し、風速の変動幅を変化させた場合の風速－応答履歴曲線の変化の様子を示す。この結果から、風速の変動幅が大きくなるにつれて渦励振の平均的な応答量が低下する傾向を示していることがわかる。これは、基本的に減衰域と励振域で空力減衰の絶対値の大きさを比べた場合に減衰力の方が強いために、風速が低下した際に風速の最小値に対応する一樣流中の応答量に引き下げられているためと考えられる。一方で、実験結果と計算結果を比較すると、同じ風速変動幅に対して計算結果の方が平均的な応答量が小さくなっている。両者の差をよく見ると、この違いは、風速が増加から減少に転じた後の領域における応答の成長が実験の方が大きくなっていることが主な原因であると考えられる。

2.3 本節のまとめ

本節では、実橋断面を対象に正弦波的な風速変動を与え、中心風速、風速変動周期、風速変動幅それぞれが渦励振応答に与える影響について検討を行った。そのいずれの場合においても、共通して確認できた事実は、計算結果、すなわち一樣流中と同じ対数減衰率分布を保っていると仮定した場合の応答の成長、減衰は、いずれも実験結果と比べて過小評価となっており、風速が変動していると励振力や減衰力が一樣流中の時よりも強められているという点である。

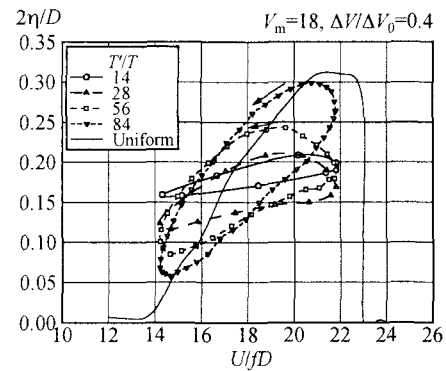
3. 円形断面および2:1矩形断面の渦励振に対する長周期風速変動の影響

本節では、強制振動型渦励振を発現する円形断面と自己励起型渦励振を発現する2:1矩形断面を用いることで、異なる励振機構の渦励振に対する長周期変動風の影響について検討する。

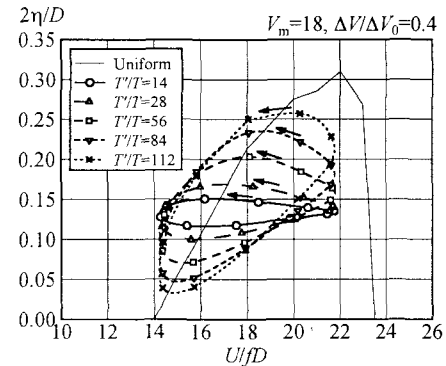
3.1 実験概要

(1) 模型諸元

図－7に本節で検討対象とした円形断面、2:1矩形断面を示す。それぞれの断面を有する2次元剛体模型は鉛

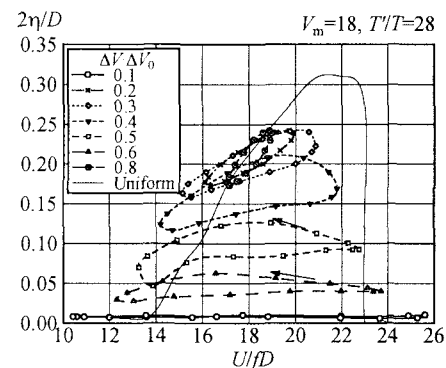


(a) 風洞実験

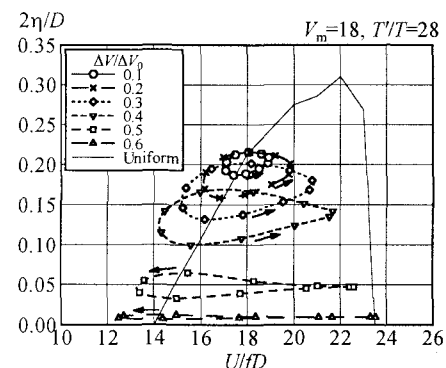


(b) 数値計算

図－5 風速変動周期が風速－応答履歴曲線に及ぼす影響
($V_m=18$, $\Delta V/\Delta V_0=0.4$)



(a) 風洞実験



(b) 数値計算

図－6 風速変動幅が風速－応答履歴曲線に及ぼす影響
($V_m=18$, $T'/T=28$)

直 1 自由度でばね支持され、表－2 に示すような構造諸元が与えられた。ここで、円形断面に発生する渦励振はカルマン渦列による強制振動型渦励振であり、2:1 矩形断面模型に発生する渦励振は前縁剥離渦によって生じる自己励起型渦励振である。このため、それぞれの断面に生じる渦励振について長周期変動風下での応答の変化を調べることによって、代表的な 2 種類の渦励振に対する長周期風速変動の影響を検討することができる。

(2) 一様流中における渦励振応答特性

図－7 に示した各断面を有する模型の基本的な渦励振応答特性として、一様流中で得られた風速－応答曲線を図－8 に示す。図－8 (a) より円形断面の渦励振は、カルマン渦列の放出周波数が模型の固有振動数にロックインする換算風速 4.5 から 6.3 の幅 $\Delta V_0 = 1.8$ の間で振動が発現しており、強制振動型の渦励振となっていることがわかる。一方、図－8 (b) に示された 2:1 矩形断面の場合、換算風速が $1.67B/D$ すなわち 3.3 に近い換算風速 3.5 から 6 付近までの換算風速幅 $\Delta V_0 = 2.5$ の間で渦励振が発生しており、さらに左右非対称な風速－応答曲線となっていることから、これは自己励起型渦励振であることがわかる。

(3) 風速変動特性

本節での検討に用いる気流は、基本的に 2.1(3) 項で述べたものと同じ方法で生成された正弦波的な風速変動を用いている。生成した気流は、円柱断面のケースに対しては、風速変動周期は $T'/T = 55.0 \sim 165.1$ 、風速変動幅は図－8 (a) に示した渦励振発現風速域の幅 ΔV_0 を基準に、 $\Delta V = 0.1\Delta V_0 \sim 0.6\Delta V_0$ の範囲で変化させた。また、2:1 矩形断面のケースに対しては、風速変動周期は $T'/T = 56.7 \sim 170.1$ 、風速変動幅は図－8 (b) に示した ΔV_0 を基準に $\Delta V = 0.1\Delta V_0 \sim 0.5\Delta V_0$ の範囲でそれぞれ変化させた。

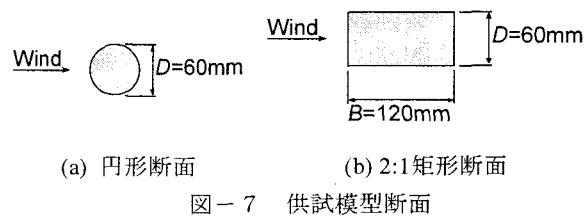
(4) 断面周辺における気流計測

本節での風洞実験では、風速－振幅履歴特性の観測に加えて、長周期風速変動下における模型からの渦の放出状況を把握するために、模型近傍に X 型熱線風速計を設置し、渦の流下によって発生する流速変動を計測した。カルマン渦、前縁剥離渦で渦の流下による流速変動が顕著に表れる位置は異なるため、図－9 に示すように、カルマン渦が励振力の原因である円形断面の場合には円柱後流内の後縁端から $1.7D$ 下流の位置、前縁剥離渦が励振力の元となる 2:1 矩形断面の場合には断面側面上の前縁から $1.5D$ 下流の側面から $0.3D$ 離れた位置、にそれぞれ X 型熱線プローブを設置し、接近流速、模型の変位と併せて模型近傍の主流および鉛直方向の流速 u 、 w を同時に計録した。

3.2 励振メカニズムの異なる渦励振応答に対する長周期風速変動の影響

(1) 強制振動型渦励振に対する長周期風速変動の影響

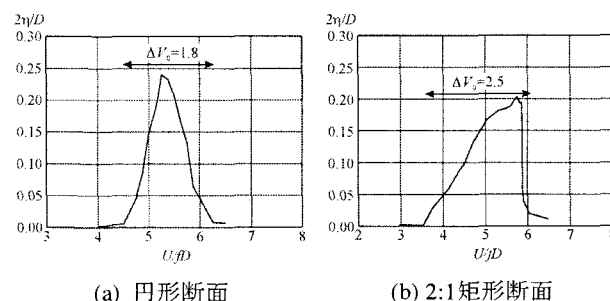
図－10 に、風速変動幅を $\Delta V/\Delta V_0 = 0.4$ 、風速変動周期を $T'/T = 165.1$ に固定して中心風速を変化させた場合の円形



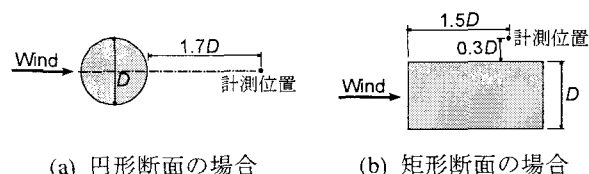
図－7 供試模型断面

表－2 供試模型構造諸元

	円柱断面	2:1 矩形断面
質量 (m)	1.36 kg/m	1.17 kg/m
固有振動数 (f)	5.50 Hz	5.56 Hz
対数減衰率 (δ)	0.0089	0.0194
スクレーン数	9.09 ($2m\delta/\rho D^2$)	8.60 ($2m\delta/\rho BD$)



図－8 一様流中における風速－応答曲線



図－9 模型周辺気流の計測位置

断面の風速－応答履歴の変化を示す。この結果より、円形断面の渦励振では風速変動の 1 周期の間における応答の増減はほとんど認められず、風速－応答履歴曲線是非常に扁平な楕円を描いている。これは、前節で検討した実橋断面に現れた特徴とは異なっている。また、平均的な応答量は、中心風速に対応する一様流中での応答振幅の大小関係を概ね反映した結果となっている。

図－11 に中心風速を $V_m = 5.5$ 、風速変動幅を $\Delta V/\Delta V_0 = 0.4$ として風速変動周期を変化させた結果を示すが、円形断面の場合、風速変動周期は大きく変化させても風速－応答履歴にはほとんど変化は認められなかった。

一方で、図－12 に示すように、中心風速を $V_m = 5.5$ 、風速変動周期を $T'/T = 165.1$ に固定して風速変動幅を変化させた場合、平均的な応答量に大きな差が現れており、風速変動幅が大きくなると応答量は減少する結果となった。

ここで、強制振動型の渦励振である円形断面の場合、その発生条件は、風速に比例する渦の放出周波数が模型の固有振動数に引き込まれて一致する Lock-in 現象が起ることである。一方、ここで振動の原因となっている

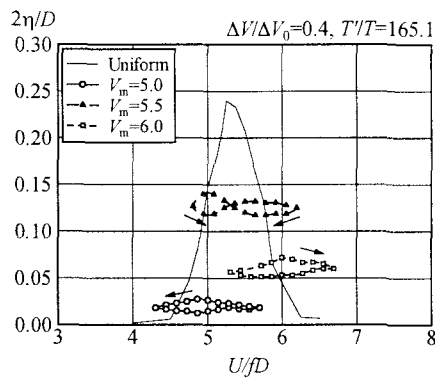


図-10 円形断面の風速-応答履歴特性に対する中心風速の影響 ($\Delta V/\Delta V_0=0.4$, $T'/T=165.1$)

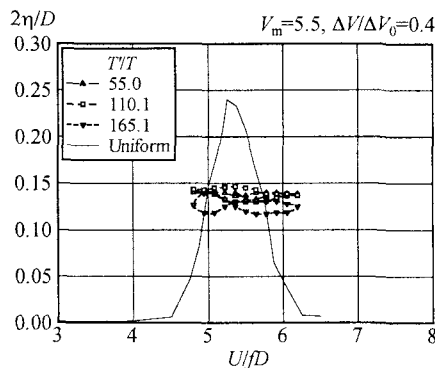


図-11 円形断面の風速-応答履歴特性に対する風速変動周期の影響 ($V_m=5.5$, $\Delta V/\Delta V_0=0.4$)

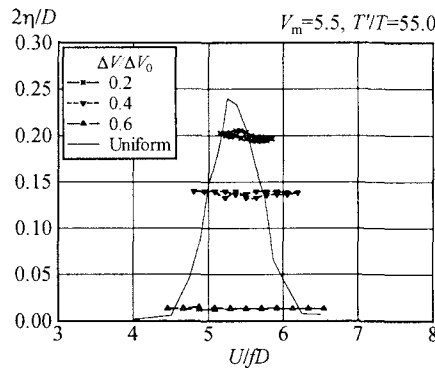


図-12 円形断面の風速-応答履歴特性に対する風速変動幅の影響 ($V_m=5.5$, $T'/T=165.1$)

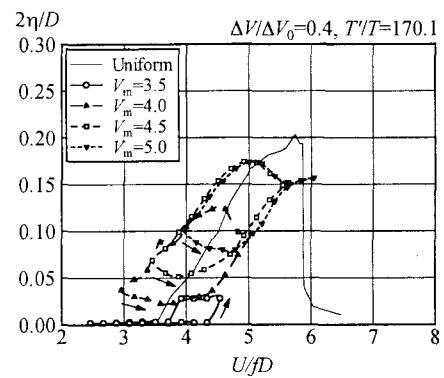


図-13 2:1矩形断面の風速-応答履歴特性に対する中心風速の影響 ($\Delta V/\Delta V_0=0.4$, $T'/T=170.1$)

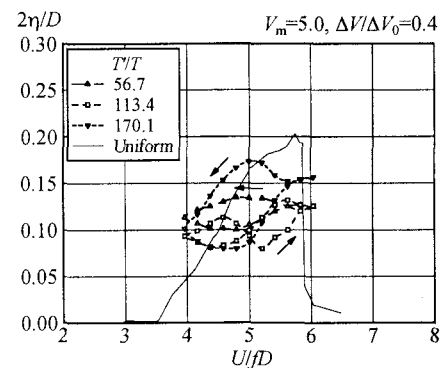


図-14 2:1矩形断面の風速-応答履歴特性に対する風速変動周期の影響 ($V_m=5.0$, $\Delta V/\Delta V_0=0.4$)

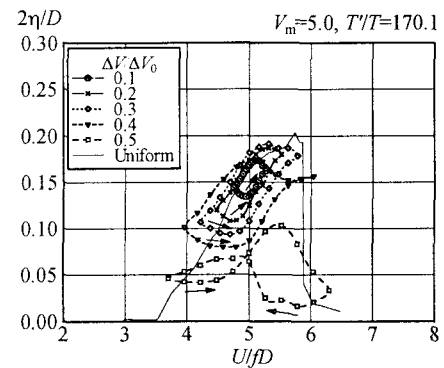


図-15 2:1矩形断面の風速-応答履歴特性に対する風速変動幅の影響 ($V_m=5.0$, $T'/T=170.1$)

渦は、流れの性質として円柱が静止していても生じるものであるため、応答振幅の大きさなどにあまり影響を受けずに励振力として作用するものである。このため、風速はLock-in現象の発生に支配的な要素であり、風速変動幅が渦励振応答に強く影響したと考えられる。

(2) 自己励起型渦励振に対する長周期風速変動の影響

図-13は、2:1矩形断面の模型について、風速変動幅を $\Delta V/\Delta V_0=0.4$ 、風速変動周期を $T'/T=170.1$ として中心風速を変化させることで得られた風速-応答履歴曲線の変化の様子を示している。この場合、風速-応答履歴曲線がなす楕円の長軸は一樣流中の風速-応答曲線に沿う傾向を示している。

次に、中心風速を $V_m=5.0$ 、風速変動幅を $\Delta V/\Delta V_0=0.4$ と

固定して、風速変動周期を変化させた場合の風速-応答履歴曲線の変化の様子を図-14に示す。この結果によれば、風速の変動周期が長くなればなるほど風速の変動1周期の間における応答の変動量は大きくなっている。

図-15に中心風速を $V_m=5.0$ 、風速変動周期を $T'/T=170.1$ として風速変動幅を変化させた場合の風速-応答履歴曲線を示すが、風速変動幅の増加に併せて、平均的な応答量が減少する傾向が認められる。さらに風速変動幅が $\Delta V/\Delta V_0=0.5$ に至ると、風速-応答履歴曲線が8の字を描くようになるが、これは風速が最大に近づくと渦励振発現風速域から外れてしまい、減衰領域に入ってしまうことが原因と考えられる。

ここで、前節で検討した長周期変動風下の実橋断面の

渦励振と比較すると、中心風速、変動風速周期、変動風速幅のいずれの影響についても、本節で検討した矩形断面に現れた傾向と同様であり、断面形状が異なっているも自己励起型の渦励振に対する長周期変動風の影響としては同じものになっていると考えることができる。

3.3 長周期風速変動場における渦形成状況

前項では、強制振動型渦励振と自己励起型渦励振のそれぞれに対する長周期風速変動の影響の違いが確認できた。本項ではそれぞれのタイプの渦励振が起こっている際に、長周期風速変動が加わることで渦の放出にどのような変化が出ているかを、短時間周波数解析を使って検討していく。ここで、解析はサンプリング周波数 $f_s=100\text{Hz}$ （円柱）、 164Hz （矩形）で記録された変位と模型近傍の流速変動の時系列データから、1024サンプル分の時系列データを取り出してFFTによる周波数解析を行っている。取り出す位置を100サンプルずつずらしていくことで時間的に連続的な周波数解析を行った。さらに、前節で指摘された長周期風速変動風下では一様流中に比べて励振力や減衰力が強められているという現象の原因について検討していく。

(1) 強制振動型渦励振における渦形成

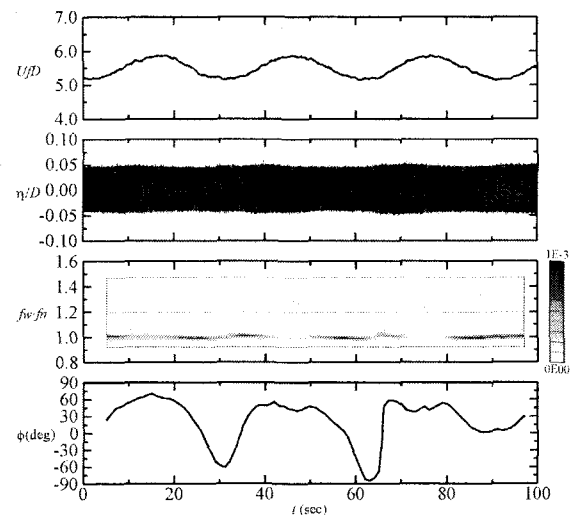
図-16に風速変動幅の異なる2つの条件について、接近流速、応答変位、円柱後流で計測された鉛直成分の変動流速を短時間周波数解析により求めた各時刻のパワースペクトル、円柱の固有振動数における円柱の応答変位に対する変動風速の位相差を求めた結果を示す。

ここで、風速変動幅が小さい $\Delta V/\Delta V_0=0.2$ の場合（図-16(a)）、後流の渦放出に起因する風速変動のパワースペクトルは固有振動数にピークを保持しており、接近流速が変動してもLock-in現象が維持されていることがわかる。一方、風速変動幅の大きい $\Delta V/\Delta V_0=0.4$ の場合（図-16(b)）には、接近流速の変動に同期して後流渦の放出周波数が変動しており、Lock-in現象が間欠的に消失していることがわかる。また、円柱の固有振動数成分における応答変位に対する後流の流速変動の位相差は、接近流速の増減に同期して増減しているが、応答に大きな変化が現れていないことを考えると位相の影響はほとんどないと考えられる。以上のことから、強制振動型渦励振に対する接近流速の長周期変動の影響は、Lock-in現象が継続されるかどうかということに決定づけられていると考えられる。

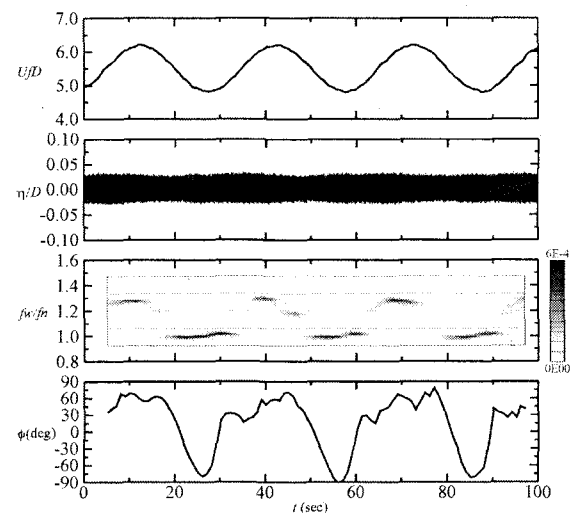
(2) 自己励起型渦励振における渦形成

図-17に風速変動幅の異なる2つの条件について、接近流速、応答変位、矩形断面側面で計測された鉛直成分の変動流速を短時間周波数解析により求めた各時刻のパワースペクトル、模型の固有振動数における模型の応答変位に対する変動風速の位相差を求めた結果を示す。

風速変動幅の小さい $\Delta V/\Delta V_0=0.2$ のケース（図-17(a)）では、模型側面における流速変動のパワースペクトルの



(a) $V_m=5.5$, $\Delta V/\Delta V_0=0.2$, $T'/T=165.1$

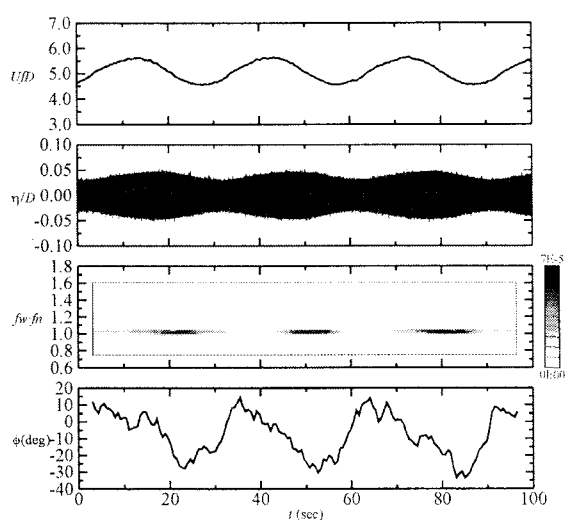


(b) $V_m=5.5$, $\Delta V/\Delta V_0=0.4$, $T'/T=165.1$

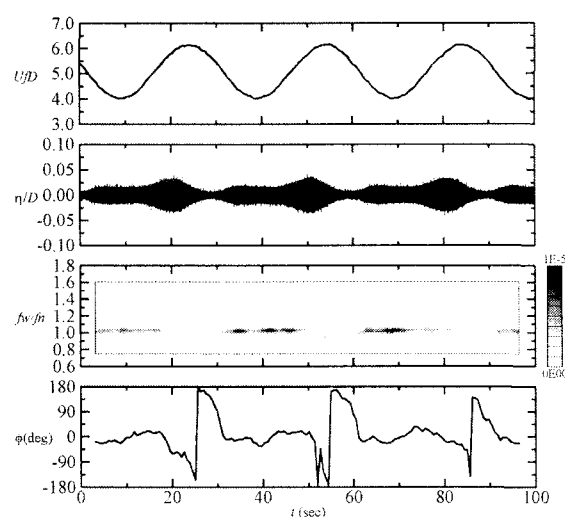
図-16 円形断面後流の鉛直方向の変動流速特性

模型の固有振動数成分の大きさが風速変動に同期して変化していることがわかる。ここで注目すべきは接近風速が最大となってから風速変動周期の1/4位の時間差をおいて応答が最大となり、応答が最大となってからさらに若干の時間差をおいて模型側面における流速変動が最大となっている点である。ここで、模型の応答変位に対する模型側面の変動流速の位相差に注目すると、平均的な位相差に対して、接近流速が増加している間は位相が進み、接近流速が減少する間は位相が遅れるという現象が見られ、さらに位相が進むと応答が成長し、位相が遅れると応答が減少する傾向を示している。すなわち、自己励起型渦励振の場合、前縁剥離渦の強さが直接励振力の大きさとなっているのではなく、接近流速の変動によって生じる前縁剥離渦流下の位相差の変化が応答の増減に大きく影響しているということが考えられる。

一方、風速変動幅が大きく風速-応答履歴曲線が8の字を描いた $\Delta V/\Delta V_0=0.5$ のケース（図-17(b)）においても、模型側面における流速変動の模型の固有振動数成分



(a) $V_m=5.0$, $\Delta V/\Delta V_0=0.2$, $T'/T=170.1$



(b) $V_m=5.0$, $\Delta V/\Delta V_0=0.5$, $T'/T=170.1$

図一17 2:1矩形断面の側面の鉛直成分の変動流速特性

のパワースペクトルの大きさは風速変動に同期して増減している。また模型の固有振動数における模型の変位に対する流速変動の位相差は、接近流速の増加と共に位相が進む一方で、接近流速が最大値に近づき一様流中における渦励振の発現風速域から外れると途端に渦の放出が弱まり、位相が大きく遅れて急激に応答が低下している。

これらの結果からもわかるように、自己励起型の渦励振における風速の増減と応答の増減の関係は、風速変動の増減で生じる渦放出の位相差の増減に支配されていると考えることができる。

3.4 本節のまとめ

ここでは、強制振動型と自己励起型という2つの異なる渦励振について長周期風速変動の影響を検討し、模型からの渦放出の状況などを検討した。その結果、強制振動型渦励振における長周期風速変動の影響はLock-in現象が起こるか起こらないかで決定づけられており、自己励起型渦励振では前縁剥離渦の流下と変位との位相差の

増減で決定づけられていることが明らかになった。特に自己励起型渦励振における位相差の増減に関しては、前節で指摘された一様流中の励振力・減衰力が風速変動の付加によって強められるという現象についても矛盾なく説明できており、風速変動の影響の新たな解釈を得ることができた。

4. 結論

本研究では、実橋断面および円形断面、2:1矩形断面を対象に、従来十分な検討がなされてこなかった平均風速レベルの長周期変動風が渦励振応答に及ぼす影響について検討した。その結果、自己励起型の渦励振に対しては長周期風速変動が付加されることによって励振力と減衰力をそれぞれ強める作用があり、その原因が風速変動によって生じる渦放出の位相差の増減にあることが明らかとなった。これは渦励振が自然気流中で発生しにくくなるという問題とは直接関連しないが、風速の時間的変化にこのような作用があることは従来指摘されておらず、風速変動の新たな働きを明らかにすることができたと思われる。

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, J. F. M., 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, Proc. of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, pp.333-341, 1975.
- 3) Nakamura Y. and Ohya Y. : The effects of turbulence on the mean flow two-dimensional rectangular cylinders, J. F. M., Vol.149, pp.255-273, 1984.
- 4) Matsumoto M. Shiraishi N. and Shirato H. : Bluff body aerodynamics in pulsating flow, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.28, pp.261-270, 1988.
- 5) Kobayashi H. and Nakade O. : Vortex-induced oscillation of two dimensional rectangular cylinder in large scale turbulence, J. Wind Engineering, No.37, pp.19-24, 1988.
- 6) Utsunomiya H., Nagao F., Noda M. and Tanaka E. : Vortex-induced oscillation of a bridge in slowly fluctuating wind, J. 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.363-368, 2000.

(2003年9月12日受付)