

橋梁基本断面の渦励振に及ぼす乱流効果に関する研究

TURBULENCE DESTABILIZATION EFFECT ON MECHANISM OF
VORTEX-INDUCED OSCILLATION OF FUNDAMENTAL BRIDGE CROSS SECTIONS

松本 勝¹⁾ 大東義志²⁾ 白土博通³⁾
青木 淳⁴⁾ 藤井大三⁴⁾

Masaru MATSUMOTO, Yoshiyuki DAITO, Hiromichi SHIRATO,
Jun AOKI and Daizo FUJII

- 1) 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)
2) 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)
3) 工博 京都大学助手 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)
4) J R 西日本 (研究当時 京都大学大学院) (〒530 大阪市北区芝田2-4-24)

This paper investigates to clear the mechanism of destabilization by grid-generated turbulence on the Vortex-Induced Oscillation of some various box sections. Measurement of Unsteady Pressure and also Free-Vibration Test on these box sections have been carried out and Turbulent destabilization effect on mechanism of the Vortex-Induced Oscillation has been considered. Moreover, The Turbulent Effect of a comparative bluff hexagonal section of bridge girder of certain cable-stayed bridge has been taken into account. Through these experiments, it is clarified that one of causes of turbulent destabilization effect of the Vortex-induced Oscillation is not that the vortex is dramatically had influence by turbulent flow but that the extremely slight difference of the vortex amplify the amplitude of vibration in turbulent flow.

Key Words: Vortex-Induced Oscillation, Turbulent Destabilization Effect,
Free-Vibration Test, Unsteady Pressure

1. まえがき

土木構造物の中でも橋梁は、その耐風安定性について数多くの研究機関によって風洞実験が行われ、研究が進められてきた。各空力現象の中でも渦励振は、構造物を直接破壊に至らしめるものでないが、設計風速よりもはるかに低い風速で発現し、発生頻度の高い励振であるため耐風設計上極めて重要な問題といえる。その上、一般に自然界における風は乱れているため、この気流の乱れが構造物に及ぼす影響(乱流効果)を考慮することも重要である。一般に矩形断面においては、乱流中で一様流中よりも空力振動特性が安定化するとされているが、一部の六角断面において逆に乱流中で不安定化することが報告されている^{1) 2) 3)}。また、前縁剥離型に属する渦励振では、有効断面比(B/D)を増加させることは渦励振開始風速を引き上げる効果と最大応答振幅を減少させる効果を有し、その渦励振を抑制するには、前縁形状は前縁剥離渦の発生しにくい丸みを帯びた形状と同様の流力効

果を有する形状に、後縁形状は後縁剥離渦の発生しにくい矩形断面と同様の流力効果を有する形状にするのが好ましいと報告されている⁴⁾。また、従来の研究から充腹断面側面上に形成される前縁剥離渦による自己励起型渦励振と断面背後に形成されるカルマン渦によるカルマン渦型渦励振はそれぞれ相互干渉していることが知られている。その上更に、乱れがそれぞれの干渉度合いに応じて複雑に影響を与え、断面形状を介して、渦励振応答振幅の安定性、不安定性が決定づけられる。

そこで本研究ではこれら渦励振を励起させる要因である2つの渦に注目し、種々の断面を用いて種々の風洞実験を行った。そして、乱流により自己励起型渦励振とカルマン渦型渦励振がどのように影響を受け、また断面側面上の流れ場が乱流によりどのように変化しているのかを把握し、乱流中で応答が不安定化する要因を解明するため、前縁・後縁の幾何学形状をパラメータとして、体系的に考察することを試みた。また乱流中で不安定化す

ると報告されている⁶⁾ 実在の橋梁の偏平六角断面模型を用いて、その原因について一考を加える。

2. 風洞実験概要

本実験で使用した風洞は京都大学工学部土木工学教室内に設置された吹き出し式エッフェル型風洞（測定部高さ 1000mm, 幅 700mm, 長さ 5000mm）であり、風速は 0.3 ~ 15m/sec の範囲で連続的に風速変化が可能となっている。また、側面境界層及び模型支持アームによる測定部の気流の攪乱を防止する意味で、測定部側壁より 35mm の位置に導流壁を設けてある。これによって模型設置位置付近では風速分布がほぼ均一になること、さらに主流方向の乱れの強さが時間平均風速約 4m/sec で 0.5% 以下になることが確認されている。気流は、一様流の他に乱流格子を用いて発生させた格子乱流を用いて実験を行った。この乱流格子を模型中心より 2370mm 上流側に設置し、模型設置位置付近での主流方向の乱れ強さは 4.8% と比較的低強度の乱流で、そのスケールは 69mm である。模型の幅員 B との比が 1.38 程度である。実験に使用した模型は断面辺長比 $B/D=4$ の矩形断面（以下矩形断面と呼ぶ）と $B/D=3$ の矩形断面の前端と後端にそれぞれ三角形のフェアリングを付加し、断面辺長比 $B/D=4$ とした断面（以下それぞれ前端フェアリング付、後端フェアリング付と呼ぶ）と $B/D=2$ の矩形断面の前縁と後縁の両縁に三角形のフェアリングを付加し、断面辺長比 $B/D=4$ とした断面（以下両端フェアリング付と呼ぶ）及びある斜張橋の偏平六角断面を用いた。それぞれの模型は木製の 2 次元剛体模型で、模型の両端には気流の 2 次元性を確保するために端板が設けてあり、模型表面には断面周りの非定常圧力を測定するための圧力孔が設置してある。但し、模型の辺長比が大きくなるにつれて断面側面の圧力特性が重要であり、また本研究の目的にもあるように乱れが断面側面の流れ場にどのように影響を与えるのか知ることが乱流効果に対する一つの手がかりになるものと考え、フェアリング部には圧力孔を設けていない。それらの断面図を図-1 に示す。

風速応答振幅測定実験では、模型のねじれ変位、左右のローリング変位を拘束し、振動モードをたわみ 1 自由度に固定した。またそれぞれの振幅応答を純粋に対比するために無次元対数減衰率（スクルートン数、 Sc 数）をすべて約 12 にあわせた。ただし偏平六角断面の場合は約 14 に合わせた。

断面側面の非定常圧力測定実験では、電動起振機を用いてたわみ 1 自由度で強制加振し、断面側面の非定常圧力測定を行った。加振周波数は $f=7.9\text{Hz}$ 、加振振幅は $2A/D=0.2$ とし、無次元風速 $V/D=7.0$ ($V=2.77\text{m/s}$) となるように風速をあわせた。但し、前端フェアリングについては $v-a$ 実験で得られた結果と対応させるため、渦励振開始風速にあわせた無次元風速 $V/D=3$ ($V=1.19\text{m/s}$) で行った。また、たわみ一自由度振動時

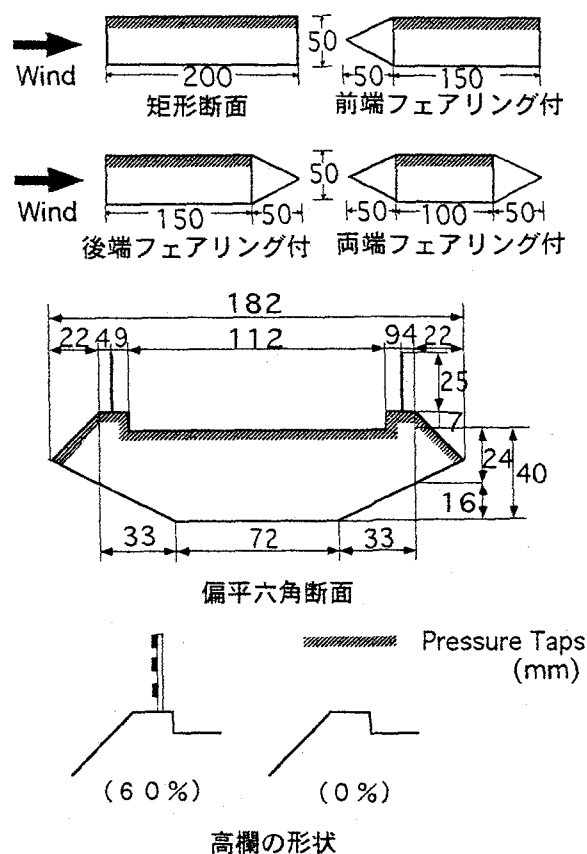


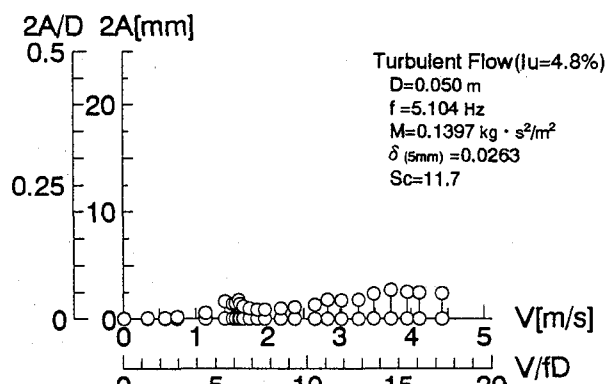
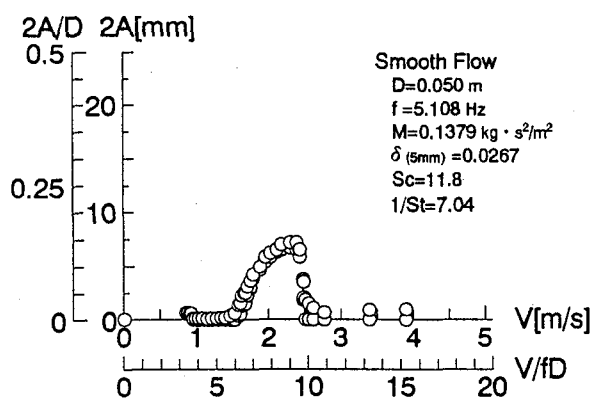
図-1 本研究で使用した模型断面図

における変動圧力は非常に小さいためある程度の振幅を確保する必要がある。その上、断面ごとの非定常圧力特性を直接比較するため統一した加振振幅を設定した。また風速については渦励振現象がある特定の風速域においてのみ発生する限定的な振動現象であるため一風速についてのみ行った。圧力測定結果の解析方法は、測定結果より模型表面の各圧力孔における物体振動数と同じ周波数成分の変動圧力係数 C_p 、平均圧力係数 $\bar{C}_p$ 、物体振動変位に対する圧力変動の位相差 ϕ を求め、さらに無次元仕事 W_r を算出した。ただし、変動圧力係数 C_p 及び平均圧力係数 $\bar{C}_p$ は、模型前面での動圧 ($1/2 \rho V^2$) で無次元化している。また位相差は中立位置から上への変位を正とした場合の最大変位と模型上面の負圧のピークを対応させ、変位に対する変動圧力の位相の遅れを正の値 ϕ とした。また $W_r > 0$ の時模型を振動させる方向に仕事が働くように定義してある。

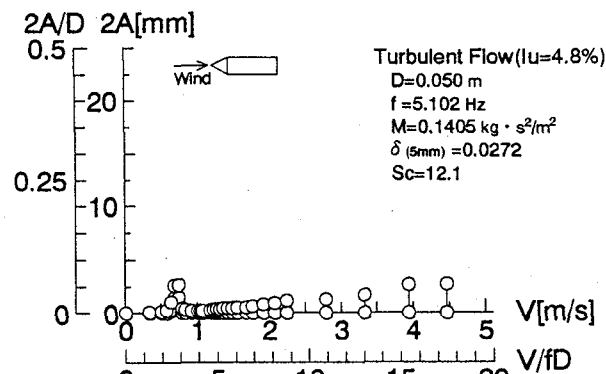
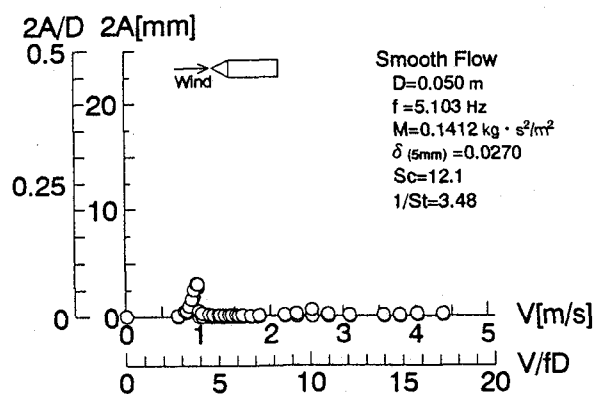
3. 風速応答振幅測定からの評価

前節で示した模型断面を用いて、一様流中、乱流中でそれぞれ風速応答振幅測定実験 ($v-a$ 実験) を行った。その結果を図-2、図-3 に示す。

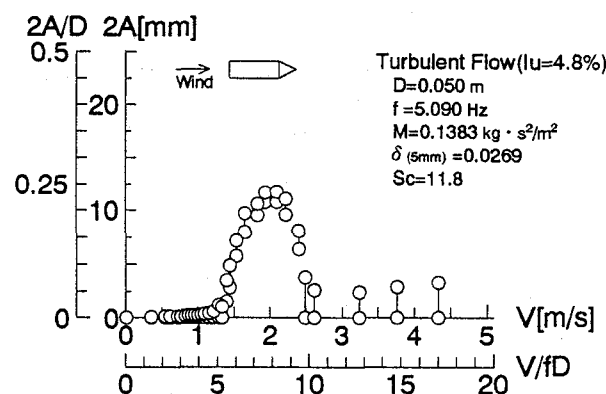
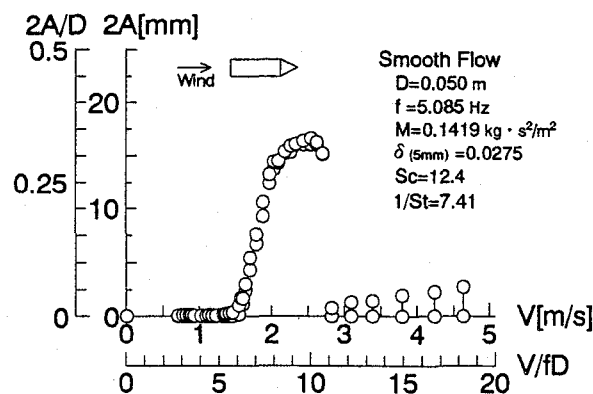
矩形断面について、乱流中と一様流中を比較すると乱流中の方が応答振幅が抑えられている。このことは、従来の研究から乱流によりカルマン渦と前縁剥離渦の両方



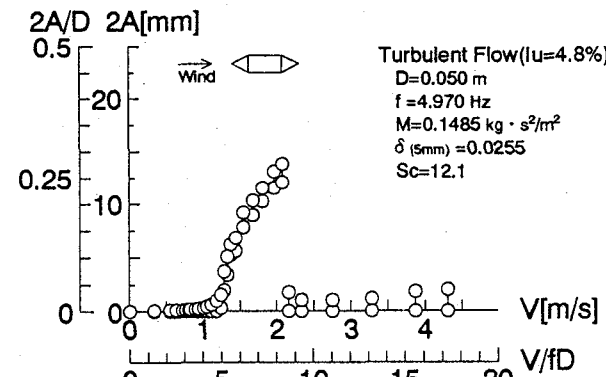
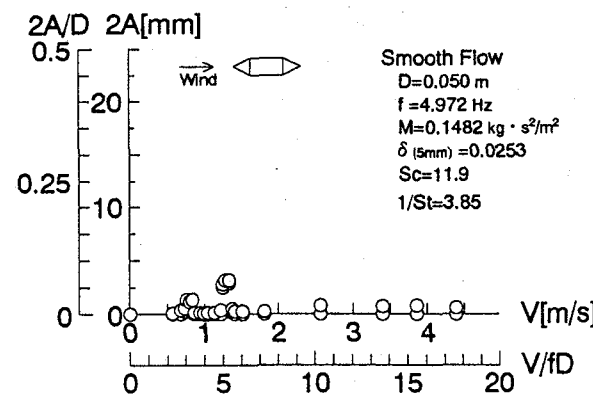
矩形断面のv-a図（一様流中／乱流中）



前端フェアリング付のv-a図（一様流中／乱流中）

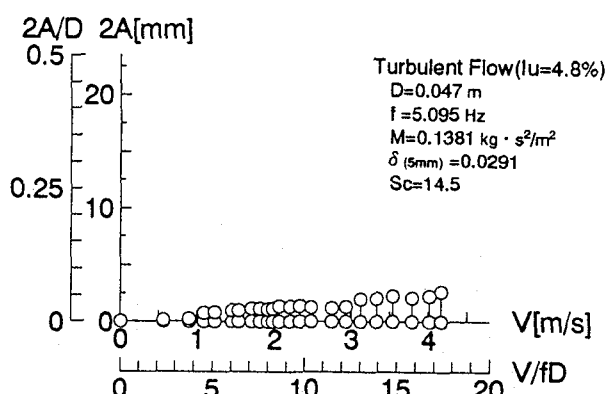
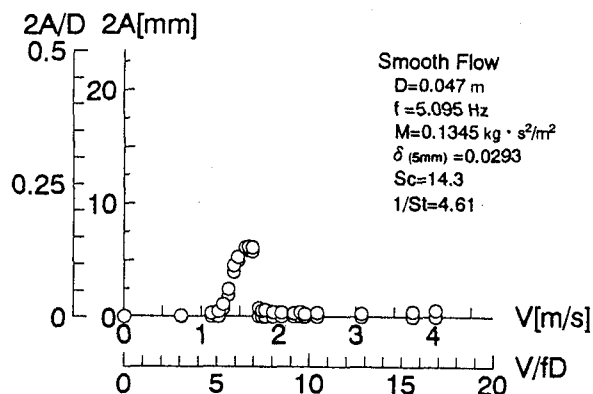


後端フェアリング付のv-a図（一様流中／乱流中）

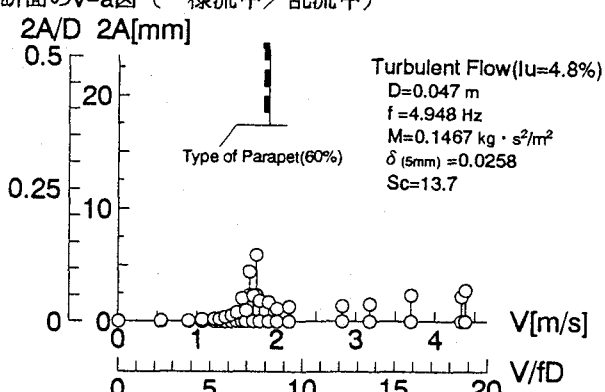
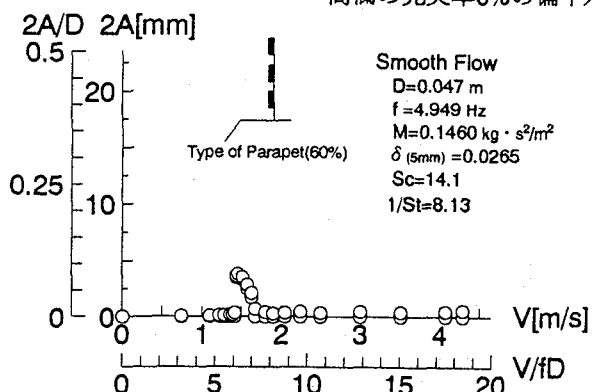


両端フェアリング付のv-a図（一様流中／乱流中）

図-2各断面ごとのv-a図（一様流中／乱流中）



高欄の充実率0%の偏平六角断面のv-a図（一樣流中／乱流中）



高欄の充実率60%の偏平六角断面のv-a図（一樣流中／乱流中）

図-3偏平六角断面のv-a図（一樣流中／乱流中）

が弱められた結果、全体として応答振幅が小さくなったものと考えられる。つまり、この断面ではカルマン渦型渦励振の発現風速 $1/St$ と自己励起型渦励振の開始無次元風速 $1.67B/D$ が接近しており二つの渦励振機構が互いに相互干渉しているものと考えられる。

前端フェアリング付について、一樣流中と乱流中ともに余り大きな差は見られないが、双方とも矩形断面の場合よりもやや低風速側で応答振幅の小さい渦励振が発現していることが確認できる。

後端フェアリング付では、一樣流中と乱流中ともに渦励振の存在がはっきりと確認できる。しかし、乱流中の方が一樣流中より応答振幅は、若干低減されている。このことからこの断面について乱流中で応答振幅がより不安定化する点での乱流効果は確認されない。

両端フェアリング付では、一樣流中と乱流中を比較すると明らかに乱流中の方が応答振幅が約5倍程度増大していることが確認でき、乱流中で不安定化する乱流効果が顕著に現れていると言える。

次に偏平六角断面を用いて、乱流中、一樣流中でそれぞれ高欄の充実率を0%,60%に変化させ、風速応答振幅測定実験を行い、風速応答振幅の違いを調べた。

高欄の充実率0%の断面について、前に述べた矩形断面でのv-a実験結果とほぼ類似しており、一樣流中より乱流中の方が応答振幅が抑えられている。

高欄の充実率60%の断面について、一樣流中と乱流

中を比較すると、若干乱流中の方が応答が大きく、乱流効果が確認される。これは乱流効果が見える両端フェアリング付の応答特性と類似している。これは従来の研究⁵⁾にもあるように高欄の形状を変化させるだけで応答が大きく異なり、高欄形状が乱流効果に大きく影響を与えていることが考えられる。

4. 断面側面の非定常圧力測定からの評価

一樣流中と乱流中でそれぞれ断面側面の非定常圧力測定実験を行った。その結果を図-4、図-5に示す。

矩形断面の圧力分布を見ると、平均圧力係数 $\bar{C}_p$ について一樣流中、乱流中を比較すると微妙に乱流中で圧力回復が前縁側に早められていることから剥離せん断層の再付着点が前縁側に移動しているのが確認できる。これは、乱れの高周波成分による連行作用（＝剥離せん断層の曲率を大きくし、剥離せん断層に断面での再付着が促進され、流体から見たみかけの辺長比が大きくなること）によるものと考えられる。これによって剥離バブルは縮小化し、変動圧力係数 $\bar{C}_p$ からもそれに対応し、一樣流中よりも乱流中の方がやや大きくなった結果となっている。無次元仕事 W_r について、断面中央より前縁側と後縁側で仕事を負であることから振動を妨げる力が働き、中央付近では仕事が正であることから振動を励起する力が働いていることが分かる。

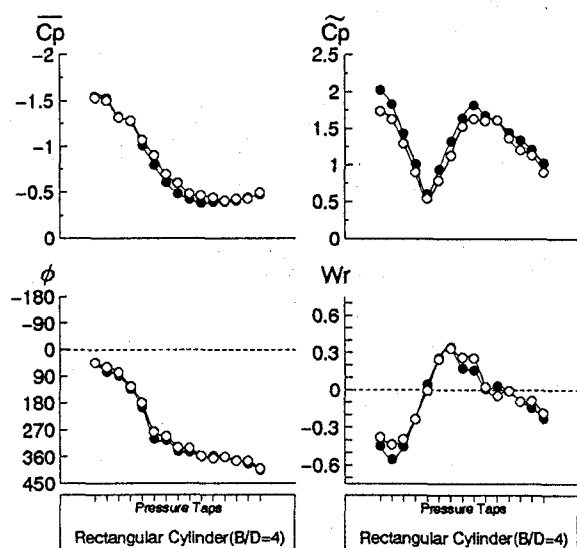
前端フェアリング付について、乱流の方が変動圧力係

数 $\overline{C_p}$ は全体的に小さい。これは乱流によってカルマン渦が弱められたためであると考えられる。位相差 ϕ について、 0° 付近に集中し、またカルマン渦型渦励振の発現無次元風速 $1/St$ の近傍で応答振幅が大きくなっていることから、前縁剥離渦が存在していないものと考えられ、この断面における渦励振はカルマン渦型渦励振であると確認できる。

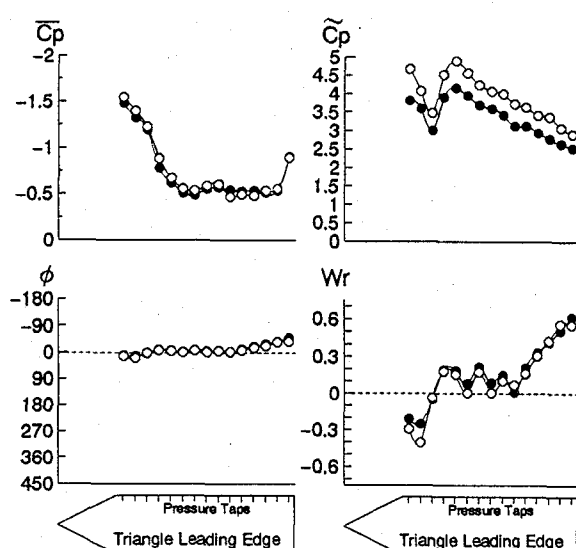
後端フェアリング付について、矩形断面と同様に前縁剥離型渦励振の出現が確認できる。乱流中よりも一様流中の方が応答振幅が増大している。これは、変動圧力係数 $\tilde{C_p}$ を見ると一様流中において後縁側で微妙に変動が大きいため、つまり乱流により流れ場が変化したため応答に大きな差が生じたと考えられ、またフェアリング部における圧力が大きく影響を及ぼしているものとも考えられる。

両端フェアリング付について、平均圧力係数 $\overline{C_p}$ では乱流中で剥離せん断層の再付着点が前縁側に移動しているのが確認され、前述した乱れの連行作用によるものと考えられる。位相特性より 0° 付近に集中していることから前縁剥離渦が存在していないものと考えられる。この断面では乱流効果が顕著に現れているが、乱流による応答振幅の増大が、前縁剥離渦そのものによるものではなく、再付着型カルマン渦に関係しているものと考えられる。圧力分布特性から乱れの連行作用により、流れ場全体が微妙に変化し、その変化こそが流体から振動系へエネルギー授受を行い、後縁側で生成される再付着カルマン渦を刺激し、乱流中で不安定化したものと考えられる。

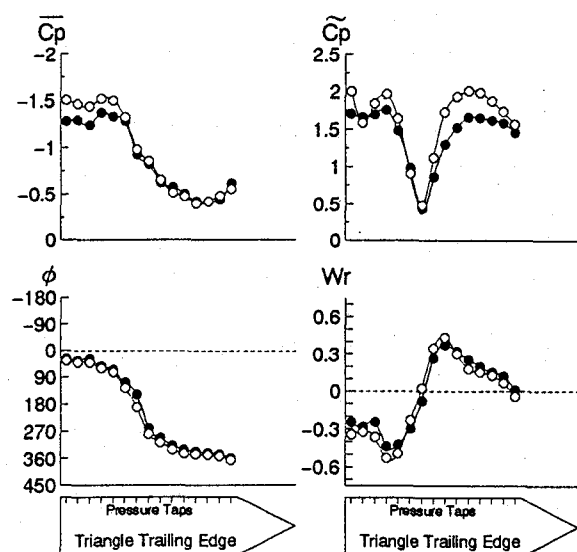
偏平六角断面について、位相特性から高欄の充実率0%の断面は前縁剥離渦が存在し、自己励起型渦励振が



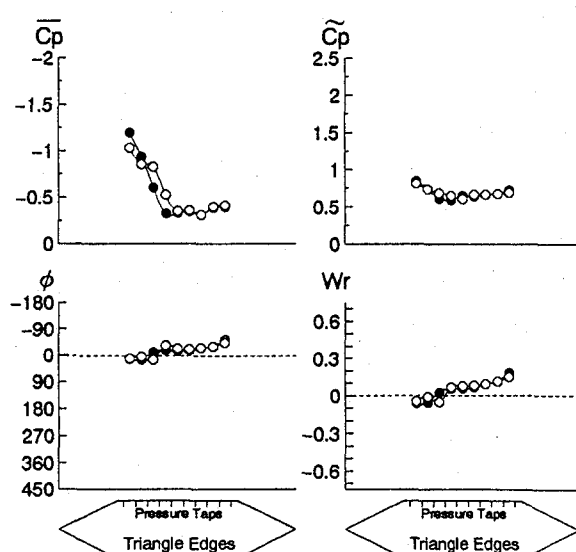
矩形断面の圧力特性



前端フェアリング付の圧力特性

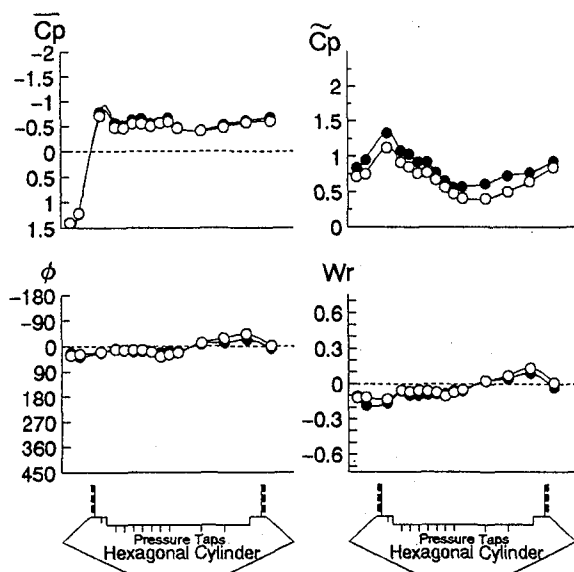


後端フェアリング付の圧力特性

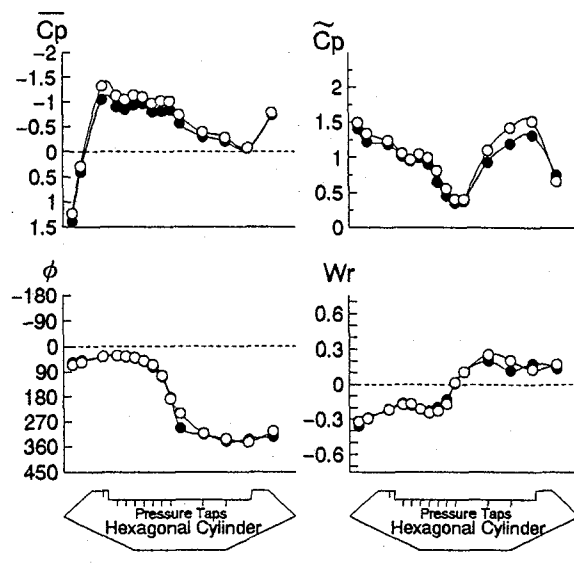


両端フェアリング付の圧力特性

図-4各断面の非定常圧力特性 (—○— : 一様流中, —●— : 乱流中)



高欄の充実率60%の偏平六角断面の圧力特性



高欄の充実率0%の偏平六角断面の圧力特性

図-5偏平六角断面の非定常圧力特性 (—○— : 一様流中, —●— : 乱流中)

発現しているのに対し、高欄の充実率 60% の断面は前縁剥離渦は存在せず、カルマン渦型渦励振が発現しているものと考えられる。高欄の充実率 0% の断面は矩形断面と類似した圧力分布特性を示しているのに対し、高欄の充実率 60% の断面は、両端フェアリング付とほぼ同様な圧力分布特性を示している。このことから高欄の充実率 60% の断面の乱流効果の一因として、両端フェアリング付と同様に再付着型カルマン渦が生成しているものと考えられ、乱れの連行作用により流れ場が微妙に変化し、後縁側で生成される再付着カルマン渦を刺激し、乱流中で不安定化したものと考えられる。

以上から、自己励起型渦励振と考えられる矩形断面と後端フェアリング付とを比較すると圧力分布特性が類似しているのに対し、乱流中で風速応答振幅に大きな差が見られる。断面側面に形成される前縁剥離渦と後縁二次渦が一体化して発現する自己励起型渦励振の発現メカニズムについて後端フェアリング付の乱流中では後縁形状により後縁二次渦が影響を受け、一体化しやすい流れ場になった可能性が考えられる。またカルマン渦型渦励振と考えられる前端フェアリング付と両端フェアリング付について乱流中で風速応答振幅に大きな差が見られる。これは後縁形状が変わると、乱流中における乱れの連行作用によりみかけの B/D が大きくなりアフターボディの形状がより強調されるため、一様流中に比べ後縁形状の出っ張りがより強められたかたちになり、後縁側で生成したカルマン渦が刺激を受け、乱流中で応答が不安定化する一因と考えられる。

5. 結論

(1) 充腹桁断面の渦励振への乱流効果は、非定常圧力特性が微妙に異なることから前縁剥離渦やカルマン渦が乱流により劇的に変化することによるものではなく、ごく

微妙な変化が流体から振動系へのエネルギー授受の条件を変化させることで大幅な空力安定化、不安定化が決定づけられることが明らかになった。

(2) 矩形断面と後端フェアリング付及び前端フェアリング付と両端フェアリング付を比較して、従来より指摘されているように、断面の後縁形状は $\square$ より $\triangleright$ の様に後流側へ突出することが空力的に不安定化することが確認できた。

(3) 両端フェアリング付の乱流効果は、乱れの高周波成分による連行作用によりみかけの辺長比 (B/D) が大きくなり流れ場が微妙に変化し、それにより再付着型カルマン渦が影響を受けたものと考えられる。

参考文献

- 1) 武田勝昭, 園部好洋: "気流の乱れ強度と渦励振応答振幅", 第 39 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1984.
- 2) 松本 勝, 白石成人, 白土博通, 真下義章, 湯川雅之, 平井滋登: "各空力振動現象に及ぼす乱れの影響", 第 10 回風工学シンポジウム論文集, 1982.
- 3) 鈴木利彦, 樋上瑋一: "乱流特性と渦励振応答振幅の関係について", 第 40 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1985.
- 4) 白石成人, 松本 勝, 長尾文明, 真下英人, 本田明弘: "渦励振に及ぼす断面形状の影響と許容振幅に関する研究", 第 7 回風工学シンポジウム論文集, 1982.
- 5) 松本 勝, 白石成人, 三沢 彰, 村上琢哉, 佐野祐一, 高橋邦夫, 金田士郎, 川邊弘美: "高欄を設置した橋梁箱桁断面の乱流効果 - 渦励振への影響 -", 構造工学論文集 Vol.36A, 1990.

(1995 年 9 月 18 日受付)