論

文

近接する円柱群の三分力特性

— 鋼管コンクリート複合構造橋脚の架設時を対象として —

Aerostatic Characteristics of Circular Cylinders in a Group

— For Evaluation of Wind Forces of High Composite Steel-tube Reinforced Concrete Bridge Piers —

野村 敏雄*¹ 藤野 陽三*²

Toshio NOMURA, Yozo FUJINO

SUMMARY

During the construction of high composite steel-tube reinforced concrete bridge piers, the steel circular cylinders in a group are exposed to wind for a certain period. Under wind flow, the grouped cylinders have extremely complicated aerodynamic characteristics such as switching of the flow and mutual interference of vortex generation. In order to establish a rational wind resistant design for this type of structures, the aerostatic characteristics of a group of 9 cylinders (3×3) were extensively studied in a series of wind tunnel experiments under uniform as well as turbulent flows. As a result of the experiment, it is found that:

- (1) The drag coefficient that acts on the group is smaller than the one established according to present design standards and individual drag coefficients corresponding to each of the cylinders in the group are different.
- (2) For intervals of the cylinder group varying between 1.4~2.0 times the cylinder diameter, lift characteristics experience significant changes. In particular, the lift force reverses its direction for cylinder intervals of 1.4 times the diameter and 1.8 times the diameter and above.
- (3) Moment coefficients increase inversely with cylinder spacing and proportionally with turbulence intensity.

1. はじめに

山岳橋梁では橋脚施工の大幅な省力化と急速施工による工期短縮を図るために Photo. 1 に示されるような鋼管コンクリート複合構造^(1,2)を有する高橋脚の施工例が増加している。この鋼管コンクリート複合構造では、高さ 50~100m の数本から十数本に及ぶ円柱群が Fig. 1 に示されるような鋼管直径の 1.3~2.0 倍程度の中心間距離で近接する自立状態に数ヶ月にわたって晒

され、風の作用が架設時の安全性を支配するため風荷重の評価が重要となる。

このような近接する円柱群においては流れのスイッチングや渦形成の相互干渉などの極めて複雑な現象が想定され、未知な点が多い。

構造物が近接して存在する場合の風荷重に関して、群立するサイロや冷却塔などの円筒状容器構造物を対象とした日本建築学会「容器構造物設計指針・同解説」³⁾

*1 (株) 大林組技術研究所 流体研究室 主任研究員

Chief Research Engineer, Fluid Engineering Department, Technical Research Institute, OBAYASHI Corporation

*2 東京大学 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 Ph.D.

Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Ph.D.

(原稿受理：平成 11 年 12 月 17 日)

に規定がある。ただし、そこでは風向方向に直列および並列に2本配置された円柱に作用する抗力係数が円柱間隔により変化⁴⁾することが示されているのみである。ESDU79025⁵⁾では2～6本程度の円柱群を対象とした相互作用の影響に関するこれまでの研究データ^{6)～10)}が示されている。しかしながら、そこで示されているのは主に後流側円柱の振動現象を取り扱うものであり、風力を取り扱っている例は少なく、わずかに Igarashi⁹⁾

Photo. 1 鋼管コンクリート複合構造橋脚の施工例
(日本道路公団山形自動車道小網川橋：
高さ約70m)
(The construction of composite steel-tube
reinforced concrete columns)

Fig. 1 鋼管コンクリート複合構造橋脚
(Composite steel-tube reinforced concrete
columns, general section)

や Eastop¹⁰⁾が3本円柱において円柱間隔と抗力係数の関係について検討を行っているのみである。

同じく、ボイラおよび原子力機器等の熱交換管群を対象とした研究においても管群振動や管群による気柱振動などの振動問題が課題となっており、佐藤ら¹¹⁾は4行3列、定岡ら¹²⁾は3行3列の円柱群に対する数値解析を行い各円柱の振動性状を求めている。

このように従来の研究は主に各円柱、特に後流側円柱の振動現象に着目しており、また、取り扱っている円柱本数も比較的少なく、各円柱および円柱群全体に作用する空気力を研究対象として取り扱った例はほとんど見られないのが現状である。

そこで、合理的な鋼管コンクリート複合構造橋脚架設時の施工方法や耐風設計法の確立を目的として、ここでは9本の円柱群に作用する静的空気力に関して検討を行ったのでここに報告する。

2 実験条件

一様流中および乱流中における基本的な風荷重特性を三分力実験と圧力測定実験により検討した。

実験は高さ：3.0m、幅：2.0mの風路に内に二次端板を取り付けた単回路回流式密閉型風洞¹³⁾を用いて実施した。本風洞の一様流中における乱れ強さは0.5%以下である。

2.1 風洞模型

風洞模型は3段3列の合計9本の円柱群から構成される二次元剛体模型である。Fig. 2に9本円柱(3×3)の模型断面を示すが、実際の実験では単独円柱、3本円柱(3×1, 1×3)を含めた三種類の模型を用いた。各円

Fig. 2 断面形状と三分力の定義
(Cross section of circular cylinders and definition
of wind forces in the wind axes)

(a) 三分力天秤
(Three component balance)

(b) 風洞模型
(Model in wind tunnel)

(c) 圧力測定
(Pressure measurement)

Photo. 2 実験状況
(General view of wind tunnel test)

柱模型はアルミ製パイプで特別な表面処理などは施しておらず、直径は 30mm である。また、圧力実験模型には圧力測定孔が設けられている。Photo. 2 に実験状況を示す。

2.2 風洞気流

本研究では実験対象が円柱群でありレイノルズ数 (Re 数) の影響が大きいと考えられる。実構造における円柱のレイノルズ数は風速 $V = 40\text{m/s}$ では $Re = 4.1 \times 10^6$ であり超臨界域となるが、模型では風速 $V = 20\text{m/s}$ としても $Re = 4.1 \times 10^4$ であり亜臨界域となる。この場合、前者では抗力係数 $C_D = 0.8$ 、後者では $C_D = 1.2$ 程度となることが知られている。そこで、超臨界域における性状を模擬的に捉えるために一様流中の実験に加え乱流中の実験をも実施することとした。

使用した乱流は 3 種類で風洞内に設置した乱流格子により発生させた。乱流格子は風洞設備の関係で試験位置の上流 1.5m に設置しており、幅 30mm, 60mm および 75mm の格子を縦横ともに 360mm ピッチで配置した。

気流計測は模型中心位置とその上下、左右 500mm の位置で行い乱流の特性を調査した。気流の計測結果を Table 1 に示す。

乱れ強さは格子幅 35mm, 60mm および 75mm の順にそれぞれ 8%, 16%, 17% 程度であった。乱れ強さおよび乱れスケールは各計測点で概ね良好な分布を示したが、平均風速分布は格子位置の影響を受け、格子により異なるが、格子の背面付近では模型中心位置より 10~20% 風速が低くなる場合があった。なお、模型中心とその左右では 5~10% 程度であった。そこで、第 4 章で後述するように三分力実験結果と模型中心部の圧力分布を積分して得られた三分力分布とが良好な

Table 1 乱流特性
(Characteristic of turbulent flow)

格子 種類	乱れ強さ(%)		乱れスケール(m)	
	2m/s	10m/s	2m/s	10m/s
1	7	8	0.06	0.06
2	14	16	0.06	0.07
3	13	17	0.07	0.06

Table 2 三分力実験
(Experimental conditions)

気 流	一様流, 乱流, $I_u=8\%$, $I_u=16\%$, $I_u=17\%$
風 速(V)	7m/s, 14m/s (水平偏角変化) 2~20m/s (風速変化)
水平偏角(β)	0°~+90°, 2° ピッチ (水平偏角変化) 0° のみ (風速変化)
円柱間隔	1.4D~2.0D (並列及び直列両方向) 1.4D~2.0D (直列方向のみ)
模型断面	9本: 3×3 断面
	単独: 1本 3本: 3×1 断面, 1×3 断面

対応を示していることを確認して、風速分布の非一様性の影響は小さいものと判断した。

3 円柱群全体の三分力特性

本章ではまず、レイノルズ数の影響および 9 本円柱の典型的な三分力特性に関して風速と水平偏角の影響を述べた後、円柱群全体に作用する各空気力係数と円柱間隔の関係について検討した結果を示す。

3.1 三分力実験

Table 2 に実験条件を示す。Fig. 2 で右から左に風が吹く状態を 0° と定義し、直列方向($S_h: 0^\circ$ 方向)、および並列方向($S_v: 90^\circ$ 方向)の円柱間隔を両方もしくは片方のみ直径の 1.4~2.0 倍の間で変化させ実験を行った。使用した気流は一様流と前述の乱流である。なお、端板の影響を補正するために一様流と $I_u = 17\%$

の乱流中で端板に作用する空気力を求めた結果、両者にほとんど差がなかった。そこで、乱れ強さの異なる各乱流中の実験では $lu = 17\%$ の結果を用いて空気力の補正を行った。

レイノルズ数の影響を検討するために 9 本円柱と単独円柱および 3 本円柱の特性を調査した実験では風速を $V = 2 \sim 20 \text{ m/s}$ 、風速、水平偏角および円柱間隔の影響を検討するために行った実験では風速 $V = 7 \text{ m/s}$ および 14 m/s 、水平偏角は $\beta = 0 \sim 90^\circ$ で変化させた。計測時間は 30 秒で、サンプリング周波数は 1 kHz である。なお、同一条件下での計測はそれぞれ 2 回実施した。

円柱群全体に作用する空気力の三分力係数はおのの(1)~(3)式のように定義した。

$$C_D = P_D / (0.5 \rho V^2 \sum A_n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_L = P_L / (0.5 \rho V^2 \sum A_n) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_M = M / (0.5 \rho V^2 B \sum A_n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 P_D ：抗力、 P_L ：揚力、 M ：空力モーメント、 ρ ：空気密度、 V ：風速、 A_n ： $\beta = 0^\circ$ での円柱 1 本の単位長さ当りの投影面積、 k ：直列方向の円柱本数、 m ：並列方向の円柱本数、 B ：直列方向の幅である。

3.2 レイノルズ数の影響

亜臨界域と超臨界域における抗力係数の違いが乱流を用いて模擬可能かどうかを検討するために、9 本円柱と単独円柱の抗力係数と風速および気流との関係を調査した。

Fig. 3 に 9 本円柱と単独円柱、および 3 本円柱の抗力係数と風速の関係を示す。円柱間隔は 3 本および 9 本円柱ともに $S_h = S_v = 1.4D$ 、水平偏角 $\beta = 0^\circ$ である。また、レイノルズ数は円柱の直径を代表長として用いると風速 $V = 20 \text{ m/s}$ において $Re = 4.1 \times 10^4$ である。使用した乱流は $lu = 8\%$ および 16% である。

Fig. 3a) は各気流中における単独円柱の変化を示している。一様流および $lu = 8\%$ では風速 $V = 5 \text{ m/s}$ 以上になると抗力係数はほぼ一定となるが、 $lu = 16\%$ では $V = 5 \sim 20 \text{ m/s}$ において減少傾向にある。 $V = 20 \text{ m/s}$ で各気流中の抗力係数を比較すると一様流、 $lu = 8\%$ 、 $lu = 16\%$ の順にそれぞれ $C_D = 1.26$, 0.81 , 0.68 となり、乱

Fig. 3 抗力係数と風速の関係
(Relationship between drag coefficients and wind velocity)

れ強さが増加すると抗力係数は低下する傾向を示した。一般的に臨界レイノルズ数以上では抗力係数が低下し、また、気流の乱れの増加に伴い抗力係数が低下する傾向^{14), 15)}を示すことが知られており、実験値もその点に対応した結果となっている。ただし、 $Re = 4 \times 10^4$ において $lu = 9\%$ では $C_D = 0.8$ 、 $lu = 16\%$ では $C_D = 0.6$ まで減少する実験例^{16), 17)}もあるが、本実験では $lu = 8\%$ では $C_D = 0.8$ 、 $lu = 16\%$ では $C_D = 0.7$ であり、多少違いがある。また、 Re の変化に対する C_D の変化についても若干相違があり、明確に超臨界域と同様の抗力係数を模擬していると言い難い面もある。しかし、通常の設計では風速が臨界レイノルズ数以下では $C_D = 1.2$ 、臨界レイノルズ数以上では $C_D = 0.8$ 程度の値が用いられていることもあり、研究目的である設計風荷重を評価するに際しては、実験結果を用いて判断することが可能であると考えられる。

Fig. 3b) は風向に対して直列配置された三本円柱の場合である。 $V = 20 \text{ m/s}$ で各気流中の抗力係数を比較すると一様流中では $C_D = 1.13$ 、乱流中では $lu = 8\%$ の場合は $C_D = 0.88$ 、 $lu = 16\%$ の場合は $C_D = 1.06$ となり、単独円柱と比較して気流の違いによる抗力係数の差が小さくなる傾向を示している。また、単独円柱と比較して一様流中では抗力係数は低下し、乱流中では逆に増加するのが特徴であり、乱れ強さが大きい方が抗力係数の増加が著しい。

次に Fig. 3c) は風向に対して並列配置の場合である。 $V = 20 \text{ m/s}$ で各気流中の抗力係数を比較すると、一様流中では $C_D = 1.27$ となり単独円柱と相違ない。一方、乱流中では直列配置の場合よりさらに抗力係数は増加し、

$Iu = 8\%$ では $C_D = 1.10$, $Iu = 16\%$ では $C_D = 1.24$ となり, $Iu = 16\%$ では一様流中とほぼ抗力係数が一致した。

Fig. 3d) が9本円柱の場合である。一様流中と $Iu = 8\%$ では概ね同様の風速の変化に対する性状を示しており, 抗力係数が $V = 20\text{m/s}$ ではそれぞれ $C_D = 1.14$ および 1.22 である。一方, $Iu = 16\%$ の場合は低風速域から前者より抗力係数が大きい傾向を示し, $V = 20\text{m/s}$ でも $C_D = 1.32$ となり最も大きくなっている。

このように9本円柱では単独円柱と逆の性状を示し, 必ずしも一様流中の抗力係数が大きくなるとは限らない結果となった。

また, 直列および並列配置の3本円柱は単独円柱と9本円柱の中間的な性状を示しているといえる。2本円柱の場合, 並列配置では円柱間隔によっては単独円柱と比較して各円柱の抗力係数が大きくなり, 直列配置では各円柱の抗力係数は小さくなること^{3), 18)}が知られているが3本円柱でも同様の傾向が見られる。

3.3 水平偏角と風速の影響

Fig. 4, 5 は円柱間隔 $S_h = S_v = 1.4D$ における三分力特性であるが, 本研究で調査した一様流中および乱流中における9本円柱の典型的な三分力特性を示している。実験に用いた乱流は $Iu = 17\%$ である。

Fig. 4 三分力特性 (一様流)
(Steady coefficients under uniform flow)

Fig. 5 三分力特性 (乱流)
Steady coefficients under turbulent flow)

実験は風速 $V = 7$ と 14m/s で実施したが, 一様流中では風速の相違によって抗力, 揚力および空力モーメント係数ともに大きな差はみられなかった。一方, 乱流中では抗力および揚力係数に風速の差による大きな違いは見られないが, 空力モーメント係数は定性的には水平偏角の変化に対して $V = 7\text{m/s}$, 14m/s ともに同様の性状を示すものの, 絶対値には差があり風速に依存する結果となっている。

気流の相違による影響を見ると抗力係数は一様流および乱流中ともに水平偏角の変化に対して同様の性状を示すが, 揚力と空力モーメント係数は気流により異なった性状を示す。揚力係数は水平偏角 $\beta = 0^\circ$ の近傍では一様流および乱流中ともに揚力勾配が負勾配となっている。水平偏角 $\beta = 0 \sim 45^\circ$ の間で一様流中では揚力係数が負から正值へと変化するが, 乱流中では負値のままである。空力モーメント係数の変化が著しく, 一様流中では比較的値が小さく, 小刻みな変動を示すが, 乱流中では水平偏角 $\beta = 0 \sim 30^\circ$ の広い領域で負勾配となる。なお, $Iu = 8\%$ の乱流中では空力モーメントの水平偏角に対する変化は一様流と $Iu = 16\%$ の乱流の中間的な性状となることがすでに確認されている¹⁹⁾。

3.4 抗力係数と円柱間隔の関係

Fig. 6 は直列間隔および並列間隔の両方の円柱間隔を $S_h = S_v = 1.4 \sim 2.0$ と変化させた場合の抗力係数であ

Fig. 6 抗力係数
(Drag coefficients)

Fig. 7 円柱間隔の影響
(Effect of cylinder spacing on drag coefficients at 0 degree of angle of attack)

Fig. 8 直列間隔の影響
(Effect of longitudinal cylinder spacing on drag coefficients at 0 degree of angle of attack)

Fig. 9 並列間隔の影響
(Effect of transverse cylinder spacing on drag coefficients at 0 degree of angle of attack)

り、上段が一樣流、下段が乱流中の実験結果である。

一樣流および乱流中ともに水平偏角が増加すると抗力係数も増加し、 $\beta = 45^\circ$ のときに最大となり、全体的には円柱間隔が増加すると抗力係数が大きくなる傾向を示している。

乱流中では一樣流中と比較して水平偏角が変化しても抗力係数はあまり増加せず、全体的に円柱間隔の違いによる差が小さくなっている。また、水平偏角 $\beta = 0 \sim 10^\circ$ 程度の範囲では、いずれの円柱間隔においても抗力係数がほとんど変化しないのが特徴である。ただし、水平偏角 $\beta = 0^\circ$ では乱流中の方が一樣流中よりも抗力係数が大きくなっている。

現状の設計¹⁾では従来の設計法^{20), 21)}を準用し、水平偏角が 0° の抗力係数を用いて風荷重を算定している。そこで、Fig. 7～9 に水平偏角 $\beta = 0^\circ$ における抗力係数と円柱間隔の関係について検討した結果を示す。

Fig. 7 は直列間隔 S_h および並列間隔 S_v をともに変化した場合である。一樣流において $V = 14\text{m/s}$ のみ円柱間隔の増加に伴い抗力係数も単調な増加を示している。しかし、他の場合は $S_h = S_v = 1.4\text{D}$ と 1.6D の間で減少した後に増加しており、抗力係数においても $S_h = S_v = 1.4\text{D}$ と 1.6D の間で性状の変化が伺える。また、いずれの場合も乱流中の方が一樣流中よりも抗力係数がやや大きくなっており、単独円柱の場合とは性状が異なっている。

Fig. 8 は直列間隔 S_h のみを変化させた場合である。一樣流中では多少風速により性状が異なる。すなわち、 $V = 7\text{m/s}$ では単調に減少し、 $V = 14\text{m/s}$ では $S_h = 1.4 \sim 1.8\text{D}$ の間でやや増加するが $S_h = 2.0\text{D}$ では減少する特性を示しており、全体的には円柱間隔が増加すると抗

力係数は低下する傾向にあると考えられる。一方、乱流中では両円柱間隔を変化させた場合と同様の性状となっており、 $S_h = 1.6\text{D}$ で減少した後に増加に転じる傾向を示している。このように、一樣流中と乱流中では円柱間隔の変化に対する特性が異なっている。また、この場合も乱流中の方が一樣流中よりも抗力係数が大きくなっている。

Fig. 9 は並列間隔 S_v のみを変化させた場合である。この場合、一樣流中および乱流中の特性が直列間隔 S_h のみを変化させた場合と逆になっている。すなわち、一樣流中では両方の円柱間隔を変化させた場合と同様の性状を示し、乱流中では円柱間隔が増加すると抗力係数は減少する。

このように一樣流では並列間隔、乱流では直列間隔の影響が卓越するが、これは乱流中では最初の第1列の円柱で剥離した伴流幅が一樣流中よりも小さいために、並列に配置された円柱間の相互干渉が小さくなることによると考えられる。したがって、多段に配置された円柱群では気流性状、並列および直列円柱間隔が密接に影響を及ぼし合っており、単純に直列間隔のみで抗力係数を評価することは出来ないと考えられる。

3.5 揚力係数と円柱間隔の関係

Fig. 10 は直列間隔および並列間隔の両方の円柱間隔を $S_h = S_v = 1.4 \sim 2.0$ と変化させた場合の揚力係数であり、上段が一樣流、下段が乱流中の実験結果である。

揚力係数は一樣流および乱流中ともに円柱間隔 $S_h = S_v = 1.4\text{D}$ と 1.8D 以上との間で挙動が異なり、 $S_h = S_v = 1.6\text{D}$ は中間的な挙動を示している。乱流中の方が一樣流中と比較して水平偏角の変化に対して滑らかな

値の変化を示しており、 $S_h = S_v = 1.4D$ では水平偏角 $\beta = 0^\circ$ で揚力が負勾配、 $S_h = S_v = 1.8D$ 以上では正勾配となり、水平偏角の変化に対して正反対の挙動となる。

Igarashi ら⁸⁾ による風向方向に直列配置された3本円柱の一樣流中の実験では最初の円柱から剥離した流れの再付着点が円柱間隔とレイノルズ数の影響により変化するため、下流側のフローパターンが変化することが指摘されている。数種類のフローパターンの変化が存在するが、 $1.0 \times 10^4 \leq Re \leq 2.0 \times 10^4$ の範囲では円柱間隔が概ね $S_h = 1.2 \sim 1.5D$ の間に変化点が存在することが示されている。

本実験の場合は並列にも円柱が配置されているので3本円柱の場合よりも複雑な流れが想定されるが、円柱間隔とレイノルズ数の影響によるフローパターンの変化、第一列と第2列、第2列と第3列の円柱間における流れのスイッチングの有無が揚力係数の変化に影響を与えていると考えられる。

3.6 空力モーメント係数と円柱間隔の関係

Fig. 11 は直列間隔および並列間隔の両方の円柱間隔を $S_h = S_v = 1.4 \sim 2.0$ と変化させた場合の空力モーメント係数であり、上段が一樣流、下段が乱流中の実験結果である。

空力モーメントは一樣流中では値が小さく、また、小刻みに勾配が変化する複雑な変動を示す。

円柱間隔 $S_h = S_v = 1.4D$ とそれ以上の円柱間隔の場合では水平偏角の変化に対する挙動が相違し、 $S_h = S_v = 1.6D$ 以上では円柱間隔によらず水平偏角の変化に対してほぼ同様の挙動となる。

一方、乱流中では揚力の場合と同様に水平偏角の変化に伴う小刻みな変動が無くなり滑らかな値の変化を示し、一樣流中とは大きく性状が異なっている。いずれの円柱間隔の場合も水平偏角 $\beta = 0 \sim 30^\circ$ の範囲で負勾配、 $\beta = 30 \sim 45^\circ$ の範囲では正勾配となる。しかし、円柱間隔の変化による影響が非常に大きく現れ、円柱間隔 $S_h = S_v = 1.4D$ の場合に最も空力モーメント係数の変化が大きく、円柱間隔が増加すると逆に値は小さくなる。 $S_h = S_v = 1.8D$ および $2.0D$ ではほとんど空力モーメントが生じなくなるが、これは円柱間隔が増加すると各円柱の相互作用の影響が小さくなり、抗力および揚力が断面に対称に作用することによって考えられる。

Fig.10 揚力係数
(Lift coefficients)

Fig.11 空力モーメント係数
(Moment coefficients)

4 各円柱の三分力特性

4.1 圧力測定実験

前章では円柱群全体に作用する空気力特性を検討したが、円柱群を構成する各円柱に作用する空気力もその本数や間隔、また、位置により単独円柱の場合とは異なってくることが考えられ、単独円柱よりも大きな抗力が作用していることも予測される。そこで、各円柱の三分力を円柱表面の圧力分布を測定することによ

り検討した。

Table 3 に実験条件を示す。また、Fig. 12 に各円柱と圧力測定位置の定義を示す。圧力測定位置は水平偏角

Table 3 圧力実験
(Experimental conditions of pressure measurements)

気 流	一様流, 乱流: $I_u=17\%$
風 速 (V)	7m/s, 14m/s (水平偏角変化)
水平偏角 (β)	$0^\circ \sim 90^\circ$, 2° ピッチ (水平偏角変化)
円柱間隔	1.4D~2.0D (並列及び直列両方向)
模型断面	9本: 3×3 断面

Fig. 12 圧力測定位置
(Position where pressure was measured)

が $\beta = 0^\circ$ の時に風上となる位置を $\theta = 0^\circ$ として反時計回りに定義した。各円柱の中央部分に 10° ピッチ、合計 36 個の圧力測定孔 (全体で 324 点) を設置して圧力分布を求め、それらを各円柱ごとに積分して抗力と揚力を求めた。空力モーメントは抗力と揚力が各円柱の中心位置に作用するとして、模型全体の回転中心からの距離を乗じて各円柱の全体に作用する空力モーメントを求めた。三分力実験と同様に各円柱の三分力係数は風軸を用いて定義した。また、風圧係数 C_p は次式により定義した。

$$C_p = (p - p_0) / 0.5 \rho V^2 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 p : 圧力, p_0 : 静圧, ρ : 空気密度, V : 風速である。

実験は円柱間隔 $S_h = S_v = 1.4, 1.6$ および 2.0 について実施した。計測時間は 30 秒で、サンプリング周波数は 500Hz である。また、使用した乱流は $I_u=17\%$ である。

4.2 圧力分布

Fig. 13 に一様流中および乱流中における各円柱の圧力分布を示す。図は三分力実験において気流および円柱間隔の相違の影響が顕著に現れる風速 $V = 14\text{m/s}$, 水

Fig. 13 圧力分布 (水平偏角: 30deg , $V = 14\text{m/s}$)
(Pressure distribution around cylinders at 30 degree of angle of attack)

水平偏角 $\beta = 30^\circ$ の状態である。また、Fig. 14 は圧力を積分し、足し合わせて求めた円柱群全体に作用する三分力分布である。図は乱流中における $S_h = S_v = 1.4D$ における結果を示しているが、いずれの空気力係数も三分力実験結果と良好な対応を示しており、他の円柱間隔の場合も同様であった。以下に各円柱の圧力分布性状を示す。

第一列の円柱はいずれも水平偏角 $\beta = 30^\circ$ の時に測定位置が真下部分となる $\theta = 180 \sim 270^\circ$ において乱流中では一様流中と比較して負圧が大きくなっており、一様流中と乱流中における剥離点の相違が伺える。す

Fig. 14 三分力実験と圧力実験結果の比較
(Comparison of three component force measuring result and pressure measuring result)

なわち、乱流中では一様流中よりも剥離点が円柱の後方風下側となるために下面において流速が高くなっていると考えられる。第2列の下段に位置する円柱6もほぼ同様の傾向を示している。

第2列の上段および中段に位置する円柱4, 5では前述の円柱とは逆に一様流中の方が $\theta = 180 \sim 270^\circ$ において負圧が大きくなっており、一様流中では第一列を通過した後に気流が乱流状態となり剥離点が変わっていると考えられる。

第3列では一様流および乱流ともに圧力分布に相違はほとんどなく、第1列, 2列部分で乱された結果、気流状態に差が無くなっていると考えられる。

このように各円柱に作用する圧力は3種類のパターンに分けられ、円柱間隔 1.4D および 1.6D は円柱1～6では一様流中と乱流中において同様の圧力分布の相違を示すが、円柱間隔 2.0D は気流の相違による影響がなくなり一様流中と乱流中の圧力分布が一致する傾向を示すようになる。

また、一様流中の場合、第1列では円柱間隔の変化に対応して圧力分布が変化することはなく、第2列の円柱4, 5のみが円柱間隔により圧力分布が変化する。

Fig. 15 各円柱の抗力係数 (乱流, 14m/s)
(Drag coefficients of cylinders under turbulent flow)

Fig. 16 各円柱の揚力係数 (乱流, 14m/s)
(Left coefficients of cylinders under turbulent flow)

一方、乱流中の場合は第1列および第2列が円柱間隔の変化に対応して圧力分布が変化するが特徴である。

4.3 抗力係数

Fig. 15 に円柱間隔を変化させた場合の各円柱における抗力係数と水平偏角の関係を示す。

図は乱流中における比較を示しているが、一様流中の場合も定性的には同じような挙動を示している。図から明らかなように水平偏角 $\beta = 0^\circ$ において抗力が大きく作用しているのは第一列の各円柱のみであり、中段の円柱2における抗力が上段および下段の円柱1, 3よりもやや大きくなっている。各円柱の抗力係数は $C_D = 1.0 \sim 1.5$ の範囲に分布しており、単独の場合よりも大きくなっている。また、第一列では円柱間隔の最も小さい1.4Dの場合に抗力係数が最も大きく、円柱間隔が大きくなるにつれて抗力係数は減少しており、円柱群全体に作用する抗力とは逆の傾向となっている。

第2列では水平偏角 $\beta = 0^\circ$ において、いずれの円柱間隔においても抗力係数は $C_D = 0$ 近傍に位置するが、円柱間隔1.4Dおよび1.6Dでは負、2.0Dでは正の値となる。また、この場合は円柱群全体に作用する抗力と

同様に円柱間隔が増加するにつれて抗力係数も増加する傾向を示す。なお、一様流中ではいずれの円柱間隔も抗力係数は負の値となった。

第3列ではいずれの場合も抗力係数は正の値となり、円柱間隔が増加するにつれて抗力係数も増加する傾向を示す。抗力係数は $C_D = 0.0 \sim 0.5$ 程度である。

このように水平偏角 0° では第1列における各円柱の抗力係数は円柱間隔が増加すると低下するが、第2, 3列では円柱間隔とともに抗力係数が増加する。そして、全体に作用する抗力としては円柱間隔とともに概ね増加する傾向となる。

ただし、円柱間隔1.4D~1.6Dでは性状が変化しており、この間で極値を有するかどうかはさらに検討する必要がある。

4.4 揚力係数

Fig.16 に円柱間隔を変化させた場合の各円柱における揚力係数と水平偏角の関係を示す。

図は乱流中における比較である。図から明らかなように円柱1~6における性状が円柱間隔1.4Dと2.0Dで相違している。円柱位置により性状の相違する水平

Fig. 17 各円柱の空力モーメント係数 (乱流, 14m/s)
(Moment coefficients of cylinders under turbulent flow)

偏角が異なっており、円柱4、5では水平偏角 $\beta=15^\circ$ までの比較的小さい領域で相違するが、水平偏角が増加すると相違はほとんど見られなくなる。一方、円柱1～3および6は水平偏角の大きい領域で相違が著しくなる傾向にあり、特に円柱1、6では作用方向が逆になっている。なお、円柱間隔1.6Dは両者の中間的な挙動を示している。

すなわち、円柱群全体に作用する揚力は円柱間隔1.4Dと2.0Dでは作用方向が逆となるが、この性状が最も顕著な水平偏角 $\beta=20\sim30^\circ$ では円柱1～3および6の相違による影響が大きいと考えられ、これは圧力分布の相違と対応するものである。

また、一様流中の場合は円柱4、5の相違が著しくやはり圧力分布と対応するものとなっている。

4.5 空力モーメント係数

Fig. 17に円柱間隔を変化させた場合の各円柱における空力モーメント係数に対する寄与分、すなわち、円柱5の中心周り各円柱におけるモーメントと水平偏角の関係を示す。この場合、円柱5は寄与しないので、図中には全体に作用する空力モーメントを示した。

図は乱流中における比較である。円柱間隔の影響が

顕著に現れるのは最も風上側に位置する円柱3であり、次に円柱2、4にも多少の影響がみられる。

円柱3では円柱間隔が増加すると空力モーメント係数は水平偏角の変化に対して直線的な変化を示すようになる。なお、一様流中では円柱間隔の相違による影響が小さく、この乱流中における円柱間隔2.0Dと同様の变化を示している。また、一様流中と乱流中では円柱群全体に作用する空力モーメントの水平偏角の変化に対する挙動は大きく異なったものとなるが、やはり円柱2～4における寄与分の相違の影響が支配的である。

空力モーメントは抗力と揚力に依存するが、前述のように抗力係数は円柱間隔の相違による影響は小さく、揚力係数は円柱1～6において相違がみられる。しかし、円柱1、6では水平偏角が $20\sim30^\circ$ の範囲では空力モーメントに対する揚力の寄与が小さく抗力の寄与が卓越するために円柱間隔や気流の相違による影響が現れにくくなっていると考えられる。

5 おわりに

鋼管コンクリート複合構造高橋脚と呼ばれる高橋脚の施工では近接する鋼管群の自立状態が存在し、その風荷重の評価は施工時の設計上重要である。

そこで、本研究では3段3列に配置された9本の円柱群に作用する空気力特性を評価するために一様流中および乱流中において円柱間隔を変化させた三分力実験と圧力実験を実施して検討を行った。今回得られた主な知見をまとめると以下ようになる。

(1) 水平偏角が 0° において、円柱群全体に作用する抗力はいずれの円柱間隔でも乱流中では一様流中よりもやや大きくなり、単独円柱の場合とは性状が異なる。また、各円柱に作用する抗力は現状の設計とは異なる分布となる。

(2) 一様流および乱流中ともに円柱群全体に作用する揚力は円柱間隔 $S_h = S_v = 1.4D$ と $1.6D$ 以上との間で挙動が異なり作用方向が逆となる傾向を示す。この場合、一様流中と乱流中では影響の大きい円柱が異なっている。

(3) 円柱間隔および気流の相違により円柱群全体に作用する空力モーメントと水平偏角の関係は大きく異なったものとなるが、最も上流側に位置する円柱を含む3本程度の円柱の影響が支配的である。

今後、円柱本数が異なる場合の影響、設計時における荷重の載荷方法やクリティカルとなる風向を特定することなどが必要であるが、現在、これらは鋼管コンクリート複合構造の架設時における風荷重評価²²⁾としてまとめ、投稿する予定である。また、渦励振などの空力振動に関する特性についても順次検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本道路公団技術部：鋼管・コンクリート複合構造橋脚設計マニュアル，1998. 8
- 2) 石川，石田：山形自動車道大網川橋の設計と施工，橋梁，1998. 3，pp.50-57
- 3) 日本建築学会：容器構造物設計指針・同解説，1990
- 4) Sachs, P. : Wind Forces in Wind Engineering, Pergamon Press, 1972, pp.73-78
- 5) ESDU79025 : Fluctuating response of circular cylinders in small groups in fluid flow, 1990
- 6) Vickery, B.J. : Across-wind buffetting in a group of four-in-line model chimneys, Proc. 4th Colloq. "Industrial aerodynamics", Aachen, June 1980, Buildings Aerodynamics, Pt 2, Fachhochschule, Aachen, 1980, pp.169-182
- 7) Hanenkamp, W., Hamer, W. : Transverse vibration behaviour of cylinders in line, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.7, No.1, 1981, pp.37-53
- 8) EL-Taher, R.M. : Flow around two parallel circular cylinders in a linear shear flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.21, 1985, pp.251-272
- 9) T.Igarashi, K.Suzuki : Characteristics of the flow around three circular cylinders arranged in line, Bull. JSME, Vol.27, No.233, November 1984, pp.2397-2404
- 10) Eastop, T.D., Tutner, J.R. : Air flow around three cylinders at various pitch-to-diameter ratio for both a longitudinal and transverse arrangement, Trans. Institution of Chemical Engineers(UK), Vol.60, Pt6, 1982, pp.359-363
- 11) 佐藤，市岡他：流動解析による熱交換群の振動と気柱振動に関する研究，三菱重工技報 Vol.32, No.2, 1995.3, pp.97-100
- 12) 定岡，梅垣他：単管及び管群における流体・構造連成振動解析，計算工学講演会論文集 Vol.1, 1996.5, pp.401-404
- 13) 伊藤，川口他：多目的大型風洞について，大林組技術研究所報，No.51, 1995.8, pp.139-146
- 14) 日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学，東京電気大学出版局，1997，pp.605-606
- 15) S.Goldstein: Modern developments in fluid dynamics, Oxford Press, pp.431-432
- 16) M.M.Zdravkovich : Flow around circular Cylinders, Oxford University Press, 1997, p.454
- 17) M. Arie, M. Kiya 他 : Characteristics of circular cylinders in turbulent flows, Bulletin of the JSME, Vol.24, No.190, April 1981, pp.640-647
- 18) 日本流体力学会編：流体力学ハンドブック，丸善，1998.5, pp.442-445
- 19) 野村敏雄，加藤敏明：近接する並列円柱群の対風応答に関する一考察，土木学会年次学術講演会，I -B21, 1998.9, pp.42-43
- 20) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1992.7
- 21) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，1996.12
- 22) 野村敏雄，藤野陽三他：鋼管コンクリート複合構造の架設時における風荷重評価，日本風工学会論文集(投稿中)