サッカーボールの低回転数飛翔の不思議な挙動の解析 Erratic Behavior of Less Spinning Soccer Ball Flight

○溝田武人¹⁾, 山本和幸²⁾, 小倉聡樹²⁾, 大屋裕二³⁾, 岡島 厚⁴⁾

Taketo Mizota, Kazuyuki Yamamoto, Satoki Ogura Yuji Ohya, Atsushi Okajima

1. まえがき

2006FIFA ワールドカップドイツ大会では、数々の無回転シュートによる魔球のゴールシーンが威力を発揮し話題になった。この大会から新しいボールが使われだして魔球のシュート頻度が増したと思われるが、昔からバレーボールのフローターサーブなどと共にこの魔球シュートは知られていた。その原因は、ボール後流のゆらぎにあるようだ、という程度の理由は考えられていたが、流体力学的なメカニズムは分かっていない。

ここでは、サッカーボールの回転速度が少ないシュートで生じる魔球的な振る舞いに関するメカニズムを追求した結果を報告する。

研究では、ボールの自由落下実験、TV映像による軌道解析、風洞実験による空気力測定、など風工学の手法を用いている。

サッカーボールの速度は、滑面球では亜臨界域である。しかし浅井ら¹⁾による抗力係数の測定結果によるとボール縫い目などの影響により超臨界領域の流れが実現されている。この魔球のメカニズムは、この領域における種子田ら²⁾の滑面球の流れ観察のように、馬蹄形渦とそれに続く一対の渦の発生位置がボール背後でランダムに変化することに基づく横力・揚力の発生による、と考えられる。

2. 実験および画像解析方法

2.1 自由落下実験

阿蘇長陽大橋の標高差 72m を利用してボールを自由落下させ 1 台の高速度カメラで撮影した。その画像を解析して、ボールが揺れる振幅や横力等の空気力係数、ストローハル数を求めた。画像解析ではあらかじめボール位置とボール直径を表す画面上のピクセル数を検定実験で求めておき、撮影映像におけるボール中心の

(X, Y, X) 座標を確定した。

2.2 TV 画像解析

2006FIFA ワールドカップドイツ大会やイングランドプレミアリーグの無回転フリーキック映像を入手し、画像解析してボールの変化を捕えた。

2.3 風洞実験

風洞実験は九州大学応用力学研究所地球大気風洞を使って行った。ボール振動装置、ボールに加わる流体力の測定装置を図 1 に示す。

Fig.1 Apparatus of ball oscillation and fluid dynamic force sensor

1)福岡工業大学, 教授,

Fukuoka Institute of Technology (FIT), Professor

2)同上, 大学院生, Graduate course of FIT

3)九州大学, 教授, Kyushu University, Professor

4)金沢学院短期大学, 教授, Kanazawa Gakuin University, Professor

3. 実験結果

3.1 ボール自由落下実験結果

自由落下実験ではボール速度が 20m/s 付近ではほぼ一定速度になったが、その付近ではボールの揺れを測定できた。その時の横揺れの振動数、落下速度から、揺れのストローハル数 St は $St=0.01\sim0.0125$ 程度であった。また、横方向 C_s およびそれに対して直角方向の揚力 C_L の振幅は $C_s=0.1$ 程度であった

3.2 TV 画像解析結果

TV 画像解析によるボールの揺れは、カメラの光軸に対して直交平面に投影したボールの動きになる。光軸方向に進行するボールの解析がより正しく現象を表すことになる。

この解析によるストローハル数は $St=0.013\sim0.014$ 程度であり、横力係数の振幅は $C_s=0.2\sim0.5$ と落下実験より大きくなった。

3.3 ボール振動実験結果

風洞流速を $U=18\sim24\text{m/s}$ 、ボール加振振幅比 $a/d=0.05, 0.01$ (ボール直径 $d=\phi 0.22\text{m}$)、振動数 $0.755\sim1.38\text{Hz}$ で上下振動させボールに加わる揚力と変位に対する空気力の位相を調べた。実験ストローハル数は $St=0.005\sim0.0175$ である。このボール加振実験によると空気力の振幅も特別に増加することはない、位相も進みのストローハル数領域はあるが、特定のストローハル数領域で傾向的な変化は観察できなかった。すなわち、この現象は周期的な加振によって現れるフラッター現象ではない、と考えられる。

3.4 ボール無振動時における揚力と横力

ボールを振動させずに固定したままで横力・揚力を測定した。120s 間の記録の中で、横力・揚力係数とも時々 0.1 にまで達することがある。その例を図 2 に示す。120 秒間の計測時間中の $T=59\sim61\text{s}$ の 2 秒間の変化を示す。

Fig.2 Lift and Side force on the ball at rest
($U=22\text{m/s}$, $Re=3.4\times 10^5$, $T=59\sim61\text{s}$)

これらの空気力を時間で 2 階積分して Z-Y 平面上の変位を求めた結果を Fig. 3 に示す。この場合、ボールを水平に蹴って Y 方向は重力の効果を入れているので、初期の揚力方向の値が影響して、-Y の値を示している。

Fig.3 Y-Z plane displacement of the ball flight

4. 考察と結論

浅井ら¹⁾によるサッカーボールの抗力係数の測定によると、ボール速度が $18\sim24\text{m/s}$ では $C_D=0.14$ 程度であり、亜臨界レイノルズ数の $C_D=0.42$ と異なっており、超臨界レイノルズ数領域である。一方、Taneda²⁾によると滑面球の超臨界レイノルズ数領域における流れは、Fig. 4 のようにボール背後の馬蹄形渦と一対の渦が形成され、この位置が不規則に発生位置を変える。その結果横力が発生する、とされている。

Fig. 2 で示した揚力や横力の不規則な変化はこの渦の不規則な発生と対応しているのではないかと考えられる。

Fig. 4 Schematic representation of vortex structure in the range of $3.8\times 10^5 < R < 10^6$

参考文献

- 1) 浅井ほか；日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集，2005. 10. 29-30，金沢大学
- 2) S. Taneda: J. Fluid Mech., Vol. 85, pp. 187-192, 1976

風車翼の空力特性に及ぼすレイノルズ数と乱れの強さの影響

Effects of Reynolds Number and Turbulence Intensity on Aerodynamic Characteristics of a Wind-Turbine Airfoil

○山本 学¹⁾ 近藤 宏二²⁾
Manabu YAMAMOTO¹⁾ Koji KONDO²⁾

1. はじめに

筆者らは、大型風車を想定した3枚翼水平軸プロペラ型風力発電設備に作用する風力特性や風車後流特性を縮尺模型を用いた風洞実験により検討している¹⁾²⁾。タワー、ナセル、翼など異なる形状の部位で構成される風力発電設備のような構造物は、各部位毎の風力特性を把握する必要がある。風車翼に着目すると、翼の空力特性は、実機におけるレイノルズ数(以下、 Re 数)を想定した既往の研究³⁾が多いが、大型風車の縮尺模型を用いる風洞実験では、 $Re \leq 10^5$ の低 Re 数においても空力特性を把握する必要がある。また、日本のように複雑地形の影響が大きい地域では、乱流中の空力特性を検討することが重要である⁴⁾。

本研究では、参考文献¹⁾²⁾で採用した翼形 M-F073³⁾を対象として、 Re 数および乱れの強さをパラメータとした風洞実験により、二次元翼の空力特性を調査した結果を報告する。

2. 実験概要

実験は、鹿島技術研究所の汎用境界層風洞で、天秤装置を用いた空力測定と多点同時風圧測定を行った。風洞の測定断面は、幅 2.5m×高さ 2m であるが、風洞内に二次元実験用側壁を模型の両端部に設置して、幅 1.83m×高さ 2m とした。Fig.1 に実験模型を示す。翼形は、(独)産業技術総合研究所と富士重工業(株)が共同開発した M-F073³⁾とした。翼弦の長さ C は、200mm である。実験パラメータは、主流方向の乱れの強さ I_u 、 Re 数(流入風速)、迎角 α (Fig.1 参照)とした。実験気流は、風洞内に乱れの原因となる障害物を設置しない $I_u=0.3\%$ と乱流格子による $I_u=5\%$ 、 16% とした。格子乱流での乱れのスケール L_u は、最大翼厚(42.4mm)の2~3倍程度であった。実験風速は、6, 8, 15, 23m/s の4種類であり、代表長さを翼弦とした場合の Re 数は、それぞれ 7.5×10^4 、 1×10^5 、 2×10^5 、 3×10^5 である。Fig.2 に一例として、風速 8m/s における実験気流の鉛直分布を示す。迎角 α の測定範囲は、 $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ とし、迎角の変化は、風車のピッチ制御を考慮して、風を吹かせた状態で増加と減少について実施した³⁾。風洞測定断面に対する模型の閉塞率は、迎角の絶対値の増加に伴い増加するが、 $-27^\circ \leq \alpha \leq 27^\circ$

Figure 1 Outline of a two-dimensional model

Figure 2 Wind tunnel flow (8m/s)

の範囲においては閉塞率 5%以下である。計測条件は、サンプリング間隔 0.001sec、個数 32768 である。

3. 実験結果

3.1 翼の空力特性

抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、モーメント係数 C_M は、下式で求めた。Fig.1 に力の向きを示す。

$$C_D = F_D / (0.5 \rho U^2 C \ell) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$C_L = F_L / (0.5 \rho U^2 C \ell) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$C_M = M / (0.5 \rho U^2 C^2 \ell) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 F_D : 平均抗力、 F_L : 平均揚力、 M : 平均モーメント、 ρ : 空気密度、 U : 風速、 C : 翼弦長、 ℓ : 模型長

Fig.3 に一例として、 $I_u=16\%$ 、 $Re=1 \times 10^5$ での迎角と各空力係数および揚抗比($=C_L/C_D$)の関係を示す。

C_L は、迎角 -14° 付近から迎角の増加に伴いほぼ直線的に増加し、迎角 18° (失速角) で最大に達した後、翼上面で剥離が起こる失速⁴⁾により値は減少する。一方、 C_D は、迎角 $0^\circ \sim 10^\circ$ で約 0 であるが、失速角以上

1) 鹿島技術研究所 主任研究員
Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute

2) 鹿島技術研究所 グループ長 博士 (工学)
General Manager, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

では剥離に伴う後流の影響により、迎角の増加に伴い値が増加する。 C_M も失速角以上では、絶対値が大きくなる傾向が見られる。揚抗比は、失速角の1/2にあたる迎角9°で最大となる。風車の回転性能は、この迎角の時に最も良くなるといえる。なお、乱流中での空力係数は、迎角の増加と減少で大きな差は認められなかった。

3. 2 Re数と乱れの強さが翼の揚力に及ぼす影響

Fig.4に、乱れの強さ毎にRe数の違いによる迎角 α と C_L の関係を示す。 $I_u=0.3\%$ の場合、 $Re=2 \times 10^5$ の失速角付近において、迎角の増加と減少で値に差が生じた³⁾が、図中には迎角増加の結果を示す。 $I_u=0.3\%$ の C_L は、 $Re \geq 2 \times 10^5$ では迎角12°で最大となるピークを示す。しかし、 $Re \leq 1 \times 10^5$ では、迎角12°付近にピークは現れず、 C_L の遷移現象が見られる。一方、乱流中の $I_u=5\%$ 、16%の結果を見ると、Re数の影響は小さい。また、失速角は $I_u=0.3\%$ の12°($Re \geq 2 \times 10^5$)に対し、 $I_u=5\%$ で14°、 $I_u=16\%$ で18°となり、乱れの強さの増加に伴い失速角は大きくなる。これは、乱れの強さが大きい程、翼表面の乱流境界層が発達し、剥離が起こりにくくなる⁴⁾ので、翼上面の剥離点が風下側に移動するためと考えられる。そのため、失速角での C_L の値は、乱れの強さが大きい方が大きい。

ここで、Fig.5に、鉛直(揚力)方向の平均風圧係数 C_{Li} の分布($\alpha=12^\circ$, 迎角増加)を示す。Re数は、Fig.4で示した $I_u=0.3\%$ での C_L の遷移現象に着目し、 1×10^5 と 2×10^5 とした。 $I_u=0.3\%$ の C_{Li} は、 $Re=2 \times 10^5$ の場合、翼上面では、風上の $x/C \geq 0.5$ で上向き(正圧)が生じ、翼下面も値は小さいが上向き(正圧)となっている。一方、 $Re=1 \times 10^5$ の場合は、翼上面の風上側で $Re=2 \times 10^5$ のような上向きの大きな圧力が生じておらず、 x/C によらずほぼ一定となっている。また、翼下面では、 $Re=2 \times 10^5$ とは異なり、 $x/C \geq 0.15$ で下向きの圧力(負圧)となる。これが原因で、 $Re=1 \times 10^5$ 以下の C_L には、失速角のピークが生じないと考えられる。乱流中の $I_u=5\%$ 、16%では、Re数によらず、 $I_u=0.3\%$ の $Re=2 \times 10^5$ とほぼ同様の圧力分布を示し、流入風の乱れがRe数の影響を小さくしていることがわかる。

4. まとめ

Re数および乱れの強さをパラメータとした風洞実験により、翼形M-F073の空力特性を調査した。その結果、揚力係数は乱れの強さが非常に小さい場合、低Re数範囲において、遷移現象が見れる。また、流入風の乱れがRe数の影響を小さくすることを確認した。

謝辞

本研究の実施にあたって、(財)電力中央研究所の田中伸和氏、江口譲氏、服部康男氏、須藤仁氏に貴重な御意見を頂きました。また、産業総合研究所の小垣哲也氏より、翼形M-F073の空力特性に関する有益な情報を頂きました。ここに謝意を表します。

Figure 3 C_D , C_L , C_M and C_L/C_D ($I_u = 16\%$, $Re = 1 \times 10^5$)

Figure 4 C_L for different Reynolds number values (Attack angle increase)

Figure 5 Distribution of wind pressure C_{Li} ($\alpha = 12^\circ$)

参考文献

- 1) 近藤他, 風車RCタワーの風荷重に関する風洞実験および風応答実測, 第55回理論応用力学講演会論文集, 2006.1, pp.53-56
- 2) 服部他, 風洞実験における風車後流の風変動特性の把握, 第26回風力エネルギー利用シンポジウム, 2004.11, pp.389-392
- 3) Kogaki, T., Matsumiya, H., Development and verification of the new MEL-airfoil series for wind turbines, Proceedings of the 14th Joint Action Meeting on Aerodynamics of Wind Turbines, 2000
- 4) Ph.Devinant et al., Experimental study of wind-turbine airfoil aerodynamics in high turbulence, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, 2002, pp.689-707

タンデム配置正方形角柱の角柱配置間隔が流れ場に及ぼす影響の検討

Effect of the distance between tandem square cylinders to the flow around the cylinders

○長谷部 寛¹⁾ 苗木 智久¹⁾ 渡邊 尚斗²⁾ 野村 卓史³⁾
Hiroshi HASEBE¹⁾ Tomohisa NAEKI¹⁾ Naoto WATANABE²⁾ Takashi NOMURA³⁾

1. はじめに

超長大橋の桁断面構造として検討されている二箱桁や、送電線や斜張橋の並列ケーブルに代表されるタンデム配置構造物周りの流れは、構造物の配置間隔によっては上流側構造物から剥離した流れが下流側構造物に衝突し、その周辺に複雑な流れ場を形成することが知られている。しかし現在、並列ケーブルに代表される円形断面を対象とした研究は広く行われている¹⁾が、矩形断面を対象とした研究は少ない。そこで本研究では、タンデム配置した矩形断面周辺に形成される複雑な流れ場の特性を把握することを目的として、タンデム配置した正方形角柱の表面圧力と周辺風速を測定することで、角柱配置間隔が流れ場に及ぼす影響の検討を行った。

2. 実験方法

本研究では、風路が正方形断面(400×400mm)の風洞を用いた。Figure 1に示すように、縮流部端部から5Dの位置に1本目の正方形角柱(辺長D=60mm)を設置して固定し、2本目をその風下側に配置し、角柱中心間隔比L/Dを2,3,4,5として実験を行った。角柱辺長Dと風洞風速U_∞から評価されるレイノルズ数はRe=5.0×10⁴に固定した。表面圧力は角柱のスパン方向中央部に圧力孔を16点設置し、32ch 差圧式同時圧力測定器を用いて測定した。風速測定にはX型プローブの熱線流速計を用いた。なお、表面圧力および風速の測定ともに測定時間は30秒、サンプリング周波数は500Hzとした。

3. 角柱配置間隔が表面圧力に及ぼす影響

Figure 2に角柱模型中心間隔比L/D=2,3,4,5における平均圧力係数 $\overline{C_p}$ と変動圧力係数 $\widetilde{C_p}$ の分布を示す。L/D=2,3およびL/D=4,5はそれぞれ定性的に一致した分布となった。このことからL/D=3と4の間で流れのパターンが大きく変化したと考えられる。平均圧力係数に着目すると、下流側角柱での違いが顕著であり、下流側角柱前面(E-F面)では、L/D=2,3で負圧を示しているのに対し、L/D

Figure 1 Arrangement of tandem square cylinders

Figure 2 Distribution of surface pressure coefficients

Figure 3 Time history of surface pressure at the center of the frontal face on the rear cylinder

- 1) 日本大学理工学部土木工学科 助手
Research Associate, Nihon University
- 3) 日本大学理工学部土木工学科 教授
Professor, Nihon University

- 2) 日本大学理工学部土木工学科 学生(研究当時)
Former Under Graduate Student, Nihon University

$=4, 5$ では値がゼロに近くなった。Figure 3 は $L/D=3, 4$ での下流側角柱前面中央部 E 点における表面圧力の時刻歴である。 $L/D=4$ では負圧だけでなく正圧も測定されていることがわかる。 このため、Fig.2 に示した平均圧力係数がゼロに近い値となった。 また、正圧が測定されたことから、 $L/D=4$ では下流側角柱前面に衝突する流れが生じていると考えられる。 なお、ここに示していない $L/D=2, 5$ の時刻歴は $L/D=3, 4$ とそれぞれ定性的に一致している。

4. 角柱周辺の風速分布

Figure 4 に $L/D=3, 4$ の角柱周辺の主流方向風速の平均値の分布を示す。 図中コンター上の数値は平均風速の値を表す。 $L/D=3$ では上流側角柱側面で加速した流れが一様に減速し、二つの角柱があたかも一つの角柱であるかのような流れとなっている。 この観点から Fig.2 に示した平均圧力係数を見直すと、 $L/D=2, 3$ の下流側角柱側面 (FG 面) では圧力の回復が生じており、圧力分布も二つの角柱を一つの角柱と見なしたような分布傾向を示している。 一方で $L/D=4$ の風速分布は、下流側角柱側面で再び加速しており、下流側角柱からも剥離流が生じていると考えられ、圧力分布の変化から推測される流れの変化に対応した分布となっている。

5. 表面圧力の相関関係

上流側角柱と下流側角柱の表面圧力の相関関係を把握するため、上流側および下流側の角柱の側面中央部 I 点と J 点における表面圧力の相互相関係数を算出した。 Figure 5 に I 点と J 点の圧力の相互相関係数を示す。 $L/D=2, 3$ では相互相関係数は高いが、これは顕著な渦放出がなく圧力変動が小さいためである。 $L/D=4$ では時間遅れ τ がゼロに近い値でピークが見られ、上流側角柱と下流側角柱がほぼ同位相の圧力変動が生じていることがわかる。 また、 $L/D=4$ と $L/D=5$ のピークの時間遅れ τ の差は $5.0 \times 10^{-3} \text{sec}$ であり、角柱間隔の差が角柱 1 つ分の 60mm、主流の風速が 12.0m/s であることから、このピークの差は角柱間隔の差に一致している。

6. まとめ

タンDEM配置角柱の角柱中心間隔比 L/D を 2, 3, 4, 5 として表面圧力と周辺風速の測定を行った。 その結果、下流側角柱前面の圧力の変化から、 $L/D=3, 4$ の間で流れパターンが大きく変化したと考えられる。 これは Liu らの実験²⁾と一致する結果である。 また、Liu らは可視化実験により、 $L/D=3.75$ と 4.25 において角柱間に渦が形成されることを確認しており、その結果から本研究においても $L/D=4, 5$ では角柱間に渦が形成されていると推測される。

$L/D=2, 3$ では角柱側面において圧力の回復が見

Figure 4 Mean velocity of streamwise component around tandem square cylinders

Figure 5 Cross correlation coefficients of surface pressure at the center of lateral faces of the cylinders

られ、二つの角柱が一体化したような流れとなっていると考えられる。 一方、 $L/D=4, 5$ では側面の圧力回復は見られず、風速測定の結果からも下流側角柱から剥離が生じる流れとなっていると考えられる。 また、 $L/D=4$ の上流側角柱と下流側角柱の側面では、ほぼ同位相で圧力変動が生じていることがわかった。 今後は角柱間の流れの構造に着目し、検討を行う予定である。

謝辞 本研究を実施するにあたり科学研究費補助金 (若手研究(B): 17760380) の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献 1) 宮田ら: 風工学シンポジウム論文集, pp.489-494, 2000

2) C. H. Liu, et al.: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, pp1019-1050, 2002

ローターが設置された円柱に作用する風圧

Investigation of wind pressures acting on a circular cylinder with rotors

菊池 浩利¹⁾ 田村 幸雄²⁾ 日比 一喜³⁾ ○洪成壹⁴⁾ ギデオンバン・ジジル⁵⁾ リサ・アルベルティ⁶⁾
Hiroto Kikuchi¹⁾ Yukio Tamura²⁾ Kazuki Hibi³⁾ Sungil Hong⁴⁾ Gideon van Zijl⁵⁾ Lisa Alberti⁶⁾

1. Introduction

A circular cylinder with high wind speed has been studied for a long time^{1),2),3)}. However, the authors had interest in how to increase momentum of air flow around a circular cylinder in ordinary wind tunnel. The authors assumed it may be possible changing the air flow past a circular cylinder by rotors. Also, it may be possible rotors can simulate the flow re-attached to the surface of the cylinder. Two rotors were installed in a circular cylinder to verify that assumption.

This paper examines the use of rotors for changing flows past a circular cylinder in a wind tunnel. Wind pressures acting on a circular cylinder equipped with rotors were measured to investigate changes of air flows. The ratio of rotor circumferential velocity to wind speed was used as a parameter for comparing drag coefficients and lift force coefficients. Drag coefficients decreased as this ratio increased. Also, the fluctuation of lift forces was significantly affected by the velocity ratio.

2. A Cylinder with rotors

Two rotors were installed symmetrically in a circular cylinder with an aspect ratio of 2, as shown in Figure 1. The rotors were 10cm in diameter and were connected to a servo-motor controlled by a driver system. The rotor's rotation direction was the same as the flow direction. The circular cylinder was made from acrylic fiber and the rotor was made from metal with a PVC coating. A bronze surface guide minimized the gap between cylinder and rotor. The cylinder and rotor surfaces were very smooth, except in the areas with the gap between them. There were three rings of measuring points, each having 43 pressure taps at 8° intervals around the circumference except near the rotors.

Figure 1 Schematic views of circular cylinder with rotors

3. Experimental set-up

In this research, wind pressures were measured to investigate changes of flows around a circular cylinder rotating at various rotor rotation speeds. Approaching flows were uniform and four wind speeds were considered: 5m/s, 10m/s, 15m/s, 25m/s. The Reynolds numbers were 1.04×10^5 , 2.08×10^5 , 3.13×10^5 , and 5.21×10^5 , respectively. The turbulence intensity of the approaching air flows was very small. Figure 2 shows mean wind speed and turbulence intensity of the case of 10m/sec in these experiments. Thirteen rotor rotation speeds were set to realize different effects of flows past the circular cylinder.

All pressure taps on the circular cylinder were measured simultaneously. The sampling frequency was set at 1 kHz and measured data length was about 32sec. Measurements were taken three times to ensure stability for all cases. Figure 3 is a photograph of the circular cylinder model with rotors set in a wind tunnel.

The influence of the rotor was varied by velocity ratio β . The velocity ratio β can be defined as $\beta = V_R / V$ where, V_R is circumferential velocity of rotor (m/sec) and V is approaching mean wind speed (m/sec).

Figure 2 Wind profile of uniform flow in wind tunnel

Figure 3 A cylinder model with rotors set in a wind tunnel

¹⁾ 清水建設技術研究所 主任研究員
Dr. Eng., Inst. of Tech. Shimizu Corp.

³⁾ 清水建設技術研究所 室長

Dr. Eng., Inst. of Tech. Shimizu Corp.

⁵⁾ ステレンボシ大学土木工学科 教授

Professor, University of Stellenbosch, South Africa

²⁾ 東京工芸大学工学部建築学科 教授
Professor, Tokyo Polytechnic University

⁴⁾ 東京工芸大学 風工学研究センター 研究員

Researcher, WERC-APEC, Tokyo Polytechnic University

⁶⁾ ステレンボシ大学土木工学科 碩士

Master, University of Stellenbosch, South Africa

4. Results of wind tunnel test

4.1 Pressure coefficients

The distribution of mean pressure coefficients of the circular cylinder was sensitive to the velocity ratio β , as shown in Figure 4. The rotation speeds of the two rotors could not be exactly equal because their mechanical performances were not exactly equal. However, the difference between the rotation speeds was less than 0.5%. The mean pressure coefficients were calculated from the average of mean pressures of two symmetric points.

Pressure coefficients from 0° to 40° did not significantly change with β . The slope of the pressure distribution curves at 40° increased with β . The absolute negative peak pressure coefficients near 90° also increased with β . The peak pressure coefficient was about -2.8 at $\beta = 14.4$. The angle at which the peak pressure coefficient moved from 76° ($\beta = 0.2$) to 88° ($\beta = 14.4$) was dependent on β . The angle of the separation point where the pressure became a constant negative value increased with β . Thus, the separation point move towards the back with increasing β . The constant pressures on the back of the cylinder increased from -0.5 (Figure 4 (a) for $\beta = 0.2 \sim 1.4$) to -0.2 (Figure 4 (b) for $\beta = 7.1 \sim 14.4$). Transition of θ with increasing β was plotted in the Figure 5. The angle at minimum C_p became about 92° .

However, the angle at constant C_p moved to back stream of the cylinder.

Figure 4 Dist. of pressure coefficients depending on β

Figure 5 Transition of θ with increasing β

4.2 Drag coefficient and lift coefficient

Drag coefficients were calculated by integrating the pressures over the surface of the circular cylinder. As is well known, the drag coefficient of a circular cylinder varies with Reynolds number, and the critical Reynolds number is around 3×10^5 for a 2D cylinder^{1),4)}.

In Figure 6(a), the drag coefficient of the circular cylinder with rotors was remarkably decreased in the range of $0.2 \leq \beta \leq 8$. This is similar to the above mentioned phenomenon of a circular cylinder without a rotor in the critical domain. Variation of fluctuating lift coefficient C'_l with β is presented in Figure 6(b). The fluctuating lift coefficient had an almost constant value of 0.04 at $\beta < 2$, but it showed variations in the range of $\beta > 2$. It increased in the range of $2 < \beta < 5$, and then decreased in the range $5 < \beta < 8$. These phenomena roughly correspond to the variation of drag coefficient shown in Figure 6(a). At a velocity ratio β of around 8, the fluctuating lift coefficient suddenly increased showing a peak corresponding to the velocity ratio showing the minimum drag coefficient in Figure 6(a).

5. Conclusion and remarks

This paper has investigated the effect of velocity ratio induced by rotors on the wind force characteristics acting on a three dimensional circular cylinder. The experimental results showed that the air flows passed the cylinder were affected by rotors. Also, the drag coefficients were sensitive to velocity ratio β , and it became minimum at β of around 8. The fluctuating lift force was very sensitive to β , also observed.

(a) Drag coefficient

(b) Fluctuating lift coefficient

Figure 6 Variation of drag and lift coefficient by β

Acknowledgments

This study was funded by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan, through the "Academic Frontier" Project.

References

- 1) Schewe, G., On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crosswind from subcritical up to transcritical Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.133(1983), 265-285
- 2) 丸川, 田村, 真田, 中村, 大型 RC 煙突に作用する揚力と振動応答, *日本風工学会誌*, Vol.19(1984.4), 37-52
- 3) Basu, R.I., Aerodynamic force on structures of circular cross section. Part1, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.21 (1985), 273-294
- 4) Simiu, E., *Wind effects on Structures*, John Wiley & Sons, INC., New York, 1996, 135-194

空力振動する二次元角柱周りに形成される風圧変動場の複素 POD 解析

Complex POD Analysis For Wind Pressure Field Around a 2-Dimensional Square Prism Under Aerodynamic Vibration

永塚康宏¹⁾ 磯野由佳²⁾ 神田亮³⁾ 丸田榮藏⁴⁾
Yasuhiro NAGATSUKA¹⁾ Yuka ISONO²⁾ Makoto KANDA³⁾ Eizo MARUTA⁴⁾

1. 序論

建築・土木分野に見られる構造物あるいは構造断面は、流れに対して流線形ではない、いわゆるブラフボディと呼ばれる形状を有することが多い。その結果、物体の周りに剥離流れが生じ、周期的に変動する圧力場が発生し、物体を振動させる。この現象は、一般的に空力振動と呼ばれ工学的に重要なサブジェクトであるため古くから研究がなされている。この現象のメカニズムを解明する上で、外力を測定し、その特性を明らかにすることは、非常に有益であるが、従来の実験手法では、外力の定量的な評価が困難であった。そこで筆者等は、ニューハイブリット振動法¹⁾ (以下、NHAT)を開発し、ブラフボディに作用する風外力及び風圧力を振動時においても測定を可能にした。

本論文では、その計測された風圧力に対し、複素 POD 解析を適用し、風圧変動場の特性について分析を行う。

2. 実験緒言

実験は、NHAT を用い風直交方向にのみ並進モードで振動する、二次元角柱の空力振動現象の再現を行った。空力振動は、Sc 数が 18.7、質量比 89.75[kg/m³]、減衰定数 2[%]の振動現象をシミュレートした。実験モデルは、Fig.1 に示すような、一辺が 150[mm]の正方形角柱で、モデルの端部には現象の二次元性を保つため、整流板が設置してある。一辺には、8 点の風圧センサーが等間隔で設置してあり、8 点×4 辺×2 層の計 64 点の同時計測が可能である。実験気流は、空力振動現象が発生し易い乱れの少ない一様流である。サンプリング間隔は、 $dt = 4\text{msec}$ で 20480 個のデータを取得し、応答が十分に発達した後半の 16384 個に対し解析を適用する。また、自由実験との対応を図り、前風速での最大変位を初期変位として与えた。

3. 複素 POD 解析

POD 解析は、一般的に主成分分析と呼ばれ様々な分野^{例えは 2)}に用いられている。風工学の分野では、田村等³⁾によりランダム現象の組織的な構造の解析法として最初に導入された。さらに、浅見ら⁴⁾によるクロススペクトルの和による複素 POD 解析や谷口⁵⁾によるヒルベルト変換による複素 POD 解析など、各モードに位相情報を持たせる解析法も導入されている。前者の複素 POD は、クロススペクトルの和より複素共分散行列を算出するため任意の周波数領域について詳細な POD 解析が可能である。後者の複素 POD は、対象とする現象を複素平面に展開することで複素共分散行列を算出する。そのため、POD 解析の拡張版と位置付けられ、POD 解析を包括しより適用性の広い POD 解析である。本論文では、実験風速を広く変化させ、その時々が発生する空力振動時に形成される風圧変動場に対し複素 POD 解析を行うため、予め現象を設定しない後者のヒルベルト変換による解析法を適用した。ここでは、解析をした 1 層 32 点により測定された変動場の複素共分散行列(R_c)を(1)式より定義する。

$$(R_c)_{jk} = \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{p}_j(t) \cdot \tilde{p}_k^*(t) dt \quad \cdots (1)$$

ここで、 $\tilde{p}(t)$: Complex Envelope, $*$: Complex Conjugate

Fig.1 Experimental Model Unit [mm]

1) 日本大学大学院生産工学研究科 博士後期課程
Graduate Student, College of Industrial Technology Nihon University Doctoral Course
2) アイディールブレイン株式会社
IDEAL BRAIN Co.Ltd

3) 日本大学生産工学部建築工学科 助教授工学(工学)
Associate Prof., College of Industrial Technology Nihon University Dr.Eng
4) 日本大学生産工学部建築工学科 教授工学博士
Prof., College of Industrial Technology Nihon University Dr.Eng

4. 解析結果

Fig.2 に、一例として応答値が最大を示した V_r における風圧変動場の複素 POD 解析の主成分のモードとその寄与率を示す。また Fig.3 に、各 V_r における応答と外力の卓越振動に対する固有振動数の比を示す。また Fig.4 に各 V_r における主要モードの寄与率の分布を示す。Fig.2 より、一次モード形は、揚力面が互いに逆位相で変動しておりこの変動は、振動を励起させる成分に寄与していると考えられる。また抗力面は、互いに同位相で、モデル中央から逆位相に変動しており渦の影響と考えられる。二次モードでは、気流の影響により下面後流域に逆位相が生じている事を考慮し、揚力・抗力面は、同位相で変動しており直接的には、振動に寄与しない変動場と考えられる。この一、二次モード形は、各 V_r において同様の傾向を示した。次に Fig.4 より寄与率の変遷を見てみると、ロックイン前では、一次モードは上昇し二次モードは、緩やかに低下している。ロックイン中では、一次モードは、次第に減少し応答値のピークを示す時応答の立ち上がり付近の寄与率まで減少する。一方二次モードは、寄与率が上昇し応答値同様ピークを示す。ロックイン後では、一次モードは、再び上昇しほぼ一定の値を示し、二次モードは、少し減少しほぼ一定の値を示す。これらの傾向を踏まえると、二次モードが振動により形成される変動場を表していると推察できるが、詳細は今後の課題とする。

Fig.2 Fluctuating Wind Pressure Distribution of 1st and 2nd Mode (at each 30°)

Fig.3 Normalized Disp. and Frequency Ratio

Fig.4 Contribution Rate of 1st and 2nd mode

5. まとめ

一様流における二次元正方形角柱の振動時に形成される風圧変動場に複素 POD 解析を用いることで、以下の特徴が明らかになった。

- 1) 一様流中では、振動時に形成される風圧変動場は、90%ほどは一、二次モードで構成される。
- 2) 各 V_r においてモード形は、変化せずにその寄与率が変化を示す。

今後、各モードの周波数特性や応答との相関を考慮し二次元角柱の空力不安定振動の、更なる分析を行う。

参考文献

- 1) 岡田, 松山, 神田, 磯野, 丸田: 2 次元流ちょうにおかれた角柱の振動時の性状を明らかにするためのニューハイブリット空力振動法の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 22 号, 12, 2005, pp.145-150
- 2) 内山, 栗山: 複素主成分分析を用いた仙台湾蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性の解析, 港湾空港技術研究所報告, 第 41 巻, 第 2 号, 6, 2002, pp.1-20
- 3) ビエンキウィッチ, 田村, ハム, 上田, 日比: 物体表面の変動圧力場の固有直交関数展開, 日本風工学会誌, 第 55 号, 5, 1993, pp.35-36
- 4) 浅見, 寺崎: 角柱型模型の変動風圧性状 複素 POD 解析による分析, 大成建設技術研究所報, 第 30 号, 1997, pp.135-138
- 5) 谷口, 谷池: 変動場の組織的な構造を評価するための複素 POD 解析に関する研究, 日本風工学会論文集, 第 31 巻, 第 4 号(通号 109 号), 10, 2006, pp.123-130