

円柱の表面粗度の変化がウェイクエクサイテーションに及ぼす影響

徳島大学大学院 学生会員 ○松川 将大 徳島大学 正会員 野田 稔
 中電プラント株式会社 非会員 井上 真尋 徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

空力振動現象の1つとしてウェイクエクサイテーションが知られており、従来の研究では、並列円柱の上流側円柱が生成する後流が下流側円柱の空力不安定振動発現の原因であると考えられてきた。さらに下流側円柱の空力不安定振動が、お互いを取り巻く流れ、後流と円柱の相互位置関係に起因する流れの干渉¹⁾という要素からなっていることが知られており、今も研究が進められている。また、円柱表面に部材軸に対してある傾きで突起を取り付けるとカルマン渦の発生が抑制される効果があるとの報告²⁾もあり、円柱表面の粗度と後流の特性との関係について不明瞭な点が多い。そこで本研究では、ウェイクエクサイテーションに対する表面粗度の影響を検討するために、並列円柱の下流側円柱の2自由度ばね支持応答実験を行った。また、円柱周りの流れ場を検討するために、円柱周りの風速分布の測定や並列2円柱間の流れの可視化実験を行った。

2. 実験概要

(1) 並列2円柱の基本条件: 並列円柱モデルの配置状況を図-1に示す。並列円柱の直径を $D=42\text{mm}$ とし、2円柱の中心間距離が $L=3D(126\text{mm})$ となる位置に配置してある。また、本研究で使用する円柱の表面粗度を写真-1に示す。ここで、ワイヤーは直径 $d=2\text{mm}$ 、 $d/D=0.048$ であり、ここでは等間隔に12本取り付ける。いずれの実験でも同様の表面粗度を使用する。

(2) 2自由度応答実験: 応答実験で測定するのは、下流側円柱の気流直交方向(鉛直)の変位 Y 、気流方向(水平)の変位 X 、吹流し距離 l (静的な空気力を受けることで無風時の下流側円柱の位置から有風時に移動した距離)を測定する。下流側円柱は、上下左右8本のばねで支持した。振動数 f を鉛直、水平方向共に 2.2Hz とし、オイルダンパーを使って対数減衰率 δ を 0.007 (スクルートン数: $Sc = 2m\delta/\rho D^2 = 16.4$) の条件を保ち下流側円柱の応答実験を行う。

(3) 円柱後流の測定: I型熱線プローブによって、基準風速が $U_0=1, 2, 3, 4, 5, 6, 9\text{m/s}$ の時の単独静止円柱後流の風速測定を行う。測定は円柱の中心点からの水平方向に $x=1D\sim 5D$ の鉛直断面において、 $y=3D\sim 3D$ までの範囲で行う。なお、評価時間を 20s として平均風速 $\bar{U}$ と乱れ強さ Iu を求める。

(4) 並列2円柱間の流れの可視化実験: オイルミスト法を用いて煙を発生させ、サンプリングレートを 500fps とした高速度カメラで、下流側円柱が振動中と静止した状態の並列2円柱間の流れを撮影して可視化実験を行う。

3. 実験結果及び考察

(1) 下流側円柱の応答: 円柱表面が滑面の場合の下流側円柱の応答を図-2に、吹流し距離を図-3に示す。並列円柱の下流側円柱は2段階の安定なリミットサイクル(StableLC)と不安定なリミットサイクル(UnstableLC)が伴うハードフラッター型の応答を示した。ここで、紙面の都合上、リミットサイクルのことをLCと表記する。1段階目のLCは倍振幅で1D程度の振幅で発生し、風速の増加に対して振幅はほぼ一定を保ち、吹流し距離もほとんど変化しなかった。一方、2段階目のLCは風速が増加するにつれて振幅が大きくなり、吹流し距離も急激に増加する。

次に、円柱表面にメッシュA、Bを取り付けた場合と滑面の状態との応答の比較を図-4に示す。メッシュを取り付けた場合、滑面の状態と比較すると、応答のピークが低風速側に生じ、高風速域での無次元倍振幅は小さくなる傾向を示した。

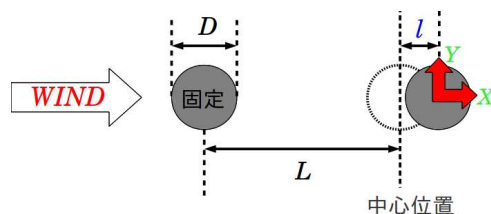
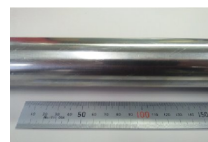


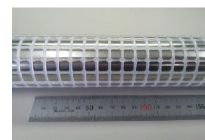
図-1 模型配置



(a) 滑面



(b) メッシュA



(c) メッシュB



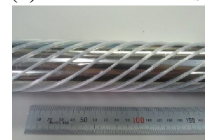
(d) ワイヤー 0度



(e) ワイヤー 10度



(f) ワイヤー 20度



(g) ワイヤー 30度

写真-1 実験で用いた粗度

ここで、図-5に円柱表面にワイヤーを取り付けた場合の応答を示す。ワイヤーの取り付け角度を 20° 、 30° で円柱表面に取り付けた場合は、1, 2段階目のLCが消失し、ほとんど振動しなかった。取り付け角度を 0° 、 10° で円柱表面に取り付けた場合は、1段階目のLCは発生したが、2段階目のLCは消失する応答を示した。この理由として、ワイヤーの取り付け角度を大きくする程、断面の二次元性を崩す効果が大きくなり、下流側円柱が受ける励振力が小さくなったことが原因と考えられる。

(2) 滑面単独円柱後流の流れ場: 応答実験で下流側円柱を設置した $x/D=3$ における上流側円柱設置位置に設置した単独円柱後流の風速分布と乱れの強さの測定結果を図-6、図-7に示す。まず、図-6の結果から $y/D=0$ 付近において風速比がかなり小さくなっていることが分かる。また、風速比が1以下の範囲となる幅は、 $2D \sim 3D$ 程度となっている。ここで図-2を見ると、倍振幅 $2Y/D=2 \sim 3$ という2段階目のLCの倍振幅とほぼ一致することが分かった。一方、図-7の結果から $y/D=0$ 付近において乱れ強さがかなり大きくなっていることが分かる。また、乱れ強さのピークが $y/D=-0.5 \sim 0.5$ であり、この間隔が $1D \sim 1.5D$ 程度となっている。ここで図-2を見ると、倍振幅 $2Y/D=1 \sim 1.5$ という1段階目のLCの振幅とほぼ一致していることが分かった。

次に、並列2円柱間の流れの可視化実験の結果を図-8、図-9に示す。ここで、下流側円柱の振動波形はほぼ正弦曲線を描いており、いずれも振幅鉛直変位が最大(上死点)の瞬間である。

図-8、9を比較すると、1段階目のLCが発生している場合はカルマン渦は発生せず、2段階目のLCが発生している場合は2円柱間に流れの巻き込みが発生しており、カルマン渦が発生していることが分かる。ここで、図-8と図-2、3とを比較すると、1段階目のLCが発生している場合の振動メカニズムとしては、ギャップフローが発生し、そのため自励振動が発生している。しかし、風速の増加に対して振幅はほぼ一定を保っていることから、上流側円柱の死水域内での振動であるために上流側円柱から剥離した流れの主流によって形成される空気の壁により振動が拘束されたと考えられ、図-8からその傾向が確認できた。

一方、図-9と図-2、3とを比較すると、2段階目のLCが発生している場合に大振幅が発生する理由としては、風速が大きくなったことで振幅が発達し2円柱間に流れ込む流れが多くなり下流側円柱が受ける励振力がさらに増加したこと、カルマン渦発生により上流側円柱の後流幅が広がった為に振幅が急激に増加したことが考えられる。

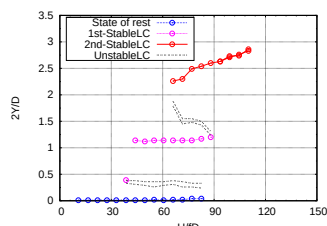


図-2 下流側円柱の鉛直倍振幅(滑面)

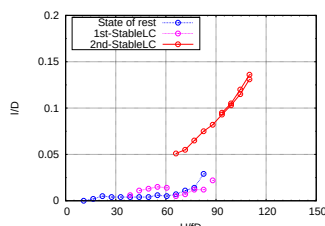


図-3 下流側円柱の吹出し距離(滑面)

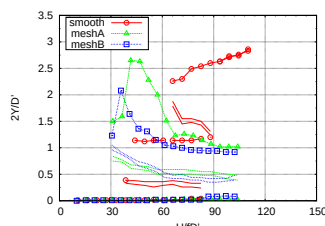


図-4 下流側円柱の鉛直倍振幅(メッシュ)

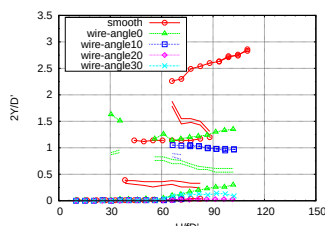


図-5 下流側円柱の鉛直倍振幅(ワイヤー)

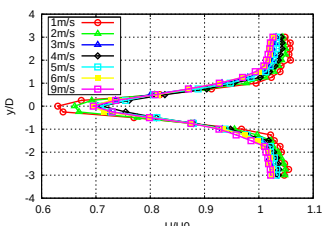


図-6 円柱後流の風速分布(滑面, $x/D=3$)

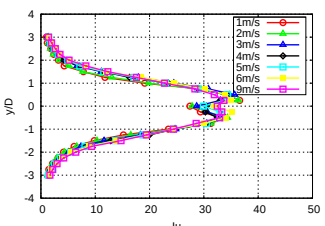


図-7 円柱後流の乱れ強さ(滑面, $x/D=3$)

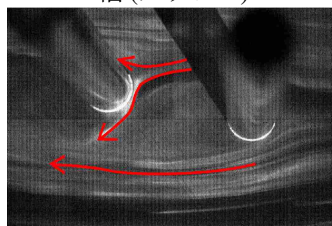


図-8 並列2円柱間の流れ(1段階目のLC発生時)

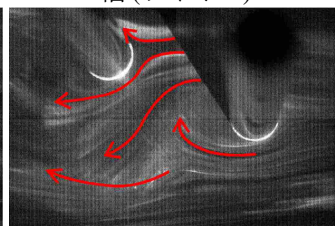


図-9 並列2円柱間の流れ(2段階目のLC発生時)

4. おわりに

以上の結果が得られたが、リミットサイクルの発生要因などは今回の検討だけでは明確にできなかった。今後はより詳細な流れの可視化実験、並列2円柱間の流れと励振力の関係を検討していく事で、大振幅振動の発生原因を理解し、ウェイクエクサイテーションの制振対策を考える必要がある。

5. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(C) 2256048000の助成を受けたものであり、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 宇都宮英彦“接近する並列円柱系の空気力学的挙動”，土木学会論文集，pp.1-8，1983.
- 2) 八木知己，岡本健吾，榊一平，頃安弘，梁子豊，成田周平，白土博通“表面形状を考慮した斜張橋ケーブルの抗力低減と空力安定化に関する研究”，第21回風工学シンポジウム論文集，pp.263-268，2010.