# 並列円柱まわりの流れの空力特性に関する数値流体解析

○ 中央大学大学院 学生員 佐藤 亮 中央大学 正会員 平野

中央大学 正会員 佐藤 尚次

廣和

#### 1. はじめに

並列構造物間における空力振動に関し、互いの間の流れの干渉 により、下流側構造物が複雑な振動現象を起こすことが知られて いる。その一例として、上流側にある構造物の後流などの影響に より、下流側の構造物がウェークギャロッピング現象と呼ばれる 振動現象を起こすことがある。この特性として文献かなどから、 上流側構造物からの後流が、下流側円柱を包み込むようにして流 れる outer accelerated flow、また、上流側円柱からの後流が、下 流側円柱の内側にも流れ込む gap flow がある。そしてこの流れ の状態の遷移を、流れの switching と呼んでいる。また、この流 れの switching の発現が、揚力の急激な変動に影響し、振動現象 を起こすとされている。

本研究は、並列構造物として、斜長橋における並列ケーブルを 取り上げ、この並列ケーブルまわりの流れで発生するウェークギ ャロッピング現象などの振動現象に着目し、有限要素法に基づく 数値流体解析を用いて、これらの振動現象の空力特性を把握する ことを目的とする。また、既存の風洞実験結果<sup>1)</sup>との比較により、 本解析手法における現象の再現性の妥当性に関して検討を行う。

## 2. 解析諸元

本研究では、並列ケーブルを2次元の近接する並列円柱構造物 としてモデル化する。図-1に示すように円柱間隔S、迎角 $\alpha$ をパ ラメータとして、円柱間隔 3D において、迎角 $\alpha$ を-10°~10° まで1°毎に変化させて、並列円柱が静止した状態での2次元静 的解析を行う。

#### 2.1 支配方程式

支配方程式は、次に示す非王縮性Navier-Stokes 方程式を用いる。

 $\rho(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(p, \mathbf{u}) = 0 \quad \text{in } \Omega$  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \qquad \text{in } \Omega$ 

ここで、 $\rho$ は密度、 $\mathbf{u}$ は流速、 $\mathbf{t}$ は時間、pは圧力、 $\Omega$ は解析領域を示す。

# 2.2 有限要素法による離散化

離散化手法として、丸岡ら<sup>2</sup>が提案している IBTD/FS 有限要素法を用いる。本解析手法では、運動方程式はIBTD 法、連続式

はFS法により離散化され、流速と圧力は分離して求まる。代数 方程式の解決にはSCG法を用いる。

#### 2.3 乱流モデル

乱流モデルを適用すると、非王縮性Navier-Stokes 方程式は時間および空間フィルタ操作を施された変数で表され、応力テンソルの(p,u)は次式で表される。

 $\sigma(p,\mathbf{u}) = -p'\mathbf{I} + 2(\mu + \rho v_{\tau})\varepsilon(\mathbf{u}), p' = p + \frac{2}{3} \cdot \rho k_{\tau}$ ここで $v_t$  は渦動粘性係数であり、これは乱流モデルにより求ま る。本研究においては、この $v_t$ を丸岡ら<sup>3</sup>が用いている RANS のSA モデルにより算出する。また、なは乱流エネルギーであり、 圧力項に換算圧力 p'として なを含めて扱うことができるため陽 には表れない。

# 2.4 解析領域及び境界条件

解析領域は、円柱直径をDとした場合、円柱前方と側方を6.5D、 円柱後方を20.0Dとしている。また、境界条件は流入境界で一様 流速1.0、側面でslip、円柱表面でnon-slipとしている。

#### 2.5 解析条件

解析条件を表-1 に示す。メッシュ分割は、断面近傍で節点を集 中的に配置している。総節点数は74285、総要素数は146480 であ る。Re 数は風洞実験 いこおける条件と同一の3.0×104 とする。

#### 3. 解析結果及び考察

解析結果は、下流側円柱の平均抗力係数、平均揚力係数を風洞 実験値と比較したものを図-2 に示す。平均抗力係数は、2 次元解 析特有の円柱軸方向の 3 次元的な流れを表現できないことによ り、解析結果が実験値を過大評価しているが、定性的に大きな差 はみられない。平均揚力係数は、風洞実験同様、迎角の増加に伴 い、その値も上昇し、ある迎角においてピークを示し、それ以降 減少している。風洞実験は、迎角 7°でピークを示しているのに対 し、解析結果は迎角 5°でピークを示している。ただし、風洞実験 は、この迎角 7°から、迎角 8°の間において、流れの switching が起こるとされている。そこで、揚力係数がピークを示す迎角 5° 及びその前後の迎角 4°,6°に焦点を絞る。図-3 に揚力変動1 周期 における平均流線図を示す。ここで、迎角 4°は、上流側円柱から

キーワード: 並列円柱、ウェークギャロッピング、定常空気力係数、数値流体解析 連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel. 03-3817-1816 fax. 03-3817-1803 の後流が、下流則円柱を包み込むようにして流れている。これに 対して迎角5°は、上流則円柱からの後流が、円柱間の内側に流れ 込んでいる。さらに、迎角6°は、円柱間への流れ込みがより顕著 にあらわれており、明らかなgap flow をあらわしている。よっ て、本解析結果から、揚力係数のピークから負勾配を示す間に、 流れの switching が生じたことがわかる。これが、下流則円柱に 作用する空気力に変化を生じさせたと考えられる。

図-4 に同迎角における揚力の最大・最小時の瞬間圧力コンター 図を示す。迎角4°は、両者の下流則円柱上下面での圧力分布の形 状の明確な差はみられない。しかし迎角5°になると、gap flow の 発現により、下流側円柱まわりの流れに変化が生じ、その結果下 流側円柱表面における圧力分布の形状に、揚力最大、最小時にお いて明確な差があらわれている。この流れの switching により生 じた圧力差が、揚力の急激な変化の要因となり、下流則円柱の振 動現象を引き起こすと考えられる。迎角6°においても、迎角5° と同様な傾向を示している。

図-5 に下流側円柱表面における平均圧力係数分布図を示す。円 柱表面 330°位置において、迎角毎にその形状に違いがみられる。 迎角 6°は、上流側円柱からの後流渦の付着が見られ、ここから流 れが円柱上下面へと伝わると考えられる。なお、迎角 5°において、 上流側円柱からの後流渦の付着の様子が迎角 6°のように明確に あらわれなかったのは、流れの switching の発現における境界付 近であることによると考えられる。

## 4. おわりに

本報では、ウェークギャロッピング現象に着目し、この空力特 性を把握することを目的とし、有限要素法に基づく2次元静的数 値流体解析行った。風洞実験同様、定常空気力係数において、平 均揚力係数が正の勾配から負の勾配を示す間に、流れの switching が生じていることが確認でき、流れのメカニズムを把 握することができた。しかし、空気力の定量的な評価、また、揚 力がピークを示す迎角が一致しなかったことより、実現象の再現 は2次元解析では難しいと判断する。今後、円柱中心間距離のパ ラメータを変化させて同様な検討を行うとともに、流れの switching の発現がどのように振動現象を引き起こす要因となっ ているかを動的解析を用いて検討を行う予定である。

**謝辞**:本研究の実施にあたり、八戸高等専門学校講師の 丸岡晃氏に協力を得た。ここに感謝の意を表す。 <参考文献>

- 建設省土木研究所:斜張橋並列ケーブル耐風制振に関する共同研究 報告書(その1),(その2),(その3), 1993, 1994, 1995
- 丸岡他: 広範囲な Reynolds 数域での円柱まわりの2次元及び3次 元数値流体解析,土木学会論文集 No. 591, 1998.4



図-5 ア流側円柱表面における平均圧力係数分布図 及び円柱表面 330°位置における拡大図

3) 丸岡他: 数値流体解析による断面辺長比4の矩形断面の空力応答 特性に関する検討,応用力学論文集 Vol.8, 2005