# 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 学生員 佐藤 亮 中央大学 正会員 平野 廣和

中央大学 正会員 佐藤 尚次

## 1. はじめに

橋梁技術及び材料発度の向上に伴い、橋梁はますます長大化 する傾向にあり、形式としても様々なものが採用されるように なってきた。代表的なものとして、近年、国内外で盛んに架設 されるに至っている斜張橋があげられる。新たに開通した多く の斜張橋の中で、特に大型な斜張橋や、PC製斜張橋において、 主要構造物であるケーブルに、並列ケーブルが多く採用されて いる。並列ケーブルは、下流側ケーブルが複雑な振動現象を起 こすことがある。これは、ウェークギャロッピング現象と呼ば れ、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 造物が複雑な振動現象を起こすものである。これらの振動現象 は、大きな振幅の振動であることから、ケーブルとタワーや桁 との定着部での疲労破壊を招く要因ともなりうる。このため、 実橋における観測や、現象を把握するための風洞実験が行われ ている。

そこで、本研究では、並列円柱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>11</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. 解析手法

数値流体解析には丸岡ら<sup>2)</sup>が提案しているIBTD/FS有限要 素法を用いている。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 リ、それぞれ陰的に解くことになるが、代数方程式の行列が対 称となるため、対称行列用の代数方程式で効率よく解析するこ とができる。本研究では、代数方程式の解法にScaled Conjugate Gradient(SCG)法を用いる。物体上に作用する静的 空気力は、離散化された運動方程式の境界積分項から、物体表 面上の各節点の表面力が算出され、これらを加算することによ って求める。

#### 3. 並列円柱まわりの流れの解析

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 ル化し、円柱間隔、迎角をパラメータとして2次元解析を行う。

()支配方程式

支配方程式は、以下に示す非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を 用いる。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p - \nu \nabla^2 \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad \text{in}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \qquad \qquad \text{in}$$

ここで、u は流速、f は外力、t は時間、p は圧力を示す。 は 1/Re を示し、Re= UD/μは無次元化パラメータの Reynolds(以下 Re とする)数である。U は代表流速、D は代表 長さ、 は一定の密度、μ は粘性係数である。

乱流には丸岡ら<sup>3</sup>が用いているRANS(Reynolds Averaged Navier Stokes equation)のSA(Spalart-Allmaras)モデルを採用する。

## ()解析領域と境界条件

解析領域を図-1 に示す。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 no-slip としている。

## ()解析条件

解析は図-2 に示す様に、円柱間隔S、迎角 をパラメータとし、円柱間隔3Dにおいて、迎角 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次元静的解析行う。

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。なお、Re数は風 洞実験における条件と同一の 3.0 ×10<sup>4</sup>とする。

表-1 解析条件	
円柱中心間隔 S	3D
Reynolds数 Re	$3.0 \times 10^4$
総節点数	74285
総要素数	146480
周方向分割数	512
最小分割幅	0.0003D
時間増分 t	0.005D/U







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

## 4. 結果と考察

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<sup>1)</sup>と比較したものを図-3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、全体的 に大きな差はみられない。平均揚力係数については、風洞実験 結果より、迎角 =7°以降、平均揚力係数が急激に減少して いるのがわかる。これは、流れのswitchingによりouter accelerated flowからgap flowに変化し、負に働く揚力が増し たことによるものである。一方、解析値では、このような平均 揚力係数が減少し始める傾向が迎角 =5°以降で見られる。 そこで、解析結果において、平均揚力係数がピークを示す迎角

=5°、その前後の迎角 =4°,6°について、揚力変動1周 期における揚力の最大(CLMAX)、最小(CLMIN)を表す時の瞬 間圧力コンター図を図-4 に示す。また、迎角 =4°,5°にお けるこれらを模式化したフローパターンの図を図-5 に示す。 それぞれの図より、迎角 =4°について、 $C_LMAX$ 時と $C_LMIN$ 時を比較すると、絶対値の大小の違いはあるものの、高圧、低 圧を示す下流側円柱表面の圧力分布形状が、ほぼ上下対称に表 れている。また、下流側円柱から放出される剥離渦も、ほぼ対 象であるといえる。一方、迎角 =5°についてもCLMAX時と C<sub>L</sub>MIN時を比較すると、下流側円柱表面での圧力分布形状に、 迎角 =4°でみられた対称性は表れない。下流側円柱から放 出される剥離渦についても、渦自体の発生はみられるが、対称 性はみられない。迎角 =6°については、迎角 =5°におけ るものとほぼ同じ挙動を示している。また、迎角 =5°,6°に おいて、下流則円柱におけるCLMAX時とCLMIN時での、圧力 分布形状の大きな差が、図-3に示す平均揚力係数の変化の要因 となっている。

これらの結果から平均揚力係数について、そのピークが迎角 =4°と5°の間で流れのswitchingが生じていると考えられ る。迎角 =4°における outer accelerated flow から、迎角 =5°では gap flow に流れが変化している。これが、図-3で生 じる平均揚力係数の急激な変化の要因と考えられる。

#### 5. おわりに

本報では、斜張橋の並列ケーブルで発生するウェークギャ 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数値流体解析により、2次元静 的解析を行った。文献<sup>1)</sup>に報告されている通り、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、流れがouter accelerated flowからgap flowに変化する、







図-5 フローパターンの模式図

流れのswitchingが生じていることが確認できた。これより、 流れのパターンは把握することができた。しかし、流れの switchingが発現する迎角については、解析結果において、 風洞実験が示す迎角よりも小さい迎角で生じた。これより、 流れのメカニズムを把握することは可能であるが、定量的な 評価は2次元解析では難しいと考える。今後、パラメータを 変化させて同様な検討を行うこと、また、流れのswitching の発現がどのようにウェークギャロッピング現象などを引 き起こす要因となっているかは、3次元解析ならびに動的解 析を用いた検討が必要である。

<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 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