

I - B7

近接する並列円柱の空力特性に関する3次元数値流体解析

中央大学 学員 丸岡 晃 中央大学 正員 平野 廣和
三井造船 正員 林 健一 中央大学 正員 川原 睦人

1. はじめに

著者らは、斜張橋の並列ケーブルで生じるウェーク・ギャロッピング現象に着目し、数値流体解析の面から、この空力応答特性を系統的に把握することを目的とし、これまでに有限要素法に基づく数値流体解析を行ってきた[1]~[3]。ここでは、並列ケーブルを2次元平面の並列円柱にモデル化している。文献[1]では、静止した状態での並列円柱まわりの流れの特性に着目し、わずかな迎角の変化により円柱間の流れの特性が変化し、これにより下流側円柱の空気が大きく変化すること数値流体解析により掴んでいる。また、文献[2],[3]では、ALE手法を適用することによって、下流側円柱を強制加振させた状態での解析を行ない、下流側円柱の変位と空気力との位相差、また、振幅依存性についての空力応答特性について、有用な知見が得られている。しかしながら、文献[1]~[3]で行なわれている解析は、ウェーク・ギャロッピング現象の解明を研究の第一歩としているために、すべて2次元解析であり、 Re 数も風洞実験より低い値を用いている。これによりメカニズム的な解明は、なされてきたが、定量的に一致した結果は充分に得られていない。この主要原因としては、流れの3次元性が考えられる。特に、円柱などの剥離点の定まりにくい形状まわりの流れは、3次元的な流れと Re 数依存性の影響が顕著であることが知られている[4],[5]。

以上のような背景から、本研究では、近接した並列円柱まわりの流れを風洞実験と同オーダーの Re 数で3次元数値流体解析を行なうことにより、空気力や流れ場の3次元的な流れの影響を把握することを目的としている。数値流体解析と既往の風洞実験との比較、検討を行ない、3次元解析により、メカニズム的な解明だけでなく、定量的な風洞実験との対応を掴むことができたのでこれを報告する。

2. 解析手法

流れ場は、非圧縮性流れを仮定し、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式の3次元解析を行なうものとする。時間方向の離散化には、運動方程式に Crank-Nicolson 法を適用し、連続式を完全陰的に取り扱う。また、空間方向の離散化には、改良型 BTD 法と FS 法を組み合わせた文献[6]による同次補間を用いた陰的有限要素法を適用する。この手法は、対称行列の陰解法であることから、計算効率と安定性に関して優れている。よって、耐風工学における数値解析のような大規模3次元解析に適している。

3. 解析条件

近接する並列円柱の空力特性の解析は、以下の条件で行なった。図-1に示すように、解析モデルは、直径を D とする円柱が2次元的に並列に並んでいる状態と仮定した。

並列ケーブル、並列円柱、ウェーク・ギャロッピング、3次元数値流体解析

中央大学大学院理工学研究科（〒112 東京都文京区春日 1-13-27, TEL:03-3817-1814, FAX:03-3817-1803）

Sh, Sv は中心間の水平及び垂直間隔を示し、 α は迎角である。ここでの解析は、 Sh をすべて $2D$ と一定として、 Sv をパラメータとして変化させた解析を行なった。

2次元平面での解析領域は、 $42D \times 20D$ (閉塞率 5%) とし、流入境界から下流側円柱までが $12D$ 、下流側円柱から流出境界までが $30D$ とした。3次元解析では、2次元解析領域をスパン方向に $2D$ 広げた領域で解析を行なった。スパン方向の境界条件は、周期境界条件を採用した。スパン方向の要素分割は、 $0.0625D$ の均等幅で、32層に分割している。2次元平面における有限要素分割は、四角形双一次要素を用い総節点数 24,319、総要素数 24,000 に分割した。円柱表面の分割は 160 分割である。また、境界層の分割は、最小要素幅を $0.001D$ とし、 $0.01D$ の境界領域を 6 分割している。解析の用いた無次元時間増分は、すべて 0.02 としている。

ここで行なった解析ケースを表-1に示す。 $Re = 10^3$ の2次元解析は、文献[1]と同様な条件であるが、解析手法、有限要素分割等が異なる。なお、3次元解析に用いた計算機は、IBM/RS/6000 SP (分散メモリー型並列計算機) であり、8 台のパラレル計算を行なった。

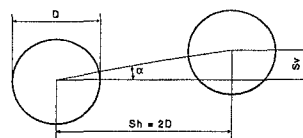


図-1 解析モデル

表-1 解析ケース

解析次元	Re 数	Sv/D
2次元	$10^3, 10^4$	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
3次元	10^4	0.1, 0.2, 0.3

4. 解析結果

図-2は、下流側円柱の抗力係数 C_d と揚力係数 C_l の平均値の Sv/D による変化と風洞実験[7]との比較を示す。 Sv/D が 0.25 前後での揚力係数の急激な変化は、 Sv/D が小さい時に生ずる outer accelerated flow と Sv/D が大きい時に生ずる gap flow (文献[8]) の流れの変化に関連付けられる。この現象は、2次元数値流体解析でも再現できると文献[1]により報告されている。

Re 数を風洞実験より低い $Re = 10^3$ と設定した場合、2次元解析は、抗力係数が大きく、揚力係数も風洞試験ほど鋭敏な変化は見られないが、抗力・揚力係数とも定性的な傾向は、良い対応を示している。この結果は、文献[1]とほぼ同様な傾向を示した。

風洞実験とほぼ同オーダーの Re 数である $Re = 10^4$ の解析では、2次元解析は、風洞実験の値と大きく異なり、特に揚力係数の変化がほとんど見られない。これは、上流側円柱の剥離渦が強い渦度をもったまま交互に下流側円柱に達し、gap flow のような円柱間を通過する流れが卓越しにくくなっているためと考えられる。3次元解析は、定量的に見て、風洞実験に近い値を示した。特に抗力係数の値が、風洞実験とほぼ同等の値を示している。但し、流れの遷移点である outer accelerated flow と gap flow の間での揚力係数の変動が、風洞試験ほど急激な格差とならなかった。

図-3 は、平均流線と煙風洞による可視化試験との比較を示す。 $Re = 10^3$ のときの2次元解析と $Re = 10^4$ の3次元解析では、円柱間を通過する強い流れが見られる。これは、gap flow の流れの特徴を示す。特に、3次元解析は可視化試験と非常に良い対応を示している。 $Re = 10^4$ の2次元解析では、gap flow と特徴付けられる流れが見られない。3次元解析と可視化試験では、円柱間と下流側円柱後方に広範囲の淀み域が見られるが、2次元解析では、淀み域を過小評価している。

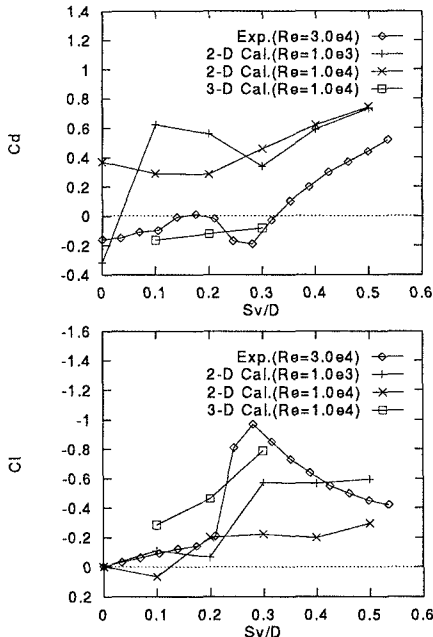


図-2 下流側円柱の平均空気力係数 (C_d , C_l)

5. おわりに

本研究では、近接した並列円柱の空力特性に関する3次元の流れの影響に主眼を置き、有限要素法に基づく非圧縮性流れの解析を行なった。数値解析と風洞実験により得られた結果の比較、検討を行なった。2次元解析では、 Re 数を風洞実験より低く設定をした場合のみ、定性的に見て、風洞実験と対応した結果が得られた。風洞実験とほぼ同程度の Re 数の解析では、3次元解析は、定量的・定性的に見て、風洞実験と良く対応する結果が得られた。流れのメカニズムの解明だけでなく、定量的な値が必要な問題に、3次元解析は有効な手段であると考えられる。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、中央大学理工学部土木工学科の吉田 賢氏に御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

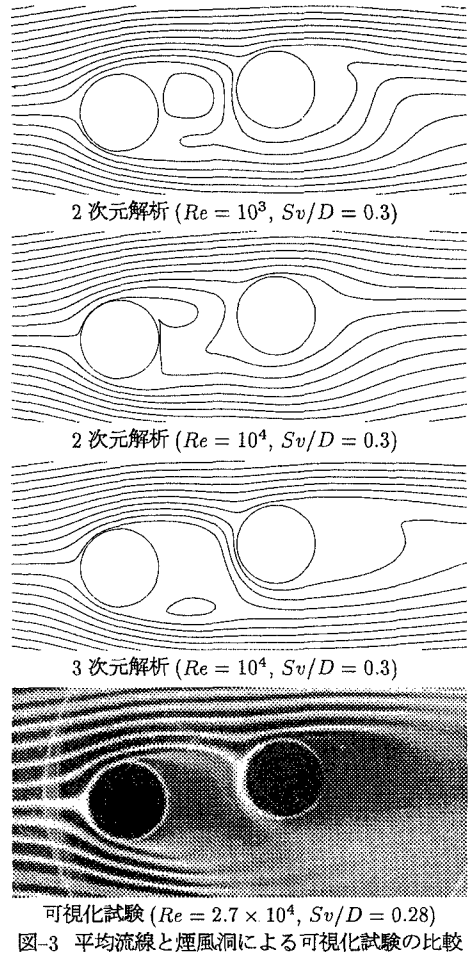


図-3 平均流線と煙風洞による可視化試験の比較

参考文献

- [1] 平野・丸岡・中久保, “近接する並列円柱の空力応答特性に関する数値流体解析”, 日本風工学会誌 第64号, pp.19-27, 1995
- [2] 平野・丸岡・林・井上・池ノ内, “近接する並列円柱の空力応答特性に関する数値流体解析”, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.785-792, 1996
- [3] 平野・丸岡・林, “近接する並列円柱の強制加振時の振幅依存性に関する数値流体解析”, 第51回年土木学会次学術講演会講演概要集 第1部門, 1996
- [4] Tamura, T., Ohta, I. and Kuwahara, K., “On the reliability of two-dimensional simulation for unsteady flows around a cylinder-type structure”, J. of Wind Engng. and Indust. Aerodyn., Vol. 35, 1990
- [5] 太田・丸岡・平野・川原, “亜臨界域における円柱まわりの3次元流れの数値流体解析”, 第14回風工学シンポジウム講演概要集, pp.199-204, 1996
- [6] 丸岡・太田・平野・川原, “同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析”, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.383-394, 1997
- [7] 林・赤瀬・井上, “並列ケーブル振動時における振幅依存性について”, 第13回風工学シンポジウム講演概要集, pp.245-250, 1994
- [8] Shiraishi, N., Matsumoto, M. and Shirato, H., “On Aerodynamic Instabilities of Tandem Structures”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 23, pp.437-447, 1986