

近接する並列円柱の静止時の空力応答特性に関する数値流体解析

○中央大学 学員 中久保 慶介
中央大学 正員 平野 廣和

中央大学 学員 丸岡 晃
中央大学 正員 川原 睦人

1 はじめに

斜張橋の並列ケーブルにおいて、ある特定の風向から風が吹くとき、ケーブルが顕著な振動現象を起こすことが報告されている。この現象は、既知の通り、複数列構造物間の流れの干渉によって起こる現象で、上流側にある構造物の後流渦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ことであり、ウェーク・ギャロップ現象と呼ばれている。本報では、この現象に着目し、有限要素法に基づく数値流体解析手法を用いて、この空力応答特性を把握することを目的としている。具体的には、斜張橋の並列ケーブルを2次元の近接する並列円柱複数列構造物としてモデル化し、迎角をパラメータとして、本論では静止した状態での並列円柱まわりの流れの解析を行うものである。さらに、既存の風洞試験結果との比較ならびに煙風洞試験による流れの可視化結果との比較を行い、本解析手法の適用性と解析上の問題点を明らかにすることとする。その結果、並列円柱構造物の空力応答特性に関して、数値流体解析の面から有用な知見が得られたので、ここにその結果を報告する。

2 流れの数値解析

流れの数値解析手法は、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を扱う、音速法^{[1],[2]}に基づく3段階陽の有限要素法である。解析モデルは、図-1に示すように、直径を D とする円柱が二次元的に並列に並んでいる状態とした。 S_H, S_V は円柱の中心間の水平間隔および垂直間隔を示す。解析は、近接する並列円柱間の中心の間水平距離を $S_H = 2D$ を一定として、迎角 α をパラメータとして変化させて行った。ここでの迎角とは、下流側円柱が上流側円柱に対して反時計方向に回転する方向を正の値としている。迎角 α は $0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$ の7ケースとし、2本の円柱は固定として、円柱の定常空気を求めた。

解析領域は、流れの方向に $38D \times 19D$ 、上流が円柱から流入境界までが $10D$ 、下流が円柱から流出境界までが $25D$ とした。境界条件は、流入境界を一樣流、流出境界をトラクション・フリーの条件とした。また、上下の壁面では鉛直方向の流速を0とし、円柱表面の流速成分を全て0とした。有限要素分割数

は総節点数 36,939、総要素数 72,600 である。円柱表面の最小メッシュ幅は、約 $0.005D$ である。また、解析のレイノルズ数は、円柱の直径を代表長さとして、 $Re=1,000$ として解析を行った。

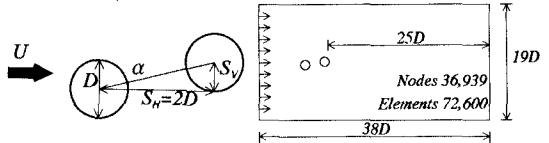


図-1 解析モデルと領域

3 解析結果及び考察

図-2は、下流側円柱の平均揚力係数の迎角による変化と、風洞実験結果^[3]との比較を示した図である。二本円柱間に gap flow が生じると、後方円柱の揚力係数が大きく変化することが各種の風洞実験から報告されている。本解析結果においても迎角が 7° 以下の場合には、平均揚力係数が0.0近傍から若干正の値を示すが、gap flow が生じる迎角 $7^\circ \sim 8^\circ$ の間で大きく変化をし、-0.4程度の負の値を示している。

風洞実験^[3]によると、迎角 $7^\circ \sim 8^\circ$ の間で解析と同様な傾向を示している。但し、風洞実験の方が、解析よりも3倍程度大きな変化を示している。さらに、解析では、迎角 8° 以降はほぼ一定値を示すのに対して、風洞実験では正の勾配を示している。迎角 12° 以上の大迎角になると、解析結果と実験結果とはほぼ同様な値に収収している。

図-3は、迎角 $6^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ の解析で得られた結果を平均化した平均流脈線図と、同一迎角で煙風洞において連続光で撮影した流れの可視化実験との比較である。平均流脈線図と流れの可視化結果の両者ともに、迎角 8° 付近を境にして、outer accelerated flow から gap flow への発生が掴めている。迎角 8° 付近を境にして、流れの状況が大きく変化している。この流れの変化が、平均揚力係数の変化を生じさせる一つの大きな要因となっていると考えられる。

図-4は、迎角 $\alpha = 7^\circ, 8^\circ$ の上流側と下流側それぞれの円柱の表面の圧力分布図である。上流側円柱の迎角 8° の圧力分布は、流れの方向に対してほぼ対象となっており、負の揚力が生じている傾向が掴める。抗力係数は、迎角 7° の方が小さい傾向を示している。

これも、outer accelerated flow と gap flow の流れのパターンの影響かと考えられる。下流側円柱の迎角 8° において、前方 45° 付近の圧力が正の値を示す。これは上流側で剥離した流れが再付着し、下向きの力を生じていると考えられる。さらに、gap flow が発生したため、円柱の上面と下面で大きな圧力差が生じていると考えられる。

図-2 に迎角 7° 以下と迎角 8° 以上のフロー・パターンを示す。揚力係数が最小の場合は迎角 7° 以下と 8° 以上の流れで圧力分布にあまり変わるところはないが、揚力係数が最大の場合にはその間で圧力分布は大きく異なる。迎角 7° 以下の流れでは、揚力係数が最小の場合の圧力分布を上下逆にしたようなものになるが、迎角 8° 以上の流れでは揚力係数が最小の場合にあった高圧部分が小さくなりながらも残っており、そのときの上流側円柱からの剥離渦（低圧部分）の付着は無い。この揚力係数が最大になるときの迎角 7° 以下と迎角 8° 以上の流れの違いによって、平均揚力係数が大きく変化するものと思われる。

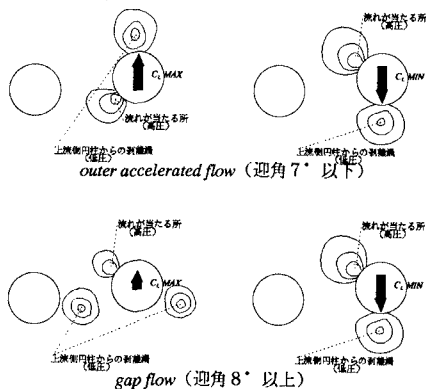


図-2 フロー・パターン

4 おわりに

静止状態における解析で得られた主要な結果を以下に示す。

1. 迎角 7° と 8° の間で後流側円柱まわりの流れは、outer accelerated flow から gap flow へと変化する状態が窺えた。この現象は、煙風洞による流れの可視化実験からも確かめることができた。
2. gap flow の発生により、後流側円柱の上面と下面で大きな圧力差を生じ、平均揚力係数を大きく変化させたと考えられる。
3. outer accelerated flow と gap flow での作用空気力の特性を把握することができた。

最後に、煙風洞での流れの可視化でご協力を頂いた三井造船（株）昭島研究所 森島弘吉氏に感謝の意を表す。

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, 風工学会誌 (投稿中)
- [2] 中久保, 丸岡, 平野: 数値解析による並列円柱ケーブルの伴うウェーク・ギャロッピング現象の解明, 第22回関東支部技術研究発表会概要集, 1995
- [3] 林, 赤瀬, 井上: 並列ケーブル振動時における振幅依存特性について, 第13回風工学シンポジウム, 1994 空力応答特性の数値解析, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集 共通セッション, 1994

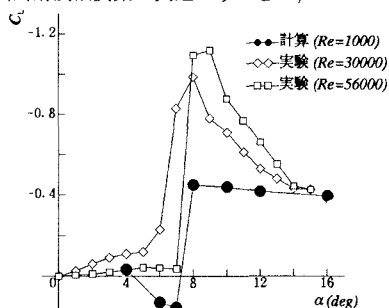
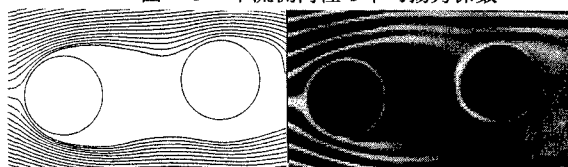
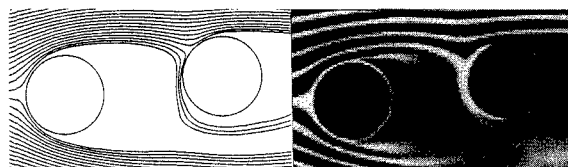


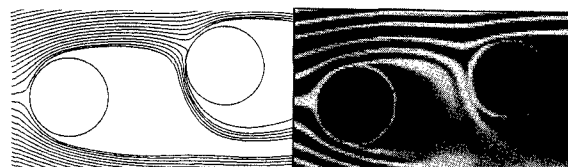
図-3 下流側円柱の平均揚力係数



$\alpha = 6^\circ$



$\alpha = 8^\circ$



$\alpha = 12^\circ$

図-4 流脈線

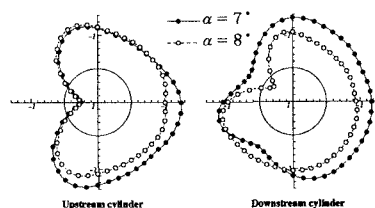


図-5 円柱表面上の圧力分布