

数値流体解析によるウェイクギャロッピングに関する研究

東京大学 正会員 ◦菊地 由佳
東京大学 学生会員 瀧澤 知樹
東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

徳島県にある東環状大橋に用いられた景観配慮型水平並列ケーブルでは、ウェイクギャロッピングの制振対策として、ヘリカルワイヤが採用された。しかし、ヘリカルワイヤは設置場所の制約を受けない一方、制振メカニズムが明らかではないため、最適な制振効果を有するスパン比と直径比の選定方法が不明である。ヘリカルワイヤの制振メカニズム効果の解明には、ケーブル各断面に作用する変動揚力を明らかにする必要があるが、スパン方向に3次元性を持つため、風洞実験による圧力測定は多くのセンサが必要となる。一方、数値流体解析は一度にケーブルの表面圧力を得ることができるが、3次元複雑な形状のモデル化および高精度の圧力予測が困難である。

そこで、本研究では領域分割法および非構造格子を用い、ヘリカルワイヤ付きケーブルおよび並列ケーブルの数値モデルを作成する。次に、3次元LESモデルを用いて、ヘリカルワイヤの制振メカニズムを明らかにするとともに、最適なスパン比と直径比を示す。最後に、ダイナミック格子を用いた動的解析を行うことにより、ヘリカルワイヤの制振効果を数値解析により評価する。

2. 数値解析モデル

2.1 ヘリカルワイヤ付きケーブルモデル

ヘリカルワイヤとケーブルの境界条件を正確に再現可能な格子作成手法として、ヘリカルワイヤ付きケーブルの2次元モデルを作成した後に、モデルを回転させながら3次元に拡張する手法を提案した。回転による歪みをなくすため、壁面付近のみスパン方向に細かい格子を採用した。さらに、領域分割法と非構造格子を用いることにより、複雑なヘリカルワイヤ近傍の格子数の削減および計算負荷の低減を可能にした。また、図1に示すように、ヘリカルワイヤ内部もグリッド分割することにより、ヘリカルワイヤがない円柱と付いた円柱を同一のメッシュで再現可能にした。

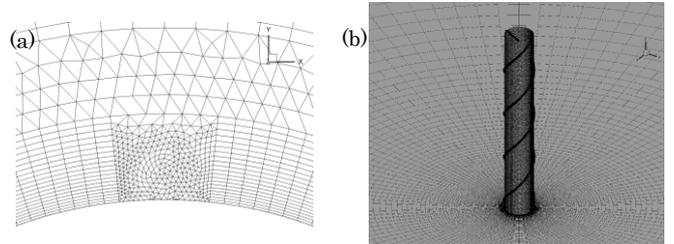


図1 数値解析モデルの(a)ヘリカルワイヤ部と(b)鳥瞰図

2.2 並列ケーブルモデル

前節で構築したヘリカルワイヤ付きケーブルモデルを用い、2次元バネで支持された並列ケーブルの振動モデルを作成した。本研究では、久保ら²⁾が用いた円柱間隔3.3Dの並列円柱を対象とし、迎角は風洞実験で大振幅振動を起こした15度を設定した。ダイナミック格子を用いることにより、構造と流体の連成解析を可能にした。次式であらわされる振動方程式を解くことで後流側円柱を移動させながら計算を行っている。

$$\begin{cases} m\ddot{y} + k\dot{y} + cy = F_I(t) \\ m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = F_d(t) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 m は質量、 c は粘性係数、 k はバネ定数、 F はモデルに生じる時間依存性のある力である。

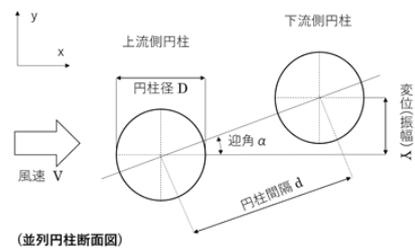


図2 並列円柱のパラメータ

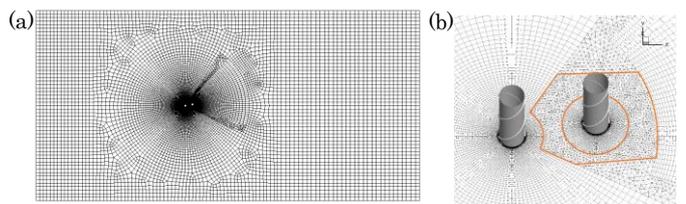


図3 数値解析モデルの(a)解析領域と(b)鳥瞰図

3. 数値解析結果

3.1 静的解析

構築したケーブルモデルを用いて予測したケーブル表面の圧力分布を図4に示す。6D以上の円柱のスパンととることで、渦のスパン方向の相関が再現でき、予測値は風洞実験値とよく一致した。

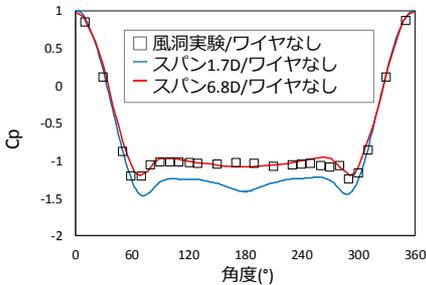
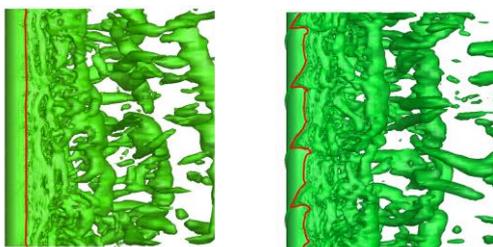


図4 圧力係数の予測値と実験値との比較

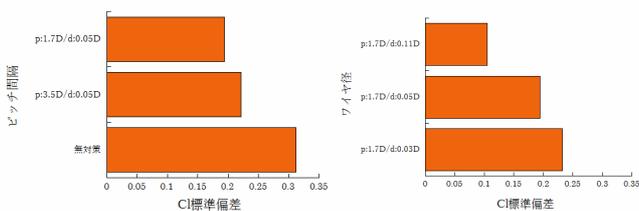
ヘリカルワイヤ無しの場合と有りの場合のケーブル周りの流れ場を図5に示す。ヘリカルワイヤにより、剥離位置が制御されていることが分かる。そこで、ヘリカルワイヤのスパン比と直径比を系統的に変化させた時の変動揚力を評価すると、図6に示すようにスパン比1.7と直径比0.11の時に最小となった。

ヘリカルワイヤが剥離点のコントロールにより変動揚力を減少させていることを定量的に示すために、円柱の各断面の変動揚力係数と代表断面の変動揚力係数との相関係数を求めた。図7に示すようにスパン比1.7、直径比0.11の時に、相関係数が減少しており、ヘリカルワイヤによる渦のスパン方向の剥離位置のずれが変動揚力の振幅の減少をもたらしていることを示した。



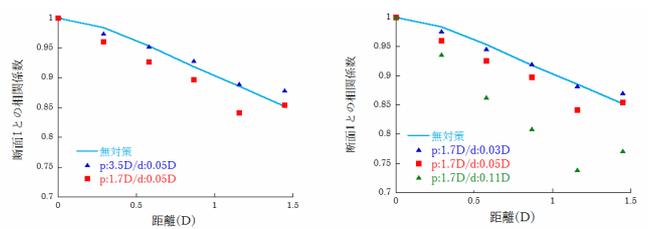
(a) ワイヤなし (b) ワイヤあり

図5 流れ場の可視化



(a) ピッチ間隔 (b) ワイヤ比

図6 揚力係数の標準偏差



(a) ワイヤスパン比 (b) ワイヤ直径比

図7 変動揚力のスパン方向の相関関係

3.2 動的解析

並列ケーブルモデルを用いて、3次元LESによる振動解析を行った。時間の制約から円柱のスパンを0.87Dとした。数値解析の結果は、ヘリカルワイヤ無しの場合に風速10m/s付近における大振幅振動を再現するとともに、ヘリカルワイヤ有りの場合にウェイクギャロッピングの抑制を再現した。ただし、スパン長さの不足、x方向とy方向の連成項の非考慮により予測値は実験値を過大評価している。

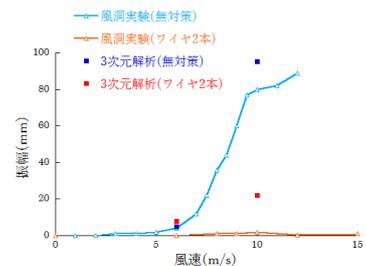


図8 後流側円柱の振幅の予測値と実験値との比較

4. まとめ

本研究は、領域分割法と非構造格子を用いることにより、ヘリカルワイヤ付きケーブルモデルを作成し、3次元数値流体解析により、風洞実験と同精度でケーブルの表面圧力分布を再現できることを示した。ヘリカルワイヤの最適なスパン比とワイヤ径を示すとともに、ヘリカルワイヤにより変動揚力およびそのスパン方向の相関係数が減少することを明らかにした。最後に、2次元バネ支持モデルとダイナミック格子を用いた並列ケーブルの振動解析を実施し、ヘリカルワイヤによるウェイクギャロッピングの制振効果を再現した。

参考文献 (1) 石原孟, 岡新一, 藤野陽三: 一様流中に置かれた正方形角柱の空気力特性の数値予測に関する研究, 土木学会論文集 Vol62A, No.1, pp.78-90, 2006.
 (2) 久保義人, 結城洋一, 石井博典, 畠中真一, 河藤千尋: 実物大供試体を用いた橋梁の並列ケーブルのウェイクギャロッピング特性. 構造学論文集 Vol.58, 2012.