

Abstract

Wake Galloping of Tandem Circular Cylinders and Unsteady Pressure

YAGI Satoru

The experimental study on the wake galloping of tandem circular cylinders is reported in this paper. The free vibration test was conducted, in which only the leeward cylinder is supported elastically. Both steady and unsteady pressure measurements were also carried out.

The free vibration test reveals that the response of the leeward cylinder is influenced significantly by the spacing of two cylinders. In the case of narrow spacing ($2D$), two or three stable responsive amplitude are observed at the same wind speed, where D is the diameter of cylinder. On the other hand, in the case of wide spacing ($3D$, $4D$), the response is typical soft type galloping. The amplitudes increase with the wind speed monotonously.

The steady lift force is obtained, integrating the measured pressure. When the leeward cylinder is displaced upward, the downward lift is generated. In the case of $4D$ spacing, the lift increases monotonously with the displacement. The distribution of surface pressure suggests that this lift force is caused by the pressure gradient in the wake region of the windward cylinder. In the case of small spacing ($2D$, $3D$), in addition to the lift force caused by the wake, the sharp peaks are observed in the lift-displacement curve. These peaks are considered to be generated by the flow switching from the outer flow to the gap flow.

From the unsteady pressure, the aerodynamic damping is calculated. Concerning with some responses, the change of the sign in aerodynamic damping agrees well with the amplitude obtained from the free vibration test. However, it is also found that there are other stable responses which occur without the change in the sign of the aerodynamic damping. In other words, these vibrations cannot be translated by the traditional self excited vibration theory.

Thus, the new formulation of aerodynamic lift is attempted. Since the formulation is nonlinear, the response is affected by the initial conditions. However, the numerical results show that the stable limit cycle occurs under some initial condition, even if the damping is positive. Therefore, it can be said that there is a possibility of self excited vibration without negative aerodynamic damping.

Keyword: wake galloping, tandem circular cylinders, unsteady pressure, steady pressure,

論文要旨

並列円柱のウェーク・ギャロッピングと非定常圧力 Wake Galloping of Tandem Circular Cylinders and Unsteady Pressure

社会システム工学コース

1055161 八木 悟

1 研究背景と目的

近年、斜張橋の長大化に伴い、並列ケーブルを採用する斜張橋が増えている。並列ケーブルでは、上流側ケーブルの後流(ウエイク)の影響によって、下流側ケーブルが大振幅の振動(ウェーク・ギャロッピング)を起こすことが知られているが、ウェーク・ギャロッピングに対する一般的な設計法は確立していない。合理的な対処法確立のためには、現象とその発生メカニズムの正確な把握が急務である。

本研究では、ウェーク・ギャロッピング発生のメカニズム解明を目的として、並列円柱の自由振動実験並びに静的圧力(以下、定常圧力)、動的圧力(以下、非定常圧力)の測定実験を行った。

2 研究手順

既往研究によれば、ウェーク・ギャロッピングでは、下流側ケーブルの振動が重要であり、上流側ケーブルが固定された状態でも現象の本質は変わらないとされている。そこで、応答実験では下流側円柱のみ弾性支持して送風時の応答を観測した。実験パラメータは円柱間隔(2D・3D・4D の 3 ケース)と固有振動数(2 ケース)とした。(D: 円柱径)

定常圧力測定実験では、下流側円柱を上下に移動させ、下流側円柱の表面圧力分布を測定した。円柱の移動範囲は $-D < YD$ (一部の実験では $-1.25D < Y < 1.25D$)とした。

非定常圧力測定実験では、下流側円柱をサーボモータで加振し、定常振動状態における表面圧力を動的に測定した。実験パラメータは、円柱間隔(2D・3D・4D の 3 ケース)、風速(6 風速)、加振振幅($Y_a < 1D$: 12 ケース、一部の実験では $Y_a < 1.25D$: 15 ケース)とした。

なお、実験の結果、従来の空力振動に対する定式化では説明できない現象が認められたため、試みに非線形な空気力を仮定した数値解析を行い、定性的には、そのような空気力でも自励振動が発生することを確認した。

3 実験結果と考察

自由振動実験

間隔 2D の場合、同一風速において、2 つあるいは 3 つの応答振幅が同時に観測されるハード型応答を示した。また、この中の大振幅の振動は、無次元風速で整理される一般的な空力振動と異なって、実風速に支配される現象である可能性があるようにも思われた。間隔 3D と 4D の場合の応答振幅は、風速とともに単調に増加する典型的なソフト型応答であった。また、この応答特性は、無次元風速(円柱径と振動数で無次元化)で整理されることが分かった。

定常圧力測定

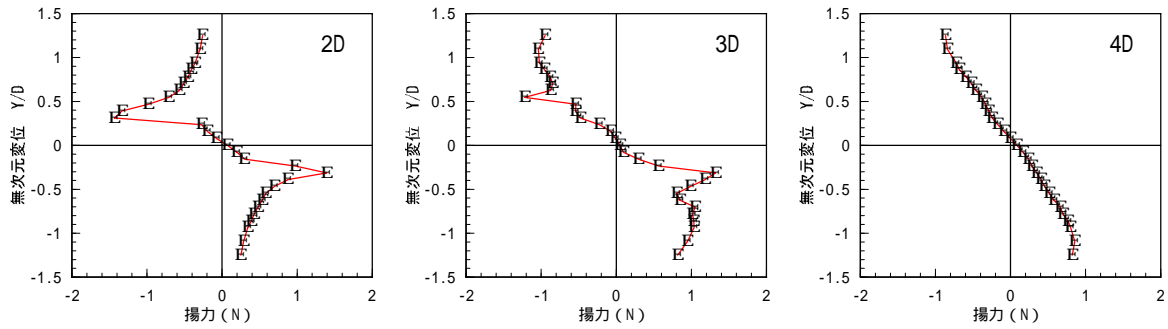


図1 揚力と変位の関係 風速 10.7m/s

図1に定常圧力測定から求めた定常揚力を示す。定常揚力の変化は円柱間隔によって著しく変化することが分かる。間隔4Dでは変位Yの増加とともに揚力は単調に減少している。しかしながら、Yが極めて大きくなった場合、揚力が0となることは自明だから、揚力が最小となる位置が測定範囲を超えていると考えられる。圧力分布を詳細に検討した結果、この揚力の原因は上流側円柱後流内の圧力勾配と考えられた。間隔2Dの揚力は、無次元変位0.3程度に顕著なピークが現れることが特徴である。同様に圧力分布データから、このピークの原因は、両円柱の外側を回る流れが両円柱間に流れ込む流れ(ギャップフロー)に変化する場合に発生するよどみ点の正圧と、高速なギャップフローによる負圧にあることが推定される。また、間隔2Dでは後流の幅が狭いため、ピークを過ぎると、揚力の絶対値が減少して0に漸近するものと考えられる。間隔3Dの揚力は、2Dと4Dの両方の特徴を持つ中間的な特性を示す。

非定常圧力

非定常圧力から非定常揚力の速度比例成分を求めた。一般的な自励振動理論によれば、速度比例揚力と構造減衰力の和が正であれば減衰、負であれば発散となり、両者の和が負から正に変化する振幅が自由振動の応答振幅となるはずである。非定常揚力の測定結果と、自由振動実験結果を比較したところ、間隔2Dの中程度の振幅を示す応答、および3Dの応答については、両者はほぼ一致した。なお、揚力波形の考察から、空力負減衰(発散)の原因は流れの履歴効果(流れの遅れ)、ある程度振幅が大きくなった場合の正減衰の原因はギャップフローへのスイッチング時の揚力ピークによる揚力の位相進みにあることが分かった。

一方、間隔2Dの大振幅の応答や、4Dの応答に関しては、空力減衰と構造減衰の和の符号が変化しておらず、従来の自励振動理論では解釈できない。しかしながら、自由振動応答には強制振動的な特徴は一切認められず、応答から見る限り、自励振動の一種であるように思われる。

間隔2Dの大振幅および間隔4Dの励振メカニズム一解釈

非定常圧力測定の結果、間隔2Dの大振幅の応答や、4Dの応答に関しては、従来の自励振動理論で説明できないという結果が得られた。観測された現象を説明するためには、新しい空気力の定式化が必要となる。そこで非常に大胆ではあるが、間隔2D~4Dの非定常揚力の後流の圧力勾配に支配される部分をS字形の曲線とみなし、これを図2の破線で示した矩形状の揚力で近似してみた。すなわち、変位が正の時に対して負揚力の絶対値Aが、負の時には正揚力が作用するとした。

$$m\ddot{Y} + c\dot{Y} + kY = -\frac{Y}{Y}A$$

運動方程式に自由振動実験とほぼ等しい条件を入力し、数値計算を行った。この運動方程式は非線形であるから、初期条件などによって異なる応答が得られるが、ある条件の下では、自励振動的なりミット・サイクルが生じることが分かった。結果の一例を図3に示す。ここで導入した揚力は測定結果に基づくものではないから、定量的に現象を説明できるわけではない。しかしながら、従来の空気力の遅れ(速度比例成分)による負減衰がなくとも自励振動が生じることが説明されたと言えよう。

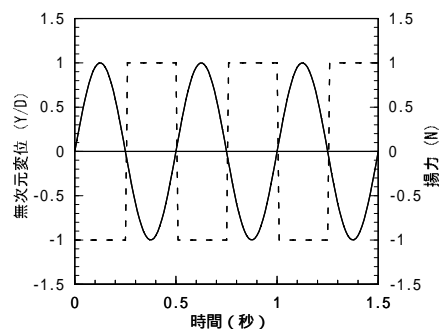


図2 仮定された揚力

4 結論

自由振動応答、揚力とも円柱間隔によって大きく変化する。

間隔 2D の中振幅の応答や、3D の応答は自励振動理論で説明できる。発散の原因は、一般的な空力不安定現象と同様に流れの遅れであり、振幅を定める正減衰は流れのスイッチングによって発生する。

間隔 2D の大振幅の応答や 4D の応答は、従来の自励振動理論では説明できない可能性が高い。矩形的に変化する揚力を仮定した解析によれば、空力負減衰がなくとも、自励振動的な振動が発生することが分かった。

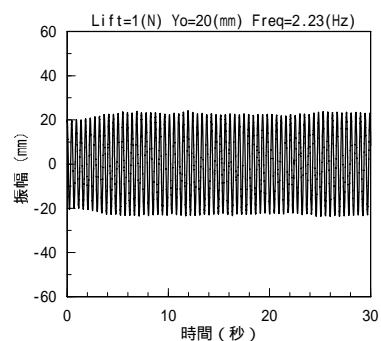


図3 数値解析結果