

第 I 部門

スパイラル突起付き並列ケーブルの Wake Galloping に対する制振効果に関する研究

京都大学工学部

学生員 ○桑原 彰吾

京都大学大学院工学研究科

正会員

八木 知己

京都大学大学院工学研究科

学生員 福島 温樹

京都大学大学院工学研究科

学生員

Quang Tung Do

京都大学大学院工学研究科

正会員 野口 恭平

1. 序論

風的作用によって単体円柱ケーブル(以下普通円柱)に発生するレインバイブレーション等の振動に対し、有効な空力的制振対策として、Fig.1 で示すケーブル表面に複数の突起を巻き付けたスパイラル突起付きケーブル(以下スパイラル円柱)が挙げられる。ケーブルが並列に配置された際に生じる Wake Galloping に対しても、スパイラル円柱の制振効果が明らかになっている¹⁾。しかし、スパイラル円柱の Wake Galloping の制振メカニズムについては明らかになっていない。そこで、本研究では静的/非定常空気力測定実験により、空気力に着目したウェイク振動発現機構を把握した上で、静的/非定常圧力測定実験を行うことで、スパイラル円柱のウェイク振動抑制メカニズムの解明を目的とした。

2. ウェイク振動の発現機構

ウェイク振動は非定常空気力に基づく 4 つの分類が可能である。この分類は、鉛直・水平 1 自由度強制加振実験での非定常揚力・抗力から Eq.(1), (2)により得られる 8 つの非定常空気力係数により行われ、 $H_1^* > 0$ の寄与する鉛直フラッター(Wake Galloping)と、 H_5^*, P_4^* または H_6^*, P_4^* が寄与する連成フラッター(Wake Induced Flutter)に大別される¹⁾。

$$\widetilde{Lift} = \frac{1}{2}\rho DU^2 \left(kH_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + k^2 H_4^* \frac{\eta}{D/2} + kH_5^* \frac{\dot{\xi}}{U} + k^2 H_6^* \frac{\xi}{D/2} \right) \quad (1)$$

$$\widetilde{Drag} = \frac{1}{2}\rho DU^2 \left(kP_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + k^2 P_4^* \frac{\eta}{D/2} + kP_5^* \frac{\dot{\xi}}{U} + k^2 P_6^* \frac{\xi}{D/2} \right) \quad (2)$$

Fig.2 に示す通り、 θ はよどみ点を $\theta = 0^\circ$ とした円周方向時計回りの位置、 X, Y は無風時の、 W, S は有風時の円柱無次元間隔と定義する。ウェイク振動は模型配置ごとに振動応答が異なり、本研究では、普通円柱で振動応答が大きくなる、 $(X/D, Y/D) = (3.0, 0.5)$ (高風速域($W/D, S/D) = (3.0, 0.3)$, D : 円柱直径)に着目する。Fig.3 に、この配置における自由振動応答実験の結果を示す。下流側が普通円柱の場合、高風速域において $H_1^* > 0$ が寄与する鉛直フラッターが発現した。下流側がスパイラル円柱の場合、鉛直フラッターが抑制された。この結果は、上流側がスパイラル円柱の場合も同様であるため、以降は上流側が普通円柱の場合で議論を行う。低風速域では、下流側円柱の表面形状によらず連成フラッターが発現した。以降、スパイラル円柱による鉛直フラッターの制振メカニズムについて検討する。

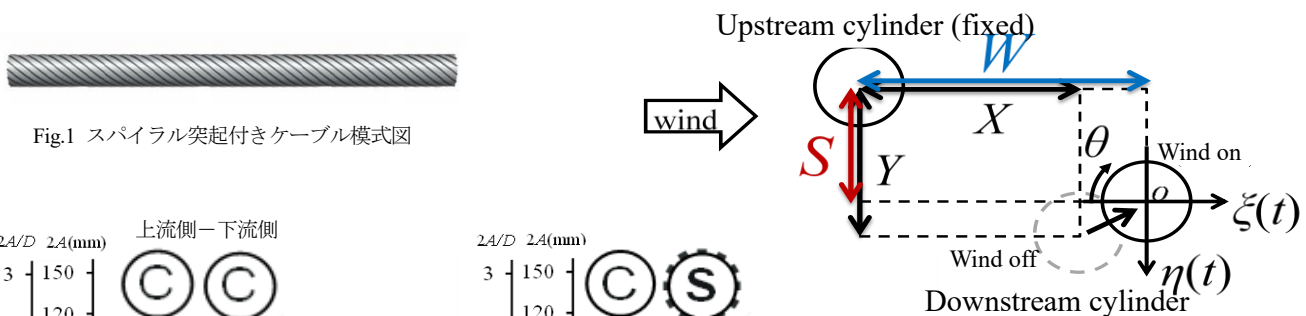
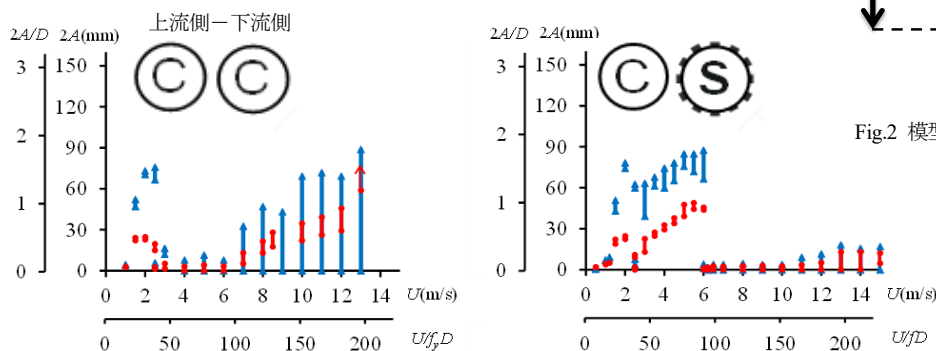


Fig.2 模型配置および座標の定義

Fig.3 自由振動応答(Velocity-Amplitude), $(W/D, S/D) = (3.0, 0.5)$

Shogo Kuwabara, Tomomi Yagi, Haruki Fukushima, Quang Tung Do, Kyohei Noguchi

kuwabara.shougo.84e@st.kyoto-u.ac.jp

3. 静止時における圧力特性

(1) 単体スパイラル突起付きケーブルの静的圧力特性

単体スパイラル円柱は、静止時の空気力(Fig.4)及び圧力計測により、レイノルズ数 $Re > 2.1 \times 10^4$ において、普通円柱の超臨界 Re 域と同様、剥離点を流下方向に移動させ、平均剥離流れの曲率を小さくし、抗力を低減させる特徴がみられた。一方 $Re \leq 2.1 \times 10^4$ では、抗力が風速の増加と共に低下することが明らかとなった。

(2) 並列ケーブルの静的圧力特性

Fig.5 に円柱表面の無次元時間平均圧力(青線)およびそこから予想される流れ場の模式図を示す。下流側にスパイラル円柱を用いることで、下流側円柱内面($\theta = 0^\circ - 120^\circ$ 付近)の負圧の絶対値を小さくすることが明らかとなった。この負圧は、既往の研究より、2円柱間的高速な流れである **Gap flow** に起因するものとされている²⁾。これより、スパイラル円柱を下流側に用いることで、**Gap flow** を抑制することが示された。

4. 並列ケーブルの振動時における圧力特性

$(X/D, Y/D) = (3.0, 0.5)$ では、高風速域で鉛直フラッターが発現する。上下流側共に普通円柱の場合の円周方向の各計測点(θ)における非定常空気力係数 $H_{1\theta}^*$ によれば(Fig.6), 下流側円柱内面で空力減衰($H_{1\theta}^* < 0$)となる。一方で、下流側円柱外面($\theta = 240^\circ - 360^\circ$)における高速な流れによって生じる負圧は、励振力($H_{1\theta}^* < 0$)となることが明らかになった。ここで、下流側円柱をスパイラル円柱にすることで、**Gap flow** が抑制され、下流側外面の励振力が減少すると共に、下流側円柱内面の空力減衰が大きくなることで、円周方向全体でより大きな空力減衰を得ることが示された(Fig.7)。これは、スパイラル突起によって下流側円柱外面の流れから内面の **Gap flow** へのスイッチングが抑制されたことが関係していると示唆される。なお、 $Re \leq 2.1 \times 10^4$ では、下流側円柱の表面条件によらず $H_{1\theta}^*$ が θ に対し同様な値をとった。これは、低風速域では下流側スパイラル円柱が超臨界とならないため、普通円柱と似たような圧力特性を示すためと考えられる。これよりスパイラル円柱による鉛直フラッター抑制効果を望むには、 Re がスパイラル円柱にとっての超臨界域にあることが必要であると示唆される。

この配置では上流側スパイラル円柱はウェイク振動に大きな影響を与えないとみられる。これより、実務上の橋梁ケーブルでは、上下流共にスパイラル円柱を用いてもスパイラル円柱のウェイク振動に対する制振効果を得られる他、本実験と比較してケーブル径が大きく、低風速でスパイラル円柱の超臨界域となるため、スパイラル突起付きケーブルが **Wake Galloping** に対し極めて優位な空力特性を有するといえる。

5. 結論

- 1) 鉛直フラッターは、**Gap flow** 起因の下流側円柱内側の負圧ではなく、下流側円柱外面の歪められた流れによる負圧が励振力として寄与することが確認された。
- 2) スパイラル円柱を下流側に用いることで、**Gap flow** が抑制され、励振力を小さくし、鉛直フラッターを抑制することが示された。実務上、橋梁の並列ケーブルにおいて、スパイラル突起付きケーブルが **Wake Galloping** に対し極めて優位な空力特性をもつと考えられる。

参考文献

- 1) 袁ら：平行ケーブルにおけるウェイク振動の分類とスパイラル突起による振動制御に関する研究，平成 29 年度年次研究発表会梗概集，pp.175-176, 2017
- 2) Zdravkovich. : Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 28(1-3), 183-199, 1988

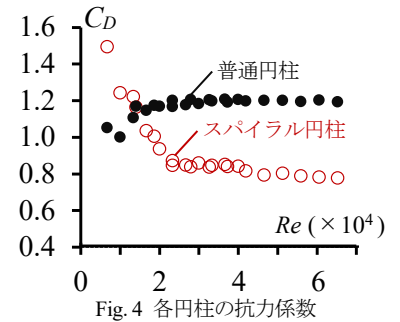
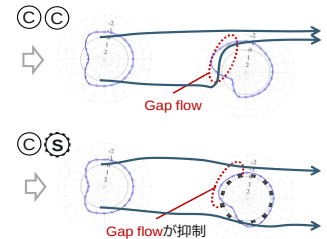
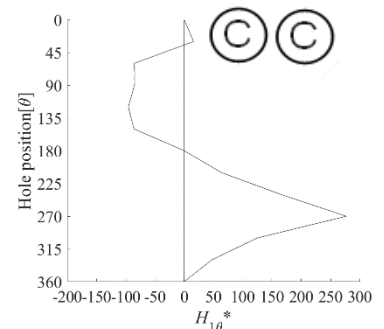
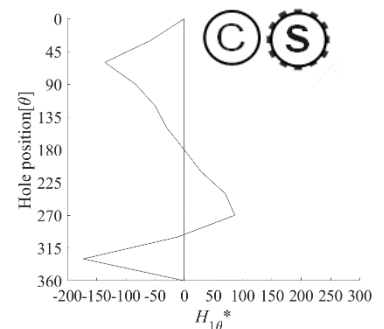


Fig.4 各円柱の抗力係数

Fig.5 流れ場の模式図
($W/D, S/D$) = (3.0, 0.3)Fig.6 $H_{1\theta}^*$ (下流側普通円柱)Fig.7 $H_{1\theta}^*$ (下流側スパイラル円柱)