

斜張橋ケーブルの空力振動現象とカルマン渦の効果に関する研究

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○内藤 寛子 京都大学大学院 フェロー 松本 勝
 京都大学大学院工学研究科 正会員 八木 知己 株式会社 I H I 島 宜範
 五洋建設株式会社 田中 政信 株式会社リクルート 前川 和都

1. 序論

斜張橋ケーブルの空力振動現象であるドライステートギャロッピング, レインバイブレーション等の発生要因として, 軸方向流, 臨界レイノルズ数, 上面側水路等が考えられている. 本研究では, これらの要因とカルマン渦の関係に着目し, 斜張橋ケーブルの空力振動現象の発生メカニズムの解明を試みる. また, スクルートン数とギャロッピング発現風速の関係について, 風洞実験並びに実橋ケーブルの屋外観測結果をもとに検討を行う.

2. 軸方向流とカルマン渦

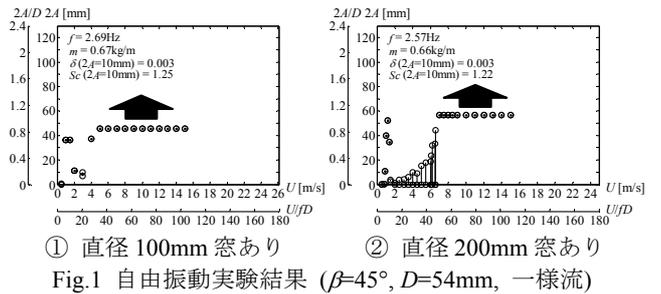
水平偏角 $\beta=45^\circ$ に水平支持された傾斜ケーブルにおいて, 軸方向流とカルマン渦には密接な関係があり, カルマン渦が抑制されることによって, ギャロッピングが発現している可能性が指摘されている¹⁾. 本研究では, カルマン渦と軸方向流の関係を検討するために, ケーブル模型の端部条件を変化させて実験を行った. ケーブル模型を水平偏角 $\beta=45^\circ$ に水平にバネ支持し, 鉛直1自由度自由振動実験を行ったところ, ケース①(直径100mm窓あり), ケース②(直径200mm窓あり)では発散振動が確認されたが, ケース②においては発散風速付近で非定常な振動が確認された(Fig.1参照). ただし, ケース③(端板あり), ケース④(壁なし)では発散振動は確認されなかった. 次に, 模型静止時における軸方向流速 V_a の平均値及び標準偏差値のspan方向の分布を Fig.2 に示す. ただし, 両者とも風洞風速 U で無次元化している. 軸方向流強度の平均値はケース②よりもケース①の方が強く, さらに, 標準偏差値に着目するとケース②が最も大きな値を示している. また, ケース②の非定常な振動中におけるカルマン渦放出強度と応答変位の関係を調べると, カルマン渦放出強度が大きいときは応答変位が小さくなり, またこの逆も確認された(Fig.3参照). つまり, 軸方向流が非定常なため, カルマン渦が非定常に抑制され, その結果として非定常な振動が発現したと考えられる.

3. 臨界レイノルズ数とカルマン渦

臨界レイノルズ数帯域においては, カルマン渦放出強度が低下するため, ギャロッピングが発現する可能性のあることが指摘されている²⁾.

4. 上面側水路とカルマン渦

Fig.4 に, ケーブル模型に人工水路を設置したときの静止



① 直径100mm窓あり ② 直径200mm窓あり
 Fig.1 自由振動実験結果 ($\beta=45^\circ, D=54\text{mm}$, 一様流)

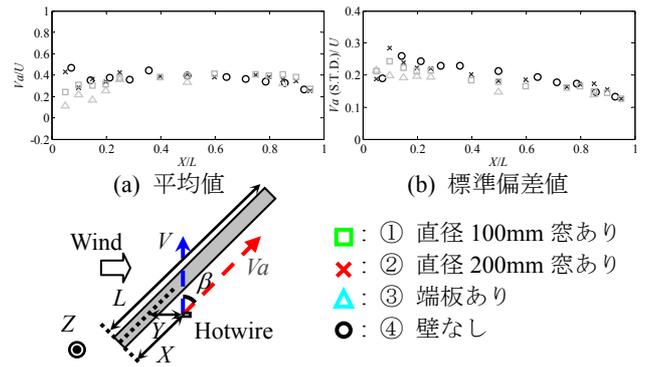


Fig.2 軸方向流強度
 ($\beta=45^\circ, D=50\text{mm}$, 円断面ケーブル, $U=8.0\text{m/s}$, 一様流, 静止断面, 熱線位置: $Y/D=0.7/\cos\beta, Z/D=0$)

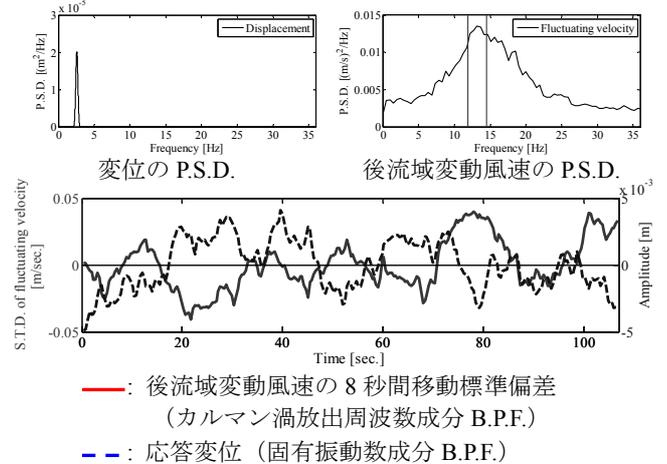


Fig.3 カルマン渦放出強度と応答変位の関係
 ($\beta=45^\circ, D=54\text{mm}$, 円断面ケーブル, 直径200mm窓あり, $U=5.0\text{m/s}$, 一様流, 熱線位置: $X/L=0.5, Y/D=3.0, Z/D=1.0$)

キーワード 斜張橋ケーブル, ギャロッピング, カルマン渦, 軸方向流, 上面側水路

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3167

断面の変動揚力のパワースペクトルと、自由振動結果を示す。これより、ケーブル表面のある位置 ($\theta=58^\circ$ 付近) に人工水路を設置すると、カルマン渦放出が抑制されることにより、空力的に不安定化することが確認された。

5. ドライステートギャロッピングとスクルトン数

Fig.5 にスクルトン数 (Sc 数) とギャロッピング発現風速の関係を示す。発現風速は Sc 数に殆ど依存しないという Saito ら³⁾ の基準 (亜臨界レイノルズ数帯域で実験) と、 Sc 数に敏感であるという FHWA⁴⁾ の基準 (臨界レイノルズ数帯域で実験) がある。亜臨界レイノルズ数帯域における自由振動実験 (前述のケース②) を行った結果、非定常なギャロッピング応答を示したが、Fig.5 上にプロットすると Saito らの基準と一致していた。また、鉛直1自由度強制加振実験から求めた非定常空気力係数 H_1^* から準定常理論を用いて Sc 数を算出し、同様に Fig.5 にプロットすると、Saito らの基準と比較的良好一致が見られた。

次に、斜張橋ケーブルの実橋観測や大型ケーブル模型の屋外観測⁵⁾ で得られたケーブルの振動事例と前述の2つの基準を比較すると、Saito らの基準に似た傾向を示していた。しかし、斜張橋ケーブルの一般的な構造減衰と考えられる $\delta=0.005$ を用いると、FHWA の基準の方に一致すると判明した (Fig.6 参照)。従って、実橋においては、臨界レイノルズ数の効果によって大振幅振動が発生していた可能性も考えられるが、一方で、亜臨界レイノルズ数帯域でも振動が励起される可能性があるため、今後より多くの実橋観測データを集める必要がある。

6. 結論

斜張橋ケーブルの空力振動の発生要因と考えられる軸方向流、臨界レイノルズ数、上面側水路等は全てカルマン渦を抑制する効果があり、その結果として振動が生じると考えられる。すなわち、レインバイブレーション及びドライステートギャロッピングは、カルマン渦の抑制によって振動が生じるという点で同一の発生機構であると考えられる。また、実橋ケーブルにおけるギャロッピングの安定性を議論するためには、今後より多くの実橋観測データを集める必要がある。

謝辞

本研究は、日本学術振興協会科学研究費補助金 (基礎研究(B), 課題番号: 18360218, 研究代表者: 松本 勝) の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) Masaru Matsumoto, Tomomi Yagi, Qingkuan Liu, Takahiro Oishi, Yoichi Adachi, "Effects of axial flow and Karman vortex interference on dry-state galloping of inclined stay-cables", Proc. of the 6th International Symposium on Cable Dynamics, Charleston, South Carolina, U.S.A., September 19-22, 2005, pp.247-254
- 2) M. Matsumoto, T. Yagi, Y. Adachi, H. Hatsuda, T. Shima, "Karman vortex effects on aerodynamic instabilities of inclined stay-cables", Proc. of the 12th International Conference of Wind Engineering, July, 2007, pp.175-182
- 3) T. Saito, M. Matsumoto, M. Kitazawa, "Rain-wind excitation of cables on cable-stayed Higashi-Kobe Bridge and cable vibration control", Proc. of the International Conference A.I.P.C., 1994, pp.507-514
- 4) FHWA/HNTB, Wind induced vibration of stay cables, Interim final report, RDT 05-004, 2005
- 5) Masaru Matsumoto, Tomomi Yagi, Seiichiro Sakai, Jun Ohya, Takao Okada, "Aerostatic force / aerodynamic response characteristics of inclined/yawed cable", in Proc. of the 11th International Conference on Wind Engineering, June 2-5, 2003, pp.1713-1720

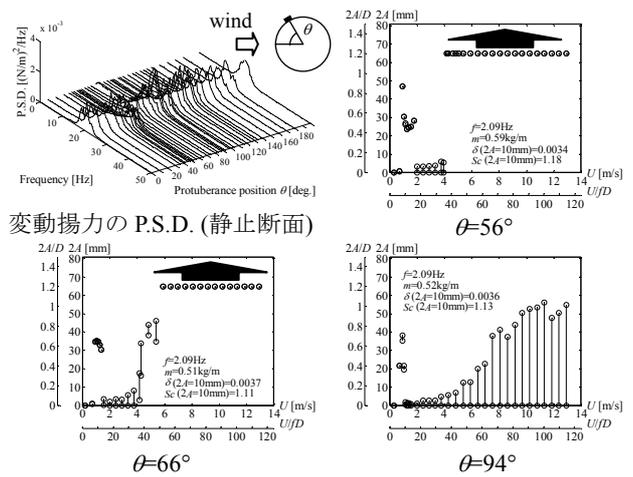


Fig.4 自由振動実験結果 ($\beta=45^\circ, D=50\text{mm}$, 片側突起付き円柱, 一樣流)

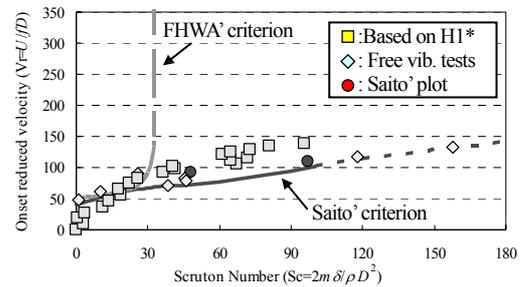


Fig.5 Sc 数 - ドライステートギャロッピング発現風速 ($\beta=45^\circ, D=50\text{mm}$, 円断面ケーブル, 一樣流)

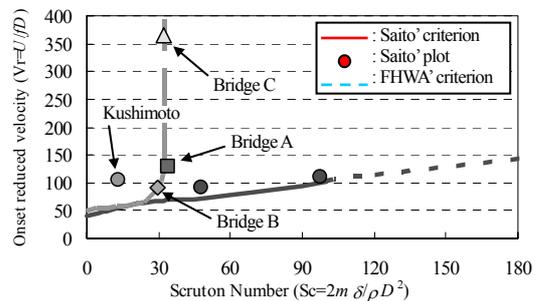


Fig.6 実橋ケーブルの屋外観測事例