

第 I 部門 斜張橋ケーブルにおける表面形状と空力特性に関する研究

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○岡本 健吾 京都大学大学院工学研究科 正会員 八木 知己
 神鋼鋼線工業株式会社 正会員 榊 一平 神鋼鋼線工業株式会社 頃安 弘
 京都大学大学院工学研究科 学生員 梁 子豊 京都大学大学院工学研究科 正会員 白土 博通

1. 序論

近年の斜張橋の長大化に伴って、ケーブルに作用する風荷重の増加、種々の空力振動現象等が問題視されている。従って、斜張橋ケーブルに作用する風荷重を低減し塔や桁への負荷を小さくすること、ケーブルの各種空力振動現象を抑制すること等が耐風設計上の重要な課題となっている。これまでもケーブルの表面形状を変化させることで空力特性を向上させる試みが成されているが、上記の課題を完全に克服するには至っていない。そこで本研究では、ケーブルに作用する抗力が比較的小さく、かつレインバイブレーションの発生要因である上面側水路が形成されにくい斜張橋ケーブルの表面形状を提案することを目的として各種実験を行い、各種表面形状と空力特性の関係について考察した。

2. 表面形状を考慮した斜張橋ケーブルの静的空気力特性

斜張橋ケーブルの突起付ケーブルに着目し、突起の形状、サイズ、間隔等のパラメータを変化させ、高風速域まで計測を行うことで幅広くレイノルズ数を変化させ、静的空気力を測定した。ただし、実験設備の都合上、風速は通常円断面ケーブルにおける臨界レイノルズ数にまでは達していない。本研究では、抗力係数 C_D を以下のように定義した。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 D}$$

ただし、 F_D : 抗力[N/m], ρ : 空気密度[kg/m³], U : 風速[m/sec], D : 直径[m]である。

円断面ケーブル、表面粗度の大きなディンプル付ケーブル、レインバイブレーションの制振対策として軸平行突起(5x11mm)を12本設けた東神戸大橋ケーブルの計測結果を Fig.1 に示す。ディンプル付ケーブルには顕著に抗力低減が見られた。東神戸大橋ケーブルは $C_D=1.1$ 程度の大きな値を示したため、軸平行突起の本数を変化させ、その効果を検討した。結果を Fig.2 に示す。これより、 C_D 値は低レイノルズ数領域では比較的小さな値を示すが、高レイノルズ数領域になるに従って回復する傾向が見られ、軸平行突起を付けることではディンプル付ケーブル程の模型表面の粗度を上げる効果を期待できないと考えられた。さらに、表面突起(5x7.5mm, 12本)を螺旋状に巻き付ける効果を検討した。結果を Fig.3 に示す。これより、巻き付ける角度を大きくするにつれて抗力低減効果が大きくなり、特に巻き付け角 $\gamma=27^\circ$ (Fig.4 参照)ではディンプル付ケーブルと同等の大きな抗力低減効果が見られた。また、Fig.3 に示す模型は全て表面粗度が一定であるため、表面粗度以外の効果で抗力の低減が起きていることが明らかになった。

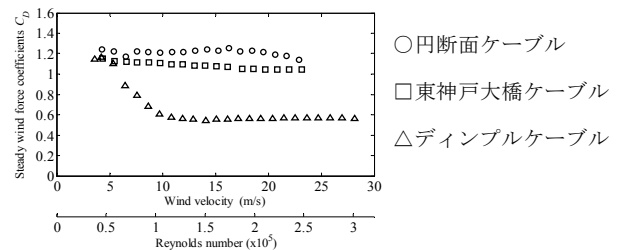


Fig.1 基本断面の抗力係数($\beta=0^\circ, D=156\text{mm}$)

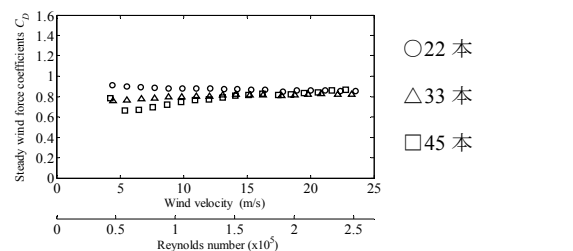


Fig.2 円断面+軸平行突起(5x5mm)の抗力係数($\beta=0^\circ, D=156\text{mm}$)

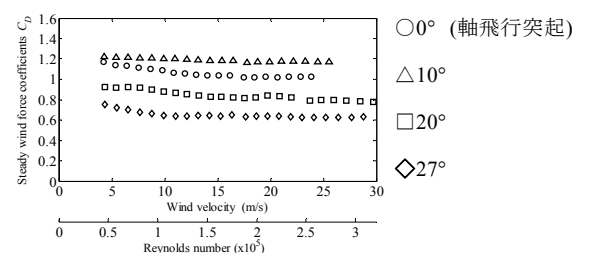


Fig.3 スパイラル(5x7.5mm)12本の抗力係数($\beta=0^\circ, D=156\text{mm}$)



Fig.4 スパイラル(5x7.5mm)12本($\gamma=27^\circ$)模型

3. 可視化実験

円断面ケーブル、軸平行突起付ケーブル、スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)について、後流域のカルマン渦を観察したところ、Fig.5のように円断面ケーブル、軸平行突起付ケーブルでは強くカルマン渦が放出されている様子が見られたが、スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)ではカルマン渦が殆ど形成されておらず、抗力係数の低減と対応している。さらに、別途行った剥離点の観察により、スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)には、軸平行突起付ケーブルの場合と異なり、突起の位置に合わせて剥離点がスパン方向に変化している様子が見られ、カルマン渦を抑制する効果を有している可能性が示された。また、スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)には、観測断面の直行方向から何らかの流れが生じている様子が観察された。これはケーブル表面の突起に沿った3次元的な流れであると考えられた。

4. 水路観察実験

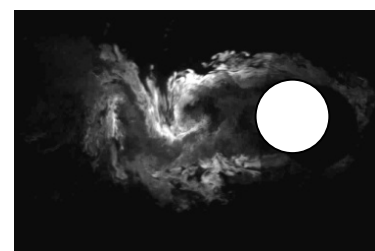
レインバイブレーションの発生要因としてケーブル表面に形成される水路(特に上面側水路)が深く関係しており、この現象を不安定化する要因であると考えられている。静的空気力測定実験では、ディンプル付ケーブル、スパイラル突起付ケーブルに抗力低減効果が最も顕著に見られた。そこで、各模型に対し、風方向にケーブルが下り勾配を有する鉛直面内傾斜角 $\alpha=30^\circ$ 、水平面内傾斜角 $\beta=45^\circ$ (水平風向偏角 $\beta^*=37.8^\circ$)のケーブル模型姿勢で強風・降雨時を再現してケーブル上面側の水路形成を観察した。結果として、Fig.6のように円断面ケーブル、ディンプル付ケーブルには明確な水路が観察されたが、東神戸大橋ケーブル(軸平行突起付ケーブル)、スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)には水路が観察されず、レインバイブレーションに対する制振効果を有していると考えられた。

5. 結論

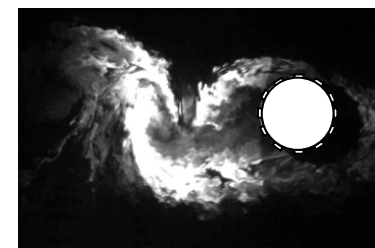
模型表面に軸平行突起を付加することでは、ディンプル付ケーブルで認められるような模型表面の粗度を上げることによる抗力低減効果を期待できないことが明らかとなった。一方で、表面突起に角度を付けて螺旋状に巻き付けたスパイラル突起付ケーブルには抗力低減効果が顕著に見られ、特にスパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)ではディンプル付ケーブルと同等の大きな抗力低減効果が見られた。可視化実験より、スパイラル突起付ケーブルは軸平行突起付ケーブルと異なり、表面突起の位置に合わせた剥離点のスパン方向への変化、スパン方向の3次元的な流れが観察され、カルマン渦の放出が抑制されていることが明らかになった。また、スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)は強風・降雨時に上面水路が観察されず、レインバイブレーションに対する制振効果を発揮する可能性があることも判明した。ただし、スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)について、カルマン渦が抑制されていることから、ドライステートギャロッピングの発現が懸念されるため¹⁾、今後より詳細な検討が必要である。

謝辞: 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C)(課題番号 21560501)の助成を受けて実施されたものである。実験にご協力頂いた京都大学大学院生の成田周平氏に謝意を表す。

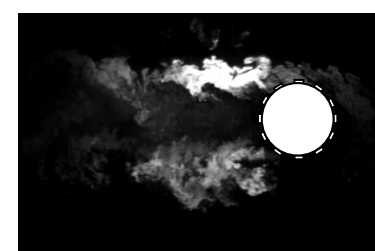
参考文献 1) M. Matsumoto, T. Yagi, Q. Liu, T. Oishi, Y. Adachi, Effects of axial flow and Karman vortex interference on dry-state galloping of inclined stay-cables, Proc. of the 6th International Symposium on Cable Dynamics, 2005, pp.247-254



(a) 円断面ケーブル



(b) 軸平行突起付ケーブル



(c) スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)

Fig.5 可視化実験($\beta=0^\circ, D=156\text{mm}$)



(a) 円断面ケーブル



(b) スパイラル突起付ケーブル($\gamma=27^\circ$)

Fig.6 水路観察実験