

## 第 I 部門 斜張橋ケーブルの空力振動に関する研究

京都大学工学部	学生員	○初田 英明
京都大学工学研究科	フェロー	松本 勝
京都大学工学研究科	正会員	八木 知己
京都大学大学院	学生員	劉 慶寛
京都大学大学院	学生員	大石 孝弘
京都大学大学院	学生員	足立 洋一

**1.はじめに**

過去の研究<sup>1)</sup>により、斜張橋ケーブルの空力振動現象の発生機構については、降雨時にケーブル表面に形成される水路、ケーブル後流域に形成される軸方向流、ケーブル軸に沿ったカルマン渦の非定常・3次元的な放出などが、その要因として考えられているが、振動現象は複雑であり未解明な点も多く残されている。

本研究においては、これらの点をふまえて、実橋ケーブルや各種風洞実験において軸方向流の観測を行い、軸方向流が斜張橋ケーブルの空気力学的振動特性に与える影響について考察を行った。また、カルマン渦とギャロッピング不安定性の関連についても考察を加えた。

**2. 実橋ケーブルにおける空力振動特性**

2004年6月の台風6号通過時に、国内のある斜張橋のケーブルにおいて大振幅の空力振動現象が確認された。そこで、この実橋ケーブルで生じた大振幅振動の発生要因を解明するため、現地調査を行うと同時に、風洞実験結果を基に考察を行うこととした。

振動状況を確認すると、片振幅1.5mにも及ぶ大振幅の振動であった。また、この振動現象が確認された時の気象条件については不明瞭な点が多いが、風速は平均風速19.8m/s(近くの気象官署より)、風向は南～南西(図-1参照)、雨は止んでいた可能性が高い。以上のことを踏まえ、今回確認された大振幅振動の発生機構について検討すると、振幅の大きさ、ケーブルの振動数、雨が止んでいた可能性を総合して考慮し、雨なしギャロッピングであった可能性が高い。

従って、雨なしギャロッピングが生じた要因について検討を加えた。雨なしギャロッピングが生じる主な要因として、ケーブル後流域に形成される軸方向流が挙げられる。そこで、ビニール紐を使ってケーブル後方に形成される軸方向流を可視化したところ、非常に強い軸方向流が存在していたため(図-2参照)、気泡を用いて実橋ケーブルの軸方向流強度の計測を行った(図-3参照)。この図から、軸方向流速は主流風速の5~9割程度の強度を有しており、非常にばらつきが大きいことがわかる。風洞実験においても同様に気泡を用いた計測を行ったところ、同様の特性が得られた。大振幅振動が生じた際、より強い軸方向流が形成された可能性、ケーブル後流域に橋桁が存在することで空気力学的に不安定になった可能性等が考えられるが、未解明な点が多く、より詳細な検討が必要である。

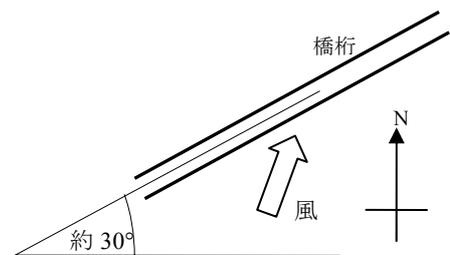
図-1 桁の方角と風向 ( $40^\circ < \beta^* < 50^\circ$ )

図-2 紐による軸方向流の可視化

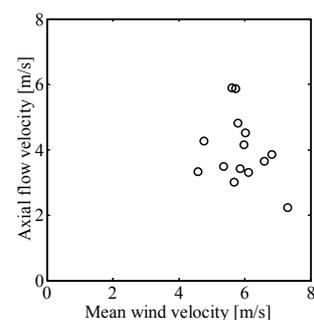


図-3 軸方向流速計測結果

### 3. 剛体ケーブル模型における軸方向流の効果

ケーブル後流域に形成される軸方向流はケーブル振動を不安定化する要因の一つであるが、風洞実験において軸方向流の効果を考える際、風洞内外の圧力差や端部条件の微妙な違いが振動応答に敏感に影響を与える。そこで、端部条件を様々に変化させることで軸方向流の強さを調節し、軸方向流の強さとギャロッピング不安定性の関連及びカルマン渦とギャロッピング不安定性の関連について考察を行った。

#### 3-1. 自由振動特性と後流域変動特性

図-4 に、端部条件を様々に変化させた (a) 人工壁なし、端版なし、(b) 人工壁なし、端版あり、(c) 人工壁あり、窓 (直径 170mm の円形窓) あり) 自由振動実験結果を示す。これより、(b)の端版ありのケースが空気力学的に最も安定であり、順に、(a), (c)であることがわかる。

次に、X 型熱線プローブ流速計をケーブル模型後流域の極めて近傍に設置し、ケーブル後流域に形成される軸方向流の強度を測定した (図-5 参照)。これより、あまり大きな違いは出ていないものの、(c)のケースが最も軸方向流が強く形成されており、(a), (b)の順で軸方向流が強い。自由振動実験では、(c), (a), (b)の順に空気力学的に不安定と考えられ、軸方向流強度の強い順と一致する。よって、軸方向流が強く形成されることがケーブルを空気力学的に不安定にしている可能性が考えられる。

#### 3-2. 変位波形特性

自由振動実験時、ケーブル振動の振幅の大きさは時間的に非定常であった。この現象を細かく見ると、振幅が小さくなる時にカルマン渦放出周波数で振動する傾向が確認されたため、(a) のケースにおいて、ケーブル模型の変位のスペクトル解析、ウェーブレット解析を行った (図-6 参照)。スペクトル解析結果より、模型振動数成分 ( $V/fD=34.8$ ) とカルマン渦放出周波数成分 ( $V/fD=8.6$ ) が卓越しており、ウェーブレット解析結果を見ると、25~35 秒にかけて模型振動数に対応するピークが見られず、カルマン渦の放出周波数成分が強く現れている。これより、カルマン渦放出周波数成分が卓越している時間帯で模型振動数成分の振動は抑えられ、カルマン渦放出周波数成分が弱まっている時間帯で模型振動数成分が強く現れることが確認された。よって、カルマン渦の生成によりケーブル振動に制振力が働く可能性が考えられる。

### 4.まとめ

端部条件を様々に変化させて各種実験を行った結果、軸方向流が強く形成されることがケーブル振動を空気力学的に不安定にしている可能性が考えられた。また、ケーブル模型が空気力学的に不安定であるときにカルマン渦放出は弱く、ケーブル模型が空気力学的に安定であるときにカルマン渦放出が強くなっていることから、軸方向流が強く形成されることでカルマン渦の生成を抑え、カルマン渦の制振作用が小さくなることにより、ケーブル振動を空気力学的に不安定にしている可能性が示唆された。

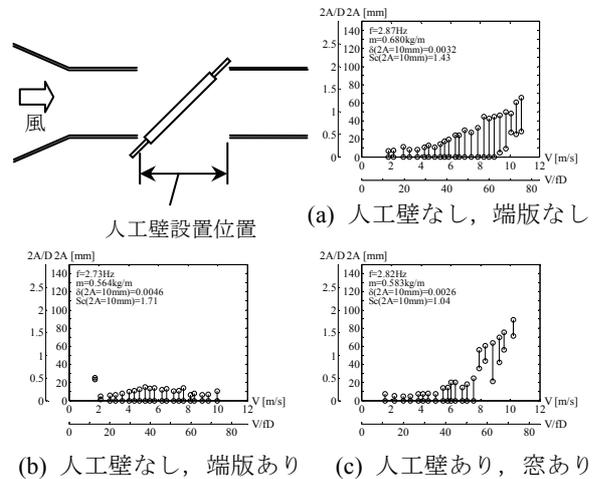


図-4 端部条件の違いによる V-A 図

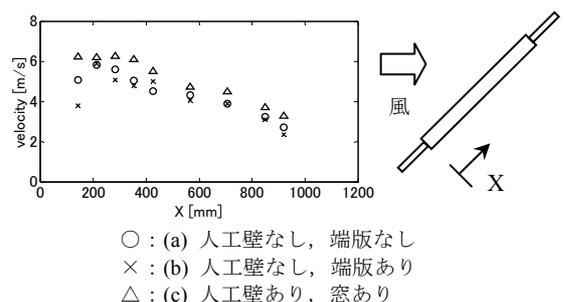


図-5 軸方向流速測定結果 ( $V=8.0\text{m/s}$ )

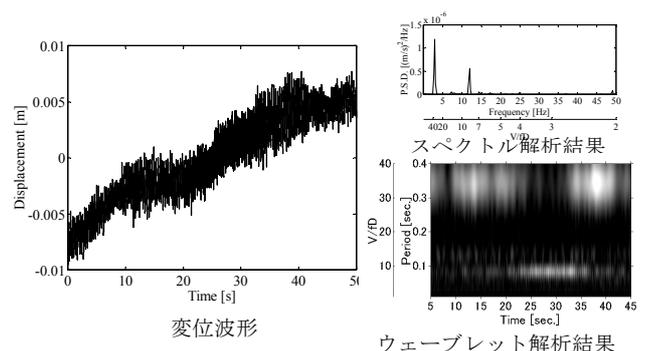


図-6 スペクトル・ウェーブレット解析結果 ( $V=5.0\text{m/s}$ )

参考文献 1) M.Matsumoto, T.Yagi, M.Goto and S.Sakai, "CABLE AERODYNAMIC VIBRATION AT HIGH REDUCED VELOCITY", on Cable Dynamics,2001