

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560501

研究課題名（和文） 斜張橋ケーブルにおける表面状態を考慮した空力振動応答評価の精緻化に関する研究

研究課題名（英文） A study towards precise evaluation of amplitudes for aerodynamic vibrations of stay-cables considering their surface conditions

研究代表者

八木 知己（YAGI TOMOMI）

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30293905

研究成果の概要（和文）：本研究では、斜張橋ケーブルの空力振動時における空気力の定量化に向けたメカニズム解明を研究目的とし、ケーブルの表面状態を種々に変化させた状態で風洞実験を行った。その結果、制振対策としてはスパン方向の剥離点変化するようなスパイラル突起付きケーブルが有効であること、またギャロッピングは、表面粗度の効果、すなわちカルマン渦が抑制された臨界レイノルズ数領域で不安定化することが空気力ならびに流れ場から明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：To investigate the galloping instability of inclined stay cables, the cable models with various kinds of surface conditions were tried to use for the wind tunnel tests. Then, it becomes clear that a cable with spiral protuberances shows the significant stability due to its three dimensional flow separation, and also, the instability of dry-state galloping can be explained by surface roughness of cable, which is related to the critical Reynolds number range. These facts are confirmed by both aerodynamic forces and flow patterns around the cable.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：風工学

1. 研究開始当初の背景

斜張橋の傾斜ケーブルの空力振動として、風雨下で振動するレインバイブレーションならびに、ケーブル表面が乾燥している状態で発生する現象としてドライステート・ギャロッピングが知られている。前者のメカニズ

ムとしては、ケーブル表面に形成される水路が挙げられるが、両者の他の発生メカニズムについては、未だ不明な点が多い。その結果として、未だ空気力が定量化できず、ダンパー等で付加減衰を対数減衰率で0.02～0.03与えれば、振動は収まるという経験則で対応

しているのが現状である。従って、空気力の定量化に向けて、発生メカニズムをより詳細に検討することが急務の課題といえる。そこで本研究では、これまでに指摘されている各種発生メカニズム、例えば軸方向流れ、水路、臨界レイノルズ数、カルマン渦の効果等に着目し、より詳細にそのメカニズムを検討すると共に、相互の関係を明らかにすることを試みた。特に本研究では、まずケーブルの表面形状を種々に変化させることで、これらのメカニズムを制御し、実際に空力特性の良いケーブル断面の開発を行った。さらに、ケーブル表面を変化させることで、ケーブル周りの流れ場を種々に変化させ、それぞれの発生メカニズムの特徴を強調した状態で、空力特性を比較検討することを試み、傾斜ケーブルの空力振動現象の解明を行った。

2. 研究の目的

本研究では、ケーブルの表面形状・状態を変化させながら、4つの内容の研究を試みた。それぞれの研究目的は以下の通りである。

(1) 抗力低減と空力安定化に関する研究

ケーブルの表面形状を変化させて、ケーブルに作用する抗力を低減し、かつレインバイブレーションの発生要因である水路が形成されにくい断面形状を開発すること。

(2) ドライステート・ギャロッピングの発生メカニズムに関する研究

各種表面形状を有するケーブル模型を用いて、カルマン渦の生成を制御した状態で、ギャロッピングの発生メカニズムを解明すること。

(3) 傾斜ケーブル周りの流れ場からの考察

ギャロッピングの発生するケーブルと発生しないケーブルに対して可視化実験を行い、流れ場の違いから発生メカニズムを解明すること。

(4) 降雨によるケーブル表面状態の変化が空力特性の及ぼす影響の解明

降雨によって水路が形成される場合もあれば、単に濡れている場合だけの時もあり、特に後者の状態で空力的に変化があるかどうかを解明すること。

3. 研究の方法

上記4種類の研究について、以下のような方法で研究を行った。

(1) 抗力低減と空力安定化に関する研究

斜張橋ケーブルの空力振動対策として制振装置が用いられることが多いが、ケーブル表面に加工を施すことによる空力的な制振対策も多数試みられている。例えば、東神戸大橋で採用された軸平行突起付ケーブルは、

12本の軸平行突起によって、レインバイブレーションの発生要因の一つである水路の形成を阻害し、制振に成功している。また、多々羅大橋で採用されたインデントタイプのケーブルは表面にディンプル加工を施し粗度を上げることによって、レインバイブレーションの制振だけでなく抗力を低減させることにも成功している。そこで本研究では、軸平行突起もある種の表面粗度と考えられることから、軸平行突起の形状、配置等を変化させることで、水路形成を妨げる効果を維持したまま、抗力をインデントタイプ並みに低減可能かどうか検討した。ただし、実橋ケーブルの表面形状加工は、PE(ポリエチレン)管を押し出し成型することを前提とし、実際に加工可能な範囲で断面形状の選定を行った。抗力低減の検討は、静的空気力測定実験ならびに流れの可視化実験で行うと共に、人工降雨下の屋外実験で水路形成の有無を確認した。

(2) ドライステート・ギャロッピングの発生メカニズムに関する研究

斜張橋ケーブルのドライステート・ギャロッピングは、カルマン渦の抑制がその発生メカニズムである可能性を指摘されている。例えば、傾斜ケーブル背後に形成される軸方向流れや、風速が上昇し臨界レイノルズ数域に達することで、カルマン渦放出が抑制され、ギャロッピングが発生するとしている。しかし、そのメカニズムは未解明な点も多い。従って本研究では、カルマン渦を制御する目的で、各種表面形状を有するケーブル模型を用いて、斜張橋ケーブルのギャロッピングの発現に関して検討を行った。ケーブル模型は、円断面ケーブル模型に加えて、矩形突起を12本、巻きつけ角 $\mu=27^\circ$ で巻きつけたスパイラル突起付きケーブル模型、凹凸表面のゴムシートを貼り付けた縞状突起付きケーブル模型、直方体突起を多数貼り付けた直方体突起付きケーブル模型を用いた。これらの模型を用いて、静的空気力測定実験、非定常空気力測定実験及び熱線流速計を用いた後流域変動風速測定実験、軸方向流測定実験を行った。ただし、模型姿勢は鉛直面内傾斜角を $\alpha=0^\circ$ で固定し、水平面内傾斜角は $\beta=0^\circ$ 及び $\beta=45^\circ$ の2種類とした。

(3) 傾斜ケーブル周りの流れ場からの考察

上記(2)の研究において、ドライステート・ギャロッピングに対して安定化を示した円断面ケーブル模型ならびに不安定化を示した縞状突起付きケーブル模型を用いて、流れの可視化実験を行い、ギャロッピングの発生メカニズムの検討を行った。模型姿勢は鉛直面内傾斜角 $\alpha=0^\circ$ 、水平面内傾斜角 $\beta=45^\circ$ とした。風洞主流方向をX、模型鉛直方向(鉛直面内主流直角方向)をY、水平面内主流直角

方向を Z と定義し、X-Y 平面の模型下流側風速特性ならびに X-Z 平面の模型下流側風速特性、特に軸方向流れの特性を PIV 解析によって考察した。

(4) 降雨によるケーブル表面状態の変化が空力特性の及ぼす影響の解明

レインバイブレーションの発生要因として、降雨時に風向に対して下り勾配を有するケーブルにおいて水路が形成されることが、その原因として知られているが、その一方で、上り勾配のケーブルに対しても振動が観測されたケースもある。本研究では、水路の形成のみならず、降雨によって傾斜ケーブルの表面状態が変化することが、空力特性にどのような影響を及ぼすかを検討するために屋外観測実験を行った。ケーブル模型を種々の鉛直面内傾斜角 α 、水平面内傾斜角 β の状態に設置し、人工降雨を与えてケーブル表面の状態を変化させ、静的空気力測定実験を行った。

4. 研究成果

上記 4 種類の研究について、以下のような研究成果が得られた。

(1) 抗力低減と空力安定化に関する研究

①ケーブル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表面粗度の効果による抗力低減を期待できないことが明らかとなった。

②表面突起を螺旋状に巻き付けたスパイラル突起付ケーブルでは、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 ($\gamma=27^\circ$ 、図 1 参照) では、ディンプル付ケーブルと同等の抗力低減効果が見られた (図 2 参照)。軸平行突起とスパイラル突起は、断面周りの粗度という観点からは同一であり、抗力低減は表面粗度の効果ではなく、剥離点の span 方向変化等の流れの 3 次元的な効果によってカルマン渦放出が抑制され、抗力も低減していると考えられる。

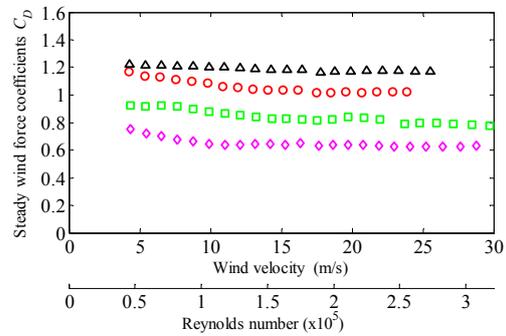


図 1 スパイラル突起付ケーブル模型

③軸平行突起ならびにスパイラル突起は、レインバイブレーションの発生要因である水路の形成を完全に抑制することが確認された (図 3 参照)。

④スパイラル突起付ケーブルでは、ドライス

テート・ギャロッピングについても確認されなかった。これは剥離点の 3 次元的な変化による効果と思われる。従って、スパイラル突起付ケーブルは、抗力低減ならびに空力不安定現象に対しても安定なケーブル形状と考えられ、実際のケーブルへの応用が期待される。



- : スパイラル突起付ケーブル(5x7.5mm, 12 本, $\gamma=0^\circ$)
- △ : スパイラル突起付ケーブル(5x7.5mm, 12 本, $\gamma=10^\circ$)
- : スパイラル突起付ケーブル(5x7.5mm, 12 本, $\gamma=20^\circ$)
- ◇ : スパイラル突起付ケーブル(5x7.5mm, 12 本, $\gamma=27^\circ$)

図 2 スパイラル突起付ケーブルの抗力係数



円断面ケーブル スパイラル突起付ケーブル

図 3 水路の形成状況

(2) ドライステート・ギャロッピングの発生メカニズムに関する研究

①図 4 に実験に使用したケーブル模型を示す。これらの模型の空力的な特徴をまとめると以下の通りである。円断面ケーブルは通常の円柱で、本実験では亜臨界レイノルズ数領域の特徴を示した。従って、ドライステート・ギャロッピングに対しては、安定化している。縞状突起付きケーブルは、表面粗度の効果で抗力低減し、カルマン渦放出も抑えられ、臨界レイノルズ数領域に達している。また、突起がケーブルに平行なため、剥離点がケーブル軸方向に変化せず、断面周りの流れが 2 次元化していると考えられ、それらの結果としてギャロッピングに対して著しく不安定化している。スパイラル突起付きケーブルは、前述の(1)の研究で使用した模型と同様の効

果を狙ったものであるが、剥離点が3次元的に変化することで、カルマン渦放出が抑制されるため抗力は低減しているが、ギャロッピングに対しても安定化している。直方体突起付きケーブル模型においては、突起が表面粗度を増加させ、抗力低減が確認されたが、3次元的な流れの効果もあり、ギャロッピング不安定性は僅かに確認されるのみであった。

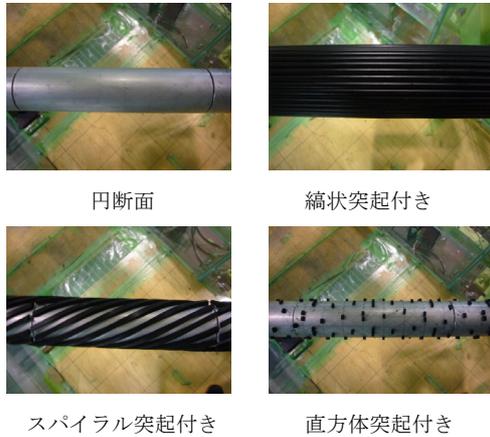


図4 実験に使用したケーブル模型

②従って、ギャロッピング不安定性を決定するのは、表面粗度の効果によって、もしくは円柱断面であれば高風速域で臨界レイノルズ数に達しているかどうか、さらには剥離点がケーブル軸方向に揃っている、即ち流れの3次元性が低いかが鍵となっていることが明らかとなった。

③ドライステート・ギャロッピングの発現は、レイノルズ数と無次元風速の両方に依存していることが明らかとなった(図5, 図6参照)。即ち、ギャロッピングが発生するかどうかは、臨界レイノルズ数域にあるかどうかで決まり、その領域内で発現風速は無次元風速で整理できると考えられる。

以上より、ドライステート・ギャロッピングの発生原因がより詳細に明らかとなり、またここで得られた知見は、斜張橋ケーブルの空力的な制振対策に応用が可能である。

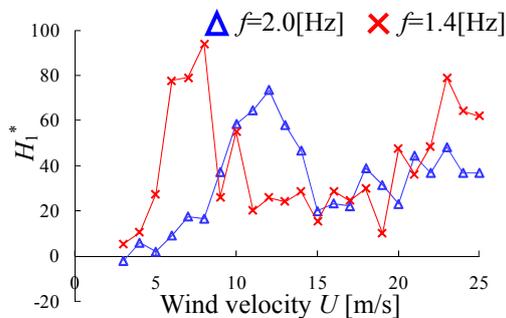


図5 空力減衰とレイノルズ数の関係

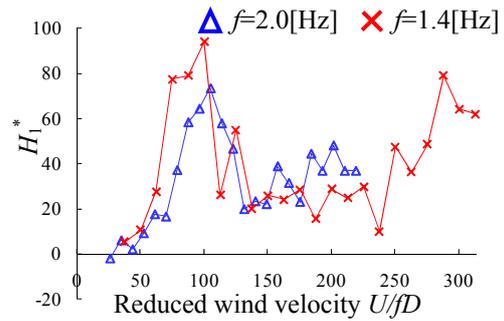


図6 空力減衰と無次元風速の関係

(3) 傾斜ケーブル周りの流れ場からの考察

①水平面内主流直角方向(Z方向)の流れは、ケーブル背後に発生する軸方向流れに起因するものであり、Z方向の平均流速は軸方向流れの平均流速と対応する。円断面ケーブル模型ならびに縞状突起付きケーブルの両者共、模型背後のY方向(鉛直方向)のほぼ全域にわたってかつ後方まで発生していることが確認された(図7, 図8参照)。従って、従来考えられていたスリッター板のような効果、即ち、剥離流れと板の間に内部循環流が形成されるような流れは考えられず、ギャロッピングの直接的な要因ではない可能性が示唆された。

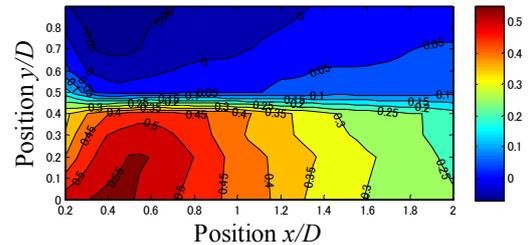


図7 円断面ケーブル背後のz方向平均風速分布(静止時)

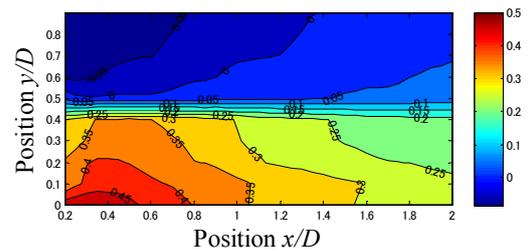


図8 縞状突起付きケーブルのz方向平均風速分布(静止時)

②模型後流側のX-Y平面で2次元的に流れを観察すると、縞状突起付きケーブルにおいては、模型背後の下流側において、流速が遅い領域が存在することが明らかとなった(図9, 図10参照)。これは、表面粗度の効果でカルマン渦の放出が抑制され、模型後縁付近への巻き込みが弱く、時間平均流れの曲率が小さくなっているためであると考えられる。

従って、ドライステート・ギャロッピングの発生機構を2次元的に考察すると、臨界レイノルズ数域でカルマン渦が抑制された結果、剥離剪断層の曲率が小さくなり、楕円断面の後流域に低風速領域が形成されるため、ギャロッピングが発生する可能性が考えられる。

以上より、本研究では空気力と流れ場の両面からドライステート・ギャロッピングの発生メカニズムを考察し、数多くの知見が得られ、今後、斜張橋ケーブルのより合理的な耐風設計に活かせるものと考えられる。

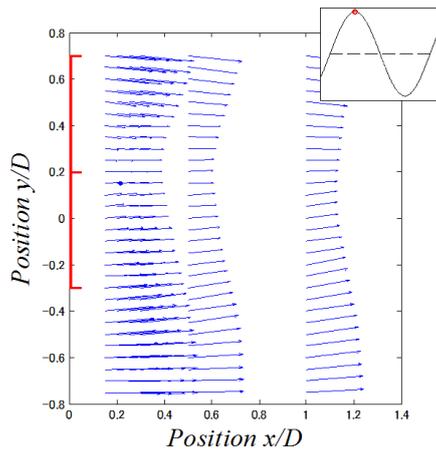


図9 円断面ケーブル背後のX-Y平面風速分布(強制加振時)

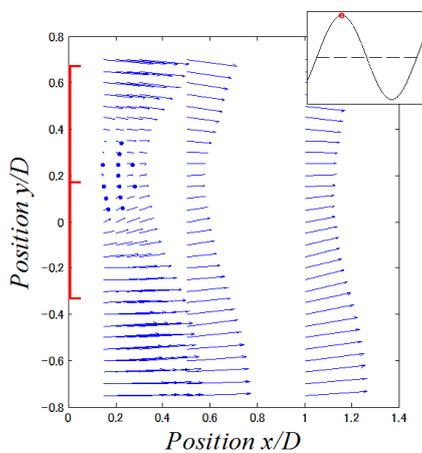


図10 縞状突起付き断面ケーブル背後のX-Y平面風速分布(強制加振時)

(4) 降雨によるケーブル表面状態の変化が空力特性の及ぼす影響の解明

種々の鉛直面内傾斜角 α 、水平面内傾斜角 β の状態、人工降雨を与えてケーブル表面の状態を観察すると共に、静的空気力を測定した。その結果、水路は形成されずに濡れている状態での空気力の測定を行ったが、乾燥状態の空気力との間に特徴的な差異は見られなかった。ただし、屋外観測のため、主流方向風速の乱れが $I_r=10\%$ 程度の強乱流中での計測となってしまったため、今後一様流中で

より詳細な検討が必要と思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 八木知己, 岡本健吾, 榊一平, 頃安弘, 白土博通, 梁子豊, 成田周平, 表面形状を考慮した斜張橋ケーブルの抗力低減と空力安定化に関する研究, 第21回風工学シンポジウム論文集, 査読有, Vol. 21, 2010, pp. 263-268
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosymp/21/0/21_0_263/_article/-char/ja/

〔学会発表〕(計13件)

- ① Kohei Shinjo, Tomomi Yagi, Shuhei Narita, Kengo Okamoto, Hirromichi Shirato, Dry-State Galloping of Stay-Cables with Various Kinds of Surface Treatments, The Twenty-Fourth KCCNN Symposium on Civil Engineering, 2011年12月15日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県)
- ② Tomomi Yagi, Shuhei Narita, Kengo Okamoto, Kohei Shinjo, Hirromichi Shirato, Generation factors of dry-state galloping of stay-cables in consideration of surface conditions, The 6th Korea-Japan Joint Meeting on Wind Engineering, 2011年10月31日, 京都大学防災研究所(京都府)
- ③ Tomomi Yagi, Shuhei Narita, Kengo Okamoto, Kohei Shinjo, Hirromichi Shirato, Investigation of dry-state galloping of stay-cables with various kinds of surface configuration, The Ninth International Symposium on Cable Dynamics, 2011年10月19日, 同済大学(中国)
- ④ 八木知己, 岡本健吾, 榊一平, 頃安弘, 白土博通, 斜張橋ケーブルの抗力低減と空力自励振動の安定化に関する研究, 「フラッターの制御と利用」に関する第1回シンポジウム, 2011年9月16日, 東京大学山上会館(東京都)
- ⑤ 新庄皓平, 八木知己, 成田周平, 岡本健吾, 白土博通, 表面形状に着目した斜張橋ケーブルのドライステート・ギャロッピングに関する研究, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 愛媛大学(愛媛県)
- ⑥ Tomomi Yagi, Kengo Okamoto, Ippei

Sakaki, Hiroshi Koroyasu, Zifeng Liang, Shuhei Narita, Hikomichi Shirato, Modification of surface configurations of stay cables for drag force reduction and aerodynamic stabilization, The 13th International Conference on Wind Engineering, 2011年7月12日, RAI (オランダ)

- ⑦ 新庄皓平, 八木知己, 成田周平, 岡本健吾, 白土博通, 各種表面形状を有する斜張橋ケーブルのドライステート・ギャロッピングに関する研究, 平成23年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2011年6月12日, 関西大学 (大阪府)
- ⑧ 新庄皓平, 八木知己, 成田周平, 岡本健吾, 白土博通, 表面形状を考慮した斜張橋ケーブルのドライステート・ギャロッピングに関する研究, 平成23年度日本風工学会年次研究発表会, 2011年5月24日, 大阪市立大学 (大阪府)
- ⑨ 岡本健吾, 八木知己, 榊一平, 頃安弘, 梁子豊, 成田周平, 白土博通, 斜張橋ケーブルにおける表面形状を考慮した抗力低減及び空力安定化に関する研究, 第60回理論応用力学講演会, 2011年3月10日, 東京工業大学 (東京都)
- ⑩ Kengo Okamoto, Tomomi Yagi, Ipei Sakaki, Hiroshi Koroyasu, Zifeng Liang, Syuhei Narita, Hikomichi Shirato, Improving aerodynamic characteristics of stay cables by modifying surface configurations, Twenty-Third KKCNN Symposium on Civil Engineering, 2010年11月14日, 国立台湾大学 (台湾)
- ⑪ 八木知己, 白土博通, 成田周平, 榊一平, 頃安弘, 梁子豊, 岡本健吾, 斜張橋ケーブルの空力特性における表面形状の効果に関する研究, 日本流体力学会年会2010, 2010年9月10日, 北海道大学 (北海道)
- ⑫ 岡本健吾, 八木知己, 榊一平, 頃安弘, 白土博通, 梁子豊, 成田周平, 表面形状を考慮した斜張橋ケーブルの空力特性向上に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1日, 北海道大学 (北海道)
- ⑬ 岡本健吾, 八木知己, 榊一平, 頃安弘, 梁子豊, 白土博通, 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, 平成22年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2010年5月22日, 京都大学 (京都府)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八木 知己 (YAGI TOMOMI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30293905

(2) 研究分担者

白土 博通 (SHIRATO HIROMICHI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70150323