

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

京都大学工学研究科 学生員 ○新庄 皓平
 鹿島建設(株) 正会員 成田 周平¹⁾
 京都大学工学研究科 正会員 白土 博通

京都大学工学研究科 正会員 八木 知己
 京都大学工学研究科 学生員 岡本 健吾
 1)研究当時京都大学大学院

1.はじめに

斜張橋ケーブルのドライステート・ギャロッピングの発現について、Matsumoto¹⁾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している。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く、より詳細に検討する必要がある。本研究では、カルマン渦を抑制する目的で、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。

2.実験概要

直径 $D=50[\text{mm}]$ のアルミニウム円柱を模型として用いた。ケーブル模型は、Fig.1 に示すように、円断面ケーブル模型に加えて、高さ $5[\text{mm}]$ 、幅 $5[\text{mm}]$ の矩形突起を巻きつけ角 27° で 12 本巻きつけたスパイラル突起付きケーブル模型²⁾、高さ $3.5[\text{mm}]$ の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、高さ $3[\text{mm}]$ 、縦 $5[\text{mm}]$ 、幅 $3[\text{mm}]$ の直方体突起を貼り付けた直方体突起付きケーブル模型を用いた。模型姿勢は水平面内傾斜角 $\beta=0^\circ$ 及び $\beta=45^\circ$ の 2 種類とした。また、傾斜ケーブル模型の風洞実験において、過去の研究³⁾から、端部の影響が大きいことが知られているが、スパン中央付近では端部の影響を受けにくいということが報告されている。そのため、 $\beta=45^\circ$ の計測では、端部の影響を受けずに、部分的に空気力の測定が可能な斜張橋ケーブル模型を用いて、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。本研究で測定した静的空気力から、以下のように抗力係数 C_D を求めた。

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

但し、 F_D 、 ρ 、 U 、 D は、抗力[N/m]、空気密度[kg/m³]、風速[m/s]、ケーブル直径[m]である。

また、非定常空気力測定実験では、強制加振周波数を $f_0=2.0[\text{Hz}]$ 、強制加振振幅を $2\eta=20[\text{mm}]$ とした。本研究で測定した非定常空気力(揚力)の模型振動数成分は、次の様に Scanlan⁴⁾により提案された非定常空気力係数 H_1^* として表した。

$$H_1^* = -\frac{L_{\eta_0} \sin \Psi_{L_{\eta_0}}}{\rho(D/2)^2 \omega^2 \eta}$$

但し、 L_{η_0} 、 $\bar{\eta}$ 、 $\Psi_{L_{\eta_0}}$ 、 ω は、鉛直たわみ 1 自由度振動時の非定常揚力(下向き正)の振幅[N/m]、鉛直たわみ変位(下向き正)の片振幅[m]、鉛直たわみ変位に対する非定常揚力の位相遅れ、円振動数[rad/s]である。 H_1^* は、空気減衰に対応し、正の値が負減衰、即ち空力的に不安定であることを示す。

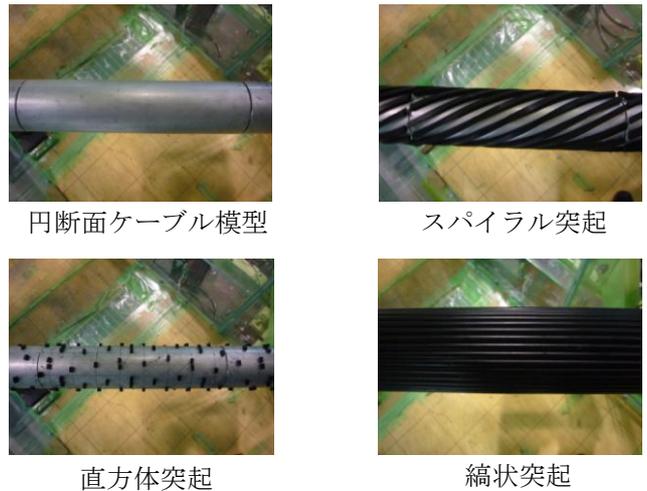


Fig.1 模型の表面形状

3.実験結果

$\beta=0^\circ$ のケースについて、模型静止時の抗力係数 C_D を Fig.2 に、後流域における鉛直方向変動風速(測定位置は模型断面中心から上方に $0.5D$ 、模型後縁端から後方に $1.0D$ の位置)の標準偏差を Fig.3 に示す。 C_D について、円断面ケーブル模型と比較して、他の 3 模型は低い値を示していることが分かる。これは、表面粗度による効果(直方体突起付きケーブル模型、縞状突起付きケーブル模型)、並びにスパン方向の剥離点変化(スパイラル突起付きケーブル模型)によるものであると考えられる²⁾。また、カルマン渦の強弱と C_D の増減が密接に関係していることが確認できる。しかし、別途行われた強制加振実験で H_1^* が負の値を示していることから、 C_D 値を下げるだけでは、ギャロッピングが発現しないことがわかる。

$\beta=45^\circ$ のケースについて、模型静止時の抗力係数 C_D 、非定常空気力係数 H_1^* をそれぞれ Fig.4、Fig.5 に、軸方向流測定実験の結果を Fig.6 に示す。Fig.6 は模型静止時に模型断面中心、模型後縁端から後方に $1.0D$ の位置で測定した軸方向流を風洞風速で除して、無次元化したものである。円断面ケーブル模型の H_1^* が負の値を示し、安定化しているのは、臨界レイノ

キーワード 斜張橋ケーブル, ドライステート・ギャロッピング, 抗力係数, カルマン渦

連絡先 〒615-8530 京都市西京区京都大学桂 C1-3-457 橋梁工学研究室 TEL075-383-3170

ルズ数に達していないため、並びに軸方向流が弱い
ためであると考えられる。但し、実橋における軸方
向流は本実験結果より強い可能性があり、ギャロッ
ピングが発現する可能性が考えられる。

スパイラル突起付きケーブル模型は、
軸方向流が他の模型と比べて強いにもか
かわらず、 H_1^* が負の値を取り、安定
化している。従って、軸方向流の強さだ
けでは、ギャロッピング安定性が議論で
きないことが明らかとなった。安定化し
た理由としては、スパン方向の剥離点変
化が考えられ、カルマン渦の放出の抑制
によって、必ずしもギャロッピングが不
安定化するという結果にはならなかつ
た。縞状突起付きケーブル模型におい
ては、表面粗度の効果で、カルマン渦放
出が抑制され、 H_1^* が正となっている。カ
ルマン渦強度とギャロッピング安定性
の関係は、未だ明らかではないが、本模
型においては、スパン方向に剥離点変
化が比較的一定になっているため、顕著
に不安定化していると思われる。直方
体突起付きケーブル模型においては、縞
状突起付きケーブル模型と同様に H_1^* が
正となっている風速域があるが、励振
力は極めて小さくなっている。これは、
縞状突起付きケーブル模型に比べて、
模型周りの流れの3次元性が強まっ
ているためであると考えられる。従
って、円断面ケーブルにおいても、臨
界レイノルズ数に達するまで風速を
上げると、同様にギャロッピングを
発現する可能性があると思われる。

さらに、縞状突起付きケーブル模型
について、強制加振周波数を変化させ、
 $f_0=1.4[\text{Hz}]$ でも計測したところ、
Fig.7に示すように、ギャロッピング
の発現風速はレイノルズ数ではなく、
無次元風速に依存する可能性が示唆
されたが、今後より詳細な検討を行
う必要がある。

4. 結論

- 1) 斜張橋ケーブルのドライステート・ギャロッピングを不安定化させる要因として、表面粗度による効果、軸方向流による効果があり、一方、安定化させる要因として、スパン方向の剥離点変化等が考えられる。
- 2) ドライステート・ギャロッピングの発現は、レイノルズ数ではなく、無次元風速に依存している可能性が考えられるが、今後より詳細な検討が必要である。

謝辞

本研究は、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。

- 円断面ケーブル模型
- △ 縞状突起付きケーブル模型
- ◇ スパイラル突起付きケーブル模型
- 直方体突起付きケーブル模型

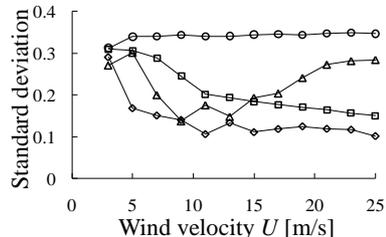


Fig.3 後流域の鉛直方向変動風速の標準偏差 ($\beta=0^\circ$, 静止時)

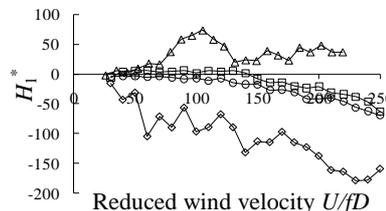
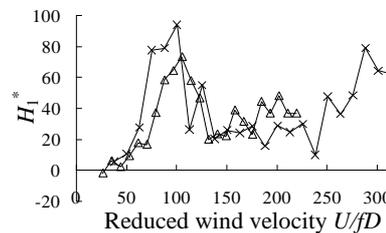


Fig.5 非定常空気力係数 H_1^* ($\beta=45^\circ$)



△ $f_0=2.0[\text{Hz}]$ × $f_0=1.4[\text{Hz}]$
Fig.7 非定常空気力係数 H_1^*
($\beta=45^\circ$, 縞状突起付きケーブル模型, $f_0=2.0[\text{Hz}]$, $1.4[\text{Hz}]$)

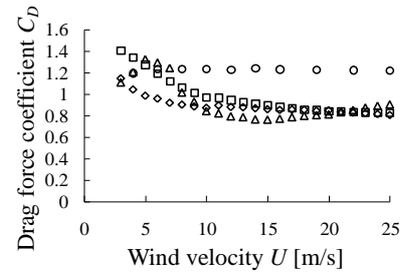


Fig.2 抗力係数 C_D ($\beta=0^\circ$, 静止時)

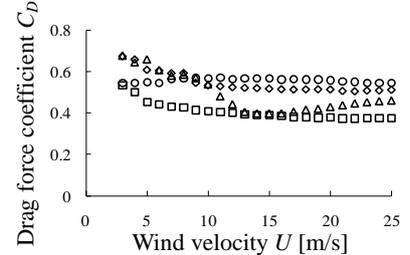


Fig.4 抗力係数 C_D ($\beta=45^\circ$, 静止時)

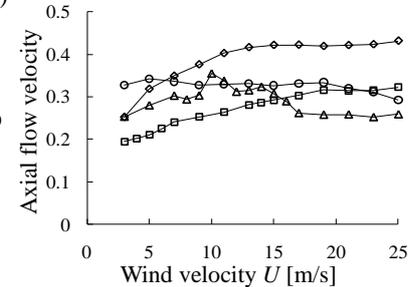


Fig.6 軸方向流 ($\beta=45^\circ$, 静止時)

参考文献

- 1) M.Matsumoto, T.Yagi, Y.Adachi, H.Hatsuda and T.Shima: Karman vortex effects on aerodynamic instabilities of inclined stay-cables, Proc. of the 12th Intl. Conf. on Wind Engineering, 2007, pp.175-182.
- 2) 八木知己, 岡本健吾, 榊一平, 頃安弘, 梁子豊, 成田周平, 白土博通, 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22回風工学シンポジウム論文集, 2010年,
- 3) T.Yagi, H.Naito, Z.Liang, H.Shirato: Evaluation of aerodynamic forces on inclined cable in consideration of end conditions of model for wind tunnel tests, Proceedings of the Sixth International Symposium on Cable Dynamics, 2009, pp.151-158.
- 4) R.H. Scanlan, J.J. Tomko: Airfoil and bridge deck flutter derivatives, Journal of Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE., vol.97, EM6, 1971, pp.1717-1737.