

臨界レイノルズ数帯域に着目した斜張橋ケーブルの空力現象に関する研究

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○島 宜範 京都大学大学院工学研究科 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 西松建設株式会社 正会員 足立 洋一
 京都大学大学院工学研究科（研究時） 劉 慶寛 京都大学大学院工学研究科 学生員 初田 英明

1. はじめに

近年, ある斜張橋ケーブルにおいて, 雨なしギャロッピングと考えられる大振幅振動現象が確認され, その発生要因としてケーブル後流域に形成される軸方向流と臨界レイノルズ数帯域に達していたことが考えられた. 本研究では, 軸方向流と臨界レイノルズ数帯域に達することがどちらもカルマン渦放出を抑制するという点に着目し, カルマン渦放出という観点から各種風洞実験を行い, 斜張橋ケーブルの空力特性について考察を行う.

2. 実験概要

水平偏角 $\beta=0^\circ$ に大型ケーブル模型($D=158\text{mm}$)を支持して模型に表面粗度を設け, 高風速域まで実験を行う. 本研究では亜臨界・臨界・超臨界の各レイノルズ数帯域におけるケーブル模型の空力特性, 及び模型断面周りの流れ場を調査し, カルマン渦の放出特性とギャロッピング不安定性との関連性及びその発生機構について考察する.

3. 考察

3.1 ケーブル模型の静的空気力特性

静的空気力係数及び変動揚力のスペクトル解析結果図を Fig.1, 2 に示す. $Re=100000$ 程度から抗力が減少し始め, $Re=150000$ 付近で最低値を示し, 再び増加することが確認された. 抗力が減少し始めるレイノルズ数付近では定常揚力が発生しているが, 抗力が再び増加し始めたレイノルズ数付近では定常揚力は確認されなくなった. 抗力が減少するレイノルズ数付近では, 変動揚力係数及び変動揚力のスペクトルのピークも減少していることから, カルマン渦放出が弱まり, 背面負圧の絶対値が低下することで, 臨界レイノルズ数帯域に達していると考えられる. また, 抗力が再び増加し始めているレイノルズ数付近では, 超臨界レイノルズ数帯域に達していると考えられる.

3.2 模型断面周りの流れ場特性

熱線流速計によって模型断面周りの風速を測定した結果を Fig.3 に示す. 各計測位置における模型上下面の差の接近風速に対する割合をプロットしている. Fig.1 において定常揚力が発生している臨界レイノルズ数帯域で, 模型中央上下面に風速差が生じていることが確認され, その差が揚力係数とほぼ同様の傾向を示すことが確認できる. このことから, 臨界レイノルズ数帯域においては, 流れ場の対称性を保っているとされるカルマン渦放出が抑制されることで, 剥離点が不安定に存在していると考えられる. その結果, 模型上下面に風速差が発生し, 圧力差が生じることで定常揚力が発生していると考えられた.

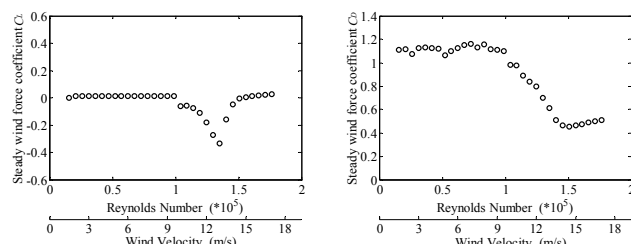


Fig.1 Steady wind force coefficients of the cable model with artificial surface-roughness ($\beta=0^\circ$)

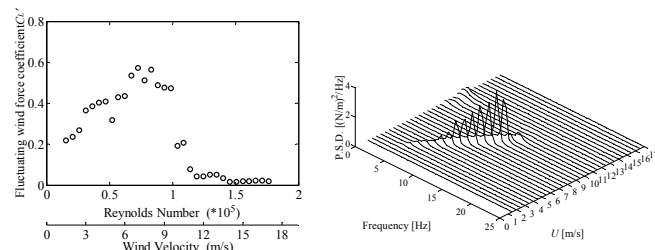


Fig.2 Coefficient and P.S.D. of the fluctuating lift force on the cable model with artificial surface-roughness ($\beta=0^\circ$)

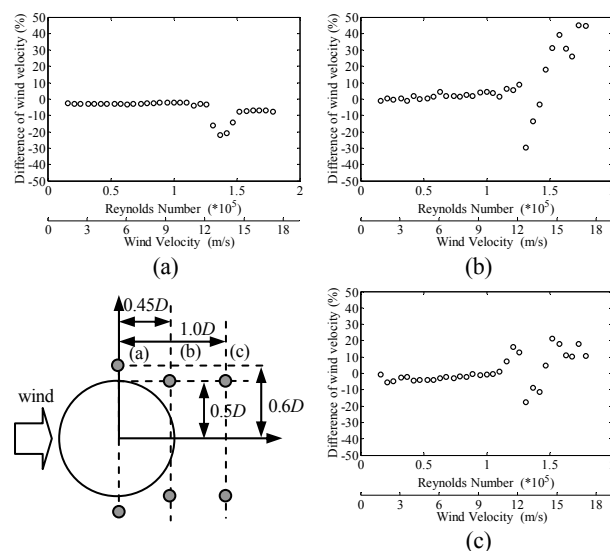


Fig.3 Re - Difference of wind velocity between upper and lower around the cable model with artificial surface-roughness ($\beta=0^\circ$)

キーワード 斜張橋ケーブル, ギャロッピング, カルマン渦, 臨界レイノルズ数

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-753-5091

3.3 非定常空気力特性

レイノルズ数によって空力特性及び流れ場が変化することから、レイノルズ数を固定し、そのレイノルズ数における空力特性を有した状態で振動数を変化させ、無次元風速を決定した。

Fig.4にたわみ1自由度強制加振実験から得られた各レイノルズ数における非定常空気力係数 H_1^* を示す。亜臨界レイノルズ数帯域及び超臨界レイノルズ数帯域では、 H_1^* は風速の増加と共に負の値を示しており、亜臨界レイノルズ数帯域ではカルマン渦によって、超臨界レイノルズ数帯域では剥離点が上下とも模型後流側に固定されることで流れ場に対称性が保たれ、励振力が作用しなかったと考えられる。一方、臨界レイノルズ数帯域では、ある無次元風速域において、 H_1^* が正の値を示すケースも確認された。

3.4 空力振動特性

自由振動実験結果を Fig.5 に示す。 $U=2.5\text{m/s} \sim 4.5\text{m/s}$ ($U/fD=5 \sim 9$) 付近でカルマン渦励振が発現している。また、臨界レイノルズ数帯域に達して非対称な流れ場になり、定常揚力が発生している風速域では、非定常振幅振動が発生しており、 $U=13.0\text{m/s}$ ($Re=135000$) 付近にピークが確認される。

3.5 非定常空気力と準定常空気力の比較

Fig.5に見られた臨界レイノルズ数帯域におけるピークの要因をより詳細に検討するために、 H_1^* を用いた準定常空気力と静的空気力係数を用いた準定常空気力を比較検討することとした。非定常空気力は $F = \frac{1}{2} \rho U^2 D \left\{ k H_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + k^2 H_4^* \frac{\eta}{D/2} \right\}$ と表せる（下向き正）。また、単位スパン幅あたりの揚力は

$L = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_L = \frac{1}{2} \rho U^2 D \frac{dC_L}{d\alpha} \cdot \frac{\dot{\eta}}{U} \cdot F_{(k)}$ と表される（上向き正）。準定常理論で考えるため、 $F_{(k)}=1$ とすると、 $\frac{dC_L}{d\alpha} = -k H_1^*$ と表せる。Fig.6に k と $\frac{dC_L}{d\alpha}$ の関係を示す。また、定常揚力が発生した場合の準定常空気力を算出する際に用いる揚力係数を $C_{Lre} = C_L + \frac{dC_L}{dU} \cdot \Delta U$ とすると、準定常空気力は $F = \frac{1}{2} \rho D U^2 \left\{ \frac{dC_L}{dU} \frac{1}{2} \frac{\dot{\eta}^2}{U} + \frac{C_D}{U} \dot{\eta} + C_L \right\}$ （上向き正）と表せる。非定常空気力から算出した $\frac{dC_L}{dU}$ とレイノルズ数の変化を考慮した場合の準定常揚力から算出した空力減衰項 $\frac{dC_L}{dU} \cdot \frac{1}{2} \frac{\dot{\eta}}{U} + \frac{C_D}{U}$ との比較を行う。

Fig.7,8,9にレイノルズ数と $\frac{dC_L}{d\alpha}$ 、レイノルズ数と $\frac{C_D}{U}$ 、 $\frac{dC_L}{dU}$ と $\frac{dC_L}{d\alpha} - \frac{C_D}{U}$ の関係を示す。亜臨界レイノルズ数帯域及び超臨界レイノルズ数帯域では定常揚力が発生せず、 $\frac{dC_L}{dU}$ がほぼ0の値を示しており、 $\frac{dC_L}{d\alpha} - \frac{C_D}{U}$ は0.5付近に点在している。臨界レイノルズ数帯域では定常揚力が発生しており $\frac{dC_L}{dU}$ が正の値や負の値を示し、 $\frac{dC_L}{d\alpha}$ の増加に伴って $\frac{dC_L}{d\alpha} - \frac{C_D}{U}$ が増加する傾向が見られる。よって臨界レイノルズ数帯域では、制振力として働く抗力が低減し、定常揚力が作用し、その際に相対風速が増加することで振動が励起されやすいと考えられる。

4. 結論

臨界レイノルズ数帯域においてカルマン渦放出が弱められた際に、カルマン渦によって保たれていた流れ場の対称性が崩れ、流れ場が非対称になることで、模型上下面の風速差による圧力差が生じ、定常揚力が発生することが確認された。そして、その揚力が発生している際に模型が振動することで、模型上下面の風速差がより増大され、振動が励起される可能性が示唆された。

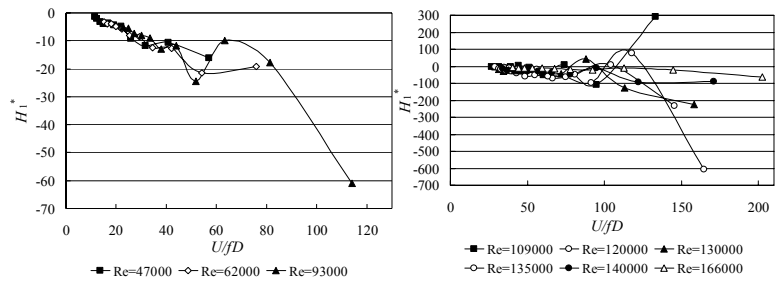


Fig.4 Aerodynamic derivative H_1^* for various Reynolds number

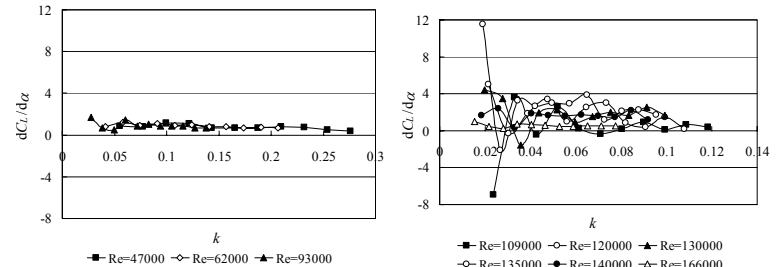


Fig.6 $dC_L/d\alpha$ for various Reynolds number

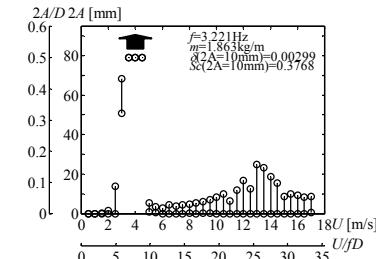


Fig.5 Velocity-Amplitude diagram

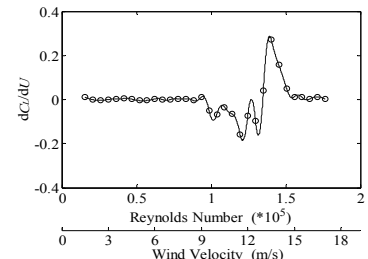


Fig.7 $Re - dC_L/d\alpha$

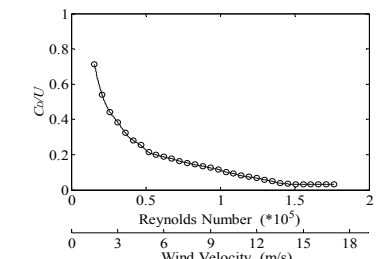


Fig.8 $Re - C_D/U$

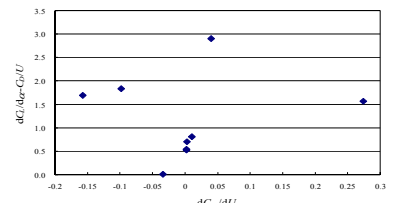


Fig.9 $dC_L/dU - (dC_L/d\alpha - C_D/U)$