

## 第 I 部門

## カルマン渦強度から見た斜張橋ケーブルの非定常空気力及び空力振動特性に関する研究

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○初田 英明 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 京都大学大学院工学研究科 学生員 足立 洋一  
 京都大学大学院工学研究科 学生員 劉 慶寛 京都大学工学部 学生員 島 宜範

## 1.はじめに

斜張橋ケーブルを模擬したケーブルを用いた実験において、 $\beta=0^\circ, 45^\circ$ の状態では模型の表面粗度を変化させ、亜臨界・臨界・超臨界の各レイノルズ数帯域において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た。その結果、レイノルズ数（風速）によってケーブル模型の空力特性及び流れ場が変化し、臨界レイノルズ数帯域においてはカルマン渦放出が抑制され、流れ場が非対称になることで定常揚力が発生することが確認された。これをふまえ、非定常空気力特性及び振動特性について考察を加えた。

## 2-1. 非定常空気力特性

レイノルズ数によって異なった空力特性を示すことは、各レイノルズ数によって異なる断面を扱っているということに相当すると考えられる。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、非定常空気力を測定する際に、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.1 に  $\beta=0^\circ$  に模型を設置したたわみ 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。 $H_1^*$  が正の値を示すと振動が励起される可能性があると考えられている。亜臨界レイノルズ数帯域（ $Re=47000, 62000, 93000$ ）及び超臨界レイノルズ数帯域（ $Re=140000, 166000$ ）では、 $H_1^*$  は風速の増加と共に負の値を示している。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で固定されることによって、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（ $Re=109000, 120000, 130000, 135000$ ）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。

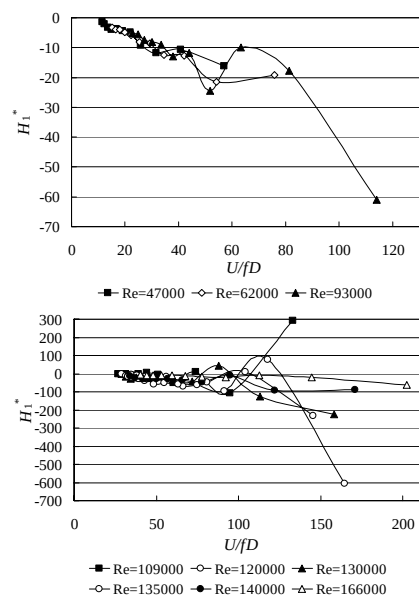


Fig.1 Aerodynamic derivative  $H_1^*$  for various Reynolds number

## 2-2. 空力振動特性

$\beta=0^\circ$  及び  $45^\circ$  の自由振動実験結果を Fig.2, 3 に示す。 $\beta=0^\circ$  の場合、 $U=2.5\text{m/s} \sim 4.5\text{m/s}$  付近（ $U/fD=5 \sim 9$ ）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、 $U=13.0\text{m/s}$ （ $Re=130000$ ）付近にピークが確認される。一方  $\beta=45^\circ$  の場合、

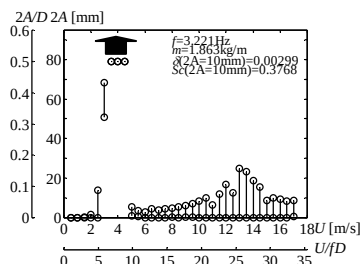


Fig.2 Velocity-Amplitude diagram ( $\beta=0^\circ$ )

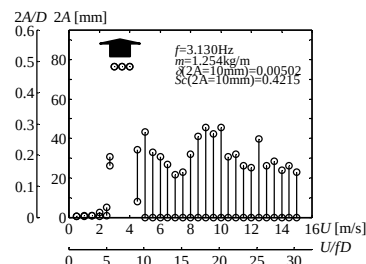


Fig.3 Velocity-Amplitude diagram ( $\beta=45^\circ$ )

$U=3.0\text{m/s} \sim 4.5\text{m/s}$ （ $U/fD=6 \sim 10$ ）でカルマン渦励振が発生している。ケーブル模型が傾斜されると模型後流域に軸方向流が生成され、軸方向流が存在する場合、カルマン渦の生成が阻害されるため発散振動が発現すると考えられている。しかし、 $U=5.0\text{m/s}$ （ $U/fD=10$  付近）以上の風速でも、非定常振幅の振動が発生しているものの発散振動には至らなかった。他研究機関<sup>1)</sup>では臨界レイノルズ数帯域における傾斜ケーブル模型において発散振動が確認されているが、本研究においては発散振動は確認されなかった。その要因として端部条件の違いが考えられる。本研究

では端板をつけて実験を行ったために十分に強い軸方向流が生成されなかったものと考えられる。これより、発散振動は軸方向流と臨界レイノルズ数の二つの要因によって励起される可能性が示唆された。

### 2-3. 非定常空気力と準定常空気力の比較

Fig.2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、 $H_1^*$ から算出し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。非定常空気力は以下の式で表せる。ただし、 $\eta$ :たわみ変位(下向き正)(m),  $(\dot{\cdot})$ :時間微分,  $U$ :風速(m/s),  $\rho$ :空気密度( $N/m^3$ ),  $D$ :代表長(直径)(m),  $k$ :換算振動数( $=D\omega/2U$ )

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 D \left\{ k H_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + k^2 H_4^* \frac{\eta}{D/2} \right\} \quad (\text{下向き正})$$

また、単位スパン幅あたりの揚力は次のように表される。

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_L = \frac{1}{2} \rho U^2 D \frac{dC_L}{d\alpha} \cdot \frac{\dot{\eta}}{U} \cdot F_{(k)} \quad (\text{上向き正})$$

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.4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  $\frac{dC_L}{d\alpha}$  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.5, 6, 7にレイノルズ数と  $dC_L/dU$ ,

レイノルズ数と  $C_D/U$ ,  $dC_L/dU$  と  $dC_L/d\alpha - C_D/U$  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、 $dC_L/dU$  がほぼ0の値を示しており、 $dC_L/d\alpha - C_D/U$  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  $dC_L/dU$  が正の値や負の値を示し、 $dC_L/dU$  の増加に伴って  $dC_L/d\alpha - C_D/U$  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る可能性が考えられる。

### 3. 結論

非定常空気力特性より、亜臨界レイノルズ数帯域ではカルマン渦によって、また、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で固定されることによって、流れ場に対称性が保たれ、空力的に安定であると考えられる。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。

また自由振動実験において、 $\beta=0^\circ$  のケースでは  $U=13.0\text{m/s}$ ,  $U/D=26$  付近に、振幅が局所的に大きくなる現象が確認された。この風速では  $dC_L/dU$  が負の値を示しており、定常揚力が発生した場合にケーブル模型が振動することで相対迎角を持ち、模型上下面の流速差が増長され、励振力が発生する可能性が示唆された。 $\beta=45^\circ$  のケースでは発散振動は発現せず、その理由として軸方向流が弱かった可能性、発散振動は軸方向流と臨界レイノルズ数の二つの要因で励起される可能性が示唆された。

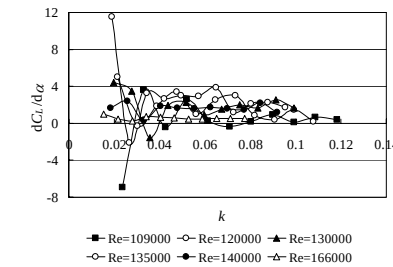
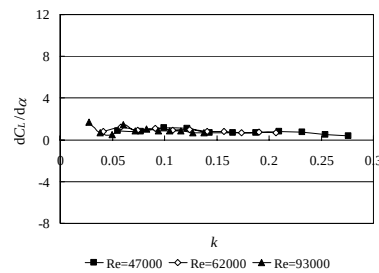


Fig.4  $dC_L/d\alpha$  for various Reynolds number

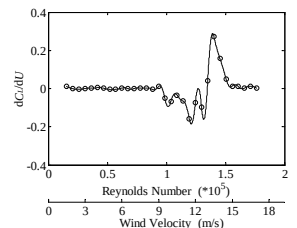


Fig.5 Re v.s.  $dC_L/d\alpha$

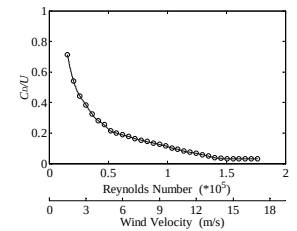


Fig.6 Re v.s.  $C_D/U$

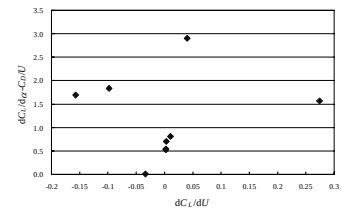


Fig.7  $dC_L/dU$  v.s.  $(dC_L/d\alpha - C_D/U)$