

直列2本円柱の空力弾性不安定振動

金沢大学工学部 正会員 岡島 厚
住友ゴム工業(株) 正会員 松本達治
金沢大学大学院 ○石黒康秀

1. まえがき 明石海峡大橋では2本のハンガーケーブルが流れ方向に対してケーブル直径の約9倍の間隔で直列に配置された際に下流側ケーブルに大きな振動を生じた。この振動現象は従来の低風速から高風速までの広い風速範囲で発生したウェークギャロピングとは異なり、高風速領域でのみ発生することが確認され、この振動をいかに抑制するかが橋梁構造物の耐風性能に関する大きな課題となっている。

本研究ではゲッチング型風洞装置を用い、流れ方向に直列設置した2つの円柱の迎え角や間隔を変化させるとともに下流側円柱の表面が滑らかな場合と表面粗さがある場合の流体力と振動振幅の測定を行い、乱れ強さによる境界層の乱流遷移の影響と振動現象の相関を調べることで本振動発生メカニズム及び発生条件や振動特性について明らかにする。

2. 実験装置および方法 本実験では、測定断面が800mm×800mm、測定部長さ2700mmの風洞を使用し、風速範囲は $U=0.5\sim21.0\text{m/s}$ で、模型がない場合の乱れ強さは0.5%以下である。供試模型は直径 $D=60\text{mm}$ 、スパン長さ $L_M=790\text{mm}$ の亚克力製円柱で流れに対して直列に設置した。模型の風洞測定部における閉塞率は7.5%であり、閉塞効果による補正は施していない。端板には直径240mmで厚さ0.8mmのアルミ板を用いた。上流側円柱は風洞壁に固定し、上・下流側円柱の相互のくい違い位置を変化させる場合は上流側円柱を中心位置から直角方向に $T=0D\sim3D$ まで移動した。また円柱の流れ方向間隔は $L=8, 12D$ とした。下流側円柱は表面が滑らかなものおよび円柱境界層の乱流遷移の促進を図り、剥離点を円柱後方に移動させる目的で全体に表面粗さ($d/D=6.7\times10^{-3}$; d : ガラスビーズ粒子径)を施した。流体力と振動振幅測定は下流側円柱のみで行い、静特性を測定する場合には下流側円柱を一分力測定器に固定し、流体力は円柱の両端において一分力測定器に貼られた歪みゲージにより検出し、動歪み計を介してデータをA/D変換した。また、下流側円柱を自由振動させる場合、円柱模型両端を4対のコイルバネにより風洞測定部外側に弾性支持し、模型円柱が流れに直角方向に並進運動するように制御した。振動振幅は円柱模型の片側端部にて測定し、レーザー変位計を介してデータをA/D変換した。また、風速はピトー管を用いてマノメーターで測定した。

3. 表面が滑らかな場合

3.1. 下流側円柱の静特性 予備実験として単独円柱の抗力を測定を行ったところ、平均抗力係数 $C_D (=2F_x/(\rho D L M U^2))$ 、 F_x : 流れ方向の流体力、 ρ : 空気の密度)は、1.05～1.15を示した。また、単独円柱の後領域内における乱れ強さ $I_u (=u_{rms}/U, u_{rms}$: 流れ方向速度のrms値)は、本実験の風速領域内で15～20%である。このことは従来の研究⁽¹⁾より円柱境界層の乱流遷移を促進させ、臨界レイノルズ数 Re_{cr} を低下させることが知られており、この I_u では、 $Re_{cr}=8.0\times10^4\sim9.0\times10^4$ になると推測される。下流側円柱の $Re (=UD/\nu, \nu$: 空気の動粘度)の変化に対する $L=12D$ での平均抗力係数 C_D 、平均揚力係数 $C_L (=2F_y/(\rho D L M U^2))$ 、 F_y : 流れに直角方向の流体力)をそれぞれ図1、図2に示す。上流側円柱の後流の乱れ強さの影響を強く受ける $T=0$ の場合、図1に示すように Re 全域にわたって他に比べて相対的に小さい値を示す。また、 C_D の値は風速の増加に伴い緩やかに $C_D=0.3$ に漸近し、従来の研究⁽²⁾結果と良く一致している。 $T=1D, 2D$ でも定性的に同様な変化を示すが C_D は $T=0$ の場合に比べ大きな値を示し、 T が大きくなるに従い次第に乱れ強さが小さくなっていることがわかる。 $T=3D$ では単独円柱の値とほぼ同じ C_D 値を示す。一方、 C_L についても T が大きくなるにつれ次第に単円柱の値に近づくこと

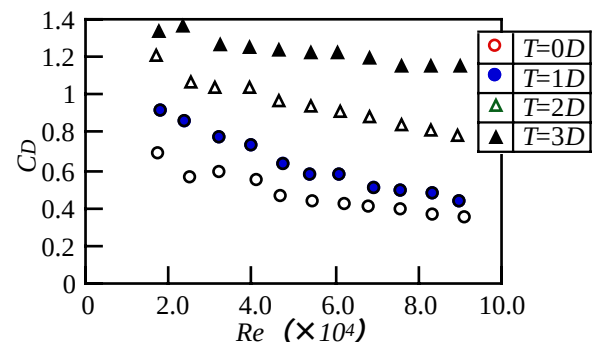


図1-滑らかな下流側円柱の C_D ($L=12D$)

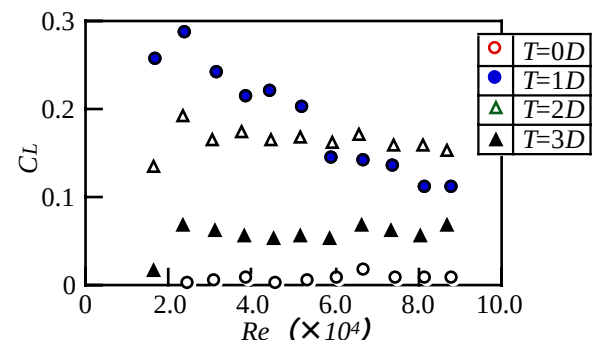


図2-滑らかな下流側円柱の C_L ($L=12D$)

Keywords: Aeroelastic instability, galloping, surface roughness, tandem arrangement, turbulent intensity

〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20 金沢大学工学部機能機械工学科 Tel. 076-234-4744 FAX 076-234-4746

がわかる。 $T=1D$ では低風速領域で大きな揚力値が作用するが、これは上流側円柱の後流により下流側円柱に局所的に乱れの影響を受けることによるものと想定され、風速が増加するに従い、円柱表面に与えられる乱れ強さの一樣性が増加し、 CL の値は $T=0D$ の実験値に近似する。 $T=2D$ および $T=3D$ では風速が 5m/sec 以上ではほぼ一定の CL 値を示し、風速が増加しても乱れ強さの分布に変化が少ないことがわかる。次に直角方向の無次元相対位置 T/D に対する下流側円柱の CL をそれぞれ図4に示す。 CD 値はすべての風速に対して、 T/D が増加するにつれて増加し、最大値を示した後減少する。 CL の最大値は風速が増加するに従って、 $T/D=1.0$ から 2.0 へと移行し、その値は次第に減少する。注目すべき点は、最大値を過ぎると CL は、負勾配をもつことである。

3.2. 下流側円柱の振動特性 換算流速 $Vr (=Uf_n/D, f_n$: 供試模型の固有振動数) に対する応答振幅 $\eta_{rms} (=y/D, y$: 振動振幅) を図5に示す。供試模型の固有振動数 $f_n=2.93\text{Hz}$, 対数減衰率 $\delta=0.0044$, スクルートン数 $C_n (=2m\delta/(\rho D^2 L_m), m$: 供試模型の質量) $=3.73$ である。 Vr の増加に伴い、バフエーティングに類似した微少振動が発生し、応答振幅を増加させても本実験での流速範囲ではギャロッピング振動には至っていない。

4. 全面的に表面粗さがある場合の振動特性 $L=8D$ に配置させた表面全体に粗さをつけた下流側円柱の Vr に対する応答振幅 η_{rms} を図5に示す。供試模型の固有振動数 $f_n=2.88\text{Hz}$, 対数減衰率 $\delta=0.0053$, $C_n=4.65$ である。 $T=0D, 1D$ において下流側円柱が上流側円柱の後流領域に存在する $T=0D, 1D$ は、上流側円柱から放出させる渦によるバフエーティングに類似した微少振動のみで大振幅の振動は観察されなかった。 $T=2D$ においては、微少振動が観測されたが、 η_{rms} は 1.0 以下である。しかし、 $T=3D$ では $Vr=85 \sim 95$ の領域で大振幅振動が発生する。このことは、後流領域の境界線上付近に位置していることから、円柱上面側では単独円柱と同様な Re に依存した亜臨界領域の境界層が形成されているが、下面側では後流領域内の乱れ強さと表面粗さの影響により乱流遷移が促進され図3に示した揚力曲線より中心に引きつけられる流体力が発生しているものと考えられる。しかし、 $Vr > 95$ では、他の直角方向距離 T と同様に振動がとまる。これは、本実験での表面粗さ円柱の臨界領域が $Re_{cr}=8.0 \times 10^4 \sim 9.0 \times 10^4$ の付近であることよりそれ以上の風速域では円柱上面側の境界層も同様に乱流遷移が促進されたためであると考ええる。また、 $L=12D$ に配置させたときの表面粗さ円柱の応答振動特性を図6に示す。 $L=8D$ と同様に $T=0D \sim 2D$ ではギャロッピング振動は観察されなかった。しかし、 $T=3D$ では $Vr=90 \sim 95$ の領域でギャロッピング振動が発生する。これは、 $L=8D$ より狭い風速領域で振動がおきている。

参考文献

1. M. M. Zdravkovich : Flow around circular cylinder, Oxford univ press, 1997
2. Parkison, G. V, Smith, J. D : The Square Prism as an Aeroelastic Non-linear Oscillator, Quartary Jour. Mech. and Applied Mathematics, Vol. XVII, 1964

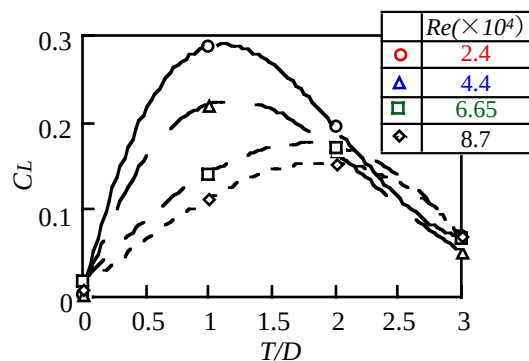


図3- 滑らかな円柱の T/D に対する CL ($L=12D$)

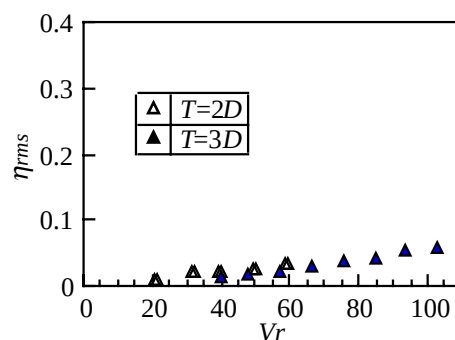


図4- 滑らかな円柱の応答振幅 η_{rms} ($L=12D$)

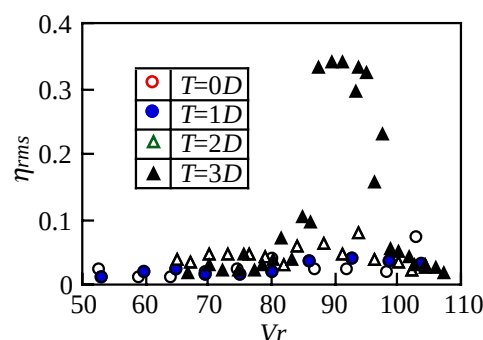


図5- 全面粗さ円柱の応答振幅 η_{rms} ($L=8D$)

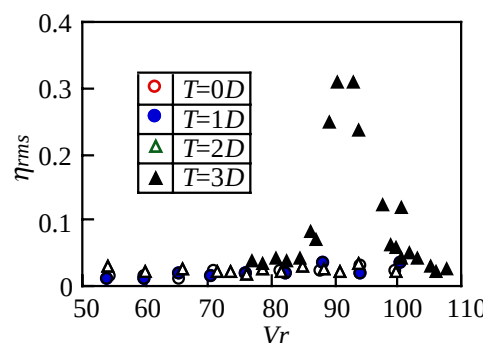


図6- 全面粗さ円柱の応答振幅 η_{rms} ($L=12D$)