

The flow-induced in-line vibration of circular cylindrical structures

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16564

氏名	中村 晶
生年月日	
本籍	兵庫県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第570号
学位授与の日付	2003年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	円柱状構造物の流れ方向流力振動
論文審査委員(主査)	岡島 厚(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	木村 繁男(自然計測応用研究センター・教授) 上野 久義(工学部・教授) 木綿 隆弘(工学部・助教授) 佐藤 恵一(金沢工業大学・教授)

学位論文要旨

Abstract The flow-induced in-line oscillation of some cantilevered circular cylinders and cantilevered tapered cylinders were experimentally studied through free-oscillation tests in a water tunnel. The response displacement amplitude of the cylinder tip was measured at reduced velocity from 1.0 to 4.0. Each cantilevered cylinder was supported by a plate spring mounted on the water tunnel wall. The cylinder aspect ratio was varied from 5 to 21 to investigate the effect of aspect ratio on the response displacement. It is found that cylinders with aspect ratios of 5 and 10 have one excitation region, while cylinders with aspect ratios of 14 and 21 have two excitation regions. The aspect ratio, therefore, affects the amplitude of the excitation regions. The influence of end-effect was also investigated using cylinders with an end plate attached to the free end. Since the cylinders with an end plate show two excitation regions, even at an aspect ratio of 5, the flow around the free end of a cantilevered cylinder causes the end-effect. The cylinder taper ratio was varied from 0% to 10% to investigate the effect of taper ratio on the response displacement. It is found that cylinders with taper ratios of 2.5% to 10% have two excitation regions, while cylinders with taper ratios of 0 and 1% have one excitation region. The taper ratio, therefore, affects the amplitude of the second excitation region. The maximum amplitude of each excitation region decreases in proportion to C_n . There is no vibration at $C_n > 2.5$ with cylinders and tapered cylinders, the suppressing criterion for in-line oscillation is $Vr < 3.3$ and $C_n > 2.5$. There is no vibration at $Vr < 1.0$ with cylinders and tapered cylinders, if the reference diameter of tapered cylinder D_{ref} is $d_{min} + (d_{max} - d_{min}) / 3$, the avoiding criterion for in-line oscillation is $Vr < 1.0$. These criteria of JSME standard "Guideline for Evaluation of Flow-Induced Vibration of a Cylindrical Structure in a Pipe," JSME S012-1998 are, therefore, valid for the cantilevered cylinders and cantilevered tapered cylinders.

1. 緒言

流れの中に流線型でない物体があると物体表面で流れの剥離が生じ、物体近傍には複雑な渦が生じる。この渦により構造物には渦励振やギャロッピングなどの自励振動が生じる場合がある。一般に振動の回避は構造物が持つ固有振動数を振動の発生機構が持つ固有振動数から十分に離すこと、共振を避けることで達成される。また、振動の抑制は十分な減衰を構造物に持たせることで達成される。本研究と最も関係の深い設計指針として、日本機械学会の「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」（以下指針という）がある。これは、“一様流中に置かれた円柱状構造物の、流れにより励起される振動に対する評価方法”を定めたものである。円柱での流体励起振動は比較的实验データも多く、振動の発生する範囲もよく研究されている。円柱には、渦発生周波数や流れによる物体に働く抗力が急変する“臨界レイノルズ数”が存在する。この臨界以下で振動の発生する範囲、条件を整理したものがこの指針である。

この指針による設計が必要な代表的な構造物として温度計さや管があるが、これテーパ円柱で有限な長さの構造物である。指針ではこのような構造物の形状を網羅して規定しているわけではない。そこで構造物形状等の因子が流力振動に及ぼす影響を調べ、評価に取り入れる必要がある。これが本研究の目的である。

2. 有限長円柱の振動特性に対するアスペクト比の影響

指針の基礎となったデータは岡島らの風洞による2次元円柱の振動実験結果である。本研究はアスペクト比 $AR (=L/d, L: \text{円柱長さ}, d: \text{円柱外径})$ が5~21の範囲で片持ち弾性支持された有限長円柱の振動特性を調べた。その結果を図1に示す。

縦軸は円柱先端の流れ方向の無次元振動振幅の Root Mean Square 値 ξ_{rms} ($=A/d, A: \text{先端変位振幅}$) であり、横軸は換算流速 $V_r (=U/fd, U: \text{平均流速}, f: \text{固有振動数})$ である。

このようにアスペクト比が10以下では流れ方向に換算流速に対して一つの励振域が現れるのに対し、アスペクト比が14

以上では流れ方向に二つの励振域が生じる。2次元円柱では風洞でも水槽でも明瞭に分かれた二つの励振域が現れるのに対し、有限長円柱では振動の谷があまり明瞭でない。アスペクト比が変わっても、換算流速 $V_r < 1.0$ の範囲で振動は生じていないため、2次元円柱と同様に有限長円柱の流れ方向振動の回避条件が $V_r < 1.0$ で良いことが分かった。

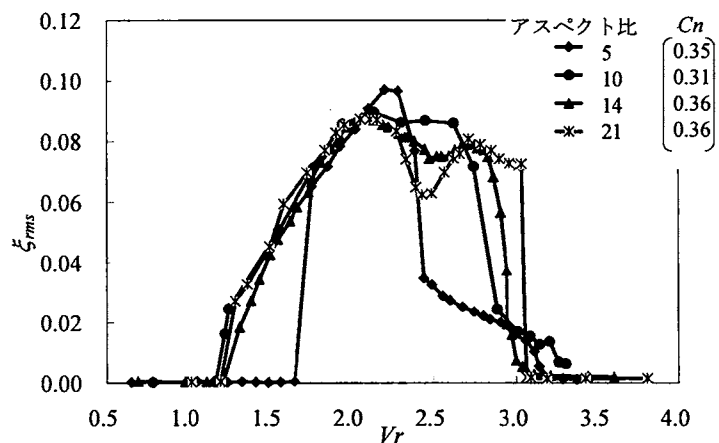


図1 流れ方向振動振幅 ξ_{rms} に対するアスペクト比 AR の影響

次にアスペクト比 10 と 21 の試験体について、換算減衰率 $C_n (= 2m\delta / \rho d^2, m$: 円柱質量、 δ : 減衰率、 ρ : 流体密度) を種々に変えて実験を行い、得られた流れ方向振幅の最大値を図 2 にプロットした。その結果、アスペクト比が変わっても換算減衰率 $C_n > 2.5$ の範囲では振動が十分に抑制されるため、抑制条件が $1.0 < Vr < 3.3$ かつ $C_n > 2.5$ であることが分かった。

3. 有限長円柱の振動特性に対するテーパ比の影響

有限長円柱の振動特性に対するテーパ比の影響を調べるため、長手方向に直径が変化する効果がどの程度あるかを、テーパ比 $TR (= (d_{max} - d_{min}) / L, d_{max}$: 根本直径、 d_{min} : 先端直径) により整理し、 $d_{min} = 20\text{mm}$ に固定して $TR = 0 \sim 10\%$ の間で変化させて振動特性を調べた。その結果を図 3 に示す。換算流速 Vr 、無次元振幅 ξ_{rms} 、換算減衰率 C_n の無次元化には、先端から $1/3$ の直径 $D_{ref} (= d_{min} + (d_{max} - d_{min}) / 3)$ を用いた。

この代表直径 D_{ref} を用いると、図 3 のようにテーパ比の違う円柱の振動範囲をほぼ同じ換算流速に整理することができるため、テーパ比に影響されない健全性評価が可能となる。このように整理した図 3 で $Vr < 1.0$ では振動が生じていないため、指針の規定である流れ方向振動の回避条件: $Vr < 1.0$ はテーパ円柱にも適用できる。

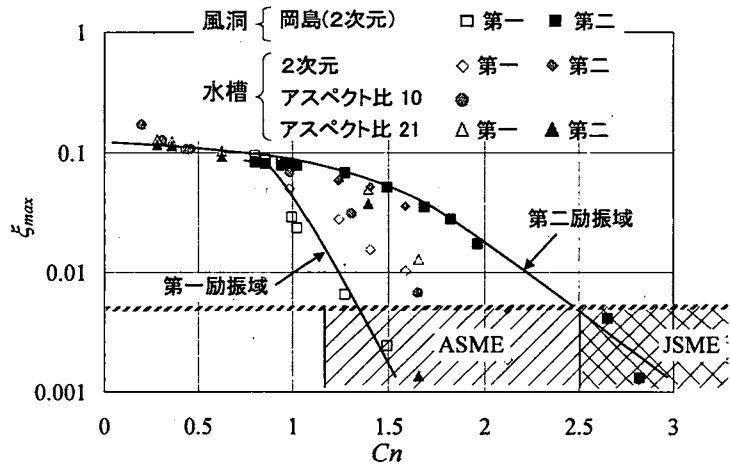


図 2 換算減衰率 C_n に対する有限長円柱の最大片振幅 ξ_{max} 、水槽実験の 2 次元円柱、岡島らの風洞実験結果との比較

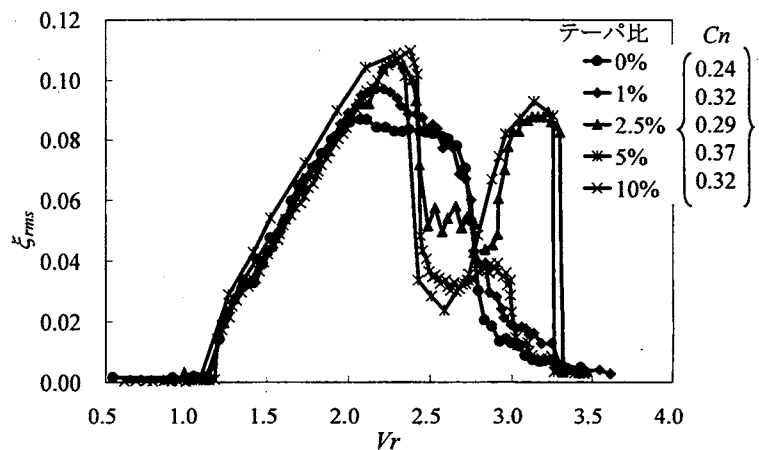


図 3 流れ方向振動振幅 ξ_{rms} に対するテーパ比 TR の影響

次にテーパ比 5%の試験体について、換算減衰率を種々に変えて実験を行い、得られた流れ方向振幅の最大値を図 4 にプロットした。その結果、テーパ円柱でも換算減衰率 $Cn > 2.5$ の範囲では振動が十分に抑制されるため、振動抑制条件： $1.0 < Vr < 3.3$ かつ $Cn > 2.5$ が円柱だけでなくテーパ円柱にも適用できる。

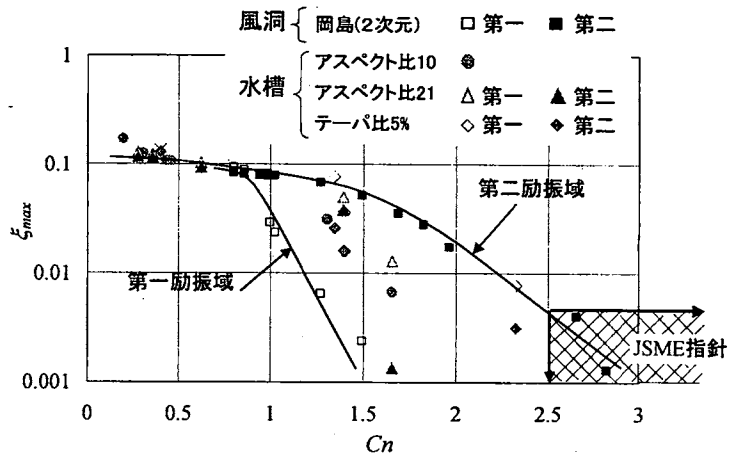


図 4 換算減衰率 Cn に対する有限長テーパ円柱の最大片振幅 ξ_{max} 、岡島らの風洞実験結果との比較

4. 円柱の振動特性と渦構造

円柱近傍に 2 本の熱膜プローブを設置し、変動流速を測定して円柱から剥離する渦を捕らえ、その周波数と位相差を調べた。その結果、十分に長い円柱に生じる流れ方向流力振動の振動形態は表 1 のように分類できることが分かった。この観察結果は数値解析による自由振動円柱周りの渦構造の観察結果と一致した。

表 1 換算流速範囲に対する励振域、渦形態の関係

	換算流速範囲	励振	渦(変動)の周波数	位相差	渦形態	
①	$Vr \approx 1.2$	第一励振域	円柱振動数の 1/4 に同期	180°	交互渦	
②	$1.4 < Vr < 1.8$		円柱振動数に同期	0°	息づき運動	
③	$2.0 < Vr < 2.2$		円柱振動数の 1/2 に近い (不安定)	180° (不安定)	交互渦	
④	$2.2 < Vr < 2.4$					
⑤	$2.4 < Vr < 2.5$		振動の谷	円柱振動数の 1/2 に同期		180°
⑥	$2.5 < Vr < 3.2$		第二励振域			

さらに円柱先端に端板を設置した場合の振動特性を調べた。その結果、端板により円柱先端を回り込む流れを抑制して先端からの斜め剥離を少なくすると、端板がない場合にアスペクト比が小さくて一つの励振域しか生じていなかった試験体でも二つの励振域が生じるようになった。よって図 1 のアスペクト比による振動特性の違いは、アスペクト比が小さいと先端の影響が相対的に大きくなること(端部効果)により生じていることが分かった。

また、円柱後流に流れを分けるスプリッタープレートを設置した場合の振動特性を調べた。その結果、スプリッタープレートにより後流の交互渦を抑制すると、一

つの励振域だけが生じた。よって第二励振域は交互渦による渦励振によって生じ、第一励振域は主として対称渦を伴う円柱後流の息つき運動によって生じることが分かった。

以上の結果から、励振域と励振機構との関連づけを次のように考察した。アスペクト比 10 の有限長円柱の振動メカニズムを表 1 との対比で図 5 に示す。

振動開始直後の $V_r \approx$

1.2 では、息つき運動に対して①の円柱振動数の 1/4 に同期した交互渦は振動振幅をわずかに増加させる。②の円柱振動数に同期した息つき運動の領域は端部効果には影響されず、円柱単体でも円柱に端板を付けても変化しない。2.0 < V_r < 2.2 の範囲では円柱振動数の 1/2 に同期した交互渦の影響が現れはじめ、息つき運動に対して③の不安定な交互渦が振動振幅を減少させる。円柱単体の場合にはすべての換算流速範囲で円柱振動数に同期した息つき運動が生じている。そのため換算流速に対して一つの励振域だけが現れる。そして 2.0 < V_r < 3.0 の範囲で円柱中央から根本側に円柱振動数の 1/2 に同期した交互渦が生じ、円柱のスパン方向に部分的に③の状態を継続し、息つき運動に対して振動振幅を減少させる。端板があると、2.2 < V_r < 2.4 の範囲では流れの 2 次元性が増して④の安定した円柱振動数の 1/2 に同期した交互渦が生じ、息つき運動を更に強く阻害して振動振幅を減少させ、2.4 < V_r < 2.5 の範囲では安定した円柱振動数の 1/2 に同期した交互渦が正の減衰を生むために⑤の振幅の谷が生じ、2.5 < V_r < 3.2 の範囲では円柱振動数の 1/2 に同期した交互渦自身が励振域を生じるため、⑥の第二励振域が現れる。

以上のように有限長円柱の流れ方向流力振動は対称渦を伴う息つき運動と交互渦による渦励振とが相互作用し、励振域を形成している。

5. 結言

以上のように本論文は円柱状構造物の流れ方向流力振動の定量的な予測評価と、渦構造と振動メカニズムの関係の両面を明らかにした。これにより振動回避・抑制条件を明確化することで流れにさらされる円柱状構造物の実用的な設計条件を得ることができた。さらに最適設計・振動制御に対する今後の展開に寄与すると考えられる。

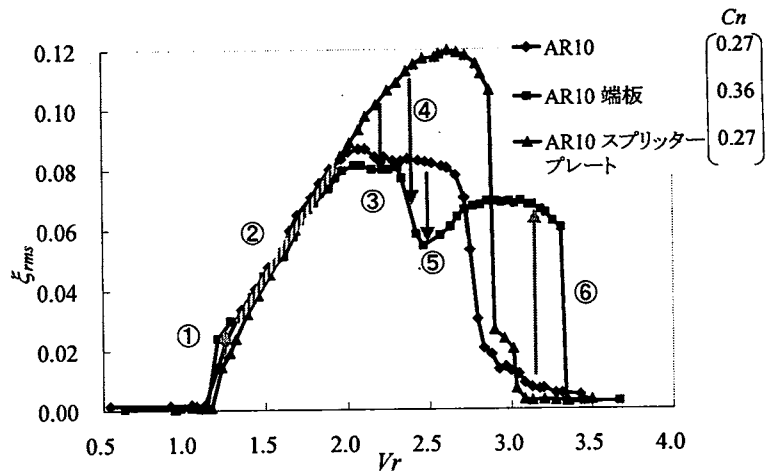


図 5 アスペクト比 10 の有限長円柱の振動特性と、端板を設置した場合とスプリッタープレートを設置した場合の比較。○で示した番号は表 1 に対応している。

学位論文審査結果の要旨

第1, 2回学位論文審査委員会を平成15年1月23日, 1月29日に開催し, 1月29日口頭発表を行い, 同日最終審査委員会を開催した。協議の結果, 以下の通り判定した。

申請者は, 平成3年3月, 神戸大学大学院工学研究科システム工学専攻を修了し, 平成3年4月, 関西電力(株)入社して, 平成9年より金沢大学大学院自然科学研究科地球環境科学専攻, 研究生等を経て, 平成14年4月同専攻に社会人入学した。申請論文は, 「円柱状構造物の流れ方向振動」と題し, 近年注目されている円柱状構造物の流れ方向流力振動の定量的な予測評価, そして後流渦構造と振動メカニズムの関係を, 回流水槽による一連の系統的实验と数値シミュレーションによって明らかにしている。1998年制定の日本機械学会「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」が対象とする代表的な構造物は温度計であるが, 指針はテーパ比やアスペクト比などの温度計形状などの規定が欠落しており, 申請論文では, 構造物形状等の諸因子が流力振動に及ぼす影響を系統的に究明し, それらの結果を振動評価に取り入れる方法を見出し, 包括的な考察を行っている。さらに円柱状構造物の振動の回避, 抑制し実用的最適設計することまで発展させ, 種々有益な提案をしている。

本論文は, 後流渦構造と振動メカニズムの詳細を究明することにより構造物の振動を回避・抑制する方法を明確化した独創的かつ画期的研究であり, 流体および振動工学の分野に跨る流力振動という学際的分野に寄与すること極めて大と判定し, 博士(工学)に値するものと認定する。