

Title	An experimental study on the VIV hydrodynamics of pre-tensioned flexible cylinders with single and multiple configurations
Author(s)	Bijan, Sanaati
Citation	大阪大学, 2012, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/59929">https://hdl.handle.net/11094/59929</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	ビジャン サナアティ Bijan Sanaati
博士の専攻分野の名称	博 士（工学）
学 位 記 番 号	第 2 5 6 4 1 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 24 年 9 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科地球総合工学専攻
学 位 論 文 名	An experimental study on the VIV hydrodynamics of pre-tensioned flexible cylinders with single and multiple configurations (初期張力がかかった一本および複数本の柔軟円柱に作用する渦励振の流体力学に関する実験的研究)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 加藤 直三 (副査) 教 授 梶島 岳夫 准教授 鈴木 博善 准教授 飯島 一博

## 論 文 内 容 の 要 旨

Vortex-induced vibration (VIV) is a multidisciplinary field that involves fluid mechanics, structural mechanics and vibrations, complex techniques for data analysis and numerical methods applied to fluid dynamics and solid mechanics. The offshore industry has been at the forefront of the interest in this fluid-structure interaction subject, in the past decades. The VIV of drilling and production risers, tensioned leg platform (TLP) tendons, and subsea pipelines subjected to ocean currents has been a serious concern for ocean researchers and engineers. The present study is addressed to improve our understanding of the involved dynamics of flexible pipes in isolated and multiple arrangements subjected to cross-flow through laboratory experiments. To investigate and pursue our objectives, results obtained from analysis of data are presented and discussed in the form of vibration amplitude and its frequency, hydrodynamic force coefficients and their frequencies, variation of mean and fluctuating component of the axial tension, synchronization of the vibration of adjacent cylinders in multiple arrangements. The experiments and their corresponding objectives were achieved in two different phases as follows:

### 1) Isolated (single) flexible cylinder

Due to large number of parameters involved with the VIV phenomenon, there is still great uncertainty in VIV design of these structures. Amongst the parameters not yet comprehensively studied are pre-tension and axial stiffness. Hence, in this phase of our study, we investigated the effects of pre-tension and axial stiffness on the dynamical responses of a flexible cylinder which was free to vibrate in three directions, i.e., axial, in-line and cross-flow. Main conclusions are as follows:

- a) High pre-tension, which reduces vibration amplitude, can significantly raise the lift coefficient. Specifically, a four-fold increase in pre-tension was found to correspond to an increase of approximately 57% in lift coefficient and a decrease of approximately 30% in vibration amplitude.

- b) The ratio of dominant inline to cross-flow frequency was almost 2.0 except for the in-line lock-in and upper branch (highest amplitude) regions. In the in-line lock-in region the ratio was found to be 1.0, and in the upper branch the ratio reached 4.0 for the highest applied pre-tension, accompanied by broadening of the region in which this ratio is over 2.0.
- c) The increasing rates of mean and fluctuating tensions increase with increasing axial stiffness and decrease with increasing pre-tension. For constant pre-tension, the increase of axial stiffness results in higher frequency increase rates, while the frequency increase rate slows with the increase of pre-tension.

### 2) Multiple flexible cylinders

The interference among groups of cylinders is an important factor in marine and civil applications such as production and drilling risers, TLP tendons and moorings, subsea group pipelines, transmission lines, suspension bridges and heat exchangers which has been the subject of many studies in the past. In this phase of the present study, the effects of arrangements between pairs of cylinders in tandem, side-by-side and staggered configurations and among four similar cylinders in square configuration on their dynamical responses were investigated. One of the distinctive features of the present study from previous studies is that most of the previous studies on multiple cylinders were reported on stationary cylinders and few studies investigated the response of an oscillating cylinder in the wake of a stationary cylinder. The studies that show VIV dynamic response of multiple flexible cylinders (two or more cylinders) with low mass ratio and high aspect ratio are scarce, mostly, because of the complexity in the responses.

The main conclusions from the present study on multiple cylinders are represented here as:

- a) At none of the examined separation distances, the downstream cylinder (in the tandem arrangement) does not show build-up of upper branch (within the classical cross-flow lock-in region of single cylinder) and the amplitude response extends beyond the classical VIV lock-in region of a single cylinder.
- b) From the frequency response of the lift (transverse) force of downstream cylinder in tandem arrangement, the highest vibration amplitude at all the separation distances occurs whenever their frequencies transition into second modal value. The merit of the present study is that the WIV (wake-induced vibration) with the cross-flow frequency response could be connected and new relationship between dynamical parameters could be found.
- c) The wake interference effect on the mean drag force of downstream cylinder (in tandem arrangement) gradually decreases with larger separation distances. For higher reduced velocities, the average value of steady drag is about 1.15, half value of that of the single cylinder and the counterpart (upstream) cylinder.
- d) The fluctuating (unsteady) drag coefficient of the downstream cylinder (in tandem arrangement) in contrast to its steady drag shows higher values than that of the single cylinder during low reduced velocities.
- e) For small separation distance between two side-by-side cylinders, no synchronization is built up for very small range of reduced velocities. During the dominance of initial branch, strong synchronization is detected which are almost in anti-phase mode. For higher reduced velocities, no synchronization is detected.
- f) For small separation distance between two side-by-side cylinders, the upper branch of the cylinder (upper cylinder), toward which the gap flow is inclined, collapses and its frequency becomes higher. For larger separation distance, both cylinders have independent classical VIV amplitudes.
- g) From the responses of the square configurations of four flexible cylinders, we found that the effect of the wake interference is much more dominant than the proximity interferences on the dynamics of group cylinders.
- h) The responses of group cylinders arranged in multiple configurations cannot be directly inferred from the results of the idealized configurations of pair cylinders (tandem, side-by-side and staggered).

## 論文審査の結果の要旨

渦励振は流体力学と構造力学の連成問題の一つであり、特に海洋工学の分野では流体と構造が干渉を引き起こす重要な問題として扱われている。海流中にある海底石油・ガス掘削装置、海底石油・ガスの生産ライザー管、緊張係留海洋機器のテンドン、海底生産パイプラインなどは渦励振を引き起こし、科学的観点ばかりでなく、設計と運用の観点から重大な関心事となっている。本研究は、直交流中にあり、三方向、すなわち軸方向、主流方向および流れとの直交方向に自由に振動する一本および複数本の柔軟円柱に作用する渦励振の現象について、実際の運用に近い環境下での水槽実験を通して、新しい知見を得ることを目的とした。この目的を達成するために、この論文では柔軟円柱の振動振幅と振動数、流体力係数と振動数、軸張力と振動数、複数本の柔軟円柱の振動の渦励振現象について、水槽での実験を実施し、考察している。

本論文は9章から成り立っている。

第1章から第3章では、本論文の目的、方法、構成を述べ、次にこれまでの渦励振の研究について詳細に解説し、その中で、実際の現場で用いられているような、周りの流体との質量比が1に近かつ大きな長さ対直径比の柔軟円柱に初期張力がかかっている状態において、一本の柔軟円柱や複数本の柔軟円柱に作用する渦励振の現象が十分に解明されていないことを明らかにしている。そして水槽実験において、初期張力や軸剛性の設定法、円柱に作用する渦励振や流体力の計測法について述べている。

第4章では、初期張力がかかった一本の柔軟円柱に作用する渦励振に関する実験の結果を示し、静水中の円柱の固有振動数と円柱直径で無次元化された流速に対する主流方向および流れとの直交方向の柔軟円柱の振動振幅の変化や、抗力や揚力の流体力係数の変化について、初期張力や軸剛性をパラメータとして考察している。

第5章から第7章では、二本の柔軟円柱を用いて、前後並び、横並び、斜め並びと配置を変え、後流側の円柱の動的挙動に着目して考察を行っている。

第8章では、正方形の配置にした四本の柔軟円柱を用いて、後流側の円柱の動的挙動に着目して考察を行っている。

第9章は、この論文全体の結論を述べている。

本論文によって示された主な結果をまとめると、以下のとおりである。

### 1) 一本の柔軟円柱について

- a) 初期張力を大きくすると、振動振幅が小さくなり、揚力変動が非常に大きくなる。
- b) 流れとの直交方向の振動のロック・イン（渦励振の振動数が円柱の固有振動数に引き込まれる現象）の無次元流速に占める領域は、初期張力が大きくなると狭まり、一方、軸剛性が大きくなると広がる。
- c) 渦励振の主流方向に対する卓越周波数と流れとの直交方向の卓越周波数の比は、ほぼ2.0であるが、流れの主流方向における渦励振のロック・インの領域では、1.0となり、一方、流れとの直交方向における渦励振のロック・イン領域における流れとの直交方向の振動振幅が最大となる上側分岐域では、最も大きい初期張力に対して4.0に達する。
- d) 張力の平均値および変動値の無次元流速に対する増加率と振動数の無次元流速に対する増加率は、軸剛性が大きくなると増加し、初期張力が大きくなると減少する。

### 2) 複数本の柔軟円柱について

- a) 前後並びの配置にした二本の柔軟円柱の場合、実験で用いた二本間の距離の範囲において、下流側の円柱では、一本の円柱で見られるような流れとの直交方向の振動における上側分岐域の形成が見られず、一本の円柱の場合のロック・イン領域を超えて振動振幅が大きな領域が拡大する。また実験で用いた二本間の距離の範囲すべてにおいて、下流側の円柱の流れとの直交方向の振動では、前方の円柱の伴流に影響によって、第二モード領域に入っても、振動数が最大値を持つようになる。また下流側の円柱の平均抗力係数は、円柱間の距離が大きくなるにつれて徐々に小さくなる。大きい無次元流速では、下流側の円柱の平均抗力係数は約1.15であり、一本の円柱の場合や上流側の円柱の約半分となっている。また下流側の円柱の抗力係数の変動成分は、小さな無次元流速では、一本の円柱の場合より大きな値を持つ。

- b) 横並びの配置にした二本の柔軟円柱の場合、小さな円柱間の距離では、無次元流速が小さい場合は流れとの直交方向の振動におけるロック・イン現象は見られない。一本の円柱の場合に初期分岐域が見られる無次元流速の範囲では、互いの円柱が逆位相の動きで流れとの直交方向の振動におけるロック・イン現象が見られる。一本の円柱の場合に上側分岐域が見られる無次元流速の範囲では、流れとの直交方向の振動におけるロック・イン現象は見られず、円柱間の流れが主流に平行でなくなり、卓越振動数が大きくなる。さらに無次元流速が大きくなると、両円柱に作用する渦励振の相互作用はなくなる。
- c) 正方形配置にした四本の柔軟円柱の場合、前後の円柱の運動の相互作用が左右の円柱の相互作用より顕著である。

以上のように、本論文は、実際の運用に近い環境下での水槽実験を通して渦励振の現象を考察したものである。これまで十分に明らかにされてこなかった、周りの流体との質量比が1に近かつ大きな長さ対直径比の柔軟円柱に初期張力がかかった状態における初期張力や軸剛性をパラメータとした一本や複数本の柔軟円柱に作用する渦励振の現象を解析し、新しい知見を与えるものと評価される。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。