

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82627

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630461

研究課題名(和文)懸垂式水中線状構造物を対象とした制振機構の開発

研究課題名(英文)Development of Vibration Suppression System for Hanging Riser

研究代表者

藤原 智 (Fujiwara, Tomo)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70511591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：海底熱水鉱床の揚鉱等の海底資源の開発への導入が見込まれる、下端が海底面に直接接続されず、懸垂状態で運用されるライザーシステムおよび洋上天然ガス液化生産設備に用いられるプラント冷却水取水管を対象として、建築物の免震部材に用いられる機構を応用した制振機構を試設計し、これらを組み込んだ多節構造型ライザーシステムの有効性の検討を実施した。その結果、浮体動揺によるライザーの振動および曲げモーメントを制振機構を取り付けた位置だけでなく、管全体に亘って低減した。さらに上端のモーメントを逃がす機構を持つシステムに対しても多節構造型ライザーシステムが管全体の曲げモーメントを低減することを確認した。

研究成果の概要(英文)：Hanging riser system is expected to apply offshore marine mineral development and injection riser for FLNG. In this research, earthquake isolation technology applied vibration suppression system was developed. In addition, efficiency of multi-joint structure riser system was investigated.

In the results of execution about experimental model test and numerical simulation, vibration suppression system suppressed top-end induced riser motion. Bend moment was also declined in any position of riser system. This advantage adapted to not only fixed top-end but also moment free top-end.

研究分野：海中海底工学

キーワード：ライザー 波浪中動揺 制振機構 水槽試験 海底鉱物資源開発 免震技術

1. 研究開始当初の背景

海底鉱物資源は石油・天然ガスなどのエネルギー資源以外の海洋資源として、近年の調達リスク回避の観点から改めて注目されている。その開発では鉱物資源を細かく粉碎し、海水と混合したスラリーとして海上まで運搬するライザーシステムの導入が見込まれている。これら揚鉱ライザーシステムでは油井・ガス井の掘削・生産のようにライザーが海底に接続せずに、海中で懸垂状態に近い運用が予想される。このような状態では下端が固定されないため、上部浮体の動揺により振動が大きくなることや潮流中 VIV (Vortex Induced Vibration; 渦励振) が大きくなる可能性がある。また、FLNG (Floating Liquefied Natural Gas: 洋上天然ガス液化生産設備) で用いられるプラント冷却水取水管についても大口径管を懸垂して運用するため同様の問題が生じる。

2. 研究の目的

本研究では上述の懸垂式ライザーシステムに関して、建築物の免震部材を参考に管内の流路を確保した実用的な制振機構を試設計した。加えて模型試験と数値計算により上部浮体の波浪中動揺に起因する振動および潮流中 VIV に対する当該制振機構の有効性を検討した。

3. 研究の方法

(1) 制振機構の設計

(1-1) 水中線状構造物の振動

水中線状構造物にとって上部浮体の動揺および潮流による振動は疲労被害を大きくする原因となり、設計上考慮すべき現象である。そのため上部浮体と水中線状構造物の接続部にはボールジョイントやバンドスチーフナーといった端部の曲げモーメントを低減するための機構を取り付けることが多く、懸垂式の構造物では接続部をチェーン吊りにして曲げモーメントを逃がすような機構が採用されている<sup>①)</sup>。また、VIV の抑制デバイスとしてはストレージやフェアリングといった装備が世界的に見ても多く導入されている。

(1-2) 建築物の免震機構

建築の世界では建造物を地震から守ることは重要な要素であり、その方法として主要構造を剛な構造にする他に地震の揺れを受け流す「免震」という考え方がある。免震部材は大きくアイソレータとダンパーに分けることができ、簡単に言うとアイソレータは

揺れを「受け流す」、ダンパーは揺れを「吸収する」ものである。それぞれの分類を表 1 に示す<sup>②)</sup>。

表 1 免震部材の分類

免震部材	アイソレータ	積層ゴム
		すべり支承
		転がり支承
	ダンパー	履歴系ダンパー
		流体系ダンパー
		粘弾性系ダンパー

(1-3) 懸垂式ライザー向け制振機構の試設計



図 1 制振機構模型

(左上：積層ゴム式、右上：ダンパー式  
左下：ばね式、右下：懸吊装置)

上述した建築物の免震部材を懸垂式ライ

ライザーに適応することを検討するに際し、①ライザーは軸方向に常に張力が発生しているため、すべり支承や転がり支承といった荷重を受けることで成立する機構は使えないこと、②構造物の地震による変形は大変形であり頻度は少ないがライザーの振動は変形が小さく常に発生していること、③上部浮体の上下動により縦方向にも振動が発生することの三点を考慮した。

そこで本研究ではライザーのジョイント部に制振機構を取り付けることを想定し、以下のような制振機構を試設計した。図-1にそれぞれの制振機構模型を示す。

#### ① 積層ゴム式

ライザージョイント部を長いボルトで接続し、間に鋼板とゴム板を交互に積層した部材を挟み、管の曲げ変形をゴムの変形で吸収する。さらに模型の縮尺に合わせて低反発ウレタンのクッション材を用いた制振機構も製作した。

#### ② ダンパー式

ライザー管の間を向かい合う2本のチェーンで接続し、直行方向に流体ダンパーを配置することで、曲げが発生するとダンパーが伸縮するような機構とした。

#### ③ ばね式

曲げ方向の変形に加えて縦方向の振動も吸収できるようにばねをジョイント部に挟んだ。なお、ばねはライザー模型との共振が発生しないように、加振周波数およびVIV周波数に対して固有振動数が十分に高いものを選定した。

#### ④ 懸吊装置

上端部の浮体との接続部に発生する曲げモーメントを逃がす機構として、吊りチェーンとリングを組み合わせて全方向の曲げ変形を吸収できる機構とした<sup>3)</sup>。

### (2) 水槽試験

試設計した制振機構の性能評価と数値計算の検証用データ取得のために水槽試験を実施した。試験は海上技術安全研究所内の深海水槽で行い、懸垂式ライザーと接続する上部浮体の動揺に起因する振動は模型上端に取り付けた強制動揺装置を用いて模擬した。また、潮流発生装置を用いて表層流れを再現し、このとき発生するVIVを計測した。

#### (2-1) 供試模型

想定実機として10インチ鋼管ライザーをベースとし、供試模型の縮尺は1/8程度とした。ライザー管模型と想定実機の関係は表-2に示すとおりである。模型は相似則に合わせて気中重量および水中重量と曲げ剛性を調整したが、管径は制振機構模型の取り付け

を考慮し相似則の約2倍にした。また、ライザー模型は2mで1本のピースとして、これを6本接続することで全長12mとした。

表2 想定実機と揚鉦管模型の関係

項目	想定実機	ライザー管模型	
		目標	計画
縮尺比		1/8	1/8
長さ [m]	1,000	125.0	12.0
外径 [m]	0.254	0.0318	0.060
曲げ剛性 [Nm <sup>2</sup> ]	2.49×10	760.0	398.9
空中重量 [kgf/m]	143.7	2.25	2.38
水中重量 [kgf/m]	124.9	1.97	1.88

※ 斜体部の項目の相似則を満足するように模型を設計した

#### (2-2) 試験条件

計測ではライザー管模型のみで制振機構を取り付けていないケースをベースに2.3節で述べた制振機構をそれぞれ上端から4mにあるジョイント部に取り付け、このときのライザー管の挙動および上端部に作用する力ならびにモーメントを計測した。なお、懸吊装置は上端部に取り付けた。上端強制加振試験では実機スケールで0.5mに相当する振幅および同じく実機スケールで4~16sに相当する加振周期で規則波加振を行った。また、潮流中VIV試験では最大5ノットに相当する潮流を管に当て、そのときのVIV挙動を計測した。

#### (3) 数値計算

水槽試験の計測結果を基に数値シミュレーションを行い、制振機構の有用性を検証した。数値シミュレーションには水中線状構造物の挙動推定プログラムとして世界で広く使用されているOrcina社のOrcaFlexを用いた<sup>4)</sup>。

### 4. 研究成果

#### (1) 水槽試験結果

上端強制加振試験の結果の一例として振幅分布の比較を図2に示す。振幅は上端加振振幅で除し無次元化した。制振機構なしのケースで最も振幅が大きくなり、順に積層ゴム式、バネ式、ダンパー式と特に振動の腹の部分で振幅が減少し、最も振幅が減少したダンパー式では制振機構なしと比較して最大4割の振幅低減効果が得られた。加えて上端に懸吊装置を取り付けたケースでは強制動揺装置との接続部に配した6分力計の計測結果から曲げモーメントが大幅に低減していることを確認した。

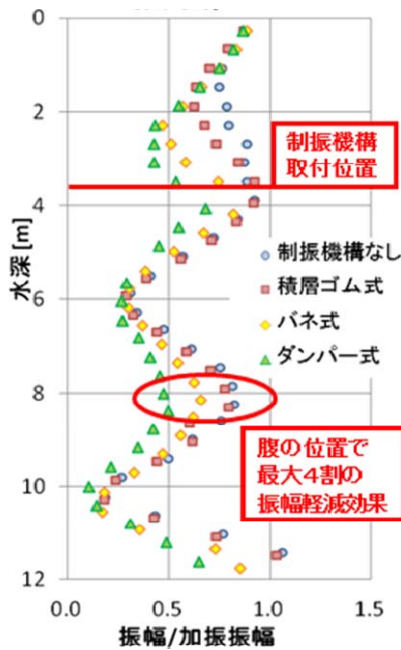


図2 上端強制加振試験結果  
(加振周期 5s、振幅 0.5m 相当)

(2) 数値計算結果

計算結果と水槽試験結果の比較を図3に示す。上端固定時の制振機構なしとダンパー式の制振機構を取り付けたケースそれぞれでおおよそ一致が得られた。また、上端部に

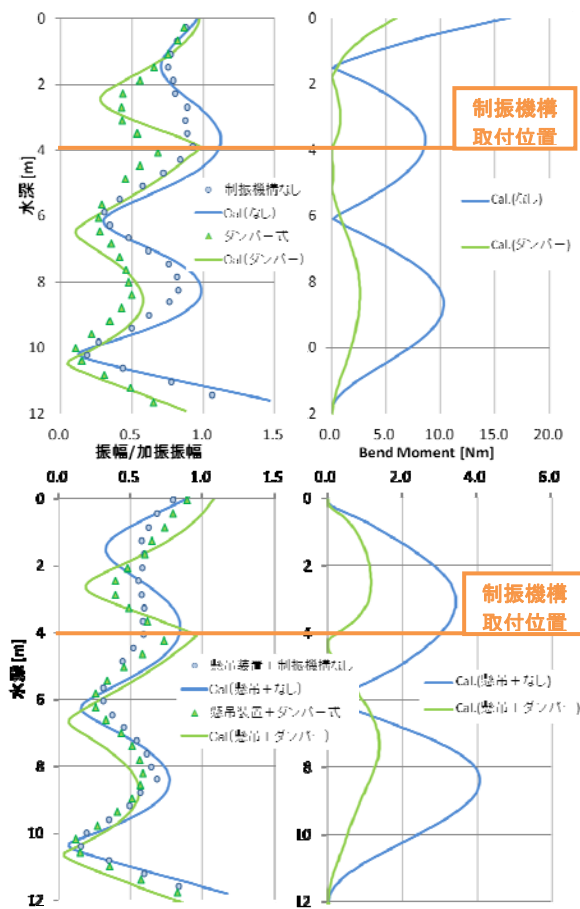


図3 数値シミュレーション結果  
(上段：上端固定、下段：上端モーメントフリー)  
(左図：振幅分布、右図：曲げモーメント分布)

懸吊装置を取り付けることで曲げモーメント逃がしたケースについても振幅分布のおおよそ一致が得られた。さらに数値シミュレーションで曲げモーメントの分布を比較すると、上端固定のケースでは制振機構を取り付けた位置でモーメントが逃げるだけでなく管の更に下側および上端接続部においても曲げモーメントが低減した。さらに上端部の曲げモーメントを逃がすケースにおいてもライザー管全体に亘って制振機構によるモーメント低減効果があることが分かった。

(3) 制振機構取付位置の最適化

制振機構取付位置の違いによる曲げモーメント低減効果を検証するために、数値計算を行った結果を図4に示す。図中では水槽試験と同じ上端から 4m の位置に制振機構を取り付けたケースと、2m 下のライザー模型全体の中間位置に当たるケース、加えて制振機構を取り付けていないケースで比較、検討を行った。制振機構を取り付けていないケースでは実機で 4~5 秒と 6~8 秒に相当する動揺周期において最大曲げモーメントが大きくなる結果となった。これはそれぞれ 3 節振動および 2 節振動の固有周期にほぼ一致している。これに対して上端から 4m の位置に制振機構を取り付けた場合、3 節振動の腹のひとつに当たる位置に制振機構を取り付けたこととなり、結果的にこの振動モードで発生する曲げモーメントを低減することが出来た。同じく上端から 6m の位置に制振機構を取り付けたケースでは 2 節振動で発生する曲げモーメントを低減することが出来た。

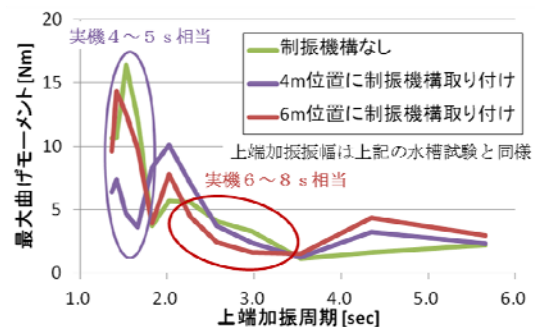


図4 制振機構取付位置による最大曲げモーメントへの影響

<引用文献>

- ① United States Patent 7,451,716
- ② 免震構造部材の基本から設計・施工まで - 社団法人日本免震構造協会
- ③ 高橋一比古、ライザー管の懸吊装置および係留管の連結装置、特許第 5665024 号 (2014)
- ④ Orcina 社 HP OrcaFlex 紹介 <https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/>

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

①藤原智、高橋一比古、金田成雄、正信聡太郎、懸垂式水中線状構造物を対象とした制振機構の開発、第 16 回海上技術安全研究所研究発表会、査読無、PS-24

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤原 智 (FUJIWARA, Tomo)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所  
その他の部局等・研究員

研究者番号：7 0 5 1 1 5 9 1

### (2) 研究分担者

該当者なし

### (3) 連携研究者

該当者なし