

PS-24 懸垂式水中線状構造物を対象とした制振機構の開発

海洋開発系 * 藤原 智、高橋 一比古、金田 成雄、正信 聡太郎

1. はじめに

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砕し、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おり、これら揚鉱ライザーシステムでは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。

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。

2. 制振機構の設計

2.1 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¹⁾。また、VIV の抑制デバイスとしてはストレーキ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。

2.2 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」という考え方があり、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²⁾。

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

2.3 懸垂式ライザー向け制振機構の試設計

上述した建築物の免震部材を懸垂式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。



図-1 制振機構模型

(左から積層ゴム式、ダンパー式、ばね式、懸吊装置)

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³⁾。

3. 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。

3. 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空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 想定実機と揚鉤管模型の関係

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 ²]	2.49×10^7	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

3. 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. 3 試験結果

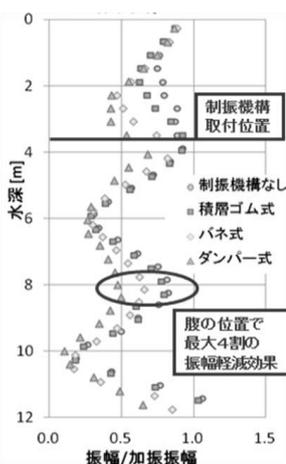


図-2 上端強制加振試験結果（加振周期 5s、振幅 0.5m 相当）

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。

4. 数値シミュレーション

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⁴⁾。計算結果と水槽試験結果の比較を図 3 に示す。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その一致が得られた。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、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。

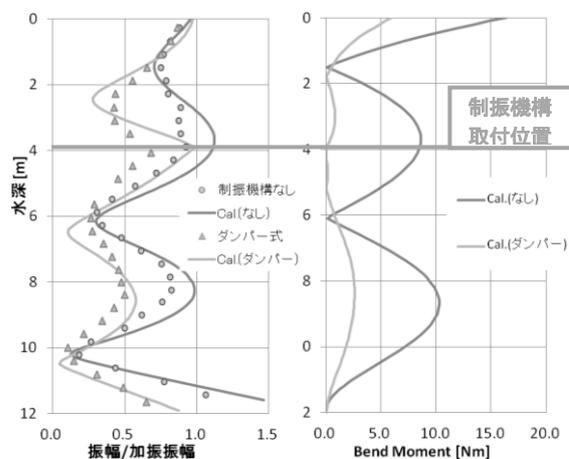


図 3 数値シミュレーション結果

(左図：振幅分布、右図：曲げモーメント分布)

5. まとめ

懸垂式のライザーに対して有効な振動低減・曲げによる疲労被害低減の方法の一つとして、建築物の免震部材のうち、積層ゴム式や流体ダンパー式等の免震部材の方式を応用して管内の流路を確保した実用的な制振機構を設計し、基本的な有効性を確認した。更にその性能を水槽試験と数値計算によって検証し、制振機構を振動の腹に当たる位置に取り付けることで、管全体に亘って振動を低減し、曲げモーメントは上端部も含めた管全体に亘って低減できた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP 26630461 の助成を受けたものです。

参考文献

- 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) 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/>