

# PS-19 タワーヨーク係留システムの設計および安全性評価に関する研究

横浜国立大学・海上技術安全研究所 連携講座 \* 石田有子、加藤俊司、湯川和浩、村井基彦

## 1. はじめに

今日、石炭や石油と比べクリーンな燃料である天然ガスに注目が集まっており、特に海底ガス田の開発には期待が寄せられている。一般的に海底で採掘された天然ガスは液化された状態 (LNG) で沿岸部の再ガス化施設まで運ばれ再びガス化されて発電施設へ送られる。この輸送方法はインフラ整備の問題等により陸上での LNG 受入れが困難な場合がある。そんなときに有望であるのが FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) <sup>1)</sup> である。この FSRU の係留方法の一つにタワーヨーク係留システムがある。タワーヨーク係留システムを用いることで陸上へ天然ガスを送るエクスポートラインの設置コストを抑えることができる。しかし現状では実際の設計例が少なく、初期設計における各パラメータの選定手順が明確にされていない。本研究では、このタワーヨーク係留システムの初期設計段階における各パラメータの設定方法を提案するとともに、FSRU を係留した場合を対象とした安全性の評価方法についても検討した。また係留システムの設計パラメータと安全性の関係について調べる感度解析も行い、その結果に基づき実際に係留システムを設計した。

## 2. タワーヨーク係留システムの設計手順

タワーヨーク係留システムは着底式の tower、tower と船体を繋ぐ mooring yoke 及び pendant linkage、復原力を与える ballast tank から成る (図 2-1)。tower 上部は回転可能な構造で、FSRU が風見鶏のように tower まわりを動くことができる。本研究では tower、mooring yoke、pendant linkage、ballast tank の 4 部材を取り扱うことにする。

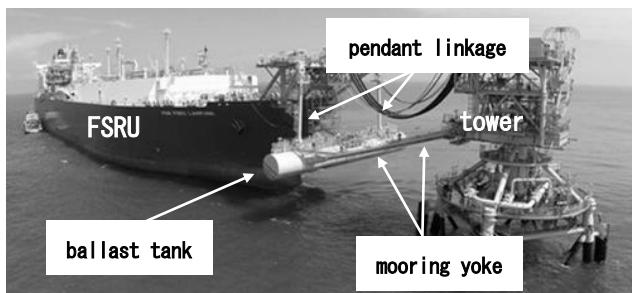


図 2-1 タワーヨーク係留システム <sup>2)</sup>

### 2.1 復原力

船体及び係留システムにおけるつり合いの関係より、mooring yoke 及び pendant linkage に発生する張力  $T_m$ 、 $T_p$  は ballast 重量  $W_b$ 、mooring yoke 長さ  $L_m$ 、pendant linkage 長さ  $L_p$ 、ballast 位置  $(x_b, z_b)$  及び船体位置  $(x_v, z_v)$  を用いて、以下の式で表される。

$$T_m = \frac{W_b L_m (x_v - x_b)}{2\{x_b(z_v - z_b) - (x_v - x_b)z_b\}}$$

$$T_p = \frac{W_b L_p x_b}{2\{x_b(z_v - z_b) - (x_v - x_b)z_b\}}$$

これより、係留システムが FSRU に与える復原力  $F_c$  は次のようになる。

$$F_c = -\frac{2T_p(x_v - x_b)}{L_p}$$

### 2.2 環境外力

本研究では、mooring yoke と pendant linkage の強度について安全性評価を行う。商用解析ツール Orca Flex を用いて計算を行い、最大引張応力及び最大圧縮応力を調べた。また、本研究では FSRU に働く外力として風圧力、潮流力、波漂流力を想定し、外力方向は図 2-2 に示すように定義した。さらに、ABS 及び DNV の規則 <sup>3)4)</sup> に従い、表 2-1 に示す 4 種類の外力方向の組み合わせについて検討した。

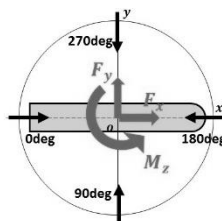


図 2-2 外力方向

表 2-1 外力方向の組み合わせ

	wind	current	wave
W1	180°	180°	180°
ABS1	210°	210°	180°
ABS2	210°	270°	180°
DNV	210°	225°	180°

### 2.3 設計手順

#### 2.3.1 pendant linkage の長さ

pendant linkage の長さ  $L_p$  を決めるにあたり、ballast tank が海水に触れずかつ、FSRU と接触しないよう考慮する必要がある。海象条件と船体の動揺特性から、船体に対する海面の相対上下変位を求め、条件を満たす  $L_p$  を定めた。

#### 2.3.2 mooring yoke の長さ及び tower の高さ

mooring yoke の長さ  $L_m$  と tower の高さ  $H_t$  は係留システムが与える復原力を左右するパラメータである。船体の offset をある範囲内  $(-\Delta x \sim +\Delta x)$  に収める場合、offset =  $\pm\Delta x$  において、常に復原力が外力より大きくなくてはならない。設置海域の海象条件と船体の外力特性から外力の最大値を求め、offset =  $\pm\Delta x$  における復原力が最大外力より大きくなるような  $L_m$  と  $H_t$  を選択した。

#### 2.3.3 mooring yoke 及び pendant linkage の肉厚

上記の手順により得られたパラメータから mooring yoke 及び pendant linkage に発生する張力を算出することができ

る。ここで、以下の条件を満たすように、mooring yoke 及び pendant linkage の肉厚 $t$ を決めた。

最大引張(圧縮)応力×目標安全率≤降伏応力(座屈応力)

### 3. タワーヨーク係留システムの設計及び安全性評価

#### 3.1 FSRU 及び海象条件

本研究では表 3-1 に示すような FSRU を係留の対象とした。またスマトラ島沖の海域を設置海域に想定した。

表 3-1 FSRU の主要目

全長	272.0 m
垂線間長	268.0 m
型幅	44.0 m
満載喫水	12.0 m
排水量	140,592 ton

表 3-2 設計環境条件

風速	29.3 m/s
流速	1.40 m/s
水深	25.0 m
有義波高	5.00 m
波周期	10.1 s

#### 3.2 設計

FSRU の主要目及び海象条件から offset が±8m 以内に収まるように、タワーヨーク係留システムを設計した。なお、mooring yoke と pendant linkage には一般構造用圧延鋼材 SS400 を使用した。SS400 の降伏応力は 215MPa である。表 3-3 に係留システムの仕様を示す。

表 3-3 係留仕様

部材	長さ	外径	内径	重量
pendant linkage	12.0 m	1.00 m	0.94 m	
mooring yoke	38.0 m	1.00 m	0.94 m	
ballast tank	28.0 m	4.00 m	3.96 m	1200ton
tower	47.0 m	6.00 m		

#### 3.3 安全性評価

表 3-3 で示した係留仕様で時間領域シミュレーションを行い、安全性評価を行った。表 3-4 に各条件における最大応力の期待値<sup>5)</sup>を示す。圧縮力が発生するのは mooring yoke のみであった。なお、mooring yoke の座屈応力は 42.3MPa である。

API<sup>6)</sup>の基準を参考に目標安全率を 1.25 と設定すると、  
最大引張応力：93.83[MPa]×1.25=117.3[MPa] ≤ 215[MPa]  
最大圧縮応力：26.29[MPa]×1.25=32.86[MPa] ≤ 42.3[MPa]  
となり、安全性が確認された。

### 4. 感度解析に基づく最適設計

係留システムのパラメータと安全性の関係を調べた。変更箇所は、「mooring yoke 及び pendant linkage の鋼管の肉厚 $t$ 」、「mooring yoke の長さ $L_y$ 」、「tower の高さ $H_t$ 」の3点である。一部結果を図 4-1 に示す。これより、発生応力に注目すると最も感度が高いのは鋼管の肉厚 $t$ であり、逆に yoke

長さ $L_y$ はさほど影響しないことが分かった。しかし $L_y$ を大きくすることで座屈応力が二次関数的に減少する。そのため安全性という観点からみると $L_y$ の選定も十分に留意する必要があることが分かる。また tower 高さ $H_t$ は $H_t=50$ [m]付近で圧縮応力が小さくなる傾向が確認された。

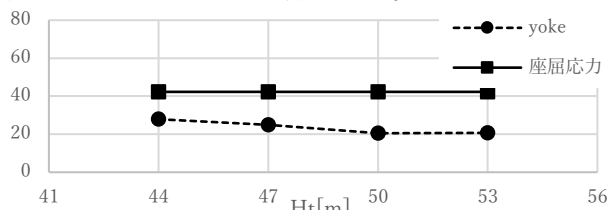


図 4-1 ABS1 最大圧縮応力 [MPa]

以上の結果を踏まえ、より安全性が高い係留システムについて検討し再度設計した。表 4-1 に再設計した係留仕様を示す。ただし、mooring yoke と pendant linkage の材質は初期設計と同じ SS400 としている。

表 4-1 再設計後の係留仕様 (変更箇所を太字で示す)

部材	長さ	外径	内径	重量
pendant linkage	12.0 m	1.00 m	0.94 m	
mooring yoke	<b>25.0 m</b>	1.00 m	0.94 m	
ballast tank	28.0 m	4.00 m	3.96 m	1200ton
tower	<b>50.0m</b>	6.00 m		

表 4-2 最大応力 [MPa] (再設計後)

	引張		圧縮
	pendant	yoke	yoke
W1	75.67	28.69	9.43
ABS1	81.87	45.83	18.86
ABS2	86.29	57.26	37.94
DNV	84.19	51.23	21.80

表 4-1 に示す仕様での安全性について、3.4 と同様の方法で確認を行った。表 4-2 に最大応力の期待値を示す。なお、今回の設計

では mooring yoke の座屈応力は 95.7MPa である。  
最大引張応力：86.29[MPa]×1.25=107.86[MPa] ≤ 215[MPa]  
最大圧縮応力：37.94[MPa]×1.25=47.43[MPa] ≤ 95.7[MPa]  
表 3-4 と比べ、最大引張応力は小さくなり、圧縮では許容応力に対する最大圧縮応力の割合が小さくなることが確認できた。

### 5. 結言

本研究を通して、初期設計段階における各パラメータの設定手順を明らかにすることができた。また感度解析を踏まえ、より安全性の高い設計を行うことができた。

### 参考文献

- 1) David, Johan : Regasification Vessels with Power Generation
- 2) SOFEC: <http://www.sofec.com/index.asp>
- 3) ABS: Floating Production Installations 2014
- 4) DNV: DNVGL-OS-E302
- 5) Bureau Veritas: NR 493 DT R03 E
- 6) API: API-RP-2RD