

浮体式天然ガス液化プラントの稼働率向上に関する研究

Research on Enhancing Operating Rate of Floating LNG

学籍番号 47116635 ウォン・テッ・スーン
指導教員 尾崎 雅彦 教授

(平成 25 年 2 月 4 日発表予定)

Keywords: FLNG, 浮体動揺, 並列係船システム

Keywords: FLNG, Floating structure motion, Side-by-side mooring system

1. 序論

1.1 研究背景

地球環境問題への対応やエネルギーの安定的な確保のため、国際的に天然ガスの需要が増加しつつある。陸から離れていたり大水深海域に存在する海洋ガス田を経済的に開発するために、FLNG(浮体式天然ガス液化プラント：天然ガスを海底から生産し、洋上で液化・貯蔵・出荷する施設のこと)が提案され、オーストラリア、ブラジル、東南アジアなど世界各地で開発が進められている。海洋工学の分野では、浮体の動揺影響、係留システム、LNG の出荷システムなどが重要なテーマである。

1.2 本研究の目的

本研究では、Operational Condition に着目して以下の 2 点について耐波性能の改良を試み、稼働率向上を目的とする。

- ① シャトル船非係船時のプラント浮体の動揺低減
- ② 並列係船時の係船システムの耐波性能向上

2. シャトル船非係船時のプラントの動揺低減

2.1 必要性

浮体の揺れによって、熱交換器が傾くと熱交換の性能が低下するため、プラント全体の液化・生産能力(稼働率)に悪影響を与えると懸念されている。プラントの稼働率向上のために、少しでも揺れにくい浮体寸法・新形状の提案を試みることを本研究の目的とする。

2.2 研究手法

3次元境界要素法[1]を用いて浮体の横揺れ(Roll)および縦揺れ(Pitch)の動揺特性を求め、多方向不規則波中の応答値を短期予測して比較する(Fig.2)。

2.3 箱型浮体の動揺特性について

規則波中の浮体の運動応答は波周期と波向によって変動する。Operational Condition の波周期の範囲(8s~16s)では、波入射角度が小さいとき(10°~50°)、波入射波角度と浮体の運動応答が単純な相関関係にない(Fig. 3, Fig. 4)。動揺しにくい浮体を計画するために、多方向不規則波中で総合的に箱型浮体の動揺を評価する必要がある。

2.4 箱型浮体の動揺計算

浮体寸法をパラメータとして箱型浮体の動揺特性を検討した。なお、浮体サイズは長さ 300m×幅 78m×喫水 12m。波の主方向は 30°である。Roll の固有周期は 28 秒に固定した。検討した結果を以下に示す。

(1) 浮体長さのみ増減したときの影響(Fig.5, Fig.6)



Source: Shell Source: Center for LNG

Fig. 1 Floating LNG and Loading arm

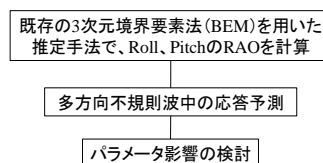


Fig. 2 Evaluation Method

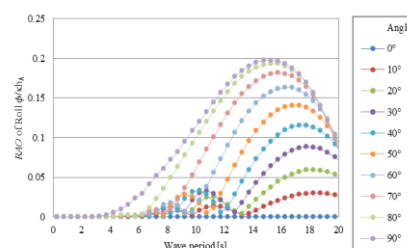


Fig. 3 Calculation result of Roll

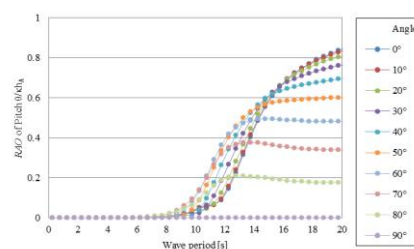


Fig. 4 Calculation result of Pitch

Roll, Pitch とともに長さが増加するほど動揺量が低下し, その効果は Pitch でより大きい.

- (2) 浮体幅のみ増減したときの影響
幅が増加すると Roll の動揺は低下するが, Pitch は比較的短周期領域でのみ動揺量の低下が認められた.
- (3) 浮体の喫水を増減したときの影響
喫水が増加すると, Roll の動揺量および比較的長周期領域の Pitch の動揺量がやや増加した傾向にある.
- (4) 平面積一定で浮体の細長比を増減したときの影響
Roll については, 長さを増やすことと幅が低減することの影響がほぼ相殺したように思われる. 一方, Pitch については, 元々幅が低減することの影響が少ないため, 長さを増やすことの影響が表れている. これは FLNG の設計段階で, プラントの必要総面積や排水量が増加した場合の計画変更の指標にも応用することが期待できる.

2.5 揺れにくい浮体形状の提案

箱型浮体(Box)の前後端に膨らみを設けることで Dog Bone 型をした浮体(Case 1)の Pitch が低減することが分かった. しかし, 逆に Roll が大きくなるため, 寸法変更には両者のバランスを考慮に入れる必要があることが分かった(Fig. 7).

3. 並列係船システムの耐波性能向上

3.1 必要性

LNG の荷役には新規開発が進められているフレキシブルホースよりも, 港湾荷役で実績のあるローディングアームが好まれる状況にある. しかし, アームの可動範囲に制限があるため, 2 浮体間の係船システムは比較的剛であり, 波による係留索の張力やフェンダーの反力の変動が大きくなる. 海象が荒れるとローディングアームの着脱よりも, 係船状態の変更の方が時間がかかり, より穏やかな海象を待って作業する必要がある. 係船システムの耐波性能向上のためにより厳しい波浪条件に対応できる係船システムが求められる.

3.2 研究手法

周波数領域で計算された 2 浮体の相互干渉を考慮した流体力係数および波強制力[2]を利用し, 係留索の幾何学的非線形性やフェンダーの非線形反力特性を考慮した 2 浮体間係船システムを時刻歴計算で解くプログラムを開発する(Fig. 8). 開発したプログラムを用いて規則波中係船システムのパラメータ影響を検討した後, 多方向不規則波中の時刻歴応答計算による検討から, より厳しい波浪条件に対応できる係留システムの提案を試みる.

3.3 係留索・フェンダーのモデル化

係留索は幾何学的非線形性を考慮するために, 時々刻々変化する係留点から索の伸び量を求め, 係留索の張力を計算する(Fig. 9). まず, 係留点間の初期距離を次式で示す.

$$\ell_o = \sqrt{(x_{ao}^f - x_{bo}^f)^2 + (y_{ao}^f - y_{bo}^f)^2} \quad (1)$$

時刻 t における係留点間の距離は次式になる.

$$\ell = \sqrt{(x_a^f - x_b^f)^2 + (y_a^f - y_b^f)^2} \quad (2)$$

よって, 係留索の伸び量は

$$\Delta \ell = \ell - \ell_o \quad (3)$$

で与えられ, 係留索の張力は次式のように表すことができる.

$$F = F_o + k \cdot \Delta \ell \quad (4)$$

ここで, F_o は索の初期張力, k は係留索のバネ剛性である.

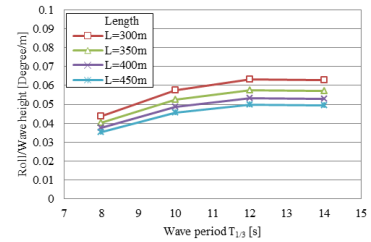


Fig. 5 Result of short-term prediction when length is changed (Roll)

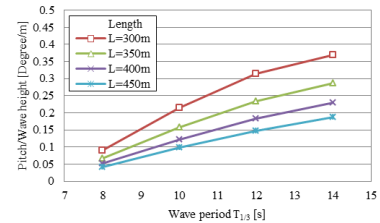


Fig. 6 Result of short-term prediction when length is changed (Pitch)

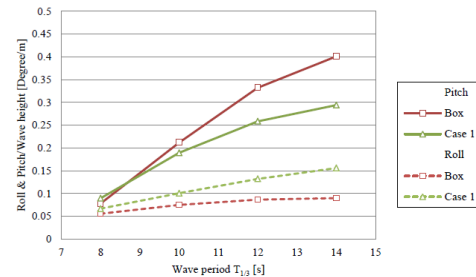


Fig. 7 Comparison of Box and Dog Bone(Case 1)

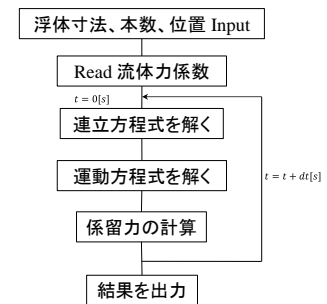


Fig. 8 Program flow

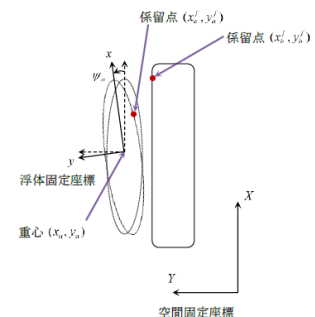


Fig. 9 Coordinate of mooring system

係留索による外力が浮体の x , y , ψ 運動に働く力とモーメントは

$$\left. \begin{aligned} F_x^a &= \frac{F}{\ell} (x_b^f - x_a^f) & F_x^b &= \frac{F}{\ell} (x_a^f - x_b^f) \\ F_y^a &= \frac{F}{\ell} (y_b^f - y_a^f) & F_y^b &= \frac{F}{\ell} (y_a^f - y_b^f) \\ M_\psi^a &= -F_x^a \cdot \Delta y_a^f + F_y^a \cdot \Delta x_a^f & M_\psi^b &= -F_x^b \cdot \Delta y_b^f + F_y^b \cdot \Delta x_b^f \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 Δx_a^f , Δy_a^f , Δx_b^f , Δy_b^f は係留点の浮体 a , b 重心からの x , y 方向の距離である。

フェンダーの非線形反力特性は圧縮量に対し、不等間隔で入力した反力の値で再現し、点と点の間の値は線形補間で求める。フェンダーの反力は船体に対して垂直に働くものとする。

3.4 計算モデル

浮体寸法、フェンダーの形式[3]、係留索の仕様[4]を Table 1 に示す。波入射角度を 330° とする (Fig. 10)。このモデルを用いて規則波中の係船システムのパラメータ影響の検討を行う。

3.5 規則波中のパラメータ影響の検討

規則波中係船システムの索取付位置・長さによる影響を検討した結果を Fig. 12 に示す (波周期 10 秒)。一点鎖線は許容荷重である。

- (1) 索の長さが長いほど、索張力の変動量が小さくなる。これは索のバネ剛性が小さくなることと、幾何学的性質による索の伸び量の減少だと考えられる。
- (2) 索長さが長すぎると、索の初期張力が高くなり、許容荷重に近づく。これは 2 船体の間隔が一定の時に索の長さを増やすことは、船軸に対する索の方向角度を小さくするので、フェンダーを圧縮させるための索初期張力が高くなるためである。
- (3) 以上の考察より、索初期張力を許容荷重の半分に設定し、長さをできるだけ長くすることが係船システムの耐波性能に有効であることが分かった。

さらに、低周波数領域を含めた検討結果を Fig. 13 に示す (波高 0.5m)。一点鎖線は許容荷重である。低周波数領域では、索の短い方の最大張力が索の長い方の最大張力と交差することが起こる。この低周波数領域の波による影響、波入射角度が変わるときの影響を考慮するために、係船システムを多方向不規則波中の時刻歴応答計算による検討が必要である。

3.6 多方向不規則波中の検討

規則波中の良いケースの一例を多方向不規則波中で検討した。その結果を Fig. 14 に示す。一点鎖線は許容荷重である。ワイヤロープによる 2 浮体の係船システムは有義波高 3m に耐える有義周期は 9 秒、有義波高 1m に耐える有義周期は 12 秒までになる。これがワイヤロープによる係船システムの耐波性能の限界であり、より良好にするためには、係留索の工夫が求められる。

3.7 新たな係船システムの提案

- (1) 係留索の素材に着目する。スチールワイヤロープと同等な強度と約半分の弾性係数を有する合成繊維ロープ「ダイニーマ」[5]に変えれば (Table 2)、係船システムの耐波性能に与える効果を検討した。結果として、ワイヤロープをダイニーマに変えれば、係船システムの耐波性能は有義

Table 1 Calculation condition

浮体	LNG 船	FLNG
サイズ	長さ 276 m × 幅 46 m	長さ 300 m × 幅 88 m
浮体間距離	5 m	
フェンダー	形式	空気式フェンダー
	直径	3 m
	ひずみ 0.6 の反力	-2207 kN
	初期圧縮量	0.4 m
係留索	種類	ワイヤロープ
	本数	任意
	ヤング率	92200 N/mm ²
	断面積	982 mm ² ($\phi D = 50\text{mm}$)
	切断荷重	1230 kN
	安全率	2.0

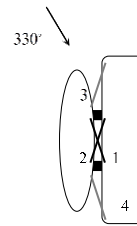


Fig. 10 Incident wave angle

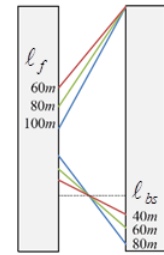


Fig. 11 Mooring line length

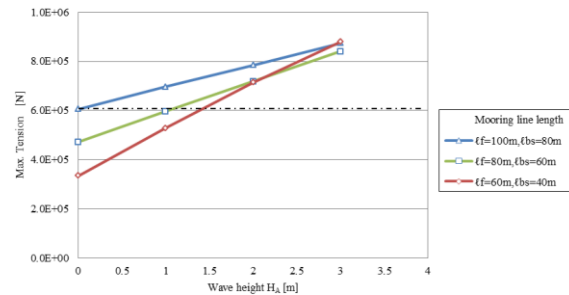


Fig. 12 Relation between Max. Tension and Wave height

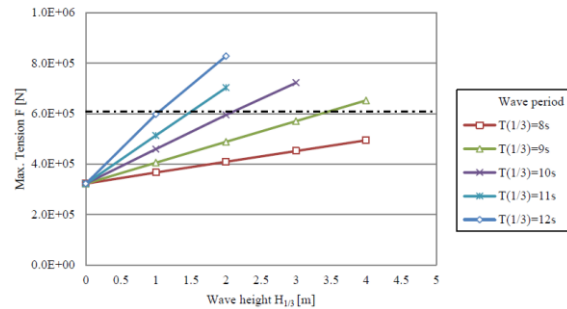


Fig. 14 Max. Tension in multi-direction irregular waves

波高 3m に耐える有義周期 9 秒から 11 秒へと長くなった(Fig. 15).

- (2) 係留索の特性を改善する工夫として、フェンダーとワイヤロープの組み合わせが考えられる。フェンダーをワイヤロープに直接つなげることで、係留索の見かけの弾性が下がるため、これが係船システムにどのような効果を与えるかを検討した。Fig. 16 のように、係船システムの耐波性能は良好な改善が得られ、有義波高 3m に耐える有義周期 9 秒から 14 までのびた。接続部の実現や強度の問題がクリアできれば、より厳しい海象に対し十分有望な案である。

4. 結論

- ① シャトル船非係船時のプラント浮体の動揺低減

- (1) 3 次元境界要素法を用いて浮体寸法をパラメータとして箱型浮体の Roll と Pitch の動揺特性を求め、多方向不規則波中の応答値を比較した。結果として、長さを増やすときの効果、幅を増やすときの効果が Roll と Pitch に別々の形に出た。動揺量を低減したい揺れの種類によって浮体寸法に反映させることが有効であることが分かった。
- (2) 箱型浮体を基準として動揺低減につながる浮体形状の提案を試みた。浮体の前後端に膨らみを設けることにより浮体の Pitch が低減する。しかし、逆に Roll が大きくなるため、寸法変更には両者のバランスを考慮に入れる必要があることがわかった。

- ② 並列係船時の係船システムの耐波性能向上

係留索の幾何学的非線形性やフェンダーの非線型反力特性を考慮した 2 浮体間係船システムを時刻歴計算で解くプログラムを開発した。規則波中係船システムのパラメータ影響を検討した後、多方向不規則波中の時刻歴計算による検討から、より厳しい波浪条件に対応できる係船システムの提案を試みた。規則波中の検討から以下の知見が得られた。

- (1) 係留索の張力が許容荷重(切断荷重に安全率を考慮した値)を超えないこと、とたるまないことを考慮すると、索初期張力を許容荷重の半分に設定することが係船システムの耐波性能にとって適切である。
- (2) 耐は性能をより良好にするためには、係留索の長さが長い方が有効である。
- (3) 索が長すぎると、2 船体の間隔が一定の時に索の長さを増やすことは船軸に対する索の方向の角度を小さくするので、フェンダーを圧縮させるための索張力が高くなり、許容荷重に近づき、係船システムの耐は性能に悪影響を与えることになる。

新たな係船システムの提案にあたって、低周波数領域での波による影響、波入射角度による影響を総合的に評価するために多方向不規則波中の時刻歴応答計算による検討を行った。スチールワイヤロープを合成繊維ロープ「ダイニーマ」に変えることと、フェンダーをワイヤロープに直接につなげることで、係船システムの耐波性能は改善されることが確認された。

参考文献

- [1] 海洋工学委員会編, 「実践浮体の流体力学」, 前編-動揺問題の数値計算法 (2003)
- [2] 瀬戸秀幸ほか, 浮体に働く流体力学解析用 3 次元境界要素計算の効率化, 平成 21 年春季講演会 www.jasnaoe.or.jp/publish/dl/sp_2009.pdf
- [3] Fentek Marine Systems GmbH, Marine Fendering Systems (2001)30-32
- [4] 鋼船規則 L 編, 艀装品, (2009)21
- [5] 山川ほか, 海水によるワイヤロープの腐食劣化の研究, 付録 1.ロープに関する資料, 海洋技術安全研究報告

Table 2 Comparison of wire rope and Dyneema

係留索	ワイヤロープ	ダイニーマ
切断荷重[kN]	1230	1270
ヤング率[N/mm ²]	92200	53665
直径[mm]	50	48

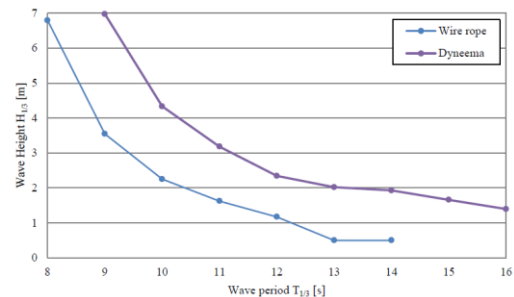


Fig. 15 Allowable wave height

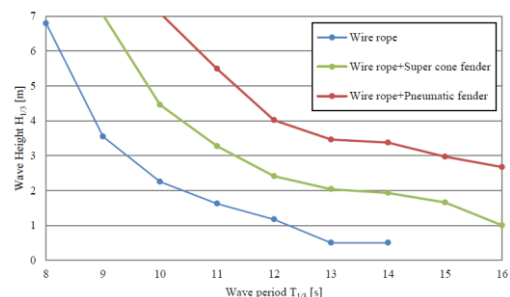


Fig. 16 Allowable wave height