External turret 係留における スラミングを考慮した船首部最大曲げモーメントの予測

学生会員 石 原 祐 希* 正会員 加 藤 俊 司**
正会員 村 井 基 彦*** 正会員 中 島 康 晴**

Estimation of Maximum Bending Moment at FPSO Bow Considering Slamming in External Turret Mooring

by Yuki Ishihara, *Student Member* Shunji Kato, *Member*
Motohiko Murai, *Member* Yasuharu Nakajima, *Member*

Summary

The external turret system is widely used for mooring of Floating Production, Storage and Offloading system (FPSO). Slamming is one of important issues which should be considered for designing FPSOs because FPSOs must stay in the same area even if those are under harsh conditions such as a storm. In response to cases of accidents caused by slamming, such as Schiehallion, a series of research projects were conducted in Europe, which proposed that the simplified estimation method of maximum slam force; however, it was too simplified to be used for detailed design.

In this paper, we present the extreme value estimation of maximum bending moment including the slamming effect at the connection between the FPSO bow and the external turret lever. The foundation of the estimation method is based on the time-domain simulation by using the simulation model which was validated by comparing the results of the simulations with those of model tests. The simulation model was validated through comparison between model test results and the simulations. Two estimation methods for the expected value of 3 hour-maximum bending moment using the validated simulation model were investigated; one was the way of averaging maxima in multiple simulations, and another was due to extreme value analyses by four kinds of methods. As a result, the first method required more than 30 simulations; for the second method, the generalized Pareto distribution was the most suitable for extreme value analysis.

1. 緒 言

現在の海底油田開発において、浮体式石油生産設備の6割以上を占める Floating Production, Storage and Offloading system (FPSO) では、External turret 係留が広く採用されている。External turret 係留はカンチレバー構造をとるため、turret 底面にスラミングが発生した場合、FPSO 船体（以下船体とする）とカンチレバー部の接続部（以下船首部とする）に大きな曲げモーメントが作用する危険性がある。1998年に発生した Schiehallion FPSO の事故等により、FPSO に発生するスラミングの危険性が示唆されると、欧州では「SafeFlow¹⁾」と呼ばれる一連の研究プロジェクトが行われた。その中で、Buchnerらによりスラミング時に External turret に作用する最大衝撃力の簡易推定法が提案された²⁾。しかし、この推定法は最大値のみを簡易的に見積もるもので、衝撃力スペクトルの取得や

時刻歴解析はできない。そこで、時刻歴解析を用いたより詳細な推定手法の確立を目的として、船首部に作用する最大曲げモーメントの期待値予測手法の検討を行った。なお時刻歴解析は、スラミングによる衝撃力の力学モデルを用いたシミュレーションにより行った。

2. 研究の手法および対象モデル

2.1 研究の手法

本論文は、一般的な External turret 係留の FPSO を想定し、模型試験および力学モデルに基づくシミュレーション計算を行った。模型試験とシミュレーション計算を比較検討することで、作成したシミュレーションモデルの妥当性の検証、ならびに力学モデルによる期待値推定の可否について検証を行った。検証を済ませたモデルを用いて、係留解析の手法を参考に2種類の期待値推定手法の検討を行った。手法①として、複数回シミュレーションの各最大値を平均し、期待値とする手法を採用した。係留解析では、実行すべきシミュレーション回数が船級協会によって異なっている³⁾⁴⁾⁵⁾ことから、曲げモーメントについても実行回数と期待値のばらつきについて検討を行った。手法②では、1回のシミュレーションに対

* 横浜国立大学 大学院 理工学府
** 海上技術安全研究所
*** 横浜国立大学 大学院 環境情報研究院

して極値解析を行う手法を採用した。一般的に線形現象における期待値は Rayleigh 分布から求められるが、スラミングによる衝撃力は非線形影響が大きく、推定に Rayleigh 分布を使用すると過小評価となる⁶⁾。船首部曲げモーメントについても、スラミングによる衝撃力の影響を受けるため、同様の結果が予想される。そこで本論文では、非線形現象に対応できる Generalized Pareto 分布や3変数 Weibull 分布、ACER 法による詳細な極値解析を行い、その適合性を検討した。

2.2 対象モデル

Table 1 に示す一般的な FPSO を想定し、Fig. 1 に示すカンチレバー部と turret を設計した。カンチレバー部の剛性等の諸元は Table 2 に示す。FPSO に使用した係留系の諸元は、Table 3 に示す通りで、Fig. 2 に示す張力特性を持つ。本論文では、船首部曲げモーメントとして、Fig. 1 のカンチレバー部の付け根（星印の位置）に作用する曲げモーメントを取り扱う。曲げモーメントは、FPSO を右舷側より見た際に、右回りに作用するモーメントを正方向と定義した。ゆえにスラミング発生時に作用する曲げモーメントは負方向となる。なおこれ以降、 $M(+)$ を正方向の曲げモーメント、 $M(-)$ を負方向の曲げモーメントを表す記号として使用する。

Table 1 Principal particular of FPSO.

Item	
Lpp	320 [m]
Loa	331 [m]
Lwl	326.85 [m]
Breadth	58 [m]
Depth	26 [m]
Draft	19.3 [m]
Displacement	287,885 [ton]
KG	11.62 [m]
KB	10.08 [m]
BM	13.95 [m]
GM_l	435.87 [m]
GM_t	12.41 [m]
K_{yy}	65.68 [m]
κ_{yy}	0.20

2.3 シミュレーションモデル

力学モデルに基づくシミュレーション計算を行うため、OrcaFlex⁷⁾ を用いて Fig. 3 に示すモデルを作成した。モデルの作成にあたり、カンチレバー部は設計値と同じ曲げ剛性を持つ、直径 5m の円柱として近似した。カンチレバー部と turret の接続部などは省略した。Turret とカンチレバー部は 6D Buoy により再現した。船体に作用する流体力は、パネル法に基づく解析ソフトの WAMIT⁸⁾ により推定した。

Fig. 1 Dimension of cantilever and external turret.

Fig. 2 Specification of mooring tension. Tx is restoring force in surge direction.

Table 2 Specification of cantilever.

Item	
Material	Mild steel
Young's modulus	204[GPa]
Moment of inertia of area	6.43 [m ⁴]
Section modulus	1.837 [m ³]
Bending stiffness	1.31×10^3 [GPa · m ⁴]

Table 3 Specification of turret mooring system.

Item	
Number of mooring lines	3
Water depth	160 [m]
Anchor radius	320 [m]
Chain length	370 [m]
Diameter	182 [mm]
Azimuth	60°, 180°, 300°
Weight in air	662.48 [kg/m]
Weight underwater	575.98 [kg/m]
Minimum Breaking Level	21,746 [kN]

OrcaFlex では、スラミングによる衝撃力は式 (1) に示す力学モデルに基づいて計算される。

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_s S \dot{r}^2 \quad (1)$$

C_s はスラミング係数であり、この係数に非線形影響が包括される。係数は対象物体の入水時には C_s 、離水時には C_e として別々に定めることができる。なお離水時の計算では、式 (1) の C_s を C_e に置き換える。 ρ は流体の密度、 S は瞬時の水線面積、 $\dot{r}$ は物体と水面との相対速度を表す。衝撃力は、対象物体が水面を通過している間のみ作用する。 C_s は DNV・GL の recommended practice⁹⁾ を参考に、 2π と 5.15 を採用した。 C_e については、模型試験結果を参考に π を採用した。

Fig. 3 Simulation model by OrcaFlex.

3. 模型試験

模型試験のため、第 2. 節にて設計したカンチレバー部、turret、係留系の 160 分の 1 模型を製作した。カンチレバー部については、フルードの相似則を満たす弾性体模型で再現した。なお曲げ剛性の相似を保つため、箱型構造から平板構造に変更した。Fig. 4 に示すように、これらの模型を FPSO 模型に接続し、海上技術安全研究所の海洋構造物試験水槽内に設置して試験を実施した。

曲げモーメントは、船首部に取り付けたひずみゲージにより計測した。造波は船首側より Table 4 に示す波条件にて行い、波の発生乱数を変更して 12 回繰り返した。

Fig. 4 Setup of model test.

4. 力学モデルの検証

4.1 検証の方法

力学モデルにより求めた曲げモーメントの妥当性を検証するため、シミュレーションと模型試験の結果の比較を行った。シミュレーション計算は、模型試験と同様に Table 4 に示す波条件にて行った。検証は 2 段階に分けて行った。

Table 4 Wave condition.

	Real	Model (1/160)
$H_s[m]$	7.8	0.0488
$T_p[s]$	15	1.186
γ		3.3
Spectral type		JONSWAP
Duration [s]	10,800	854

Fig. 5 Division in frequency domain.

1. Fig. 5 に示す周波数帯ごとに分割した検証
(線形成分, 2 次成分, 3 次以上の高次成分)
2. 全ての周波数帯を考慮した, 全体の検証
(統計量, ピーク値分布, 最大値の期待値)

4.2 線形成分の検証

曲げモーメントの線形成分の検証は、式 (2) に示す無次元化した応答関数 ($G_1(f)$) の比較により行った。応答関数の入力値は静水中の船体中央位置における波高 $H(f)$ 、出力は曲げモーメント $M(f)$ とした。 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 S は turret の底面積、 L は船首から turret 中心までの水平方向長さを表す。応答関数は、模型試験ではスペクトル解析から、シミュレーションでは周波数領域解析から求めた。

$$G_1(f) = \frac{M^{(1)}(f)}{\frac{1}{2} \rho g S L H(f)} \quad (2)$$

Fig. 6 は無次元化応答関数を周期ごとに比較したものである。両者の値がほぼ一致していることから、曲げモーメントの線形成分について、同程度の大きさであることを確認した。

4.3 2 次成分の検証

曲げモーメントの 2 次成分の検証は、式 (3) に示す無次元化した 2 次応答関数 ($G_2(f_1, f_2)$) の比較により行った。2 次応答関数は、模型試験とシミュレーションともに、Matlab の toolbox である Higher Order Spectral Analysis Toolbox¹⁰⁾

Fig. 6 Response function of first-order.

を用いたパワースペクトル解析から取得した。Fig. 7は2次応答関数のうち、 $f_1 = f_2$ における、周期ごとの比較である。

$$G_2(f_1, f_2) = \frac{M^{(2)}(f_1, f_2)}{\frac{1}{2}\rho g \sqrt{SL} H^2(f_1, f_2)} \quad (3)$$

シミュレーションは模型試験を30%程度上回っている。これはシミュレーションモデルと模型でカンチレバー部の形状が異なっており、作用する流体力が異なるためと考えられる。シミュレーションは模型試験に対し多少過大評価であるが、Fig. 5のパワースペクトルより曲げモーメントへの2次成分の影響は小さく、かつ安全側である。ゆえに、模型試験とシミュレーションの2次成分の結果に大きな差異は生じないと考えられる。

Fig. 7 Response function of second-order.

4.4 高次成分の検証

曲げモーメントのうち、3次以上の高次成分をハイパスフィルタリングにより抽出したところ、Fig. 8に示す過渡振動が現れた。これはスラミング時の衝撃力が起振力である。スラミングによる影響について、2次成分では衝撃力による影響（スラミング係数による結果の違い）がほとんど見られなかったことに対し、こちらでは振幅の大きな過渡振動が発生している。また後述する Fig. 9(b)の時系列が示すように、過渡振動によって観測される最大曲げモーメントは非常に大きいことがわかる。ゆえに、External turret に作用するスラミング現象では、過渡振動を考慮することが重要であると考えられる。

3次を超える高次応答を扱う理論体系は存在しないため、過渡応答の減衰特性および鉛直方向の固有振動モードからモデルの妥当性を検証した。

減衰特性の検証には、式(4)に示す振幅比を表す減衰係数 δ を用いた。 a_n はある時刻での過渡応答のピーク値を表し、 a_{n+5} は a_n から5番目の過渡応答のピーク値を表す。

$$\delta = \frac{1}{5} \ln \frac{a_n}{a_{n+5}} \quad (4)$$

OrcaFlex の modal analysis を行い、固有振動数の推定を行った。固有振動数の推定については、模型は turret 底面をハンマーでたたくことで、シミュレーションモデルは OrcaFlex の modal analysis により実施した。Table 5は、減衰係数と固有振動数を比較したものである。模型試験とシミュレーションの減衰係数は兼ね一致している。固有振動数については、シミュレーションモデルは模型より0.2Hzほど高くなったものの、存在する固有振動モードを捉えられたことを確認した。

Table 5 Comparison of damping coefficient and natural frequency between model test and simulation.

	δ	f_n [Hz]
Simulation	0.2~0.35	1.78
Model test	0.2~0.3	1.58

Fig. 8 Transient oscillation by slamming. (experiment)

4.5 モデルの全体検証

模型試験の波高データをシミュレーションモデルに入力することにより、同じ時系列の海象を Fig. 9 (a) のように再現したところ、(b) のような曲げモーメントの時系列が得られた。曲げモーメントの最大値（正方向と負方向それぞれ）と時系列の標準偏差、ピーク値分布について検証を行った。

Table 6は模型試験とシミュレーションの最大値、標準偏差を比較したものである。スラミング係数は $C_s = 2\pi$ と $C_s = 5.15$ の2ケースについて計算を行ったが、ともに誤差10%以内に収まった。今回は最大曲げモーメントの推定が目的のため、以後の解析では最大値がより模型試験に近い、 $C_s = 5.15$ を採用した。

次に、曲げモーメントの時系列データからピークを抽出し、ピーク値分布の検証を行った。ピーク値のカーネル密度分布、分布の平均と標準偏差を示したものが Fig. 10 である。両者のピーク値分布は近く、分布の平均値についてもシミュレーションは模型試験の 95%信頼区間に収まっている。分布の標準偏差については、正方向では信頼区間からわずかに外れているが、負方向では収まっている。

Fig. 9 (b) から、シミュレーションでは C_e の影響によりさらなる過渡振動が発生している。この振動が時系列に与える影響を確認するため、振動の発生しない C_e を 0 とした場合と、 C_e を π とした場合で標準偏差を比較した。 C_e が 0 の場合 30,498[kNm], C_e が π の場合 30,500[kNm] と影響はほとんど見られなかった。ただし、正方向の最大曲げモーメントについては、 C_e が 0 の場合には小さな値となった。本モデルでは C_e の評価に問題はあるが、強度評価において重要な最大曲げモーメントを生じたのは C_s による負方向である。ゆえに、以後は負方向曲げモーメントの最大値分布と期待値推定に焦点を絞る。

Fig. 9 Comparison of model test results and simulation ones with respect to waves and bending moment. (a) Wave time series. (b) Bending moment time series.

4.6 最大値のサンプル期待値

力学モデルの統計モデル検証のため、模型試験とシミュレーションによる 3 時間最大曲げモーメントの期待値を比較した。模型試験の期待値は、計測した 3 時間 $\times$ 12 データの各最大値の平均とし、95%信頼区間はブートストラップ¹¹⁾により計算した。シミュレーションによる期待値は、3 時間 $\times$ 100 データの各最大値の平均とし、95%信頼区間はブートストラップにより計算した。

Fig. 11 は 3 時間における曲げモーメントの最大値の期待値を示す。正方向および負方向の曲げモーメントについて、シミュレーションにおける 95%信頼区間が、模型試験における 95%信頼区間に包括されていることが確認できた。期待値の差についても 10%以内に収まっている。式 (1) に示した力学モ

Fig. 10 Comparison of the peak value distribution of 3 hours-bending moment in simulation with model test. (a) Peak value distribution of $M(+)$. (b) Mean, standard deviation (std.) and 95% Confidence Interval (C.I.) of $M(+)$. (c) Peak value distribution of $M(-)$. (d) Mean, std. and 95% C.I. of $M(-)$. The left side in (b) and (d) shows the Mean. The right side does the std..

デルを用いた曲げモーメントの最大値の期待値推定が、誤差 10%以内で可能であることが示された。

Fig. 11 Comparison between the expected values due to simulation and those in model test. (a) $M(+)$ expected value. (b) $M(-)$ expected value.

Table 6 Comparison of the maximum value and standard deviation of bending moment in simulation.

	Maximum value M(+) [kNm]	Maximum value M(-) [kNm]	Standard deviation [kNm]
Model test	2.40×10^5	2.86×10^5	2.76×10^4
Simulation($C_s = 2\pi$)	2.22×10^5 (7.5%)	3.03×10^5 (5.9%)	2.58×10^4 (6.5%)
Simulation($C_s = 5.15$)	2.26×10^5 (5.9%)	2.85×10^5 (0.35%)	2.53×10^4 (8.3%)

5. 力学モデルによる期待値推定手法の検討

本節では、第 4. 節で検証した力学モデルを用いた期待値推定手法として、2 つの手法の検討を行った。検討に際しては、第 4. 節と同様 3 時間の最大値の期待値を対象とした。なお本節では、負方向の曲げモーメントの結果について示す。正方向の曲げモーメントについても同様の手法が成り立つ。

5.1 手法 ①：複数回シミュレーションによる推定法

複数回シミュレーションの各最大値を平均し、期待値とする手法を検討した。検討に際し、船首部の曲げモーメントにも影響を及ぼす、係留張力の解析手法を参考とした。係留解析について、各船級協会では時刻歴応答解析を行う場合の、繰り返すべきシミュレーション回数が提案されているが、船級協会によって異なる指針を示している。DNV・GL では 10～20 回³⁾、NK では 20 回以上⁴⁾、BUREAU VERITAS (以下 BV) では 30 回以上、それ以下であれば平均値と標準偏差を組み合わせたこと⁵⁾となっている。そこで曲げモーメントにおいても係留設計にならい、シミュレーション回数に対する 3 時間最大曲げモーメントの期待値の信頼幅評価を行った。シミュレーション回数は、5 回、10 回、15 回、20 回、30 回、40 回、50 回の 7 通りとした。

3 時間のシミュレーションを 100 回行い、最大値のサンプルを 100 個用意した。この 100 個の最大値の平均値を、3 時間期待値の最良推定量とした。100 個のサンプルから、期待値推定に要するシミュレーション回数分のサンプルを無作為に抽出し、平均する操作を行った。この操作に対してブートストラップを行い、期待値の 95%信頼幅を求めた。

Fig. 12 は、シミュレーション回数 100 回の平均を期待値の最良推定量とし、その経験分布に基づく信頼幅をシミュレーション回数ごとに表したものである。点線は最良推定量 (100 回平均) からの誤差が 10%、5% となる値を示す。最良推定量からの誤差をみると、10% 以内に収めるには 10 回以上、5% 以内に収めるには 50 回以上のシミュレーション回数が必要である。曲げモーメントの最大値はばらつきが大きく、信頼幅が減少しづらと考えられる。信頼幅の減少率に着目すると、20 回から 30 回では誤差 12.7% から 10.6% と 2.1% 分減少するのに対して、30 回から 40 回では 10.6% から 9.9% と 0.7% 分の減少のみである。また、シミュレーション回数が 30 回を超えると変化がほとんど見られない。推定結果の安定性を考えると、シミュレーション回数は 30 回以上が望ましいといえる。この結果は、係留解析において BV が提唱している結果と等しい。

Fig. 12 Expected values of 3 hour maximum bending moment relating to the number of simulations.

5.2 手法 ②：極値解析を使用した推定法

1 回のシミュレーションデータに対して極値解析を行い、最大値の期待値を推定する手法を検討した。極値解析は POT 法 (Generalized Pareto 分布), POT 法 (3 変数 Weibull 分布), All peaks approach (Gumbel 分布), ACER 法の 4 つの手法を使用した。参考として、期待値分布のみ Rayleigh 法の計算結果についても示す。手法の詳細については付録を参照されたし。なお計算には、Matlab プログラムの Waf¹²⁾ と ACER.v2¹³⁾ を使用した。

波の発生乱数が異なる 100 個のシミュレーションデータを用意し、それぞれ極値解析を行った。Fitting を行った例を Fig. 13 に、100 個の各シミュレーションデータにおける最大値の期待値と信頼区間を示したものを Fig. 14 に、100 個の期待値と信頼区間の大きさ (信頼幅) の分布を箱ひげ図で表したものを Fig. 15 に示す。+ は外れ値を表す。Table 7 はこれら 100 個の信頼区間が、100 回のシミュレーションの平均値を捉えた割合を示す。

Generalized Pareto 分布を使用した推定については、Table 7 より 100 回平均を 97% と高い割合で捉えられている。期待値についても、Fig. 15 をみると妥当な値を示している。信頼幅については、データごとによるばらつきが他の手法と比較して非常に大きい。

Weibull 3 変数分布を使用した推定については、Table 7 よりどちらも 100 回平均を 95% を超える高い割合で捉えられている。Fig. 15 をみると、期待値は妥当な値を示しており、そ

Fig. 13 Examples of fitting. (a) Generalized Pareto distribution. (b) 3-parameter Weibull distribution. (c) Gumbel distribution. (d) ACER method.

のばらつきも Generalized Pareto 分布と比較すると小さい。信頼幅についても、Generalized Pareto 分布よりばらつきが小さく安定している。

Fig. 14 Expected value and confidence interval. (a) Generalized Pareto distribution. (b) 3-parameter Weibull distribution. (c) Gumbel distribution. (d) ACER method.

Gumbel 分布を使用した手法では、Fig. 15 をみると信頼幅は他の手法と比較して小さく収まっているものの、Table 7 をみるとそのために 100 回平均値をとらえることができていない。また、期待値も少し小さな値となっている。Gumbel 分布をピーク値分布に fitting する推定手法では、わずかに小さく見積もられてしまう危険性があるといえる。

ACER 法による推定値については、Table 7 より 100 回平均を捉えた割合は 84%と Generalized Pareto 分布や 3 変数

Fig. 15 Comparison of distribution of expected value and 95% C.I. in each method. (a) Expected value (b) 95% C.I.

Weibull 分布と比較すると少し精度が低い。一方で Fig. 15 より期待値は他の手法と比較して、少し大きな値となり、安全側に見積もられる傾向を示している。なお信頼幅については、Gumbel 分布による推定よりは大きいものの、Generalized Pareto 分布や 3 変数 Weibull 分布を用いる場合と比べると小さな値となっている。ACER 法は推定手法として有効であるが、小さく見積もられているケースもいくつか見受けられる (Fig. 14)。そのため、シミュレーション 1 回の推定においては、信頼区間は広いものの安定性がある、3 変数 Weibull 分布を用いる方が良いと考えられる。

以上の考察を踏まえると、fitting の性能については Generalized Pareto 分布、3 変数 Weibull 分布、ACER 法ともに良好といえる。信頼幅を考慮すると、大きさとばらつきがともに大きな Generalized Pareto 分布よりも、その他の 2 手法の使用が望ましいといえる。次に 100 回平均をとらえた回数を考慮すると、ACER 法は期待値が安全側であるものの、信頼幅が小さいことから全体が小さく見積もられる可能性がある。一方で、3 変数 Weibull 分布は信頼幅は広くなるもののばらつきが小さく、安定して安全側に見積もりやすい。以上のことから、

Table 7 Percentage that C.I. covered the mean of 100 simulations.

Method	Number of times
Generalized Pareto	97
Weibull	96
Gumbel	65
ACER	84

ら、設計において 3 変数 Weibull 分布の使用が望ましいと考えられる。

6. 結 論

本論文では、External turret 係留に作用するスラミングが船首部に及ぼす最大曲げモーメントの期待値を、力学モデルを用いて推定する手法の検討を行った。

初めに、模型試験と力学モデルに基づくシミュレーションを比較することで、力学モデルの妥当性検証を行った。シミュレーションモデルの検証の結果、スラミングによる衝撃力の力学モデルを用いた、曲げモーメントの最大値の期待値の推定が可能であることが示された。

次に、検証されたモデルを用いて、曲げモーメントの最大値の期待値推定手法について検討を行った。検討した手法は、複数回シミュレーションの各最大値を平均して期待値とする手法 ① と、1 回のシミュレーションに対して極値解析を行う手法 ② の 2 つである。手法 ① では、シミュレーション 100 回の平均値を最良推定量とし、実行回数による期待値の信頼幅の変化について検討を行った。推定結果の安定性を考慮すると、30 回以上のシミュレーション回数が望ましいことを示した。これは BV の係留解析における提唱結果と等しく、スラミングを考慮した場合においても同様に適用可能なことを示している。手法 ② では、非線形現象に対応できない Rayleigh 法に代わる手法として、4 つの極値解析手法について比較を行った。Fitting 性能について POT 法 (Generalized Pareto 分布、3 変数 Weibull 分布) と ACER 法が良好であること、設計の観点では POT 法 (3 変数 Weibull 分布) が適当であることを示した。

以上の結果から、スラム力の力学モデルを使用した時刻歴解析により、船首部曲げモーメントの最大値の期待値推定が可能であることを示した。またスラミングによって過渡振動が励起されることから、最大曲げモーメントの正確な推定には、本論文のような過渡振動を含めた解析を行うことが重要である。

謝 辞

模型試験にご協力いただいた、海上技術安全研究所 産業システム系の岡修二氏に御礼申し上げます。

また本研究を行うにあたり、広くご支援賜りました海上技術安全研究所 海洋開発系 海洋システム研究グループの皆様に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Buchner, B., Hodgson, T., Voogt, A.J.: "SUMMARY REPORT ON DESIGN GUIDANCE AND ASSESSMENT METHODOLOGIES FOR WAVE SLAM AND GREEN WATER IMPACT LOADING", 2004.

- 2) Buchner, B., and Voogt, A.J.: Wave Slamming on External Turrets of FPSOs, Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2009-79581, 2009.
- 3) DNV・GL: OFFSHORE STANDARD DNVGL-OS-E301 Position mooring, 2018.
- 4) ClassNK: Guidelines for Floating Offshore Facilities for LNG/LPG Production, Storage, Offloading and Regasification (Fourth Edition) Japanese Version, pp. 17-23, 2016 (in Japanese).
ClassNK: 浮体式海洋液化天然ガス及び石油ガス生産、貯蔵、積み出し、再ガス化設備のためのガイドライン (第4版), pp. 17-23, 2016.
- 5) BUREAU VERITAS: Classification of Mooring Systems for Permanent Offshore Units, p. 22, April 2012.
- 6) Ishihara, Y., Kato, S., Murai, M., Nakajima, Y., and Nakanishi, S.: EXPERIMENTAL STUDY OF SLAM FORCES ON EXTERNAL TURRETS WITH DIFFERENT TOP ANGLES, Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2020-18327, 2020.
- 7) Orcina: <https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/index.php> (Retrieved on March 16, 2021)
- 8) WAMIT, Inc.: <https://www.wamit.com/> (Retrieved on March 16, 2021)
- 9) DET NORSKE VERITAS: RECOMMENDED PRACTICE DET NORSKE VERITAS DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads, pp. 126-127, 2014.
- 10) Higher Order Spectral Analysis Toolbox:
<https://jp.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3013-hosa-higher-order-spectral-analysis-toolbox> (Retrieved on March 16, 2021)
- 11) Micael, R.C.: Bootstrap Method: A Guide for Practitioners and Researchers, Wiley Series in Probability and Statistics (Second Edition), Wiley, 2007
- 12) Brodtkorb, P.A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rydén, J. and Sö, E.: WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads, Proc. 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Seattle, USA, Vol III, pp. 343-350, 2000.
- 13) Naess, A., Gaidai, O., and Karpa, O.: Estimation of Extreme Values by the Average Conditional Exceedance Rate Method, Journal of Probability and Statistics Vol. 2013 pp. 1-15, 2013.

付 録

A1. 極値解析手法

A1.1 Rayleigh 法

Rayleigh 法は、線形現象の極値予測に用いられる一般的な手法で、最大値の期待値 (Most Probable Maximum Value, MPM 値) は以下の式で表される。

$$MPMvalue = \mu + \sigma \sqrt{2 \ln T / T_z} \quad (A1)$$

μ , σ は時系列の平均値および標準偏差, T_z はゼロアップクロス平均波周期, T は再現期間を表す。

A1.2 POT 法 (Generalized Pareto 分布)

POT (Peaks Over Threshold) 法は、ある閾値を超えるピーク値を抽出する手法で、抽出したピーク値に極値分布を fitting して解析を行う。本手法では抽出したピーク値に対し、下記の Generalized Pareto (GP) 分布を fitting し、最大値の期待値を求めた。

$$x = \begin{cases} \mu + \frac{\sigma}{k} \left(1 - \frac{1}{N^k}\right), & k \neq 0 \\ \mu + \sigma \ln(N), & k = 0 \end{cases} \quad (A2)$$

σ は尺度パラメータ, μ は位置パラメータ, k は形状パラメータを表す。Fitting には MPS (Maximum product of spacings) 法を使用した。閾値は任意で定めるため $\mu + 3\sigma$ とし、信頼区間は 95% とした。

A1.3 POT 法 (3 変数 Weibull 分布)

POT 法により抽出したピーク値に対し、下記の 3 変数 Weibull 分布を fitting し、最大値の期待値を求めた。

$$x = b + a \left(-\log \frac{1}{N} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (A3)$$

a は尺度パラメータ, b は位置パラメータ, c は形状パラメータを表す。Fitting には最尤法を使用した。閾値は $\mu + 3\sigma$ とし、信頼区間は 95% とした。

A1.4 All peaks approach (Gumbel 分布)

スラミング 1 回につき 1 つのピークを抽出し、すべてのピーク値に対して以下の式で示す Gumbel 分布を fitting し、最大値の期待値を求めた。

$$x = b - a \log \left\{ -\log \left(1 - \frac{1}{N} \right) \right\} \quad (A4)$$

a, b はともにパラメータ。Fitting にはモーメント法を使用し、95% 信頼区間は bootstrap により取得した。

A1.5 ACER 法¹³⁾

Average Conditional Exceedance Rates (ACER) 法は時系列データにおいて、閾値の変数 η を超える超過確率を求め、

その超過確率に対して極値分布を fitting する手法である. η を変数とする超過確率は以下に示す式で表される.

$$\tilde{\epsilon}_k(\eta) = \frac{1}{N - k + 1} \sum_{j=k}^N a_{kj}(\eta) \quad (\text{A5})$$

N は全データ点数, $a_{kj}(\eta)$ は直前 $k-1$ 個のデータが閾値 η

を超えない条件下での超過回数, $\tilde{\epsilon}_k(\eta)$ は直前 $k-1$ 個のデータが閾値 η を超えない条件下での平均超過確率を表す. $\tilde{\epsilon}_k(\eta)$ に対し, 下記の Gumbel 漸近型分布を fitting し, 最大値の期待値を求めた. なお信頼区間は 95%とした.

$$\epsilon_k(\eta) = q_k \exp\{-a_k(\eta - b_k) - c_k\}, \eta \geq \eta_1 \quad (\text{A6})$$