

PS-23 船体応答の効率的な極値予測法

構造安全評価系 * 高見 朋希

1. はじめに

船舶が遭遇する海象における船体応答の極大値及びその発生確率を評価することは安全性確保のために極めて重要である。このためには、不規則波の位相成分を表現するための乱数値を変えたモンテカルロシミュレーションまたは構造信頼性理論による線形化に基づく手法が知られているが、精度の良い確率のためには多くの乱数値を取る必要があり、これによって極値予測に要する計算工数が膨大になる。本発表ではこの問題を解決するために、少ない乱数の数でも精度の良い確率評価が可能な新しい手法を紹介し、その検証結果及び効果について発表する。

2. Prolate Spheroidal Wave Functions を使った海洋波

通常、長波頂不規則波は三角関数の重ね合わせとして以下の式で表される。

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^M \sigma_i (u_i \cos \omega_i t + \bar{u}_i \sin \omega_i t)$$

$$\sigma_i = \sqrt{S(\omega_i) \Delta \omega} \quad (2.1)$$

ここで $S(\omega)$ は波スペクトル、 ω_i は各要素波の角周波数、 $u_i, \bar{u}_i$ は標準正規分布に従う乱数である。ここで、要素波の数 M は任意に決めることができるが、波浪中応答の発生確率を正確に判定するためにはなるべく多く、約 $M=30 \sim 100$ の値を取る必要がある¹⁾。

一方で、Sclavounos²⁾ は、Prolate Spheroidal Wave Functions (PSWF) を使った長波頂不規則波表現を提案した。これは次式で表される。

$$\zeta(t) = \sum_{n=0}^{N_\zeta} z_n f_n(t), \quad -T \leq t \leq T$$

$$\text{where } f_n(t) = \sum_{j=0}^{N_p} X_{nj} \psi_j \left(\frac{t}{T}, c \right) \quad (2.2)$$

ここで z_n は標準正規分布に従う乱数、 ψ_j は PSWF、 c はスレピアン周波数³⁾である。 X_{nj} は波スペクトルに応じて事前に計算することができる²⁾。(2.2) 式は時間長の制約があり、スレピアン周波数 c および波スペクトルの上限周波数 Ω と以下の関係がある。

$$c = T\Omega \quad (2.3)$$

また、不規則波を十分に表現するのに必要な乱数の数 N_ξ は、

$$N_\xi \cong 2c / \pi \quad (2.5)$$

となること Sclavounos²⁾ により示されている。本研究では $c=20$, $T=25$ [s] とした場合の波浪中応答の極値予測結果を紹介する。

3. 船体縦曲げモーメントの極値予測法

本研究では過去に構築した低次元モデル⁴⁾をコンテナ船(船長 283.8m)の船体縦曲げモーメントの時系列計算に用いる。遭遇海象は2種類とし、有義波高 6.5m, ゼロアップクロス周期 10.5s (State 1), 及び有義波高 11.5m, ゼロアップクロス周期 11.5s (State 2) の Pierson-Moskowitz スペクトルとした。スペクトル形状を図-1に示す。これらの海象中を向波状態で航行する状態での船体縦曲げモーメントの極値予測を三角関数ベースの式(2.1)と PSWF ベースの式(2.2)を使って調べた。なお、State 1 では船速ゼロ、State 2 では船速 8kt を想定した。

極値予測法には1次構造信頼性理論 (First Order Reliability Method, FORM) を用いた。FORM では、応答局面を乱数値、すなわち式(2.1)の場合 $u_i, \bar{u}_i$ 、式(2.2)の場合 z_n により作成し、対応する極大縦曲げモーメントに対する設計点を探索する方法である⁴⁾。State 1 では縦曲げモーメントの波浪成分のみ、State 2 では衝撃力に伴う弾性振動成分を含んだ縦曲げモーメントの極値分布を調べた。

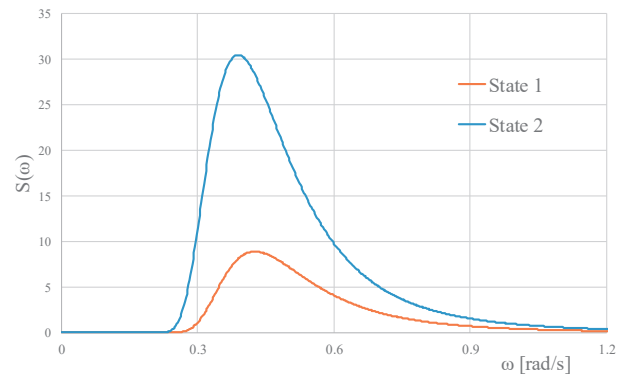


図-1 想定した遭遇波浪スペクトル

4. 縦曲げモーメントの極値予測結果

三角関数ベースの式(2.1)と PSWF ベースの式(2.2)を用いた場合の縦曲げモーメント極値の信頼性指標 (β) を FORM により計算した。State 1 の結果を図-2に、State 2 の結

果を図-3に示す。それぞれ、Trig.+FORMが三角関数ベースの方法、PSWF+FORMがPSWFベースの方法である。信頼性指標の検証のため、モンテカルロシミュレーション（MCS）の結果も示している。

State 1の結果から、Trig.+FORM ($M=50$)、PSWF+FORM ($N_{\xi}=9$)はモンテカルロシミュレーションの結果とほぼ同値の信頼性指標を導いている。PSWF+FORMの乱数の数 $N_{\xi}=9$ はTrig.+FORMに要する乱数の総数 ($=2M=100$)と比較して大幅に少なく、計算効率の高さを示している。Trig.+FORMを使った場合、 M を減らすと計算精度が悪化していることもわかる。

State 2の場合も、Trig.+FORM ($M=50$)、PSWF+FORM ($N_{\xi}=9$)はほぼ同程度の信頼性指標を結果として導いている。このため、厳しい海象中かつ応答に非線形性がある場合でも、PSWF+FORMの高い計算効率を示されたと言える。State 2のモンテカルロシミュレーションの結果より若干低い値となっているが、これは弾性振動の影響が入るため応答局面の非線形性が強くなり、FORMで得られる信頼性指標がMCSより下回ったと考えられる。二次信頼性理論（Second Order Reliability Method, SORM）の適用により解決されるであろう⁵⁾。

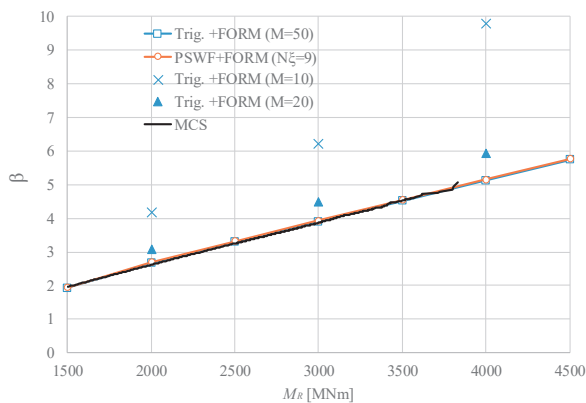


図-2 縦曲げモーメント極値の信頼性指標分布 (State 1)

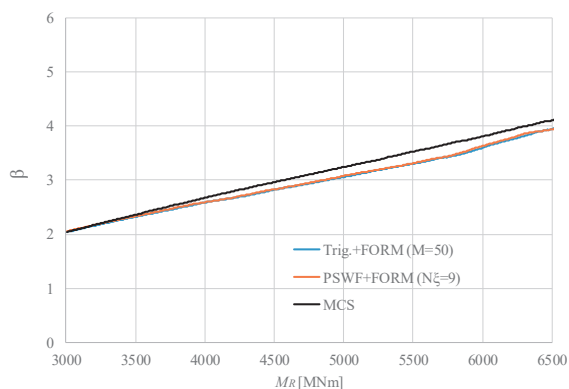


図-3 縦曲げモーメント極値の信頼性指標分布 (State 2)

5. まとめ

本研究では船体縦曲げモーメントの効率的な極値予測法として、PSWFを使った海洋波による不規則波表現のための

乱数削減のアプローチを採用し、一次信頼性理論 FORM による極値予測結果を示した。PSWF ベースの方法は、極値予測に必要な計算工数を従来の三角関数の重ね合わせによる海洋波表現と比べて大幅に削減することができ、かつ評価される縦曲げモーメントの確率分布も正確であることが確認された。本手法により、CFD や非線形有限要素法などの高忠実度な解法を用いた場合でも効率的な船体応答極値予測が期待できる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19K04865 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Jensen JJ. : Extreme value predictions and critical wave episodes for marine structures by FORM. Ships and Offshore Structures (2008), Vol. 3, pp.325-33.
- 2) Sclavounos PD. : Karhunen-Loeve representation of stochastic ocean waves. Proceedings of the Royal Society A; Mathematical, Physical and Engineering Sciences (2012), pp.2574-94.
- 3) Slepian D. and Pollak HO. : Prolate spheroidal wave functions, fourier analysis and uncertainty - I. The Bell System Technical Journal (1961), Vol. 40, Issue 1, pp. 43-63.
- 4) Takami T., Komoriyama Y., Ando T., Ozeki S., Iijima K. : Efficient FORM-based extreme value prediction of nonlinear ship loads with an application of reduced-order model for coupled CFD and FEA. Journal of Marine Science and Technology (2019), Vol. 25, pp.327-345.
- 5) Takami T., Iijima K., Jensen JJ. : Extreme value prediction of nonlinear ship loads by FORM using Prolate Spheroidal Wave Functions, Marine Structures, Vol. 72, 102760.