

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656549

研究課題名（和文） 構造信頼性手法を用いた設計荷重設定方法に関する研究

研究課題名（英文） Derivation of design loads by structural reliability method

研究代表者

飯島 一博 (IIJIMA KAZUHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50302758

研究成果の概要（和文）：本研究では構造信頼性理論 FORM を用いて、一定時間区間の任意の確率レベルの線形／非線形応答を与える、最もありえる不規則波浪時系列を求める。本手法により、膨大な工数を必要としていた設計荷重の導出が、荷重分布を含めて比較的容易に可能であることが示された。また、船体桁の縦曲げ崩壊事象に関して、不規則波中の一発大波での崩壊の方が連続する極限的な波列中の崩壊事象よりもあり得るシナリオであることが示された。

研究成果の概要（英文）：First Order Reliability Method (FORM) is adopted to derive irregular wave trains which yield response equivalent to the maximum response at an arbitrary probability level in a period. It is shown that the method is effective in determining the structural design loads for linear/nonlinear response. The method is also applied to the cumulative collapse behavior of a ship's hull girder in a short term sea state. It turned out that the most probable severe collapse scenario is the one extreme event rather than a series of extreme waves.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：材料・構造力学，信頼性工学

1. 研究開始当初の背景

一般に設計短期海象が設定されたとき、設計短期海象中でシミュレーションあるいは実験を行い、さらに統計処理を行うことで、荷重極値の確率分布を得ることができる。最大応答が得られて設計荷重を求めようとしたとき、規則波中の応答関数が最大となる波向き・規則波周期における荷重分布が設計荷重設定に支配的であることなどを仮定した上で、設計荷重を設定する必要があった。

このような従来の方法では、非線形性を有する応答について考慮する場合、確率的に有意な値を得るためには膨大な数のシミュレーションとその労力が必要である欠点があった。さらに、実際の最大応答が極限的な不規則波

中で生じることを考慮すると、設計荷重が規則波中の荷重特性で決定されるという仮定は非合理的といわざるをえない。

上記の欠点を解決する方法として、不規則波が多数の要素規則波の重ね合わせで表現されることに着目し、予め調整した位相を有する要素規則波を重ね合わせた不規則時系列を設定しておき、この調整された不規則波中のシミュレーションによって、比較的短時間で最大応答を発生させる方法がある。最大応答を生じさせる瞬間の荷重分布がそのまま設計荷重分布の候補となる点でも合理的である。

Jensen が提案した構造信頼性理論(FORM)を用いた手法は、非線形性を有する応答についても適用できる点で注目される。しかしなが

ら、これまで線形応答あるいはそれに準じる応答についてのみ適用に限られていた。また、荷重分布について検討されてこなかった。

2. 研究の目的

研究代表を含む研究グループでは船体桁の崩壊問題を取り扱ってきた。例えば、コンテナ船の斜め波中での崩壊問題では、縦曲げモーメントと振じりモーメントが複合する問題を扱った。複合荷重下の強度の上限を示す相関曲線も純縦曲げあるいは純振じりで得られる最終強度の単純和とはならず非線形関係で与えられる。斜め波中で最も生じやすい崩壊現象について、荷重と構造強度の両面からの探求は興味深い。

また、もう一つの問題として船体縦曲げの最終強度後の崩壊挙動がある。最終強度を超える荷重が作用すると船体構造は崩壊し塑性変形が進む。リスク(「Risk(リスク)=Frequency(頻度)×Consequence(結果・被害)の期待値」として定義される)に基づいて設計がなされるべきという観点に立てば、単にある確率レベルの荷重というだけではなく、同じ確率レベルの荷重の中でも大きな崩壊が生じるときの荷重はどのようなものか?を推定する必要がある。リスク評価上重要な崩壊事象のシナリオの元になる波浪とはどのようなものか?という疑問に対応する探求ともなりうる。

以上から、Jensen の提案した信頼性理論による設計荷重設定手法を拡張的に用いて、複合的な線形・非線形荷重に対する設計荷重と船体縦曲げ崩壊の崩壊量を最大にする設計荷重を導出することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 理論

まず、構造信頼性理論による荷重設定方法について簡単に説明する。波浪スペクトル $S(\omega)$ が与えられたとき、座標原点における長波頂不規則波時系列 $\eta(t)$ は次式のように要素規則波を足し合わせることで表現されることが知られている。

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S(\omega_i)} d\omega \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (1)$$

ここで、インデックス i は波スペクトルを N 個に分割した場合の i 番目を示し、 ω_i は i 番目の周波数を表す。 ε_i は 0 から 2π までの一様な乱数である。一方で、次のような不規則波の表現も知られている。

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N u_i \sqrt{S(\omega_i)} d\omega \cos(\omega_i t) + \sum_{i=1}^N \bar{u}_i \sqrt{S(\omega_i)} d\omega \sin(\omega_i t) \quad (2)$$

ここで、 u_i, \bar{u}_i は互いに無相関な平均ゼロ・分散 1 の標準正規確率変数である。中心極限定

理によって、式(2)で表示される不規則波分布は正規分布に従うことが容易に理解される。式(1)(2)のいずれの表示も等価であるが、本研究では式(2)で表される不規則波表現を用いることとする。

不規則波中の時刻 t における応答を考え、初期攪乱の影響は対象とする系が有する減衰によって消滅していると考えてよいものとするれば、式(2)の表現から、時刻 t における応答 r_t は、初期値によらず u_i, \bar{u}_i の関数となる。よって、線形応答・非線形応答を問わず、

$$r_t = r(u_1, u_2, \dots, u_N, \bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_N | t) \quad (3)$$

と表される。線形応答の場合であれば、伝達関数の振幅特性と位相特性で記述ができる。限界状態関数を $g(\cdot)$ によって表すものとする。応答の目標値を R とするとき、次式を考える。

$$g(\cdot) = g(u_1, u_2, \dots, u_N, \bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_N | t) = R - r(u_1, u_2, \dots, u_N, \bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_N | t) \quad (4)$$

式(4)はいわゆる限界状態関数であり、 $g(\cdot) = 0$ で表される曲面を限界状態曲面と呼ぶ。この場合、応答値 r_t が目標値あるいは閾値 R を超える状態を限界状態と考えることになる。構造信頼性理論の FORM によれば、限界状態関数が与えられると、信頼性指標 β は標準正規空間内で原点と限界状態曲面上の点の最小距離として定められる (図 1 参照)。

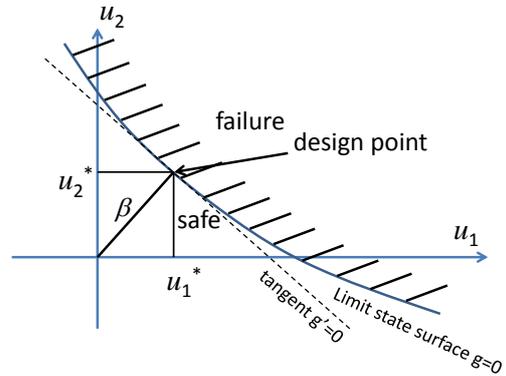


図 1 FORM の概念

数学的には、

$$\beta^2 = \min(u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_N^2 + \bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2 + \dots + \bar{u}_N^2) \quad (5)$$

拘束条件 $g(\cdot) = 0$

の最小値問題で与えられる。信頼性指標 β と確率の間には

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6)$$

の関係があることが知られている。ここで $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数である。

式(5)を最小化する変数 u_i, \bar{u}_i の組み合わせを設計点と称し u_i^*, \bar{u}_i^* で表示する。得られた設計点 u_i^*, \bar{u}_i^* を式(2)に再代入することで、限界状態に達する最も生じやすい応答を生じさせる不規則時系列、すなわち「設計不規則波時系列」が得られる。設計不規則波時系列下で信頼性指標 β に対応した最大応答が生じ、そのときの荷重分布が設計荷重となりうる。

(2) 研究の手順

本課題では信頼性手法を用いた設計荷重の設定方法について、a. 荷重分布の合理性、b. 複合的な瀬非線形荷重への適用性、c. 崩壊事象のような累積性のある非線形応答への適用性、を検討する。そのために次のような手順により研究を行う。

a. 荷重分布の合理性

コンテナ船の曲げ捩り設計荷重設定では荷重の分布が重要である。曲げ捩りの設計荷重については各船級協会から各種のものが提案されているものの本質的には船体中央を原点として、船長で無次元化された船長方向の位置を x としたとき、 $\sin(x)$ あるいは $1-\cos(x)$ に近い荷重分布という点で一致している。本検討では構造信頼性理論によって定められた荷重分布が船級協会から提案されている設計荷重の荷重分布が一致するかを調べる。

b. 複合非線形応答

設計荷重の設定は通常、船長方向応力成分のような応力のある単一成分に着目してなされる。しかしながら、本来は強度基準に対して最も厳しい応答を生じるような設計荷重設定を目指すべきである。強度基準の例ではミーゼス応力に対するものがあるが、ここではミーゼス応力を簡易化した、二成分からなる複合応力

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2} \quad (7)$$

を対象とし、簡易化したミーゼス応力を最大化する設計荷重の導出を試みる。

c. 累積性のある崩壊事象に対する設計荷重

極限荷重の下で船体ハルガーダ構造は崩壊し、塑性変形が生じる。極限荷重が連続する場合には累積的な塑性変形が生じていく。このような極限荷重を発生させる不規則波時系列のうち、最大の累積塑性変形量を生じさせるものを求める。数時間程度の不規則波時系列を対象とする。

4. 研究成果

前節で示した a-c の項目について、以下にそれぞれ成果を報告する。

(1) 荷重分布の合理性についての検討

設計短期海象として波向き 120° (斜め向かい波)、有義波高 10m、平均周期 10.5s を選んだ。このときの、E/R 前デッキ部など 4 か所の船長方向応力に着目する (図 2 参照)。信頼性指

標 $\beta=4.0$ となるような応力応答を生じさせる波浪時系列を得る。

次に、E/R 前部においてそり応力が最大化するときの捩りモーメント分布を図 3 に示した。図中には比較のために船級協会から提案されている設計荷重の分布を示した。おおむね船級協会から提案されている設計荷重と同様の分布が得られていることがわかる。以上から、構造信頼性を用いる手法によって、分布を含む設計荷重が設定できることがわかった。

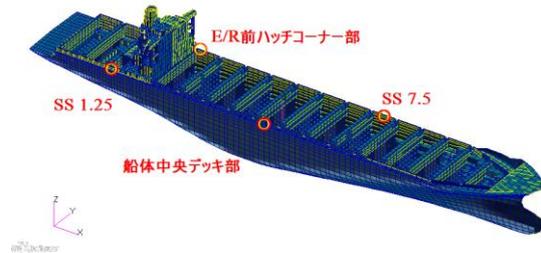


図 2 応力参照位置

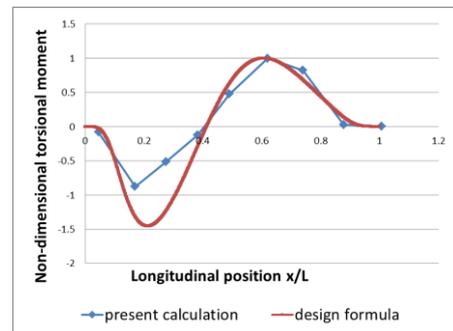


図 3 捩りモーメントの分布

(2) 複合非線形応答

前節と同様にコンテナ船の E/R 前部における応力を検討対象とする。図には本検討で用いた応力の応答関数の例を示す。

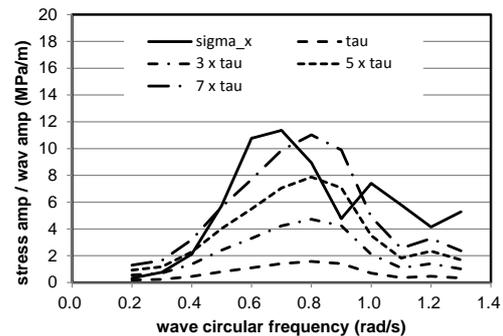


図 4 検討に用いた応力応答関数

式(7)中の σ_1 として軸方向の応力 σ_x を、同 τ については、計算で得られたせん断応力を用いる。せん断応力の大きさに関して、比較のために 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 倍する場合 (case1 ~ case4) の検討を行った。複合応力の応答値

が時刻 500s において 240MPa に達するよう な不規則波浪時系列を図に示した。

case1 の場合にはほぼ σ_x の性質だけで決まるのに対して, case4 ではせん断応力 τ の性質で決まる. case2, case3 はこれら の間である. また, 応力が複合する結果, case1 では最も大きな波高を要するのに対して, case4 ではその 2/3 程度である. 位相も異な ってくるのは船長方向応力とそり応力とで 位相応答関数が異なるからである.

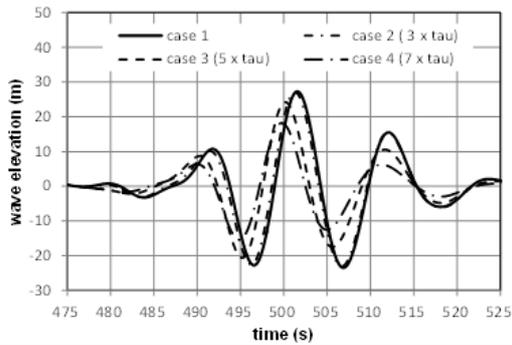


図 5 複合応力を最大化する不規則波時系列

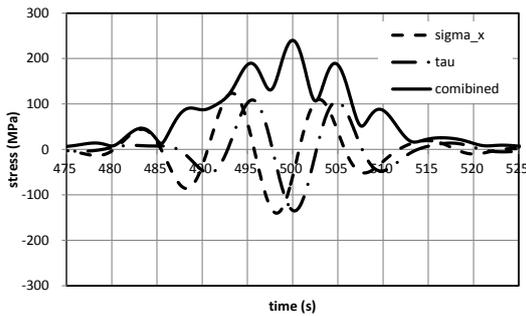


図 6 設計不規則波時系列の下での応力

図 6 には一例として case3 の応力時系列を 示す. 時刻 500s 前後で船長方向応力とせん断 応力がおおむね最大値を取っており, これら の重畳の結果, 複合応力が時刻 500s において 最大値をとっていることがわかる.

以上から, 構造信頼性手法によって, 複合 する非線形な応答について設計不規則波を特 定することが可能なことが示された. このと きの荷重を調べることで設計荷重設定も可能 である.

(3) 累積性のある崩壊事象に対する設計荷重
 極限的な設計短期海象の下, 船体桁が崩壊 する際の崩壊量を最大化する不規則波時系列 の検討結果を示す. 検討に際しては 1000 波中 の最大縦曲げモーメントの期待値が, 最終強 度の 1.1 倍になるような非常に極限的な短期 海象として, 向い波中有義波高 21m, 平均周 期 10s の波を選んだ. 船体は 300m の箱型の船 体モデルを選んだ.

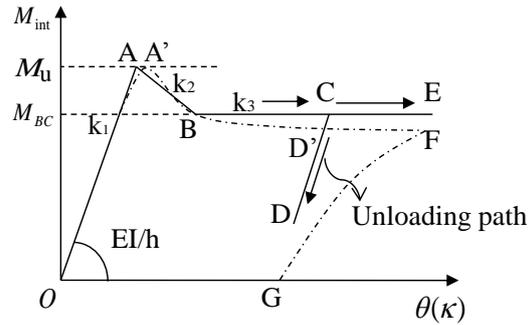


図 7 検討に供した耐力曲線

図 7 に検討で用いた耐力—変形関係を模式的 に示す. 弾性域(OA), 最終強度 A, 耐力低 下(AB), 耐力低下の緩和域(BC), 除荷(CD), 再 負荷(DC, E)からなっている.

崩壊量を最大化させる不規則波として特定 された不規則波時系列を図 8 に示す. 時刻 700s 程度で, 最大の波高が生じており, この 瞬間に崩壊が生じる. 引き続いてたとえば時 刻 1500s, 3000s においてもそれに準じるよう な最大波が生じているが, 一回目の崩壊によ り静水中荷重が低下しているために, 一回目 より後では荷重が耐力を超えることがなく, 崩壊も生じないことがわかった.

以上のことを解釈すれば, 「様々な崩壊挙動 が考えられ得るが, リスクを確率×崩壊量で表 す時のリスクの観点からは, 最も考慮するべ き崩壊事象は一発の大波中で大崩壊する事象 である」, といえる.

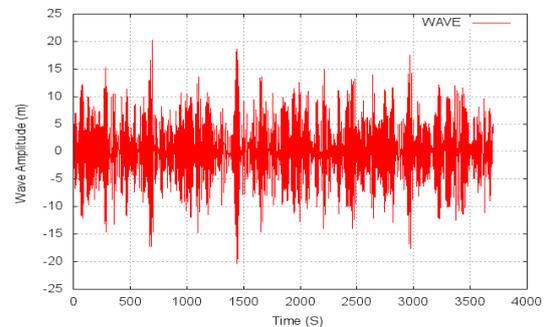


図 8 崩壊量を最大化する不規則波時系列

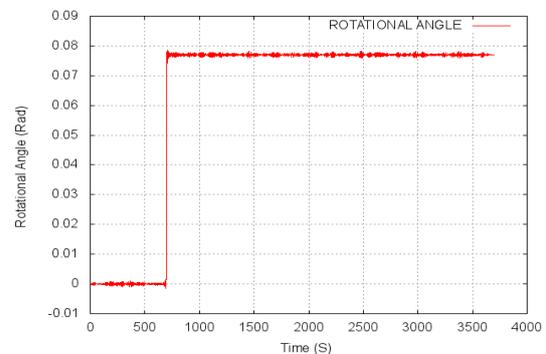


図 9 回転角の時刻歴

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

飯島一博, 藤久保昌彦, 堀田裕樹, 中村健人,
構造信頼性理論による非線形応答のための設計不規則波列の導出, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, (投稿済, 査読審査中)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

〔その他〕

<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/naoe/naoe4>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯島一博 (IIJIMA Kazuhiro)

大阪大学 准教授

研究者番号: 50302758

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし