B02 嵐モデルを用いた船体疲労強度における応力応答関数の検討

井上 直 (指導教員 深沢・柴原)

Study of Stress Response Function for Fatigue Strength Analysis of a Ship Using the Storm Model

By Tadashi Inoue

Abstract

The fatigue strength of a ship is evaluated by the crack propagation simulation recently, with the use of the Storm Model proposed by Tomita. In the simulation, it is necessary to estimate the long-term probability of occurrence of the stress fluctuation, which is obtained by the wave spectrum and the stress response function. This means that how to calculate the stress response function is essential. In the present paper, the stress response functions caused by wave pressure are calculated with the use of DISAM method (DIScrete Analysis Method) which is the most exact method at present. Comparing the simulation results of crack propagation using the stress response function calculated by DISAM method with that by a simplified method called as SRFM (Similar Response Function Method), the accuracy of the simplified method is discussed. Moreover, another simplified method is proposed to estimate the stress response function from the viewpoint of the design tool for fatigue strength analysis of a ship by the crack propagation simulation with the use of the Storm Model.

1. 緒 言

現在,船体構造部材の疲労設計は各船級協会規則に基 づいて行われているが,現実には疲労き裂損傷は生じて おり,極端な場合,就航後間もなく相当大きなき裂損傷 例も報告されている.さらに同型船でありながら,ある 船には損傷が起こり他の船には損傷が起こらないといっ た事例も起きている.そこでこのような現状を改善する ため,より精度の高い疲労設計法の確立を望む声が高ま っている.

現在の疲労強度評価は、Miner 則に基づく累積疲労被害 度を用いて判断することが一般的であり、その時の疲労 被害度の値は、荷重の作用順序に関係なく変動荷重の頻 度分布のみによって決められる.しかし、構造部材の疲 労き裂の発生・進展は荷重の作用順序よって大きく異な り、この疲労被害度の値は判断の目安程度に用いられて いる.そこで富田ら¹¹は応力作用順序を考慮できる Paris 則を用いたき裂伝播解析による疲労強度評価を船舶に適 用するために、多数の船舶が遭遇する短期海象の有義波 高の履歴を調べてパターン化し、疲労強度評価のための 荷重履歴シミュレーションモデルとして嵐モデルを提案 した.き裂伝播則と嵐モデルを用いることにより累積被 害則では表現できなかった荷重履歴の影響を考慮した疲 労強度評価が可能となった.

嵐モデルで,船体構造部材の疲労強度を評価するため には,応力の長期発現頻度分布を Paris 則に用いる必要が ある.応力長期発現頻度分布は波浪スペクトルと応力応 答関数より得られる応力スペクトルを波浪の長期データ と組み合わせることによって求めることができる.ここ で応力応答関数をどのように求めるかが重要となってく るが,変動水圧によって生じる応力応答関数の場合,各 波条件ごとの変動圧分布形状が異なるため,厳密に応力 応答関数を求めるためには多数の変動水圧分布を用いて 有限要素法による構造解析を行う必要がある.しかし, 実際にはすべての波浪条件に対して有限要素法などを用 いて構造解析を行うことは不可能に近い.したがって応 力応答関数を厳密に計算せず,何らかの方法により簡易 的に推定した応答関数によって代用することができれば 解析回数を大幅に削減することができ,船舶の設計上非 常に有用となる.

そこで、本研究では船体に働く荷重のうち波浪変動圧 を外力として、これまで計算されることが少なかった厳 密な応力応答関数を、DISAM 法³(Discrete Analysis Method)と呼ばれる手法を用いて計算し、簡易計算法での 応答関数と比較することによって、嵐モデルでの船体疲 労強度を評価するための応力応答関数の簡易推定法につ いて考察・提案する.

2. Paris-Elber 則

本研究では、き裂伝播解析は Paris-Elber 則を用いて行った. Paris-Elber 則では、き裂進展速度 da/dN 式は有効応力拡大係数範囲 Δ Keff を用いることによって(1)式のように表される.

$da/dN = C(\Delta Keff)^{m} \quad (1)$

ここで、C,m は材料定数である.船体構造部材に発生 するき裂の多くは表面き裂であり、応力拡大係数は溶接 ビートや部材形状によって変化する.これらの影響を考 慮に入れた応力拡大係数は、有限板に対する修正係数や 溶接ビードに対する修正係数と構造的応力集中係数を用 いて、計算することができる.

Paris 則においてある時のき裂進展速度 da/dN はその時 点で加わる公称応力, き裂長さ(深さ),構造的応力集中係 数によって変化し、最終的に発生した応力の大きさと発 生回数が等しくても、応力の負荷順序が異なれば最終的 なき裂長さは大きく異なる.したがって、Miner 則で考慮 できなかった荷重の負荷順序の影響も考慮することがで きる.

3. DISAM 法による応力応答関数の算出 3.1 DISAM 法(DIScrete Analysis Method)

船体構造解析における荷重 - 応答関係が線形であれば, 波浪条件ごとに異なった荷重を加えなくても,船体の荷 重が作用する部分を多数のユニットに分け,それぞれの ユニットに単位荷重を加えて構造解析を行い,荷重と応 力の関係づけるマトリックス(荷重応力変換マトリック ス)を作成することによって,線形重ね合わせ原理を用い, 応答を求めることができる.

DISAM 法では、ある水圧点に単位荷重を加えた場合に 着目している応力点に生ずる応力を求め、それを荷重応 力変換係数とする.全ての水圧点での荷重応力変換係数 を求めれば、ストリップ法によって求まる波浪変動圧で の荷重から対象要素に負荷される応力の時系列、または 荷重応力応答関数を求めることができる.実際には、構 造モデルの外板部の要素1列に対して単位荷重を加えて 構造解析を行い、応力点での荷重応力変換係数を求める. 次に単位荷重を負荷させる要素列をずらして加え新たな 荷重応力変換係数を求める.この工程を順次繰り返して 行い、外板一周分の荷重応力変換係数を求め、荷重応力 変換マトリックスを作成する. なお, この時構造モデル に加えられた荷重はモデル全体でバランスする荷重では ないため、拘束点で反力が発生する. この拘束点での反 力を打ち消すために、各単位荷重ごとに不平衡力除去の 計算を行った.

ストリップ法により求めた波浪変動圧から,1出会周期 を8等分した時刻での水圧分布を求める.Fig.1に示すよ うに,DISAM法で求めた荷重応力変換マトリックスをあ る時刻での水圧分布と掛け合わせることにより,ある時 刻における着目した要素に加わる応力を求めることがで きる.これを時間を変化させて繰り返し,8つの時刻にお ける応力を求め,時間領域で正弦補間し,応力振幅を導 出する.各船長波長比における応力振幅を求め,船長波 長比とその時の応力振幅の関係を表した応力応答関数を 作成する.



3.2 構造モデル・境界条件

解析対象船としてダブルハル大型 VLCC(船長×船幅 ×深さ=320[m]×船幅 60[m]×深さ 30[m])の満載状態を用 いた. DISAM 法による構造解析は船体中央部の 1/2Hold+1/2Hold を取り出した,いわゆる 3 ホー ルドモデル(長さ×幅×深さ=100[m]×船幅 60[m]×深さ 30[m])を用いて,汎用有限要素法構造解析プログラム MSC.NASTRAN により行った.境界条件・荷重条件を Fig.2 示す.



Fig.2 Analysis model

3.3 応力応答関数の作成

ストリップ法による波浪変動圧計算結果と前述のよう に作成した荷重応力変換マトリックスから, Fig.3 の応力 点における各出会角ごとの応力応答を求め,応力応答関 数を作成する.応力応答関数の算出をするのに用いた波 浪変動圧のデータは載荷重量は満載状態,波長船長比 λ/L=0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0(14 パ ターン),フルード数 Fn=0.1192,波高 h=5[m]を用いた.





4. SRFM 法による応力応答関数の算出

SRFM 法³(Similar Response Function Method)とは、ある 点の応力に対する水圧の影響は、応力点より遠い水圧よ りも応力点に近い水圧の方が大きいと考え、水圧点と応 力点の距離にしたがって水圧の値を比例配分する影響係 数を定め、この影響係数を水圧の応答関数に乗じて加え 合わせ、応力の応答関数を近似するものである.このよ うな考えをもとにして、以下のように応答関数を近似す る.まず、波との出会角 χ ごとに代表波長を定め、各波 方向ごとに、水圧点 i における代表波長での水圧応答関数 値を \mathbf{p}_i とする.応力点と水圧点 i の距離を l_i とすると、 各波方向ごとに影響係数 α は以下のようにして計算され る.

$$\alpha(\chi,\lambda) = \sum_{i}^{M} \left(p_i(\chi,\lambda) / (l_i)^k \right) \quad (2)$$

ここで、 $p_i(\chi, \lambda)$ は波方向 χ での水圧点 i における水圧 の応答関数値である.次に、代表波長において構造解析 を行い、この波長での応力の応答関数値を求め、この値 を先の影響係数に乗ずることによって応力応答関数の近 似値を求める.すなわち、代表波長において厳密な応力 応答関数と一致するよう、いくつかの水圧応答関数を水 圧点と応力点の距離に応じて重みをかけて加え合わせ、 近似応答関数を求めることになる.

SRFM 法によって作成した応力応答関数の一例を Fig.4 に示す. (2)式の k の値は, k=1,2,3 の 3 パターン作成した.

SRFM 法と DISAM 法で作成した応力応答関数は,大半の出会角において概ね良好な一致を示したが,短波長領域ではしばしば Fig.4の(b)のような差が見られた.また,Fig.4の(a)のような二つの山を持つ形状の応力応答関数の場合,応答関数の片方のピークの推定精度は近似の方法によって大きく変化することが分かった.SRFM 法(k=1)の場合,ある出会角においては代表波長を持つ波長がずれてしまい,全く違う形状の応力応答関数となった.



Fig.4 Stress response functions calculated by DISAM and SRFM methods

5. 嵐モデルによるき裂伝播シミュレーション 5.1 嵐モデル

嵐モデルとは船舶が遭遇する波浪の作用順序による疲 労強度への影響を考慮するため,冨田ら[®]よって提案され た波浪モデルで,船舶が遭遇する海象を比較的穏やかな 平穏状態と前半では有義波高が徐々に上昇し最大値に達 したあと後半では徐々に低下するといった特徴が見られ る嵐状態とに分離して考えるモデルである.

5.2 き裂伝播シミュレーション

本章では、DISAM 法によって作成された厳密な応力応答 関数と SRFM 法によって作成された近似的な応力応答関数 を用いてき裂伝播シミュレーションを行い、応力応答関数 の形状の違いによる影響を明らかにする. 今回以下のよう な2種類の解析を行った.

- 船体が受ける波との出会角が船体疲労寿命・疲労強度 にどのような影響を与えるかを検討するため、DISAM 法での応力応答関数を用いて、決まった1つの出会角 でしか波に遭遇しないという条件でき裂伝播シミュレ ーションを行い、他の出会角での結果と比較した.そ の結果より、き裂伝播に大きな影響を及ぼす出会角を 推察する.
- 2) Fig4の応力応答関数において,短波長で DISAM 法と SRFM 法の応力の値の差が少ない出会角 χ=120°と長 波長での応力の差が少ない出会角 χ=270°でき裂伝播 シミュレーションを行った.この時,き裂進展の傾 向に著しい差が生じないようにするため,出会角 χ=120°の最大応力値を出会角 χ=270°の最大応力値を 等しくしてシミュレーションを行った.

シミュレーションでは,初期き裂長 a=0.0002[m],初期き 裂深さ b=0.0002[m],板厚 0.0014[m]とした. また全シミュレーションにおいて,応力の大きさ・繰り 返し回数・応力負荷順序は全て同じとした.シミュレー ション結果を Fig.5-Fig.6 に示す.

Fig.5 より,出会角 χ=0-180°では応力の値が小さすぎて 疲労破壊は見られなかった.また嵐モデルシミュレーシ ョンにおいて疲労き裂に強く影響を及ぼす波向きは①解 析対象部材がある舷側の横波(χ=270°)→②解析対象部材 がある舷側の横波から 30°傾いた波(χ=240, 300°)→③解析 対象部材がある舷側の横波から 60°傾いた波(χ=210, 330°) となった.これは解析対象部材がある舷側の波の影響を 受けやすいためである.また真横からの波を受けると船 体がローリング運動をするので,波浪変動圧による水圧 の値が高くなるからであると考えられる.

Fig.6 より, 出会角 x=270°より出会角 x=120°の場合の方 が DISAM 法と SRFM 法による疲労寿命の差が低くなっ ている.ゆえに短波長の応力応答関数が疲労寿命に強く 影響を与えると考えられる.また出会角 x=120°のシミュ レーション結果において, SRFM 法(k=1)と DISAM 法の 応力応答関数が,き裂伝播に大きな影響があると考えた 船長波長比 0.2 において,他の SRFM 法(k=2,3)より大 きな差が出ており,また船長波長比が 1.0-2.5 の間で非常 に大きな差が出ているにも関わらず,き裂伝播の値は一



番近くなっている. これは船長波長比が 0.2-0.4 での SRFM 法(k=1)の応力応答関数の傾きが, SRFM 法(k=2, 3)と比較して大きいため, 0.2 より小さい船長波長比での 応力を補間した際 DISAM 法での応力応答関数との差が 一番小さくなったためだと考えられる. つまりき裂伝播 において,今回計算に用いた最小船長波長比 0.2 より小さ い値での応力応答関数の影響は重要であると考えられる.

6. 新たな簡易推定式の提案

6.1 新たな提案手法

前章で得られた結果を基に、新しい応力応答関数の簡 易推定法を提案する.簡易推定式を作成するにあたって、 船長波長比においては、短波長での応力応答関数を,ま た出会角ではχ=210°-330°の応力応答関数を正確に近似す べきであることが分かった.そこでまず現在の SRFM 法 では正確に応力応答関数を近似できない理由を下記に挙 げる.

- SRFM 法はある点の応力に対する水圧の影響は、応 力点より遠い水圧よりも応力点に近い水圧の方が大 きいと考えから,影響係数を作成するものであるが、 実際応力点に加わる応力に一番影響を与える水圧点 は必ずしも一番距離の近い水圧ではなく、構造物の 形状や剛性によって変化する.
- 2) SRFM 法において影響係数は距離によってのみ変化し、距離が近いほど強い応力が発生するとされるが、 実際には同じ距離の水圧点でも引張と圧縮の応力が存在し、き裂伝播には引張応力が重要となる。

1)の問題点を改善するために,構造モデルごとに変化する形状や剛性の影響を影響係数に組み込むのは非常に困難である.しかし,2)の問題点に関して,構造モデルの形状が分かっていれば,ある水圧点における応力点で応力の引張と圧縮の違いはおおよその見当がつく.そこで新たな提案手法として,水圧点ごとに応力点に加わってくる応力の圧縮と引張の区別をつけるために,構造の形状から加わってくる応力の正負を把握し,圧縮の場合は影響係数の符号を負,引張の場合は正とするように決定する.この時(2)式のkの値は,最も精度よく応力応答関数を近似できた k=3 を使用する.新たな提案手法によって作成した応力応答関数の一例を Fig.7 に示す.この時,参考文献³で最も良いとされた k=2 での SRFM 法の応力応答関数と比較した.



of the proposed method

6.2 提案手法によるき裂伝播シミュレーション

新たな提案手法の有用性を検討するため, SRFM 法と 比較して DISAM 法との疲労寿命との差がどれだけ改善 されたのかを確認する.この時,初期き裂長さ a=0.0002[m],初期き裂深さ b=0.0002[m],板厚 0.0014[m] で、応力の大きさや作用順序、波向きの発生確率はラン ダムとし各手法5パターン,計15パターン解析を行った. シミュレーション結果をFig.8に示す.

SRFM 法では DISAM 法の平均疲労寿命と 9.13 年(85%) の差が発生していたが、本提案手法では DISAM 法の平 均疲労寿命との差を 3.81 年(35%) までさげることができ、本提案手法の有用性が確認できた.



Fig.8 Crack growth curve of the proposed method



本研究では、船体に働く荷重のうち波浪変動圧を外力 とし、DISAM 法と呼ばれる手法を用いて、船体の対象構 造部材における厳密な応力応答関数を計算し、簡易推定 手法である SRFM 法と呼ばれる手法で作成された応力応 答関数と比較することによって、嵐モデルシミュレーシ ョンにおいて応力応答関数が船体の疲労き裂・疲労寿命 にどのような影響を与えるかを考察した.得られた結論 を以下に示す.

- 1) DISAM 法を用いて, 今までに行われることの少なか った厳密な応力応答関数を作成することができた.
- 嵐モデルシミュレーションによって、疲労き裂・疲 労寿命に影響を強く及ぼす波向きは、解析対象部材 がある舷側の横波状態であることが分かった。
- 3) 嵐モデルシミュレーションによって、疲労き裂・疲労寿命に影響を強く及ぼす応力応答関数は、短波長での応力応答関数であり、応力応答関数を作成する上で、使用する波浪変動圧データは船長波長比が 0.2より小さい場合のデータが重要であることが分かった。
- 4) SRFM 法における影響係数に圧縮と引張の違いを考慮に入れることにより、SRFM 法よりも精度のよい 簡易推定法を提案することができた。

参考文献

- 富田康光:疲労設計に対する嵐モデル適用の有用性, 日本造船学会講演会論文集,第1号,2003,pp77-78
- 2) 倉本美男,戸沢秀,白木原浩,井上俊司,伏見彬: 波浪中の船体局部応力のシミュレーション手法に関 する研究,日本造船学会論文集,第170号,1991, pp425-437
- T.Fukasawa, K.Hashimoto, Y,Tomita: Evaluation of Simplified Prediction Method of Stress Response Function from the Viewpoint of Fatigue Strength Analysis a Ship, Practical Design of Ships and Mobile Units, vol2, 2001, pp1081-1087