8 メガフロートの構造部材の疲労強度評価の研究

-長期健全性予測診断システム-

海上安全研究領域(構造安全性研究グループ)*岡 正義、岡 修二、河邉 寛

1. はじめに

本研究は「メガフロート情報基地機能実証試験」 として当所が国土交通省より受託した各種の開発研 究を行い、その一連の研究において、波浪中におい てメガフロートの構造部材に生じる応力を詳細部に 至るまで正確に見積もる技術の開発、および長期の 使用に対して構造が安全に機能を維持することを監 視する長期健全性予測診断システムの開発を報告す るものである。

メガフロートは波浪中に浮かぶ巨大な構造物であ る。したがって、常に構造部材には波浪によって繰 り返し応力が発生する。波浪中の構造応答は流体一 構造連成弾性応答計算法が開発されているが、主と して上下変位などの運動の検討が多く報告されてい る[1]。しかし、隔壁と補強縦通材との交差部などの ように応力集中が発生するような構造詳細の波浪に よる応力応答を見積るような検討例は少ない。本研 究では、メガフロート全体の波浪による公称レベル の応力応答を「詳細3次元解析法」[1]で求め、構造 詳細部をズーミングした有限要素法により計算する 2段階解法[3]を用いて詳細部の応力応答を計算する。

この結果を用いて、メガフロートの長期の使用期 間にわたり構造部材に蓄積される疲労被害度を計算 し、使用中の構造健全性の目安として疲労被害度を 用いた診断システムを開発した。これらの予測手法 を実海域の実証試験により検証し、開発した手法の 有用性を報告する。

2.メガフロートの構造詳細部の応力計算 メガフロートの内部構造は、縦横の隔壁で区画さ れ、さらに全長にわたり船底および甲板にアングル 材(ロンジ材)で密に補強されている。また、内部 空間は、喫水を確保するためのバラストタンク、ド ライなボイド空間および IT 機器を収納する IT スペ ースからなる。このような縦横の構造部材が貫通、 交叉する構造の不連続箇所は、同時に応力集中部と なり損傷の発生個所と考えられえ、その部材に生じ る応力の正確な見積もりが必要となる。

2.1 構造詳細部

上述のメガフロートの応力集中の評価の対象とな る船底の局部構造として、以下の構造詳細部につい て応力解析を行った。

○底部ロンジ部材(ロンジ)

○ロンジ貫通スロット周り(スロット)

○ 水密隔壁とロンジの交叉部(ウォータタイト) 以下にそれぞれをロンジ、スロット、ウォータタイ トと称する。

2.2 構造詳細の応力計算法

メガフロートの波浪中応答計算は、任意の浮体構 造、海域状態に対応できるように、メガフロート本 体および周辺の流体を有限要素法によりモデル化し た「詳細3次元解析法」が現在最も信頼できる解析 法である[1]。しかし、メガフロートのような大規模 構造物の詳細部の疲労強度評価にも対応できる応力 解析は、詳細3次元解析法の構造有限要素であって も十分な精度を得るほどの詳細な有限要素のモデル 化をするができない。そこで、メガフロートの構造 詳細の応力計算を行うにあたり、まず、①弾性応答 計算により公称応力を求め、次に②構造詳細につい て FEM によるズーミング応力計算で構造詳細の応 力を求める 2 段階解法を採用した[3]。具体的には、 次のような計算手順である。

①公称応力応答解析

詳細 3 次元応答計算からは、波周波数、波向きが ω=0.8~2.0[rad/s](0.1 rad/s 間隔)

χ=0°~90°(15°間隔)

規則波の組み合わせに対する浮体の上下変位(たわみ)w及び変動水圧pの分布が振幅と位相で得られる。ここで、波周波数は浮体の設置海域の波浪統計から代表的な波周期を捉えて、T=7.85s~3.14sの範囲とし、波向きは波浪推算結果から、西側からの波のエネルギーの流入は微小であると判断し、0度(E)から90度(N)の範囲とした。

○全体変形による応力

全体変形wによる浮体の縦・横曲げモーメント M_x、M_y及びせん断力 Q_x、Q_yを下式から計算した。 ここで、I₁、I₂は縦横の断面 2 次モーメントである。

$Mx = -EI_1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$	$M_{\rm V} = -EI_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial v^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)$
$Qx = -EI_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$	$Qy = -EI_2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$

縦曲げモーメントから、浮体の底部縦通材位置での 断面係数による以下の簡易式で応力換算係数を求め た。Dは浮体の深さである。

$$\sigma_{X} = \frac{M_{X}}{Z_{1}} \quad , \qquad Z_{1} = \frac{I_{1}}{D/2}$$
$$\sigma_{X} = \frac{M_{X}}{Z_{1}} \quad , \qquad Z_{1} = \frac{I_{1}}{D/2}$$

②FEM ズーミング応力解析

詳細3次元応答解析から得られたたわみ(全体変形)と変動水圧から、構造詳細に発生する応力を求めるため、次の2つの荷重成分による応力に分離して、それぞれの換算係数を求めた。

スロットについては、図1に示す浮体のズーミン グモデルに単位横曲げモーメント及び単位横せん断 力を与え、全体変形による応力換算係数を求めた。 ロンジ・ウォータタイトについては、縦曲げモーメ ントから、浮体の底部縦通材位置での断面係数によ る前記の簡易式で応力換算係数を求めた。



図1 構造詳細応力解析のための FEM ズーミングモデル

○変動水圧による応力

次に、変動水圧によって構造詳細に発生する応力

を求めるため、図1のズーミングモデルに単位水圧 を与え、変動水圧による応力換算係数を求めた。

2.3 規則波中応力応答関数

前節の1)、2)の応力換算係数から得られる応力 成分をそれぞれ足し合わせて、応力の応答関数を求 めた。

応力応答関数の例を図2に示す。

$$\operatorname{Re} \sigma_{sL} = K1 \times \operatorname{Re} p + K2 \times \operatorname{Re} Qy + K3 \times \operatorname{Re} My$$

$$\operatorname{Re} \sigma_{LG} = K4 \times \operatorname{Re} p + K5 \times \operatorname{Re} Mx$$

$$\operatorname{Re} \sigma_{WT} = K6 \times \operatorname{Re} p + K7 \times \operatorname{Re} Mx$$

$$\operatorname{Im} \sigma_{sL} = K1 \times \operatorname{Im} p + K2 \times \operatorname{Im} Qy + K3 \times \operatorname{Im} My$$

$$\operatorname{Im} \sigma_{LG} = K4 \times \operatorname{Im} p + K5 \times \operatorname{Im} Mx$$

$$\operatorname{Im} \sigma_{WT} = K6 \times \operatorname{Im} p + K7 \times \operatorname{Im} Mx$$

$$|\sigma_{SL.LG.WT}| = \sqrt{\operatorname{Re}\sigma_{SL.LG.WT}}^{2} + \operatorname{Im}\sigma_{SL.LG.WT}^{2}$$



図2 応力応答関数の例(計測点4のロンジ)

2.4 不規則波中の応答

応力応答関数と波スペクトルとを線形重ね合わせ、 波の主方向をパラメータに応力の有義値を平均波周 期の関数として求めた。ここで、波スペクトルはメ ガフロートの設置海域の海底、風の吹送距離を考慮 して JONSWAP 波スペクトル及び方向分布関数は COS4 乗分布を採用した[2]。

3. 実証試験

3.1 計測システム

図 3 に示すように 10 箇所のロンジ、スロット、 に対して、応力を計測し、2 節の計算手法の妥当性 を検討する。計測方法は、毎正時から 30 分間サン プリング周期 5Hz で自動計測を行い、10 箇所 21 チ ャンネルの応力(歪)の時系列データを収集した。



3.2 データ処理

計測で得たデータは電気的、機械的各種ノイズを 含んでいるため、まず、スパイクノイズが見られる ものについては解析から外し、次に高周波の成分を 取り除くため 10 データの移動平均による平滑化を 行った。

平滑化した歪の時系列波形からゼロアップクロス 法で Peak to Peak 間の復振幅の頻度分布を求め、 統計解析を行った。図4 に Peak to Peak の平均値 と有義値の関係を示す。直線は頻度分布が Rayleigh 分布に従うと仮定したときの理論値である。計測時 間 30 分間ではサンプル数が少ないため、1/10 最大 値にはばらつきがみられるもののほぼ Rayleigh 分 布に従うといえる。



図4 応力の30分計測の平均値と有義値、1/10 最 大値との関係(計測点4のロンジ)

3.3 計算値との比較

2節で求めた応力の有義値の計算値と、実験値と を有義波高で割った値と比較した。結果の一例を図 5 に示す。実験値の有義波高、波周期は、メガフロ ート浮体上の北東部に設置された相対波高の時系列 データの統計解析値を用いた。

すべてのロンジ、ウォータータイトの計算値は実 験値との比較から良好な精度を得ているといえる。 スロットについては、浮体の沖側の3点で、いずれ も実験値が計算値よりも高くなるという結果となっ た。これは、波エネルギー吸収装置であるカーテン ウォールが沖側に設置されているため、理論では端 部でゼロとなる横曲げのモーメントが実際は作用し ていたことが主な原因であると考えられる。

メガフロートの長さ方向の変形が主として応力成分 を誘起するロンジ、ウォータータイトの計算による 構造詳細部の応力の予測は良好といえるが,幅方向 の変形から生じる応力成分が主成分であるのスロッ トの予測精度が劣る。したがって、メガフロートの 波浪中弾性変形の縦方向のみならず横方向の解析精 度を向上させることが今後の課題である。





Ts [sec] (Sign.1/3)

12

10

2

0

図 5 応力の計測値と計算値の比較 (計測点②、④のロンジ及びスロット)

4. 構造部材の疲労強度評価

(長期健全性予測診断システム)

浮体構造物の強度評価は、一般に、過大荷重によ る部材の座屈・大変形と繰り返し荷重による疲労亀 裂について、損傷発生の可能性を検討する。構造物 が長期にわたってその機能を維持し安全性を確保す ることは、これらの損傷が発生することなく稼動で きることと言える。本研究では、メガフロートの長 期にわたる使用期間中に構造に損傷の発生有無を常 時監視するシステムを構築することを目的に,疲労 亀裂の発生を監視する長期健全性予測診断システム を作成した。

4.1 疲労強度評価手法

メガフロートの構造部材に生じる応力は、不規則 な波浪によって誘起されるので、ランダム荷重によ る疲労強度評価となる。そのような場合の疲労強度 評価手法は、累積疲労被害度(Miner則)あるいは 亀裂進展予測法などが提案されている。現在のとこ ろ、主要船級協会の船体構造の疲労強度評価は、累 積疲労被害度を用いて行われている。メガフロート の構造部材の疲労強度評価も累積疲労被害度を採用 する。

前節で検討したメガフロートの船底のロンジ、ス ロット、ウォータータイト部材について累積疲労被 害度の計算を行う。計算の仮定は以下のとおりであ る。

(1) 応力の長期頻度分布

短期の不規則海面での応力の頻度分布は、 Rayleigh分布とし、そのパラメータは前節のように して求める。設置海域の長期の波浪統計は、沿岸開 発技術センターにより計測された東京湾の第2海堡 の統計[4]を用いる。

メガフロートは長期にわたる使用を目的としてい る。海水環境において、浮体の鋼材は経年化により 腐食の発生と進行の可能性がある。これによる構造 の断面積変化に伴う応力の増加を考慮することが必 要である。腐食による鋼材の板厚衰耗率の長期の計 測例は、一般の商船の報告例[5]はあるが、メガフロ ートでは取得されていない。腐食衰耗率の経年変化 を、バルクキャリアーの Oil 系塗装された貨物倉内 の倉内肋骨上部の衰耗統計値を使用する。メガフロ ートの使用形態から考えると、やや過酷な衰耗率と も言えるが,安全性の確保と言う意味で採用する。 与えられる衰耗率を用いて年と共に板厚が一様衰耗 と仮定し、応力の応答関数を更新して長期分布を計 算する。

(2) S·N 線図

構造物の疲労亀裂発生の S-N 線図は、部材ごとの 特性に応じて異なるとも考えられるが,ここでは船 舶の疲労被害度の検討に用いられる DNV の S-N 線 図[6]を使用する。

4.2 長期健全性予測診断システム

長期健全性予測診断システムのうち、ITメガフロ ートの構造部材の健全度の表示画面を図6に示す。

累積疲労予測分布図は、スロット、ロンジ、ウォ ータタイトのうち、設定した年月において最も疲労 の激しい詳細構造の被害度を、しきい値に対する割 合で色分けして表示している。今回、しきい値は、 日本海事協会が疲労強度評価ガイドライン[7]の板 部材の累積疲労被害度 0.6 に設定している。

累積疲労予測グラフは、分布図で選択した箇所の 危険度の経年変化を示すもので、この値がしきい値 を超えたときには検査・保守が必要となる。このと き折れ線グラフの対象となる構造詳細(もっとも被 害度の大きい構造詳細)は左下の絵の中でハイライ トされる。また、分布図で歪計測箇所を選択すると、 本表示では計測期間が短いので表示されていないが、 現在までの累積疲労被害度の実測値がプロットされ、 推定値との比較ができるようになっている。もし、 実側値が推定値を大きく上回るときは、センサ、計 測器祈等の計測システムに異常があるか、もしくは 実際に損傷が発生している可能性があるので、シス テムの確認または対象箇所の点検が必要となる。 メガフロート本体と同様の手法により、係留ドル フィンとフェンダーの相互作用によるドルフィンの 疲労強度をパラメータとした長期健全性診断システ ムも組み込まれている。

5. まとめ

本研究は、波浪中においてメガフロートの構造部 材に生じる応力を詳細部に至るまで正確に見積もる 技術の開発、および長期の使用に対して構造が安全 に機能を維持することを監視する長期健全性予測診 断システムの開発を行った。

(1)メガフロート全体の波浪による公称応力応答 を「詳細3次元解析法」で求め、構造詳細部をズー ミングした有限要素法により計算する2段階解法を 用いて詳細部の応力応答を計算する手法を開発した。

(2)メガフロートの長期の使用期間にわたり構造 部材に蓄積される疲労被害度を計算し、使用中の構 造健全性の目安として疲労被害度を用いた診断シス テムを開発した。

(3)これらの予測手法を実海域の実証試験により 検証した。

6. 参考文献

[1]瀬戸秀幸、越智真弓、太田真、河角省治:超大型 浮体式構造物における規則波中弾性応答の理論解析

(第4報)、日本造船学会論文集、第189号、pp.47-54、 2001

[2] メガフロート技術研究組合、(財)沿岸開発技術 研究センター:メガフロートの総合安全性評価手法 に関する研究 P115、平成 13 年 3 月

[3]井上 清:超大型平板状弾性浮体構造物の構造解 析法に関する研究、平成 14 年 3 月

[4](財)沿岸開発技術研究センター:全国港湾海洋
 波浪観測 25 ヵ年統計資料 NOWPHAS 1970-1994、
 1996

[5]山本規雄:確率モデルに基づく浮力の発生及び進行の評価、日本海事協会誌、No.245、pp.183-213、1998

[6] Det Norske Veritas : Fatigue Assessment of Ship Structure, 2001

[7] 日本海事協会:疲労強度評価ガイドライン(ダ ブルハルタンカー編)、2001



図6 長期健全性予測診断システムの画面