大波高中におけるコンテナ船の波浪荷重

正員 溝 上 宗 二* 正員 安 川 宏 紀*
 正員 黒 岩 隆 夫** 正員 末 岡 英 利***
 正員 西 村 信 一**** 正員 宮 崎 智*****

Wave Load on a Container Ship in Rough Seas

by Shuji Mizokami, *Member* Hironori Yasukawa, *Member*
 Takao Kuroiwa, *Member* Hidetoshi Sueoka, *Member*
 Shinichi Nishimura, *Member* Satoshi Miyazaki, *Member*

Summary

Model experiments were carried out for a container ship in long crested irregular waves to investigate the non-linear effect on ship responses such as ship motions, wave induced pressure and wave load varying with wave height. The wave condition was changed from moderate to rough sea state in head waves. Numerical computations, by means of the strip method, the slender ship theory and the non-linear time domain strip method, were also carried out. The calculation results were compared with the experimental data to confirm the accuracy and to check on the range of the applicability.

As a result, non-linear effect on vertical bending moment and wave induced pressure were remarkably observed in large waves: with increase of wave height, the bending moment acting on fore part is accelerated due to the influence of slamming and the induced pressure at the position near water surface is repressed due to the influence of exposure to the air. A time domain strip method can predict well the significant/maximum value of non-linear vertical bending moment in large waves. Toki's correction method¹²⁾ is useful for improving the calculation accuracy of the induced pressure in regular and irregular waves.

1. 緒 言

近年、コンテナ船の大型化、高速化が進んでいる。コ

ンテナ船は、大波高時においてサギングモーメントが著しく増大することがある。そのため、従来船の外挿域に相当するような超大型、もしくはより高速なコンテナ船においては、サギング時の最大応力や座屈強度の検討等が一層重要になると考えられる。加えて、船体構造の強度検討に際しては、船に作用する荷重をより合理的に推定しなくてはならない。

波浪による作用荷重の推定には、通常、単位波振幅あたりの荷重を求め、それをベースに短期予測、長期予測

* 三菱重工業(株)長崎研究所船舶・海洋研究推進室

** 三菱重工業(株)長崎研究所強度研究室

*** 三菱重工業(株)本社 船舶技術部

**** 三菱重工業(株)神戸造船所船舶・海洋部計画設計課

***** 三菱重工業(株)長崎造船所造船設計部船殻設計課

Fig. 1 Arrangement of ship model

の手法を用いる。これは、波浪荷重の変動量は波高に比例するとした線形重ね合わせの仮定の下で成り立つ議論である。微小運動を行うとする線形理論では、水面下の船体断面形状は静水中での形状に置き換えて扱うことができる。しかし、波高が高くなり船体運動が大きくなると、水面下の断面形状は静水中での形状と大きく異なり、運動や波浪荷重は波高に対して線形的に応答しなくなる。ここでは、波高に対する非線形な応答特性を「波高影響」と呼ぶことにすると、この波高影響の存在は、水槽試験によって広く認知されている(例えば、^{1) 2) 3) 4) 5) 6)})。しかしながら、これらの多くは規則波中における計測例であり、実用上重要と考えられる不規則波中での検討、加えて、そのような波高影響を不規則波レベルで推定する方法ならびにその検証に関する研究はなされていないように思われる。

本論文では、

- 4,900TEU 積みの Post-Panamax コンテナ船を対象に、船体運動や波浪変動圧、波浪荷重における波高影響の実態把握
- 規則波中、不規則波中での荷重応答特性における既存の理論計算法の適用性確認

を目的としている。

まず、コンテナ船模型を用いて、規則波中ならびに不規則波中での水槽試験を実施し、船体運動や波浪変動圧、波浪荷重における波高影響を把握した。本論においては、波方向については正面向波を対象とした。規則波中試験では、波高を3種類変化させた応答特性(RAO)を計測した。不規則波中試験では、比較的波高の低い場合から、スラミングが頻繁に発生するような大波高時まで、有義波高や平均波周期を種々変えた長波頂不規則波中での応答特性を計測した。規則波中試験で得られたRAOを用いて短期予測計算を実施し、それを不規則波中での水槽試験結果と比較することにより、運動や荷重における波高影響の実態を把握する。

次に、この波高影響を既存の理論計算法を用いて予測することを考える。本論文では、線形計算法としてストリップ法(STFM)⁷⁾と細長船理論の一つであるEnhanced Unified Theory(EUT)^{8) 9)}を用い、非線形計算法として非線形時刻歴ストリップ法(MSLAM)^{2) 10)}を用いる。

縦曲げモーメント等の波浪荷重においては、山本等の一連の研究で知られているように、大波高時におけるスラミングおよびそれに伴うホッピングによる高次の荷重成分の影響が大である¹⁾。このような荷重の予測は通常の線形理論計算では困難であるため、MSLAMを用いて、大波高時の縦曲げモーメントの計算を行い、水槽試験結果と比較する。

波浪変動圧における波高影響は、水面近傍位置で発生する当該点の空中露出の影響によって生じることが知られている^{6) 11) 12)}。さらに土岐らは、線形計算で求めた変動圧をベースに、長期予測のレベルにおいて空中露出の影響を考慮する方法を提案している¹²⁾(これを土岐の補正法と呼ぶ)。土岐の補正法を用いると、空中露出の影響を考慮した変動圧の長期予測値を求めることが可能であるが、やせ形船については、その有効性の検証は十分とはいえない。その検証には、短期海面ではあるが、水槽試験結果との比較が有効と考えられる。波浪変動圧に関しては、STFMとEUTを用いることとする。

2. 水槽試験

2.1 供試模型

本研究では4,900TEU 積みの Post-Panamax コンテナ船を対象とし、船長4.20mの木製模型船を用いて波浪中水槽試験を実施した。模型船の主要目等をTable1に示す。副部としてビルジキールならびに固定された舵が模型船に装着される。船速は、大波高を想定していることから、船速低下を考慮して15kn相当とした。船長をベースとしたフルード数 F_n で0.153である。

供試模型船は、縦曲げモーメント等の波浪荷重を計測するため、長さ方向に8分割されたいわゆる分割模型と

した。Fig.1に模型船の概要を示す。分割模型 8 個のうち、中央部の 6 個は、1 辺 75mm の鋼製角パイプのバックボーンに固着され、また船首および船尾部は各々ブロックゲージで連結される構造とした。角パイプは、実船の曲げ剛性が相似となるように選定された。分割模型間には、変形を許容するために 5mm の隙間を設けた。その隙間は、防水処理を施すため、柔らかいビニールシートで覆った。長さ方向の重量分布は、実船のそれに一致するようバラストウェイトを用いて調整した。

水槽試験に先立ち、ハンマリングテストを実施し、模型船の振動特性を求めた。その結果、2 節、3 節の縦曲げ振動数がそれぞれ、6.52Hz, 14.95Hz で対数減衰率はそれぞれ、0.365, 0.367 であった。

2.2 試験方法

水槽試験は、三菱重工業長崎研究所耐航性能水槽（長さ 160m × 幅 30m × 深さ 3.5m）で実施された。試験は曳航状態で行われ、曳航点は Square Station(SS)4.5 位置の重心高さとした。ただし、Surge, Sway, Yaw に関する復原力を付加するため、前後、左右方向にはコイルばねをそれぞれ 2 本ずつ取り付け付けた。

2.3 計測項目と計測方法

計測項目は、船体運動、船首加速度、波浪変動圧力、波浪縦曲げモーメントと、船底露出回数である。

船体運動は、抵抗動力計に装備されている検出器プーリーとポテンシオメーターで Surge, Sway, Heave を計測した。Pitch, Roll は 2 軸型傾斜計で、Yaw は光ファイバージャイロで各々計測した。

船首加速度は、甲板上の FP 位置に設置した歪みゲージ式加速度計を使用して計測した。

縦曲げモーメントは、SS9 と SS2.75 断面に取り付けたロードセルとバックボーンの SS8, SS7, SS6, SS5, SS4 位置に貼り付けた歪みゲージを用いて計測した。

変動圧力は、SS5.25, SS7.5, SS8.5 の断面内に $\phi 30$ の受圧板を取り付けミニビーム型ロードセルでそこに作用する荷重を計測し、単位面積当たりの圧力に換算した。

Table 1 Principal particulars of ship model

		Model	Ship
Length	L_{pp}	4.200 m	258 m
Breadth	B	0.652 m	40.0 m
Depth	D	0.396 m	24.3 m
draft	d	0.204 m	12.5 m
Service speed	U	1.61 m/s	24.5 kn

Fig.1に模型船における圧力センサー位置を示す。図中、P1～P12 が圧力計測位置である。P7 と P12 は左舷側に取り付けられたセンサーであり、それぞれ P4 と P9 と同じ深さにある。

船底露出回数は、SS9.5 と SS9 船底位置に水位接点（一対のエナメル被服銅線）を貼付け、船底が波面より露出した場合のみ電圧が作用するように設定し、電圧の計測結果から求めた。

2.4 試験条件

2.4.1 規則波中試験

規則波中試験では、波向きは正面向波 (180deg.)、波長船長比 (λ/L) 0.4, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5 の 7 点とした。入射波高 H_w は、実船相当値で 4m, 8m, 12m とした。ただし、造波機能力の制限から、短波長の $\lambda/L = 0.4$ と 0.5 では、目標波高 12m に対して、それぞれ、8.3m と 10.1m と小さな波高で試験を行った。

2.4.2 不規則波中試験

長波頂不規則波（一方向不規則波）中で試験を実施した。波向きは正面向波 (180deg.) である。波スペクトルとして、ISSC スペクトル (1964) を用いた。試験では、計測結果の信頼性を高めるため、出会い波数がトータルで約 300 になるように、4,5 回航走を繰り返しデータを収録した。

Table 2に不規則波中試験における有義波高 $H_{1/3}$ と平均波周期 T_V の目標値を示す。上段の Case 1, 2, 3 の組み合わせは、平均波周期一定として波高を変化させたものであり、波高影響を調査するための試験である。また下段の波条件は、Sea State 6, 7, 8 を想定したものであり波高とともに T_V が長くなると仮定した。なお、Case 1 は、Sea State 8 と同一である。

Table 2 Significant wave height and wave period of irregular waves

	Case 1	Case 2	Case 3
$H_{1/3}$	12 m	8 m	4 m
T_V	13.4 sec	13.4 sec	13.4 sec
Sea State	6	7	8
$H_{1/3}$	5 m	8 m	12 m
T_V	8.6sec	10.9 sec	13.4 sec

2.5 解析方法

規則波中試験の計測データは、振幅位相解析により、各応答に対する出会い周波数成分の振幅を求めた。不規則波中試験の時系列データ解析方法として、船体運動と

Fig. 2 Comparison of ship motions and vertical acceleration at F.P. in waves

上下加速度に対してはスペクトル解析，波浪変動圧と縦曲げモーメントに対してはゼロアップクロスによるピーク解析を用いた。解析結果から，それぞれの応答の有義振幅を求めた。

静水面に近い点での変動圧力センサーが水面を出入りする場合には，この空中露出によって，通常の正弦波の一部を切り取ったような計測波形となる。その場合には，一回の変動周期の最大値と最小値の差の半分を変動振幅¹²⁾として取り扱った。

2.6 水槽試験結果：規則波中試験結果と不規則波中試験結果の相関について

規則波中での試験結果については無次元表示し，不規則波中での試験結果については実船レベルにスケールアップした値で表示する。

2.6.1 船体運動と船首加速度

Fig.2に船体運動 (Heave, Pitch) と F.P. での上下加速度の試験結果を示す。規則波中での船体運動は波振幅あるいは最大波傾斜，加速度応答は最大波傾斜と重力加速度 g で無次元化している。参考のため，ストリップ法 (STFM) による計算結果を併記している。船体運動や上下加速度の応答関数 (RAO) は， $\lambda/L=0.9$ より大きいところにおいて，波高が大きいくほど応答振幅値が小さくなる。すなわち，波高の増加に伴って単位波振幅当たりの運動応答や加速度が小さくなっていることが分かる。この傾向は O'Dea, J.F.³⁾ をはじめとして多くの研究者によって認知されているものである。

不規則波中での水槽試験結果では，横軸に有義波高を取り，縦軸にそれぞれの有義値を示している。同一平均波周期 ($T_V = 13.4$ sec) の下で，有義波高だけが異なる場合の比較である。水槽試験におけるばらつきを見るため，同一波条件において試験を 4,5 回実施し，それぞれの結果を図示している。加えて，Fig.2に示した波高の異なる 3 種類の RAO を用いた短期予測計算結果 (図中，CAL と記載) とストリップ法 (STFM) による短期予測計算結果を示している。3 種類の RAO を用いた Heave, Pitch の短期予測結果は，波高によって若干異なるものの，不規則波中試験のばらつきの範囲内にあり，試験結果と良い一致を示す。

船首部での上下加速度については，3 つの波高による RAO に対し，比較的明瞭な差異を持つ 3 つの短期予測結果が現れる。船首端での上下加速度を考えていることから，波高に対する船体運動の差異が，あたかも増幅されたかのようになり，明瞭な波高影響が表れたものと考えられる。不規則波中での加速度の有義値は，波高の近い RAO を用いた短期予測結果と一致する方向に見える。今回の結果では波高 8m の RAO を用いた短期予測結果が，実験値と良く一致している。

2.6.2 波浪荷重

Fig.3に縦曲げモーメントの試験結果を示す。規則波中での結果を見ると，波高が大きくなると単位波振幅当たりの縦曲げモーメントは大きくなるという波高影響が見られる。この傾向は，SS7, 8 において顕著である。

不規則波中では，水槽試験結果とストリップ法による

Fig. 3 Comparison of vertical bending moment in waves

短期予測計算結果に加え、波高の異なる3種類のRAOを用いた短期予測計算結果を図示している。SS5位置での縦曲げモーメントの3種類の短期予測計算結果は、不規則波中試験結果と概ね良い一致を示す。一方、SS7, 8のような船首部においては、水槽試験による曲げモーメントの有義値と有義波高との間に比例関係はなく、有義波高が高くなると、曲げモーメントが一層増大するという非線形影響が見られる。短期予測計算では、そのような非線形影響を捉えることはできない。特に、大波高時に計測された船首部での縦曲げモーメントの有義値は、いずれの短期予測計算結果よりも大きな値である点、注意が必要であろう。

Table 3に、試験条件毎の出会い波数と船底露出回数の計測結果を示す。海象条件が厳しくなるにつれて船底露出の頻度が大きくなり、 $H_{1/3}=12\text{m}$ の場合には、出会い波が4波から5波に1回の割合で船底露出を起こしていること、その内約半分はSS9の位置を越える激しい船体運動が起こっていることが分かる。大波高試験時において大きな縦曲げモーメント値が生じているのは、バウフレアスラミングと、それに伴うホイッピングの影響¹⁾と考えられる。

2.6.3 波浪変動圧

Fig. 4に各計測点での波浪変動圧の試験結果を示す。Fig. 1に示したように、P9, P11はSS5.25断面、P4, P6はSS7.5断面、P2はSS8.5断面に位置し、P2, P4, P9は静水面やや下、P6, P11はビルジサークル付近の同一水線上にある。規則波中での結果を見ると、P2, P4位

Table 3 Number of slamming in irregular waves

$H_{1/3}$ condition	Experiment		
	Encounter wave	Slamming	
		SS9.5	SS9
12m (Case 1)	298	72	33
8m (Case 2)	305	5	1
4m (Case 3)	323	0	0

置のような水面に近いところでは、波高の増大とともに単位波振幅当たりの波浪変動圧は小さくなるという波高影響が見られるが、P6, P11のような船底に近いところでは波高影響が小さい。水面に近いところで波高影響が現れるのは、計測された波浪変動圧の波形から判断して、変動圧計測点の空中露出による影響¹¹⁾¹²⁾⁶⁾と考えられる。

不規則波中での試験結果からは、次のことが分かる。水面に近いP2, P4, P9位置においては、水槽試験による有義値と有義波高との間に比例関係はなく、有義波高が高くなると、波浪変動圧の増加が抑えられる方向にある。RAOから求めた短期予測計算結果は、このような波高影響を捉えることができない。特に船首部においては、3種類のRAOによる短期予測結果は大きく異なり、波高が小さい場合のRAOを用いた短期予測結果が大きめとなる。一方、船底に近いP6, P11位置においては、RAOから求めた短期予測計算結果は不規則波中試験結

(1) in regular waves (RAO)

(2) in irregular waves (significant value), $T_V = 13.4$ sec

Fig. 4 Comparison of wave induced pressure in waves

果と比較的良好一致を示し、水面に近い部分での結果とは明らかに傾向が異なる。波浪変動圧の合理的な取り扱いのためには、水面に近い箇所での修正が必要であることが分かる。

3. 理論計算

3.1 理論計算法の概要

線形周波数応答計算法としてストリップ法と細長船理論、非線形時刻歴計算法として非線形時刻歴ストリップ法の3つの計算法による波浪荷重の計算を実施し、水槽試験結果と比較を行った。3つの計算法の特徴は次の通りである。

(1) ストリップ法 (STFM)

STFM(Salvesen, Tuck and Faltinsen Method)は、Salvesen らによって提案された、代表的なストリップ法⁷⁾である。計算では、船体2次元横断面の流体問題を解き、その解を船長方向に積分することによって、radiation & diffraction 問題の解を求め、船体運動を求める。オリジナルのSTFMと比較すると、diffraction 問題において、出会い円周波数ではなく入射波の円周波数¹³⁾を用いている点が異なる。不規則波中での応答は、応答関数を計算で求め、それをベースに線形重ね合わせによる短期予測計算を実施し、長波頂不規則波中での有義値を計算した。波スペクトルとして、水槽試験と同じ

Fig. 5 Comparison of ship motions and vertical acceleration at F.P. in waves

く、ISSC(1964) スペクトルを用いる。

(2) 細長船理論 (EUT)

EUT(Enhanced Unified Theory) は、柏木によって提案された細長船理論であり、ストリップ法の持つ理論的なあいまいさを極力廃し、より合理的に前進速度影響が考慮される計算法である⁸⁾⁹⁾。計算では、ストリップ法の場合と同様に、船体2次元横断面の流体問題を解き、その解を船長方向に積分することによって、radiation & diffraction 問題の解を求め、船体運動を求める。不規則波中での応答は、STFM と同じく、短期予測計算を実施し、長波頂不規則波中での有義値を求める。

(3) 非線形時刻歴ストリップ法 (MSLAM)

MSLAM(Mitsubishi SLAMing prediction method) は、山本等が開発した非線形時刻歴ストリップ法¹⁾をベースに、STFM にならい独自の改良を施したものである²⁾¹⁰⁾。規則波中、不規則波中での船体運動を時刻歴ベースに取り扱い、スラミングのような非線形な挙動を取り扱うことができるという特徴を有す。船体運動に伴う喫水変化の影響を考慮して、ストリップ法と同様な手法で、復原力、強制力、radiation 力を計算し、船体運動を求める。スラミング発生時には、それによる衝撃力が近似的に付加され、3 節の振動モードまでが考慮される。不規則波中での応答は、計算機中で不規則波を発生させ、そこでの船体運動時刻歴計算を実施し、得られた結果を水槽試験と同じ要領で解析して有義値を求める。

Fig. 6 Comparison of vertical bending moment in irregular waves (significant value), $T_V = 13.4$ sec

3.2 計算と水槽試験の比較ならびに考察

計算は、水槽試験での模型船を対象とし、不規則波中の結果は、実船レベルにスケールアップした値で表示する。

3.2.1 船体運動と船首加速度

Fig.5 に船体運動と船首加速度の比較を示す。MSLAM による計算結果は、波高の増加に伴って単位波振幅当たりの運動応答や加速度が小さくなる傾向を良く捉えている。線形計算である STFM や EUT はそのような波高影響を捉えることはできない。定量的に見ると、STFM や EUT による計算結果は過大であり、MSLAM の計

Fig. 7 Vertical bending moment in waves (maximum values)

算精度が優れていることが分かる。

不規則波中では、STFM, EUT, MSLAM いずれの理論計算法も、Sea State とともに船体運動や上下加速度が増加する様子を良く捉えており、その中でも MSLAM の計算精度が優れている。

3.2.2 波浪荷重

Fig.6に縦曲げモーメントの有義振幅の比較を示す。STFM による結果は、有義波高に対して線形的に大きくなるが、MSLAM による結果は、波高の増加に伴い、縦曲げモーメントが線形増加分を上回り非線形的に増加している。これは、実験値の傾向を良く表しており、かつ定量的にも一致している。非線形ストリップ法は、縦曲げモーメントにおける波高影響を精度良く捉えており、その有効性を確認できた。

Fig.7に、MSLAM による計算と規則波中ならびに不規則波中における縦曲げモーメントの最大値と最小値の船長方向分布の比較を示す。縦軸は、正の値がホギング状態を、負の値がサギング状態を表す。規則波中については、MSLAM による計算値は実験値と良く一致している。しかし、不規則波中では有義波高が高くなるにしたがって、実験値より大きめの計算結果となり計算精度が劣る傾向が見られる。この要因として、不規則波中では計算と実験において波の条件を厳密に一致させることが難しいこと、加えて、大波高不規則波の水槽試験では、白波のような波崩れが発生していたことがあげられる。

規則波中試験のように波条件が明確な場合には、大波

高時にも実験と計算が良く一致しており、波浪荷重の推定法として、MSLAM は実用に耐え得ると考えられる。

3.2.3 波浪変動圧

波浪変動圧の規則波中ならびに短期予測計算において、線形計算法をベースに、次に示す土岐の補正¹²⁾を施した計算を実施し、水槽試験結果と比較した。

変動圧力を求めたい位置の静水面からの深さ方向位置を D_G ($D_G = 0$ が静水面, $D_G > 0$ が静水面下, $D_G < 0$ が静水面上位置を表す), 波浪変動圧の線形理論による推定値が水頭単位で H_{PW} であるとき、波浪変動圧 P_a は次のように表される。

$$P_a = \begin{cases} \rho g H_{PW} & \text{for } D_G > H_{PW} \\ \rho g (H_{PW} + D_G)/2 & \text{for } D_G \leq |H_{PW}| \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。ただし、 $D_G < 0$ のとき、 H_{PW} として、静水面上位置における計算値を用いる。また、 H_{PW} は短期予測計算においては有義値をとる。

Fig.8に、波高影響が強い SS7.5 の P4 位置における波浪変動圧短期予測結果 (有義振幅) の比較を示す。平均波周期一定で有義波高だけを変化させた場合の結果である。図中、

- (1) w/o correct : 空中露出の補正を施さない場合
- (2) with correct-1: 空中露出の補正を施した RAO (波高 8m) を用いて短期予測を行った場合

Fig. 8 Comparison of wave induced pressure in long crested irregular waves (significant value), $T_V = 13.4$ sec

(3) with correct-2: 土岐の補正を施した場合

を意味し、EUT 計算をベースとしている。(1)の結果は、波高が小さいときの精度は良いが、波高が大きくなるに従って実験値との差が増大している。(2)の結果は、波高 8m の RAO を用いているため、有義波高が 8m 付近までは、(3)の結果と同程度になっているが、線形的に増加しているため、有義波高 12m では過大となっている。それに対し、(3)の結果は、有義波高の増加に伴って変動圧力の増加率が小さくなるという水槽試験の傾向をよく捉えており、土岐の補正の有効性が分かる。以下には、全ての波浪変動圧の計算結果に土岐の補正を施し、その結果を水槽試験結果と比較することにする。

Fig.9は、不規則波中での静水面より上方の船体表面の変動圧を示している。線形計算では直接計算できない静水面上方の圧力に関しても、土岐の補正により計算することが可能である。ミドシップ付近 (P8) では、計算結果は実験値と良く一致しているが、船首部 (P3) では、過大となっている。これは、定常造波による非線形影響が考慮されていないためと考えられる。

Fig.10 に、規則波中での理論計算結果と水槽試験結果の比較を示す。図は、SS7.5 における変動圧力の横断面における分布図であり、横軸は船体横断面に沿った角度、すなわち、静水面と船体中央線の交点を中心とした角度を意味し、0deg. が船底の船体中央線位置を、 ± 90 deg. が左右両舷の静止時水面位置を表す。左側には STFM との比較結果、右側には EUT との比較結果を示している。空中露出の影響の補正により、 θ が ± 90 deg. の船側付近において、波高が小さいほど単位波振幅当たりの波浪変動圧は大きくなる、という波高影響を捉えることができる。STFM と EUT を比較すると、STFM による計算値は全般的に過大であり、EUT の方が波高による変動圧力の変化を良く捉えている。

Fig. 9 Comparison of wave induced pressure above waterline in irregular waves (significant value), $T_V = 13.4$ sec

Fig.11 に不規則波中での波浪変動圧有義値の横断面上分布図の比較を示す。横軸は船体横断面に沿った位置を表しており、センターラインと静水面の交点を中心とした角度である。実験結果を見ると ± 90 deg. に近いところで空中露出の影響が表れ、 ± 80 deg. 近傍でピークを持つような分布形状となり、また理論計算結果はこのような実験値の傾向をよく表している。STFM と EUT を比較すると、規則波中での場合と同じように、全般的に STFM による計算値は過大であり、EUT の方が精度が高い。

4. 今後の課題

大波高時の波浪荷重に焦点を絞り、水槽試験結果と既存の方法による理論計算結果について報告した。しかし、本研究は端緒に着いたばかりであり、解決すべき課題も多い。以下に今後の課題を列挙する。

(1) 斜め波中での実態把握:

今回対象としたのは、正面向波だけである。実際には、斜め波、横波等、種々の波方向に対する波浪荷重や変動圧力の検討が必要である。特に、コンテナ船の場合には、斜め大波高中でのねじり荷重に関する検討が不可欠である。また、今回、長

Fig. 10 Wave pressure distributions in regular waves (SS7.5)

波頂不規則波中における結果についてのみ報告したが、実海面により近いと考えられる短波長不規則波中での検討を実施する必要があるだろう。

(2) 理論計算法の高度化：

今回適用性を検討した計算法は、大波高時ににおいて使えるレベルにはあるが、すべての項目において、実用上十分と言えるものではない。特に、波浪変動圧の推定精度向上を図る必要がある。そのためには、グリーン関数法やランキンソース法と言った3次元計算法の実用化が望まれる。また、今回縦曲げモーメントの計算に使用したMSLAMをより有効活用するためには、斜め波問題への拡張を図る必要がある、そのためには、深沢が指摘した問題¹⁴⁾の解決を図る必要がある。

(3) 設計荷重の設定：

今回得られた知見を、船殻構造設計へと展開するためには、設計荷重を合理的に決める必要がある。本論文で扱ったような大波高時には、線形重ね合わせが成り立たないため、長期予測値のように、スマートに設計値を決めることができない。また、ある設計海象を考える場合にも、何らかの形で「避航操船」の影響を考慮する必要があるように思われる。それらの合理的な取り扱いを検討する必要がある。

Fig. 11 Distribution of wave induced pressure in long crested irregular waves (significant value)

5. 結 言

コンテナ船模型を用いて、規則波中ならびに不規則波中での水槽試験を実施し、船体運動や波浪変動圧、波浪荷重に及ぼす波高影響を把握した。次に、線形計算法として、ストリップ法、細長船理論の一つである Enhanced Unified Theory、非線形計算法として、非線形時刻歴ストリップ法 (MSLAM) による理論計算を実施し、水槽試験結果と比較・検討した。本研究で得られた知見をまとめると次のようになる。

- (1) 規則波中の船体運動は波高の増加に伴って単位波高当たりの応答が小さくなる。大波高規則波中での船体運動は、線形計算 (EUT, MSLAM) と比べ、非線形計算である MSLAM により良く捉えられる。不規則波中では、船体運動の波高影響はあまり顕著で無く、不規則波中の船体運動は有義波高にほぼ比例する。

- (2) 船首部においては、波高が高くなると曲げモーメントが一層増大するという波高影響が現れる。短期予測計算では、そのような波高影響を捉えることはできず、大波高時には水槽試験結果よりも過小となる。MSLAM は曲げモーメントにおける波高影響を捉えることができ、さらに曲げモーメントの長さ方向分布、サギングとホギングモーメントにおける非対称性など水槽試験結果と良い一致を示す。

- (3) 波浪変動圧における波高影響は、水面に近いところにおいて顕著に現れ、波高が高くなるとそれに伴う波浪変動圧の増加が抑えられる方向となる。これは、当該点の空中露出によって生じるものである。土岐の補正¹²⁾を施した変動圧力の計算結果は、修正を施さない計算結果と比較して、水面付近における値が小さく抑えられ、水槽試験結果と一致を示す方向となる。EUT による計算結果は、STFM よりも水槽試験結果に近い値を示す。

あわせて、大波高時におけるコンテナ船の波浪荷重研究に関する課題についても整理を行った。引き続き検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の実施に際し、理論計算法について種々御指導いただいた九州大学応用力学研究所柏木 正先生に感謝の意を表します。また、本研究の実施にあたり、種々御助言いただいた長崎研究所土岐 直二主幹、水槽試験を担当いただいた長崎研究所第二実験課福嶋 祐二主任、川崎佐年社員、理論計算に御助力いただいた菱算 (株) 戸崎寛氏、膨大な実験結果の整理に御尽力いただいた松尾 都多子女史に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山本善之, 藤野正隆, 深沢塔一: 非線形性を考慮した波浪中の船体縦運動および縦強度 (第3報), 日本造船学会論文集, 第145号, 1979, pp.63-69.
- 2) Toki, N., Hatakenaka, K., Takahashi, T. and Fujii, H.: Experimental and Theoretical Approach to the Estimation of non-Linear Vertical Wave Loads, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.154, 1983, pp.141-150.
- 3) O'Dea, J.F. and Walden, D.A.: The Effect of Bow Shape and Nonlinearities on the Prediction of large Amplitude Motions and Deck Wetness, Proc. 15th Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg, 1984, pp.163-176.
- 4) 藤野正隆, 尹 範相: 大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究 (第3報), 日本造船学会論文集, 第158号, 1985, pp.169-180.
- 5) Fonseca, N. and Guedes Soares, C.: Time-Domain Analysis of Large-Amplitude Responses of Ships in Waves, Proc. 7th Int. Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units, Hague, 1998, pp.495-501.
- 6) Miyake, R., Kinoshita, T., Kagemoto, H. and Zhu, T.: Ship Motion and Loads in Large Waves, Proc. 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, 2000, pp.48-61.
- 7) Salvesen, N., Tuck, E.O. and Faltinsen, O.: Ship Motions and Sea Loads, Trans. of SNAME, Vol.78, 1970.
- 8) Kashiwagi, M.: Prediction of Surge and Its Effects on Added Resistance by Means of the Enhanced Unified Theory, Trans. of West-Japan Society of Naval Architects, No.89, 1995, pp.77-89.
- 9) Kashiwagi, M., Mizokami, S., Yasukawa, H. and Fukushima, Y.: Prediction of Wave Pressure and Loads on Actual Ships by the Enhanced Unified Theory, Proc. 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, 2000.
- 10) Vulovich, R., Hirayama, T., Toki, N. and Mizuno, H.: Characteristics of Hull Stresses Measured on a Large Containership in Rough Seas, Trans. of SNAME, Vol.97, 1989.
- 11) 谷澤克治, 田口晴邦, 猿田俊彦, 渡辺 巖: 短波長域を航走する VLCC の船側に働く波圧に関する研究, 日本造船学会論文集 第174号, 1993, pp.233-242.
- 12) 土岐直二, 戸沢 秀, 福嶋祐二, 和田洋二郎: VLCC 船型に作用する波浪変動圧力の特性とその長期予測について, 日本造船学会論文集 第176号, 1994, pp.375-385.
- 13) 渡辺 巖: 斜め波中を航走する船体に働く Diffraction Pressure の実用的計算法, 関西造船協会誌 第221号, 1994, pp.83-89.
- 14) 深沢塔一: 斜波中非線形船体運動/波浪荷重の時間領域における数値計算法に対する一考察, 日本造船学会論文集 第167号, 1990, pp.69-79.