

コンテナ船の波浪荷重に関する研究

技術研究所 三宅竜二 朱庭耀 重見利幸
飯島一博 熊野厚

1. 緒言

近年、コンテナ船の大型化が進み、従来のパナマックス型コンテナ船を大きく上回るオーバーパナマックス型コンテナ船が建造されている。このようなコンテナ船は、船首部に大きなフレアを有し、甲板開口部が非常に大きいことから、大波高中では船首フレア部に大きな衝撃荷重が作用し、甲板開口部には船体振りモーメントに伴う大きなそり応力が発生する。このため、船体構造設計上、大波高時における船首フレア部の衝撃荷重や船体振りモーメントを高精度に推定することが要求されている。しかしながら、船体振りモーメントについては、過去に微小波高中での水槽試験¹⁾²⁾³⁾は行われているものの、大波高中での水槽試験結果は報告されておらず、船首部に大きなフレアを有するような近年の大型コンテナ船模型を用いて船体振りモーメントを計測した水槽試験結果も報告されていない。また、船体振りモーメントの推定においては、微小振幅による線形理論の適用範囲内でさえ、横揺れに伴う慣性力、減衰力及び復原力における船長方向分布の計算法の違い等から、各機関が保有している線形ストリップ法の計算結果にばらつきが見られる。

本研究では最新の大型コンテナ船の四分分割模型を用いて、波の出会角・出会周波数・入射波高を系統的に変化させ、その中を航行する当該模型船の運動・波浪断面荷重及び波浪変動圧力を計測するといった詳細な水槽試験を行った。尚、船体振りモーメントは重量分布に大きく左右されることから、実機の代表的な重量分布を各分割模型に適用した。以下に水槽試験から得られた結果を示すと共に、大波高波浪中を航行する大型コンテナ船の船首部フレア部が縦曲げモーメントに与える影響や船体振りモーメントの応答等、各種応答について非線形特性を交えて考察及び検討した結果を示す。また、船体振りモーメントをはじめ各種波浪荷重に関して、水槽試験結果とストリップ法及びランキンソース法による計算結果を比較することにより、既存の波浪荷重推定法の妥当性を検証した結果を以下に報告する。

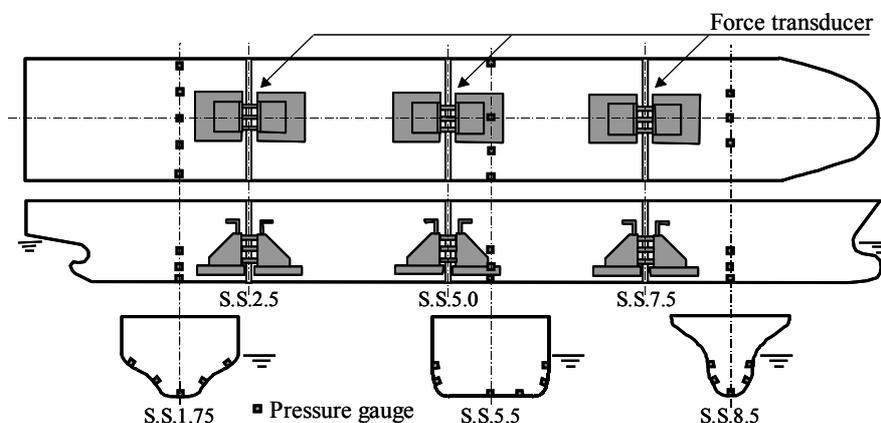


Fig. 1 The arrangement of the pressure gauges and the force transducers

2. 水槽試験

2.1 供試模型

供試模型は海上技術安全研究所で設計されたオーバーパナマックス型コンテナ船型であり、船体断面の波浪荷重を計測するために、Fig. 1 に示すように S.S.2.5, 5.0, 7.5 の3断面で5分力計を介して接続された4分割模型である。この模型の主要目を Table 1 に示す。分割模型間に変形を許容するために5mm程の隙間を設けてあり、その隙間は防水処理を施すために柔らかいビニールシートで覆った。模型船の重量分布については、近年の大型コンテナ船における代表的な重量分布を求め、各分割模型に適用した。各分割模型に関する重心位置及び環動半径を Photo 1 に示すように分割模型を乗せる台を2箇所のベアリング機構で回転可能なように支持した装置、いわゆる“ブランコ”により計測し、バラストウェイトを用いて重量分布の調整を行った。この模型船の重量分布を Table 2 に示す。

Table 1 The particulars of the model

	Ship	Model
Length (Lpp) (m)	283.8	5.000
Breadth (B) (m)	42.8	0.754
Draft (d) (m)	14.0	0.247
Displacement (Δ)	109480 (ton)	584.10 (kgf)



Photo 1 The measuring instrument for center of gravity and radius of gyration of the separating model

Table 2 The weight distribution of the model

S.S.A	S.S.B	W (kgf)	LCG (m)	KG (m)	$\kappa_{xx}/B(G)$	$\kappa_{yy}/Lpp(G)$	GM _T (m)
0.0	2.5	116.27	-1.862	0.360	0.375	0.062	-
2.5	5.0	186.58	-0.634	0.318	0.364	0.057	-
5.0	7.5	192.69	0.633	0.304	0.351	0.057	-
7.5	10.0	88.56	1.722	0.303	0.315	0.061	-
0	10	584.10	-0.104	0.320	0.356	0.243	0.019

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, 水深 3.5m）において実施した。水槽試験は XY 曳引車により模型船を曳航し、6 自由度ガイド装置を用いて計測を行った。曳航点は模型船の重心とし、Surge, Sway, Yaw に関する復原力を付加するために、前後、左右方向にコイルばねを取り付けた。水槽試験模様の一例を Photo 2 に示す。



Photo 2 The situation of an experiment in regular waves ($H_w=15\text{m}$, $\chi=180\text{deg.}$, $\lambda/L=1.0$)

2. 3 計測項目及び計測方法

水槽試験における計測項目は、船体運動、波浪変動圧力、波浪断面荷重（水平・垂直剪断力、振り・縦曲げ・水平曲げモーメント）であり、計測装置の取り付け位置を Fig. 1 に示す。

船体運動については、Surge, Sway, Heave を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ョンメーターにより計測し、Pitch, Roll, Yaw を光ファイバージャイロにより計測した。

波浪変動圧力は Fig. 1 に示すように 3 断面(S.S. 1.75, 5.5, 8.5)の船体表面に $\phi 30$ の受圧板を取り付けたミニロードセルを 16 個取り付け、そこに作用する荷重を計測し、単位面積あたりの圧力に換算した。波浪断面荷重については、S.S.2.5, 5.0, 7.5 の 3 断面に取り付けられた 5 分力計を用いて計測した。

2. 4 試験条件

本水槽試験では入射波の波長と出会角及び入射波高を系統的に変化させた試験パラメータとしたことに特徴があり、Table 3 に示すように、波高を 3 種類、波長船長比を 10 種類、入射角を 7 種類、船速を 2 種類変化させて規則波中での水槽試験を行った。入射波との出会角については、向波を 180deg.、追波を 0deg.とした。但し、波高 15m については、18.4knot のみの水槽試験を行った。また波高 15m では、短波長域で波崩れが起きるために、波長船長比 0.3~0.7 の範囲では計測を行うことができなかった。

Table 3 The experimental parameters for the ship

Incident wave height (m)	3.5, 9.0, (15.0 ; only 18.4knot)
λ/L	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.6
Incident wave angle (deg.)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
Ship speed (knot)	18.4, 24.5

3. 数値計算

3. 1 ストリップ法

ストリップ法による計算は STFM をもとに行い、2次元流体力は Close-Fit 法により求めた。波浪変動圧力については、Diffraction Potential を用いた渡辺の方法⁴⁾により計算を行い、さらに、短波長域における波の反射に基づく修正⁵⁾⁶⁾を波浪変動圧力に行った。

3. 2 ランキンソース法

ランキンソース法は単純吹き出しを核関数とする積分方程式による境界値問題の解法である。本研究では、前報⁷⁾と同様に、ケルビン波の放射条件には、Dawson が提案した上流差分近似による手法を適用し、リング波の放射条件には、Rayleigh の仮想摩擦に相当する項を付加する手法を用いて計算を行った。本計算には、NK が開発したランキンソース法による計算コードを用いた。

4. 水槽試験結果及び数値計算結果

4. 1 船体運動

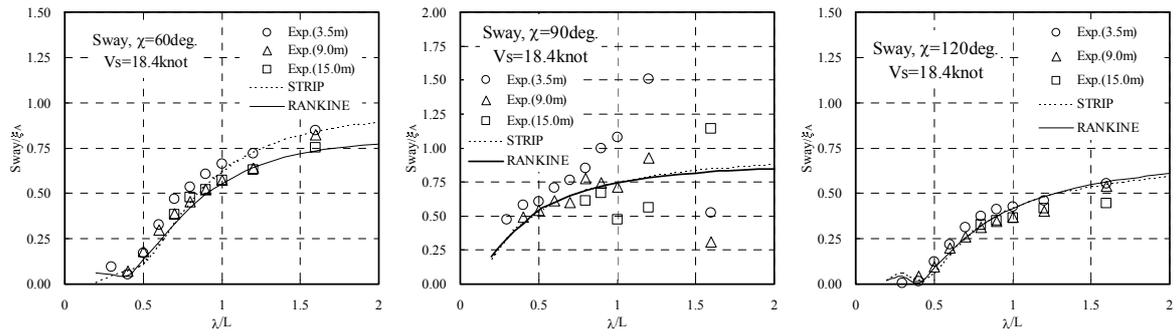
Fig. 2 に船体運動の応答関数(RAO)の代表例を示す。横軸に波長船長比 λ/L を、縦軸に入射波の振幅(Roll, Pitch は波傾斜)で無次元化した単位波振幅あたりの運動変位の振幅を示す。図中の "Exp.(3.5m)", "Exp.(9.0m)", "Exp.(15.0m)" は、それぞれ実機換算で波高 3.5, 9, 15m における試験結果を示し、"STRIP" は波高 3.5m におけるストリップ法(STFM)による計算結果を、"RANKINE" は波高 3.5m におけるランキンソース法による計算結果を示している。ここで示す水槽試験結果は、計測値の主要な応答成分を捉えるために計測波形をフーリエ解析して求めた出会波周期と同じ周期をもつ一次成分の振幅とした。Roll 運動に対する非線形粘性減衰力については、ストリップ法による計算では池田らによる算定式(組立推定法)⁸⁾を用い、ランキンソース法による計算では曳航中自由横揺試験から得られた減減係数を用いた。

計算に用いたストリップ法並びにランキンソース法は微小振幅による線形理論であることから、これらの計算結果は線形領域と考えられる波高 3.5m における水槽試験結果と比較することが好ましいと考えられる。

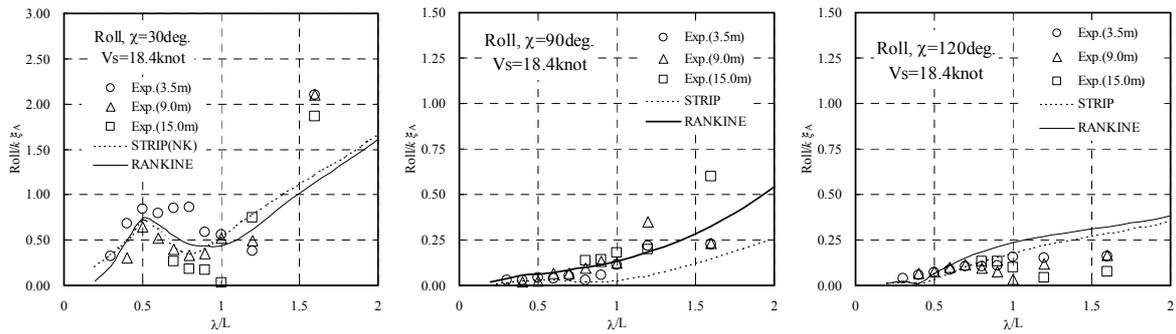
Sway 運動については、横波(90deg.)の長波長域において、それぞれの波高における水槽試験結果にばらつきが見られる。この原因の一つとして、この波向・波長域では左右方向の漂流力が大きいために、水槽試験では Sway 運動の復原力として取り付けられたコイルばねのばね定数を漂流力に応じて変化させて計測を行ったことが挙げられる。

Roll 運動については、当該模型船の Roll 運動に関する同調周期が斜追波(30deg.)の長波長域にあるために、Fig. 2(b) に示すように、斜追波(30deg.)の長波長域で波高の増大と共に単位波高あたりの応答振幅が若干小さくなる非線形性が見受けられる。単位波高あたりの Roll 運動の変位は、ビルジキールからの渦放出などに伴う非線形減衰力のために、波高の増大に伴って顕著に減少することが従来から知られており、本水槽試験結果からもこの従来知見が再確認された。

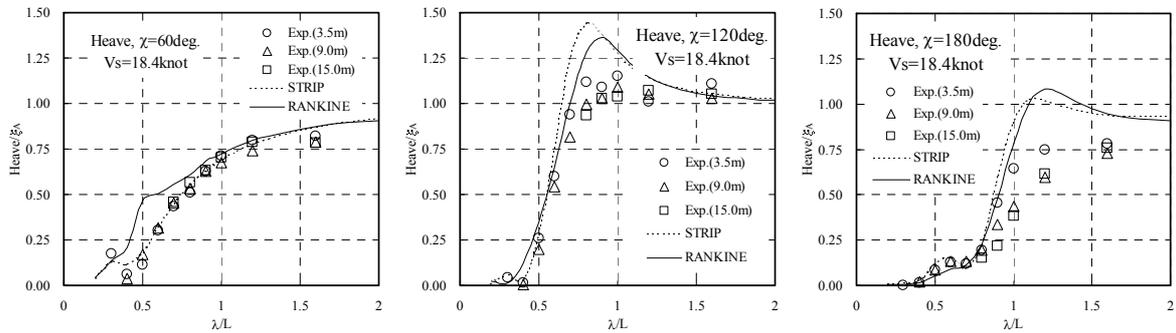
Heave 運動については、Fig. 2(c) に示すように、向波(180deg.)、斜向波(120deg.)の $\lambda/L=1.0$ 周辺において、波高の増大と共に単位波高あたりの応答振幅が小さくなる非線形性が明らかに認めら



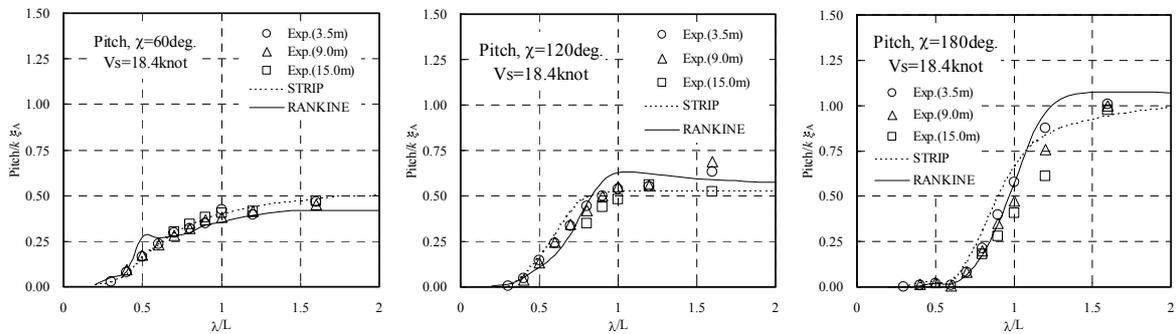
(a) Sway motion amplitude ($\chi=60, 90, 120\text{deg}$.)



(b) Roll motion amplitude ($\chi=30, 90, 120\text{deg}$.)



(c) Heave motion amplitude ($\chi=60, 120, 180\text{deg}$.)



(d) Pitch motion amplitude ($\chi=60, 120, 180\text{deg}$.)

Fig. 2 The comparisons of the experimental results and the calculation results on the motion amplitude ($V_s=18.4\text{knot}$)

れる。これらの波向・波長域における出会周期は Heave 運動の固有周期に対応しており、Heave 運動の同調点周囲におけるこのような非線形特性は先に行われた水槽試験⁹⁾においても確認されている。さらに、Pitch 運動についても Heave 運動の非線形性が示された波向・波長域で非線形性が見受けられる。

Fig. 2 に示すように、全体的に船体運動については、ストリップ法及びランキンソース法による計算結果は波高 3.5m による水槽試験結果とほぼ一致していることが確認された。

4. 2 波浪変動圧力

構造設計上重要な波浪変動圧力の一例として、向波(180deg.)における船首部断面(S.S.8.5)での波浪変動圧力及び横波(90deg.)における船体中央部断面(S.S.5.5)での波浪変動圧力の応答関数(RAO)をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。(紙面の都合上、代表的な結果についてのみを示した。)

各図共に、横軸に波長船長比 λ/L を、縦軸に入射波の振幅に相当する水頭圧で無次元化した単位波振幅あたりの波浪変動圧力の振幅を示している。水槽試験における水線面近傍の水圧計では、船体運動を含む相対水位変動から水圧計が空中に飛び出し、時系列波形が正弦波形を一部切り取ったようないわゆる半波形状となる場合がある。このような場合の水槽試験結果は、フーリエ解析ではなく、空中露出を考慮した半波処理により解析した結果である。

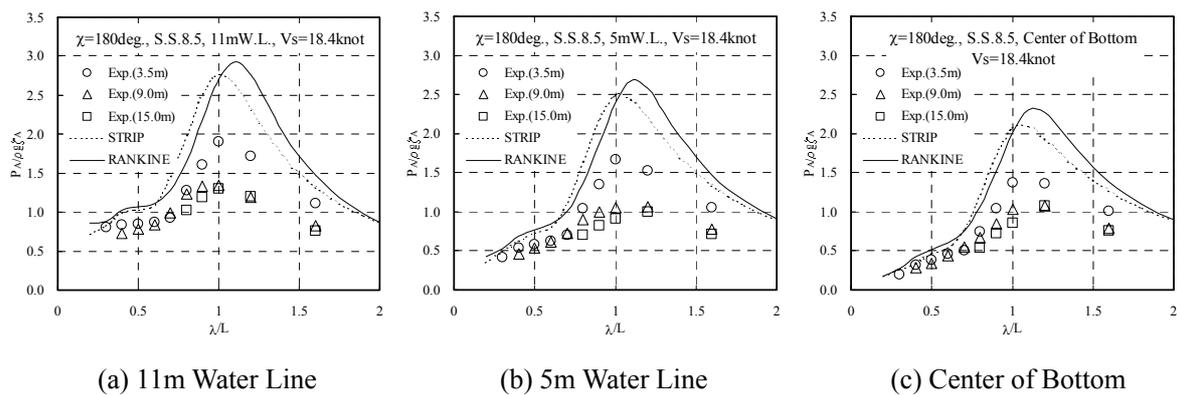


Fig. 3 The comparisons of the experimental results and the calculation results on the pressure amplitude (S.S.8.5, $\chi=180\text{deg}$, $V_s=18.4\text{knot}$)

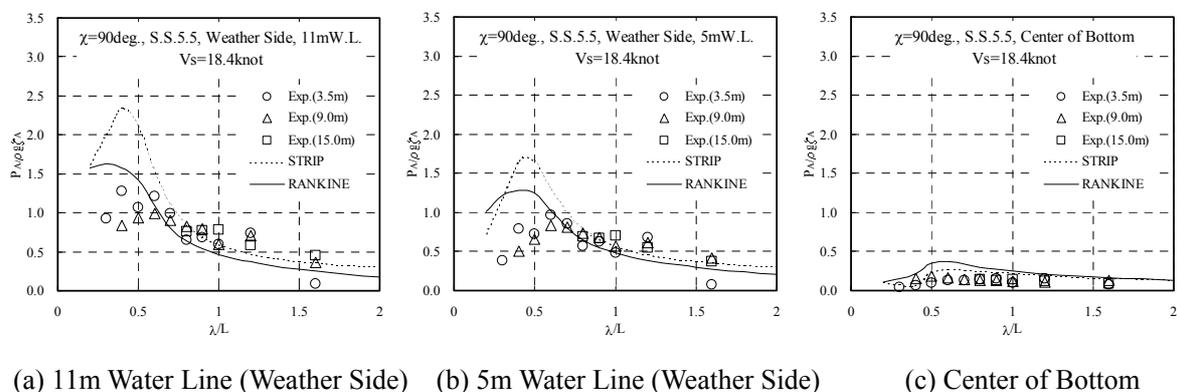


Fig. 4 The comparisons of the experimental results and the calculation results on the pressure amplitude (S.S.5.5, $\chi=90\text{deg}$, $V_s=18.4\text{knot}$)

さらに、船体運動と同様に図中の "Exp.(3.5m)", "Exp.(9.0m)", "Exp.(15.0m)" は実機換算で波高 3.5, 9, 15m における試験結果を示し、"STRIP" は波高 3.5m におけるストリップ法(STFM) による計算結果を、"RANKINE" は波高 3.5m におけるランキンソース法による計算結果を示している。

Fig. 3(a)(b), Fig. 4(a)(b) に示すように、水槽試験結果より水線面近傍の波浪変動圧力は、応答が大きくなる波長域付近で波高が増加すると共に単位波振幅あたりの振幅が減少する非線形性が確認された。このような波向・波長域では、船体運動に波高に対する非線形性が見られることから、この非線形性が波浪変動圧力に大きな影響を与えていると考えられる。

Fig. 3 に示すように、向波(180deg.)における船首部では、ストリップ法とランキンソース法による計算結果は、 $\lambda/L=1.0$ 周辺で波高 3.5m の水槽試験結果よりも大きい傾向がある。

一方、Fig. 4 に示すように、横波(90deg.)における船体中央部では、ストリップ法による計算結果は短波長域で波高 3.5m の水槽試験結果よりも大きな値を示しているが、ランキンソース法による計算結果は短波長域で波高 3.5m の水槽試験結果よりも若干大きいことを除けば、水槽試験結果とほぼ一致していることが確認された。

4. 3 波浪断面荷重

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に波浪断面モーメントが最大となる波向における各断面の応答関数(RAO)を示す。横軸に波長船長比 λ/L を、縦軸に入射波の振幅で無次元化した単位波振幅あたりのモーメントの振幅を示している。船体運動や波浪変動圧力と同様に、図中の "Exp.(3.5m)", "Exp.(9.0m)", "Exp.(15.0m)" は実機換算で波高 3.5, 9, 15m における試験結果を示し、"STRIP" は波高 3.5m におけるストリップ法(STFM) による計算結果を、"RANKINE" は波高 3.5m におけるランキンソース法による計算結果を示している。図に示す水槽試験結果の振幅値は計測波形をフーリエ解析して求めた出会波周期と同じ周期をもつ一次成分の振幅である。

縦曲げモーメントについては、Fig. 5(b)(c) に示すように、水槽試験結果は船体中央断面(S.S.5.0)及び船首部断面(S.S.7.5)では、向波(180deg.)の $\lambda/L=1.0$ 周辺において、波高が増加すると共に単位波振幅あたりの振幅が増加する非線形性が見られる。この傾向は特に船首部断面(S.S.7.5)において顕著に現れている。水槽試験に用いた模型船は船首部に大きなフレアを有することから、大波高中では、バウフレアスラミングや船首部フレアでの急激な浸水面の変化による静的復原力の大きな変化がサギングモーメントに大きな影響を与えたことが原因の一つと考えられる。

ランキンソース法による縦曲げモーメントの計算結果は、Fig. 5(b)(c) に示すように、船首部断面(S.S.7.5)及び船体中央断面(S.S.5.0)では、その応答が大きくなる向波(180deg.)の $\lambda/L=1.0$ 周辺において、ストリップ法による計算結果及び波高 3.5m の水槽試験結果に比べて明らかに小さい傾向がある。この波向・波長域では、波高 3.5m においてもバウフレア部がかなり浸水するなど、既に非線形な応答が水槽試験で見受けられたために、計算結果と試験結果を単純に比較することは難しいと思われる。また、船尾部断面(S.S.2.5)におけるランキンソース法による結果は水槽試験結果と良く一致していることから、波高 3.5m の船首部及び船体中央断面における縦曲げモーメントの水槽試験結果は、波高 3.5m においてもバウフレアから非線形な影響を受けていることが予想される。

水平曲げモーメントについては、縦曲げモーメントと同様に Fig. 6(b)(c) に示すように、水槽試験結果は、船体中央断面(S.S.5.0)と船首部断面(S.S.7.5)において、その応答が大きくなる斜向波

(120deg.)の短波長域において波高が増加すると共に単位波振幅あたりの振幅が増加する非線形性が若干見られる。この原因についても、バウフレアが大きな影響を与えていると考えられる。

ランキンソース法による水平曲げモーメントの計算結果は、Fig. 6(a)(b)(c) に示すように、波高 3.5m の水槽試験結果と良い一致を示している。一方、ストリップ法による計算結果は、全ての断面において、短波長域での計算結果がランキンソース法による計算結果や波高 3.5m の水槽試験結果よりも大きい傾向がある。この傾向は船体中央断面(S.S.5.0)において明らかに見られる。

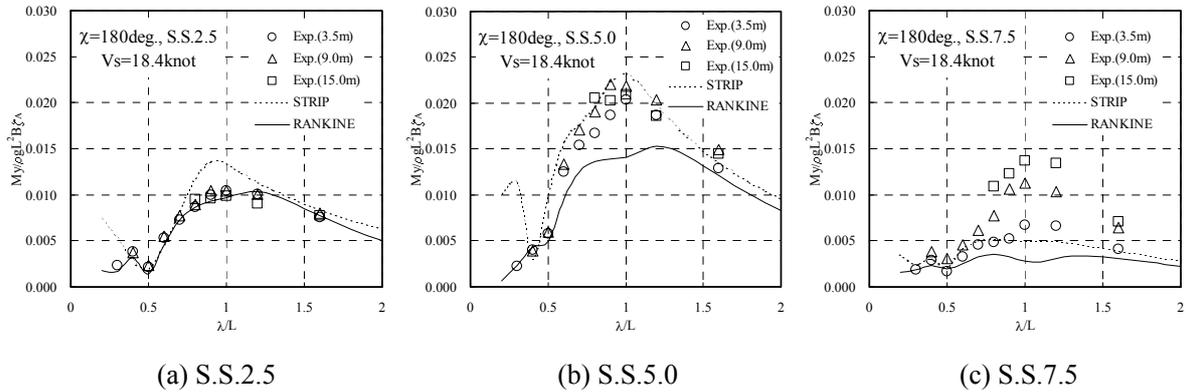


Fig. 5 The comparisons of the experimental results and the calculation results on the vertical bending moment amplitude ($\chi=180\text{deg.}$, $V_s=18.4\text{knot}$)

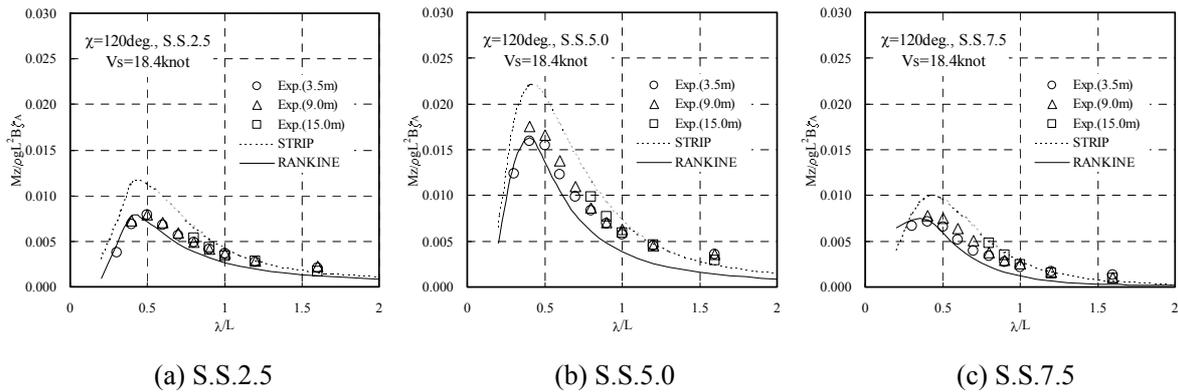


Fig. 6 The comparisons of the experimental results and the calculation results on the horizontal bending moment amplitude ($\chi=120\text{deg.}$, $V_s=18.4\text{knot}$)

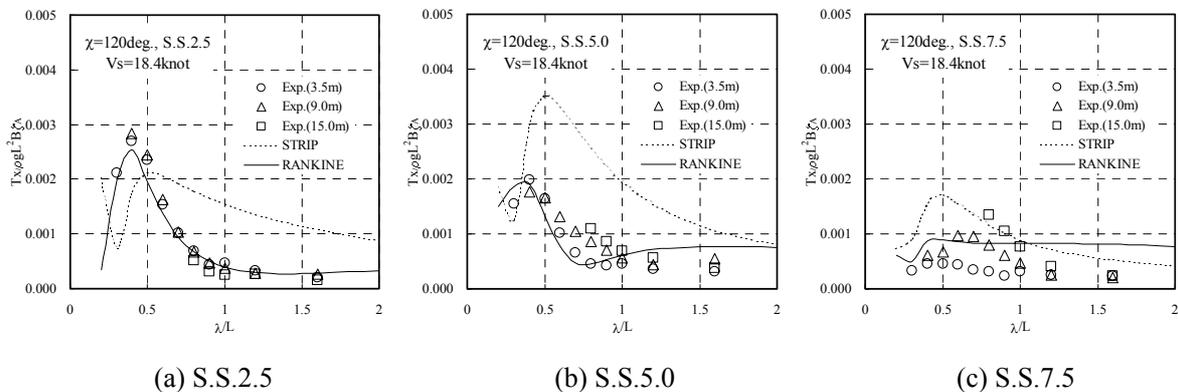


Fig. 7 The comparisons of the experimental results and the calculation results on the torsional moment amplitude ($\chi=120\text{deg.}$, $V_s=18.4\text{knot}$)

振りモーメントについては、Fig. 7に示すように、水槽試験結果は斜向波(120deg.)の短波長域での応答が大きく、その船長方向分布は、S.S.2.5での応答がS.S.5.0やS.S.7.5における応答よりも大きいことが確認された。この傾向は、コンテナ船の構造上からS.S.2.5近傍(エンジンルーム前)で大きなそり応力が発生する傾向と一致しており、大変興味深い結果である。さらに、波高に対する非線形性については、船尾部断面(S.S.2.5)ではほとんど見受けられないが、船首部断面(S.S.7.5)では波高が増加すると共に単位波振幅あたりの振幅が増加する非線形性が顕著に見られる。このような非線形性は縦曲げ・水平曲げモーメントと同様の原因により生じていると考えられる。

Fig. 7に示すようにランキンソース法による振りモーメントの計算結果は、試験結果の応答が最大となるS.S.2.5における斜向波(120deg.)の短波長域をはじめ、全体的に波高3.5mの水槽試験結果と良好な一致を示している。一方、ストリップ法による計算結果については、波高3.5mの水槽試験結果とあまり一致していない。ストリップ法は、短波長域における顕著な現象である船首尾部での波の反射を考慮していない等、三次元的な影響を厳密に考慮していないために、振りモーメントのような縦曲げ・水平曲げモーメントに比べ非常に小さな値を高精度に推定することは難しいと考えられる。

5. 非線形影響係数

波浪変動圧力及び波浪断面荷重の波高の変化に伴う非線形性を調べるために、前章で示した各波高による水槽試験結果の応答関数(RAO)を用いて長期予測を行った。これより得られた各波高の長期予測値を用いて波高の変化に伴う非線形性の修正を行う係数(非線形性影響係数)を求めた。尚、構造強度評価上、水平曲げにより発生する水平曲げ応力と振りにより発生するそり応力を明確に分離する必要があるために、振りモーメントについては水槽試験結果を剪断中心廻りの振りモーメントに変換し、これより得られた応答関数(RAO)を用いて長期予測を行った。また、長期予測には、BMTの北大西洋をベースに作成されたIACSの波浪テーブルを用いた。

波浪断面荷重について、波高9m, 15mの応答関数(RAO)を用いて求めた長期予測値(10^{-8})と波高3.5mの応答関数(RAO)を用いて求めた長期予測値(10^{-8})の比をそれぞれTable 4, Table 5に示す。さらに、波浪変動圧力について、波高9m, 15mの応答関数(RAO)を用いて求めた長期予測値(10^{-8})と波高3.5mの応答関数(RAO)を用いて求めた長期予測値(10^{-8})の比をそれぞれTable 6, Table 7に示す。

波高3.5m及び波高9mの水槽試験結果(RAO)から、波高15mの横波(90deg.)における波浪変動圧力や斜向波(120deg.)における振り・水平曲げモーメントは、短波長域において、その応答が最大になることが予想される(波高15mの短波長域における水槽試験は波崩れが生じるために実施していない)。このため、波高15mにおけるこれらの長期予測値を精度良く推定することは難しく、本研究ではこれらについての長期予測値を求めなかった。

Table 4, Table 5に示すように、波浪変動圧力については、船首部断面(S.S.8.5)、船体中央断面(S.S.5.5)、船尾部断面(S.S.1.75)の水線面近傍において、波高による非線形影響係数は、おおよそ0.8程度となることが示された。これより得られた波浪変動圧力の知見をまとめ、コンテナ船の直接強度計算ガイドラインに適用した。

Table 4 The effect of the wave heights on the pressure of the long term prediction
 $[10^{-8}(H_w=3.5m) / 10^{-8}(H_w=9.0m)]$

	Pressure		
	90deg.	180deg.	All Heading
S.S.1.75 11mW.L.	0.85	0.86	0.85
S.S.1.75 5mW.L.	0.95	1.01	0.96
S.S.5.5 11mW.L.	0.86	0.81	0.85
S.S.5.5 5mW.L.	0.91	0.83	0.88
S.S.8.5 11mW.L.	0.88	0.80	0.82
S.S.8.5 5mW.L.	0.82	0.75	0.76

Table 5 The effect of the wave heights on the pressure of the long term prediction
 $[10^{-8}(H_w=3.5m) / 10^{-8}(H_w=15.0m)]$

	Pressure		
	90deg.	180deg.	All Heading
S.S.1.75 11mW.L.	-	0.67	0.70
S.S.1.75 5mW.L.	-	0.92	0.80
S.S.5.5 11mW.L.	-	0.72	0.72
S.S.5.5 5mW.L.	-	0.80	0.81
S.S.8.5 11mW.L.	-	0.72	0.74
S.S.8.5 5mW.L.	-	0.65	0.66

Table 6 The effect of the wave heights on the torsional moment and vertical/horizontal bending moment of the long term prediction $[10^{-8}(H_w=3.5m) / 10^{-8}(H_w=9.0m)]$

	T.M.		V.B.M.		H.B.M.	
	120deg.	All Heading	180deg.	All Heading	120deg.	All Heading
S.S. 2.5	1.04	1.02	1.03	1.02	1.04	1.03
S.S. 5.0	0.97	0.97	1.13	1.13	1.07	1.06
S.S. 7.5	1.18	1.15	1.65	1.60	1.06	1.04

Table 7 The effect of the wave heights on the torsional moment and vertical/horizontal bending moment of the long term prediction $[10^{-8}(H_w=3.5m) / 10^{-8}(H_w=15.0m)]$

	T.M.		V.B.M.		H.B.M.	
	120deg.	All Heading	180deg.	All Heading	120deg.	All Heading
S.S. 2.5	-	-	0.98	0.97	-	-
S.S. 5.0	-	-	1.11	1.10	-	-
S.S. 7.5	-	-	2.04	1.98	-	-

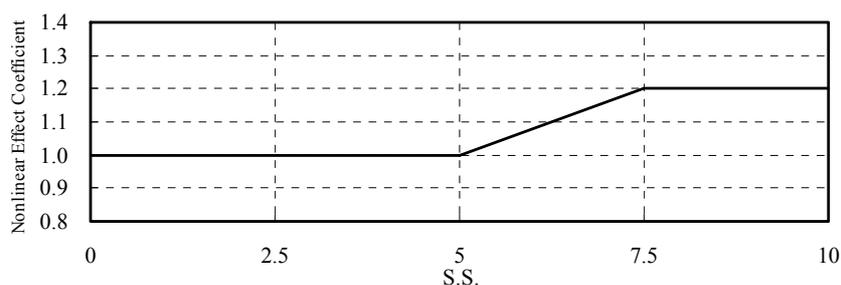


Fig. 8 The distribution of the nonlinear effect coefficient with the torsional moment

Table 6, Table 7 に示すように、縦曲げモーメントにおける波高による非線形影響係数は、船首部断面(S.S.7.5)では 2.0 程度であり、船体中央断面(S.S.5.0)では 1.1 程度であることが示された。さらに、船尾部断面(S.S.2.5)では、ほとんど波高の変化による非線形性がほとんど無いことも示された。尚、水槽試験から得られた縦曲げモーメントの応答関数(RAO)は、計測波形をフーリエ解析して求めた出会波周期と同じ周期をもつ一次成分の振幅であることから、サギングモーメントとホギングモーメント（縦曲げモーメントの非対称性）を考慮した解析結果ではない。構造強度評価を行う際には、縦曲げモーメントをサギングモーメントとホギングモーメントに分離する必要があることから、今後はサギングモーメントとホギングモーメントにおける波高の変化による非線形影響係数を求める必要があると思われる。

水平曲げモーメントについては、Table 6 に示すように波高による非線形性はほとんど無いことが示された。

さらに、振りモーメントについては、Table 6 に示すように波高による非線形影響係数は船首部断面(S.S.7.5)では 1.2 程度であるが、船体中央断面(S.S.5.0)と船尾部断面(S.S.2.5)では波高による非線形性はほとんど無いことが示された。これより得られた振りモーメントの知見を Fig. 8 に示すように、振りモーメントの波高による非線形影響係数の船長方向分布として纏め、コンテナ船の船体曲げ振り強度評価ガイドラインに適用した。

6. まとめ

最新の大型コンテナ船模型を用いた水槽試験を行い、大波高波浪中を航行する大型コンテナ船の船首部フレア部が縦曲げモーメントに与える影響や船体振りモーメントの応答等、各種応答について考察及び検討を行った。さらに、船体振りモーメントをはじめ各種波浪荷重に関して、水槽試験結果とストリップ法及びランキンソース法の計算結果を比較することにより、既存の波浪荷重推定法における妥当性を検証した。これらより得られた結果を以下にまとめる。

1. Roll 運動の同調現象に伴う運動の非線形性は従来から知られていたが、本水槽試験においてもこのような非線形性が再確認された。
2. 水槽試験結果より向波や斜向波における Heave の同調点近傍で、単位波高あたりの Heave 運動の振幅が波高の増大と共に小さくなる非線形性が確認された。
3. 水槽試験結果より水線面近傍の波浪変動圧力は、応答が大きくなる波長域付近で波高が増加すると共に単位波振幅あたりの振幅が減少する非線形性が確認された。
4. 水槽試験結果より船体中央断面及び船首部断面における縦曲げモーメントは、向波の $\lambda/L=1.0$ 周辺において、波高が増加すると共に単位波振幅あたりの振幅が増加する非線形性が確認された。
5. 水槽試験結果より船体中央断面及び船首部断面における水平曲げモーメントは、その応答が大きくなる斜向波の短波長域において、波高が増加すると共に単位波振幅あたりの振幅が増加する非線形性が若干見られた。
6. 水槽試験結果より振りモーメントは、斜向波の短波長域における応答が大きく、S.S.2.5 での応答が S.S.5.0 や S.S.7.5 における応答よりも大きいことが確認された。さらに、波高に対する非線形性は、船尾部断面ではほとんど見受けられないが、船首部断面では波高が増加すると共

に単位波振幅あたりの振幅が増加する非線形性が顕著に見られた。

7. 船体運動に関して、ストリップ法及びランキンソース法による計算結果は水槽試験結果とほぼ一致することが確認された。
8. ランキンソース法による水平曲げモーメントの計算結果は水槽試験結果と良い一致を示していた。一方、ストリップ法による計算結果は短波長域での計算結果がランキンソース法による計算結果や水槽試験結果よりも大きい傾向が示された。
9. ランキンソース法による振りモーメントの計算結果は、水槽試験結果と良好な一致を示していたが、ストリップ法による計算結果は、水槽試験結果とあまり一致していなかった。大型コンテナ船における振りモーメントの推定には、ランキンソース法のような三次元影響を厳密に考慮することができる三次元波浪荷重推定法が有効である。
10. 波浪変動圧力及び波浪断面荷重の波高による非線形性影響係数を求め、コンテナ船の直接強度計算ガイドライン及び船体曲げ振り強度評価ガイドラインに適用した。

謝 辞

本水槽試験は、三菱重工業(株)及び(独)海上技術安全研究所並びに(財)日本海事協会の共同研究の一環として行われたものであり、関係者の皆様に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 竹沢誠二 他：斜波中曳航船体運動および波浪荷重試験，日本造船学会論文集，第 149 号，1981, pp.37-46.
- 2) 高石敬史，吉野泰平：斜め波中におけるコンテナ船の船体中央曲げ及び振りモーメントについて，関西造船協会誌，第 152 号，1974, pp.79-91.
- 3) 永元隆一 他：波浪中で船体が受ける横剪断力，横曲げモーメントおよび振りモーメントの計算，日本造船学会論文集，第 132 号，1972, pp.257-268.
- 4) 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
- 5) 伊東章雄，溝口純敏：肥大船の短波長域における波浪変動圧について，日本造船学会論文集，第 166 号，1989, pp.251-258
- 6) 伊東章雄，溝口純敏：肥大船の斜波中短波長域の波浪変動圧について，関西造船協会誌，第 222 号，1994, pp.125-132
- 7) 三宅竜二 他：ランキンソース法による一般商船における波浪荷重推定について，日本造船学会論文集，第 190 号，2001, pp.107-119.
- 8) 池田良穂：横揺れ減衰力，日本造船学会運動性能委員会第一回シンポジウム，1984
- 9) 三宅竜二，朱庭耀，影本浩：VLCC 及びコンテナ船の大波高中における運動・波浪荷重に関する実験的研究，日本造船学会論文集，第 190 号，2001, pp.75-86