

船首バルブ部に作用する環境荷重

海上安全研究領域 耐航・復原性研究グループ

*谷澤 克治, 南 真紀子, 小川 剛孝

1 はじめに

オイルタンカーやケミカルタンカーの海難事故による大量の重油や化学物資の流出は、海洋環境破壊を引き起すため、重大な社会問題となっている。重油等の流出事故による環境破壊を防止するためには、船舶の座礁や衝突事故を未然に防ぐことが大事である。しかし、海難事故を完全に無くすことは困難であり、たとえ事故が発生しても載貨物を流出させないための対策が現実的な環境破壊防止策として求められている。これまでに、タンカーでは座礁時の油流出を防止するため二重船底が義務づけられて来た。しかし、二重船底だけでは衝突事故により船側に破口が生じた場合には油流出の可能性が残り、対策として十分ではない。そこで、現在では船殻全体の二重化(ダブルハル)が進められている。ダブルハルは被衝突船側の対策として高い油流出防止効果が期待できるが、衝突速度が速い場合には、衝突船の船首バルブ部が被衝突船の内殻をも突き破ってしまう可能性がある。そこで衝突船側にも対策が必要とされている。海上技術安全研究所では、衝突船側にも衝突時のエネルギーを吸収させるため、船首バルブ部の構造を柔構造にした緩衝型船首構造の研究を実施している。

緩衝型船首構造では船首バルブ部の板圧がこれまでより薄くなるため、その設計基準の策定にあたってはスラミング衝撃荷重等の環境荷重に対する強度を担保する必要がある。船首バルブ部はShell構造であり、緩衝型にするとフレーム間長が短くなることから、局所的な凹損等を心配する必要はあまりないが、バルブ部全体がリングフレーム構造となるため、環境荷重による破損モードとして全体的な座屈が心配される。特にコンテナ船に見られる幅の狭い船首バルブでは、水平方向の大きな環境荷重に対して弱いため、環境荷重を正確に見積る必要がある。

そこで、当所の80m角水槽においてコンテナ船の自航式模型を用いた水槽実験を実施し、船首バルブ部に作用する波浪荷重を計測した。また、船首バルブ部に作用する波浪衝撃荷重を計算で求めるため、バルブ形状を楕円体近似して長さ、幅、高さの簡単なパラメータで表現し、簡便で信頼性の高いvon Kármán¹⁾流の運動量理論を適用した推定法を開発した。本報ではこれらの研究成果の概要について報告する。

2 水槽実験の概要



写真-1 水槽実験の様子

(1) 供試模型ならびに計測項目

水槽実験は海上技術安全研究所80m角水槽において大型コンテナ船(海技研モデル)の自由航走模型を用いて実施した。模型船の主要目とbodyplanをそれぞれ表-1と図-1に示す。船首バルブ部にはたらく波浪荷重は、船首バルブ部と主船体間に検力計を取り付け、上下及び水平方向の剪断力と曲げモーメントとして計測した。検力計で計測される荷重には、船首バルブ部に作用する波浪荷重の他に、船首バルブ部の慣性力が含まれる。そこで、FPの上甲板下部に加速度計を取り付けて上下・水平方向の加速度を計測し、慣性力成分を除去した。これらのセンサーの配置図を図-2に示す。図中のP1及びP2は半

導体式水圧計で、局所的な水圧を計測するために取り付けた。

表-1 供試船主要目

	Ship	Model
$L_{pp}(m)$	283.8	5
$B(m)$	42.8	0.754
$D(m)$	24.0	0.423
$d(m)$	14.0	0.247
$\Delta(m^3)$	107072.2	0.586
C_b	0.629	0.629
$GM(m)$	1.084	0.019
k_{yy}/L_{pp}	0.244	0.244

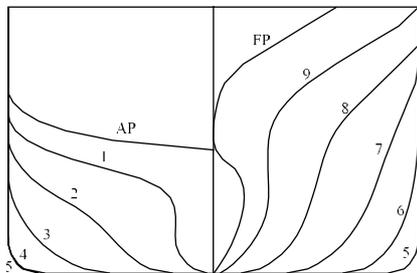
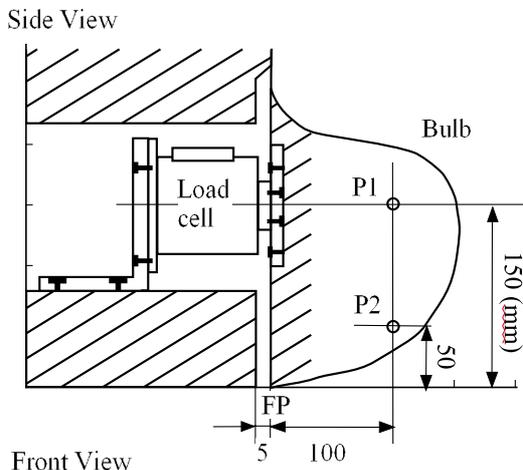


図-1 Bodyplan



Front View

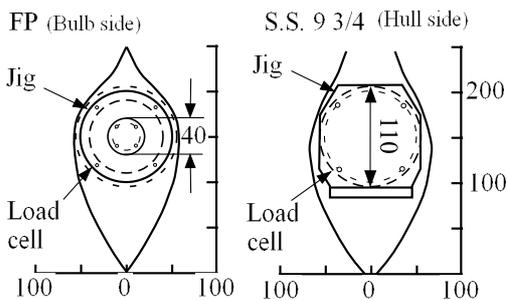


図-2 船首バルブ部計測装置配置図

本実験では、船首バルブ部にはたらく波浪荷重や水圧の他に、船体運動及び船首相対水位の計測も行った。船体運動は光ファイバージャイロならびにジャイロアクセロメーターにより6自由度の計測を行った。相対水位の計測には容量式波高計を用いた。

(2) 実験条件

本実験の目的は、船首バルブ部にはたらく波浪衝撃荷重の計測である。そこで船首部の船底スラミングが発生しやすいと予想される縦運動の同調点付近を中心に計測を行った。規則波中で船首部露出が発生した実験条件を表-2にまとめて示す。表中の波高は実船換算した値で、フルード数 0.239 は実船の航海速度 24.5kt に、フルード数 0.195 は波浪中で少し減速した速度 20kt に相当する。本水槽実験では、表中に示した範囲以外にも、波長では $\lambda/L = 0.6, 0.8, 1.5$ 、波高では $H_w = 5m, 9m$ についても計測を実施したが、船底露出は発生しなかった。

表-2 実験条件及び船底露出発生状況

λ/L	Fn	0.239		0.195	
		$H_w(m)$	λ	$H_w(m)$	λ
1.0	180	○	○	○	○
	135	○	○	○	○
1.2	180	○	○	△	○
	135	○	○	△	○

(3) 実験結果

バルブに作用する衝撃荷重にとって最も重要な船首部相対水位の計測結果を NSM による計算値と比較して図-3 に示す。計測結果には波高による非線形影響が現れており、特に向波の同調点付近では顕著である。向波の同調点付近で微小波高時の相対水位計測値が NSM による計算値よりかなり大きな値になっているのは、船首部における前後方向の波の攪乱と放射の影響があるためで、NSM ではこの影響が取り入れられていないからである。しかし、波高が高くなるにつれて非線形影響により相対水位の応答は小さくなるため、船底露出が発生する波高 12 m ならびに 14 m 相当になると、実験値は NSM の計算値より小さくなっている。出会角 135° の場合は向波中と比べて相対水位振幅の波高による非線形影響は小さいが、同調点付近では非

線形影響がやはり顕著であり、大波高の場合はNSMの計算値は過大な値になっている。バルブ部に作用する衝撃荷重を精度よく推定するためには、推定法の入力となる船首部相対水位の計算精度を上げる必要があり、これには船首部における前後方向の反射波の影響と波高による非線形影響を取り入れた船体応答の3次元非線形計算法を開発しなければならない。しかしこれは将来の課題として、本報では実験で計測された船首部相対水位を用いて、バルブの衝撃荷重を推定した。推定法ならびに推定結果については第3節で示す。

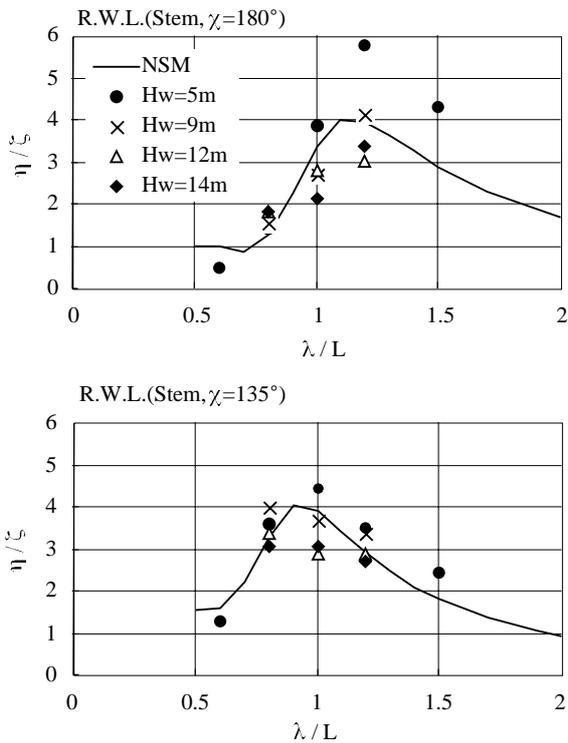
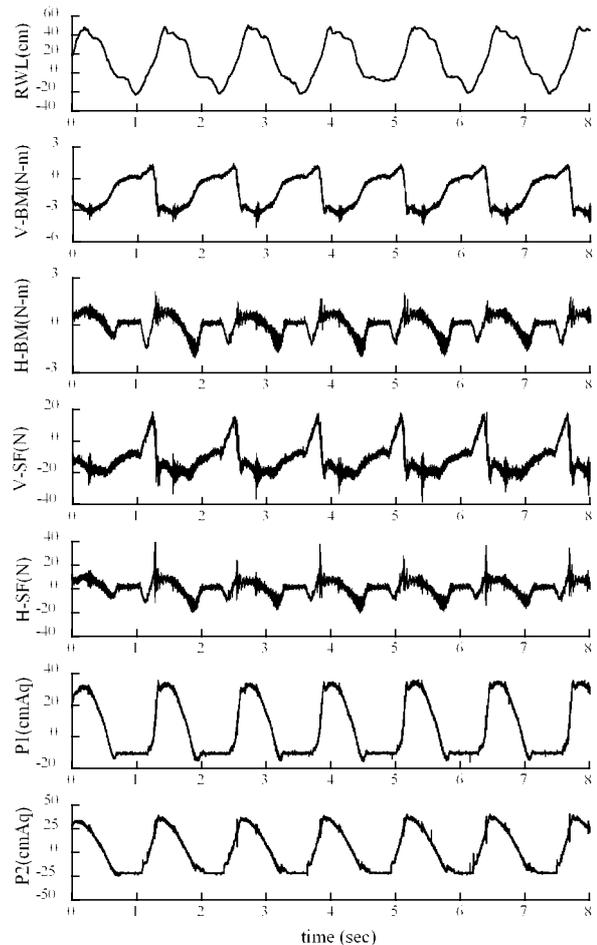


図-3 船首相対水位

次に、船首バルブ部に作用する上下及び水平方向の剪断力と曲げモーメントの計測結果を示す。まず、時系列の一例を水圧及び船首部相対水位の時系列と共に図-4に示す。実験条件は $\lambda/L = 1.0$, $H_w = 12m$ 相当, $\chi = 135^\circ$ である。剪断力及び曲げモーメントは船の静止時の自重と浮力がつりあった状態をゼロとしてプロットしている。水圧波形から船首バルブ部が露出している時間と水面への突入のタイミングが分かる。本報告ではバルブ部に作用する衝撃荷重をバルブ部が水面露出している時の値からピーク値までの差と定義し、波形からこれを読み取った。衝撃荷重を波長船長比、船速及び波高毎に整

理した結果を図-5から図-7に示す。図-5は正面向波中での実験結果で、正面向波中では水平方向の衝撃荷重は発生しなかったのて上下方向の荷重についてのみ示している。図から波高及び船速が大きくなるにつれて荷重が大きくなる事がわかる。ちなみにバルブ部に静的に働く浮力は約 $21N$ で、計測された衝撃荷重は高々その2倍程度であり、強度設計上あまり問題にならない量と考えられる。図-6,7は斜向波 $\chi = 135^\circ$ の場合の計測結果で、それぞれ上下方向ならびに水平方向の荷重を示している。斜向波状態では上下方向の衝撃荷重は向波状態より若干緩和されていることが分かる。一方、水平方向の衝撃荷重が発生するようになるが、その値は高々 $15N$ で、浮力より小さい値であった。

以上の実験結果から、船首バルブ部に作用する波浪衝撃荷重はバルブ部の浮力のオーダーであり、緩衝型柔船首構造設計上の制約要因にならないと考えられる。



($\lambda/L = 1.0, H_w = 12m, \chi = 135^\circ$)

図-4 計測波形の一例

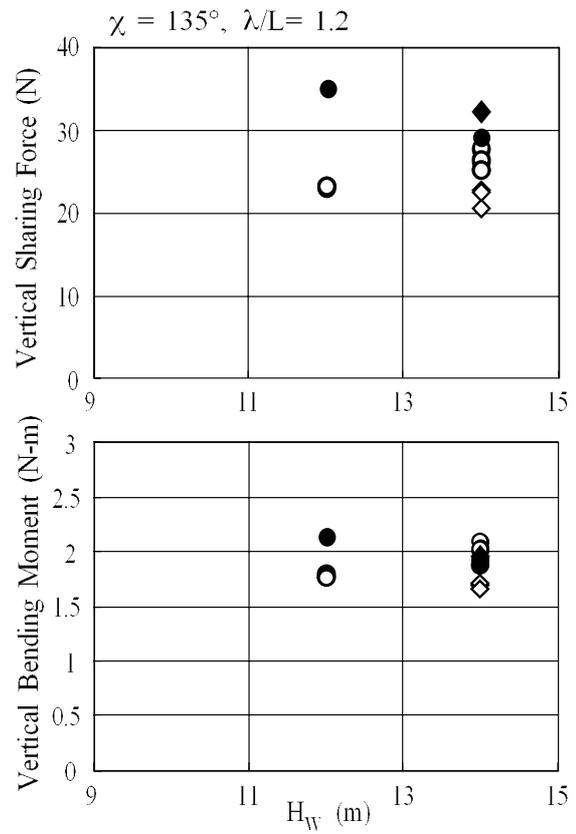
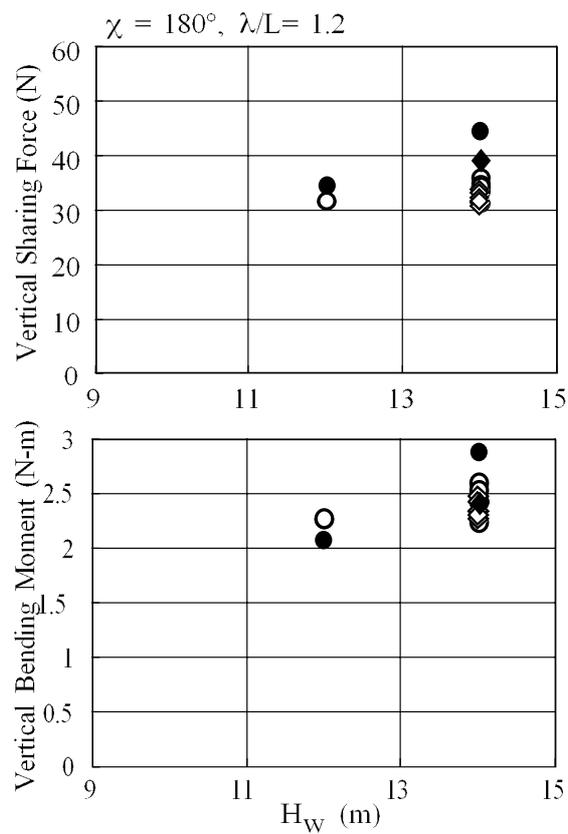
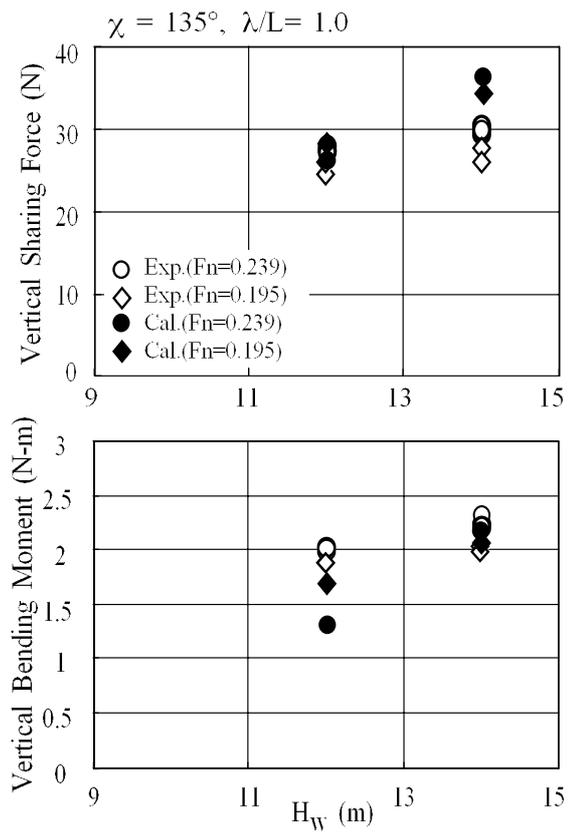
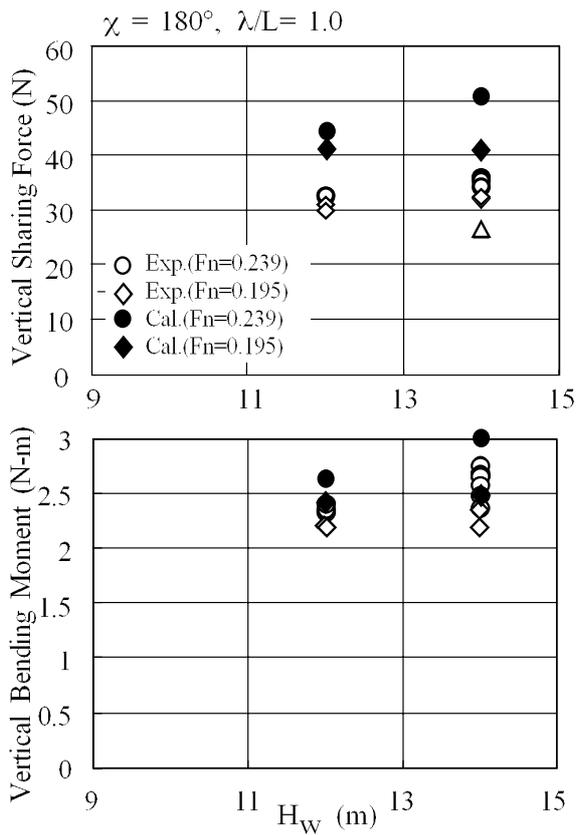


図-5 バルブ部に働く上下方向の剪断力と
曲げモーメント（正面向波）

図-6 バルブ部に働く上下方向の剪断力と
曲げモーメント（斜向波）

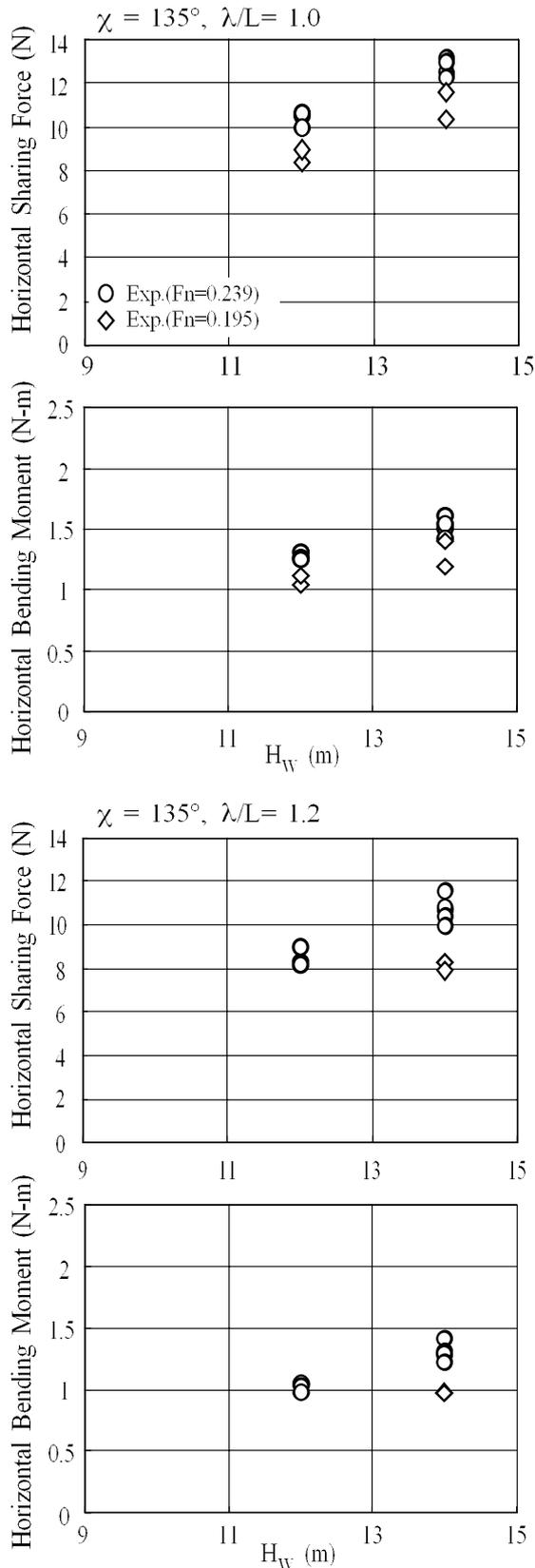


図-7 バルブ部に働く水平方向の剪断力と曲げモーメント（斜向波）

3 船首バルブ部に作用する波浪荷重推定法

船首バルブ部に作用する波浪衝撃荷重の短期予測値ならびに長期予測値は、概ね次のような手順で求められる。まず、任意の与えられた海象条件における船体運動と船首部相対水位変動の計算を行い、その結果から船底露出確率ならびに露出したバルブ部が水面へ突入する瞬間の相対速度と相対角度の結合確率密度関数を計算する。これに予め計算しておいた個々の相対速度と相対角度に対応する衝撃荷重を乗じて衝撃荷重の確率密度関数を求め、その超過確率からあるレベル以上の衝撃荷重が発生する確率を計算する。長期予測では想定している船舶が会うであろう海象条件を波浪統計表等から求め、短期予測結果との畳み込み積分を行って超過確率を計算する。この手法は船底スラミングの長期予測手法と同じであり、確立された手法である。この手続きの中で、現在欠けているものは、船首バルブ部が水面へ再突入する瞬間の相対速度と相対角度が与えられたとき、バルブ部に発生する衝撃荷重を推定する簡便な計算法である。そこで、次のような計算法を提案する。

まずバルブ部の形状を理想化して楕円体で近似する。非常に特殊な形状の船首バルブを除き、この近似により大きな誤りが生じることはないと考えられる。バルブ部の長さ、半幅、半高さをそれぞれ a, b, c として3つの簡単なパラメータで表現すると、バルブ部の形状は

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

で近似される。次に、この形状を持った剛体が水面に突入する際の衝撃荷重を von Kármán 流に水面の盛り上がりを見做して付加質量の時間変化で求めると、バルブ付け根に作用する剪断力と曲げモーメントは

$$F = \frac{\rho\pi ab^2 V}{2} \sqrt{f(t)} \frac{df(t)}{dt}, (a > b) \quad (2)$$

$$M = \frac{\rho\pi a^2 b^2 V}{4} \sqrt{f(t)} \frac{df(t)}{dt}, (a > b) \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{2V}{c} t - \left(\frac{V}{c}\right)^2 t^2, (0 \leq t \leq c/V) \quad (4)$$

となる。ここで、 ρ は水の密度、 V はバルブと水面との衝突速度である。この式から剪断力ならびに曲げモーメントの最大値と、それらを

与える時刻は

$$F_{max} = \frac{\rho\pi ab^2}{2c} V^2, t = \frac{2 - \sqrt{2}}{2} \frac{c}{V} \quad (5)$$

$$M_{max} = \frac{\rho\pi a^2 b^2}{3\sqrt{3}c} V^2, t = \frac{3 - \sqrt{3}}{3} \frac{c}{V} \quad (6)$$

で与えられる。衝撃荷重の計算で水面の盛り上がりを見無視すると実際より低い値になり、その修正係数は2次元楔の水面衝撃では $\pi/2$ であることが Wagner により示されている²⁾。そこで、本報では上式で与えられる値にこの修正係数 $\pi/2$ を乗じた値を最大値とする。

本計算法が妥当なものであるか検証するため、水槽実験で得られた衝撃荷重との比較検討を行った。結果を図-5,6に実験結果と比較して示す。先に述べたように計算には、船首相対水位の計測値を微分して求めた衝撃速度を用いた。一般的に衝撃荷重の計算結果は計測結果をよく説明しており、良好な結果が得られていることが分かる。

以上は上下方向の衝撃荷重の計算であるが、横方向も計算式の b と c を入れ替えることで対応できる。ただし、衝撃速度の推定値に船首部相対速度をそのまま用いると当然過大となる。横揺れにより 30° 傾斜した状態で船首バルブ部が水面に突入する非常に厳しい場合を想定すると、横方向の衝撃速度成分は鉛直方向の $1/2$ 程度であると考えられるが、これでもまだ過大である。横方向の衝撃速度をどのように考えるべきか、現在、実験結果を解析しながら検討中である。

4 おわりに

大型コンテナ船の自航式模型を用いた水槽実験を実施し、波浪衝撃荷重により船首バルブ付根に生じる剪断力及び曲げモーメントを計測した。その結果、船首バルブ部に作用する衝撃荷重は波高及び船速が大きくなるにつれて増大する一般的な傾向が確認された。上下方向の荷重の大きさは、向波状態の最も厳しい場合でも、バルブ部に働く浮力の2倍程度であった。また斜め向波中で計測した水平方向の荷重の大きさは、

最も大きな値でも上下方向の荷重より小さく、浮力の半分程度であった。以上は規則波中での実験結果である。本研究では不規則波中で実験も実施したが、500波の出会い波で計測された上下方向ならびに水平方向の剪断力の最大値は、それぞれ高々 $50N$ ならびに $20N$ 程度であり、規則波中での値を大幅に上回ることはなかった。不規則波中での実験結果については、次の機会に報告する。

本研究では衝撃荷重の簡易計算法も提案し、計測結果と比較して良好な結果を得た。本簡易計算法は von Kármán 流の運動量理論に基づく手法で、簡便でかつ信頼性の高い方法である。自由表面の盛り上がりに対する補正係数として Wagner の2次元衝撃理論から導かれる値 $\pi/2$ を安全側の値として用いたが、遠山^{4,5)}の3次元水面衝撃の研究によると、3次元物体の場合はもう少し小さな値になるようである。本計算法の入力となる船首相対水位の推定についてはストリップ法(NSM)では不十分と考えられ、現在開発中の船体応答の3次元非線形計算法の完成を急ぐ必要がある。

参考文献

- 1) von Kármán, T. : The impact on sea plane floats during landing, *NACA*, TN321, (1929)
- 2) Wagner, H. : Über Stöße und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol.12, No.4, (1967)
- 3) Chuang, S.L. : Theoretical investigation on slamming of cone-shaped bodies, *J.S.R.*, Vol.13, (1969)
- 4) 遠山泰美 : 任意形状物体の2次元水面衝撃計算法について, *船論*, 第173号, (1993)
- 5) 遠山泰美 : 平板近似による3次元水面衝撃計算法について, *船論*, 第179号, (1996)