

緩衝型船首構造の効果の検証

輸送高度化研究領域

*山田 安平、遠藤 久芳

油流出防止構造プロジェクト

川野 始、高田 篤志

1. はじめに

ダブル・ハル構造のタンカーにおいても、大型かつ高速の船舶が衝突した場合には、船側に大きな損傷を受け、荷油の漏洩により甚大な海洋環境汚染を引き起こす恐れがあり、その防止対策が必要である。衝突によるタンカーからの油流出防止策として、被衝突船の船側構造強化だけでは、効率上一定の限界がある事が分かってきた¹⁾。そこで、被衝突船のみでなく衝突船においても変形による衝突エネルギーを吸収する「緩衝型船首構造」というアイデアが提起された。当研究所では、国土交通省からの受託研究プロジェクトとして、「衝突時の油流出防止のための緩衝型船首構造基準に関する研究」を行っている。本研究では、被衝突船にとって最も脅威となる、船首バルブを対象として、緩衝型船首構造の具体的な構造要件を明らかにし、国際基準策定に資することを目的としている。プロジェクトの初年度及び2年目では、船首バルブの軸圧潰実験²⁾及び曲げ崩壊実験³⁾を実施し、崩壊メカニズムを明らかにするとともに、FEM解析及び簡易解析法の精度検証を行った。

平成15年度は、実船衝突シナリオを仮定し、AframaxがD/H VLCCに衝突する大規模FEMシミュレーション解析を行い、緩衝型船首構造の効果の検証を行った。本稿では、このシミュレーション解析結果の概要及び緩衝型船首構造の効果について報告する。

2. 効果の指標

緩衝型船首構造の効果を確認するための指標としては種々考えられるが、本稿では、次の2つを用いて評価した。1つは、衝突船の構造破壊で吸収した

エネルギー ($E_{S,B}$) を両船の構造破壊で吸収したエネルギー (E_s) で除した比率 ($R_{E,B}$) であり、緩衝型の効果が高いほど、 $R_{E,B}$ の値は 1.0 に近づく。

AFRAMAX_BALLAST_AIRFLOW_FLD1

Fig. 1

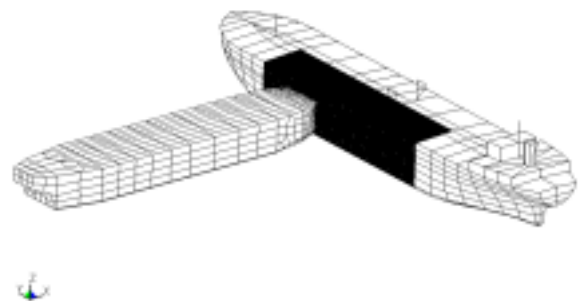


図1 衝突計算用 FEM モデル ($\theta=90$ 度)

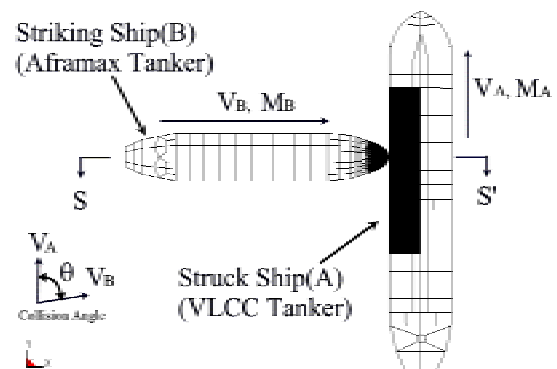


図2 衝突条件 (上面図)

一方、緩衝型船首構造を有する船舶が最大何ノットで衝突しても相手船の荷油流出を生ぜずに済むかということは、運航上の限界値を把握する上で有用であると考えられる。そこで、本研究では、任意の衝突条件（衝突角度、排水量及び喫水）に対して、衝突時に被衝突船の内殻を破断しない最大の衝突速度を「限界衝突速度」と定義し、この「限界衝突速度」を緩衝型船首構造の効果のもう1つの指標とし

て採用した。FEM 解析のみにより、限界衝突速度を求めるためには、同条件にて衝突船の速度を変えた解析を何ケースも行わなければならない。しかし、静止した被衝突船の船体中央部付近に、 $\theta = 90$ 度で衝突し、衝突後両船が一体となって運動する場合に限り、限界衝突速度を次のような簡易的な方法で推定することができる。衝突後の両船の速度を V' とし、船体運動以外で吸収するエネルギーの総和を E_s とすると、衝突前後の運動量保存則及び運動エネルギー保存則は、それぞれ次式のようにになる。

$$M_B V_B = (M_A + M_B) V' \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} M_A V_A^2 + \frac{1}{2} M_B V_B^2 = \frac{1}{2} (M_A + M_B) V'^2 + E_s \quad (2)$$

ただし、 M 及び V はそれぞれ、付加水質量込みの質量及び速度とし、添字 A は被衝突船を、添字 B は衝突船を表すものとする。①、②から V' を消去して、 V_B について整理すると、

$$V_B = \sqrt{2E_s \times \frac{M_A + M_B}{M_A M_B}} \quad (3)$$

となる。被衝突船の内殻破断までに船体運動以外で吸収するエネルギーを $E_{s,cr}$ とすると、限界衝突速度 $V_{B,cr}$ は次式のような簡単な式で表せる。

$$V_{B,cr} = \sqrt{2E_{s,cr} \times \frac{M_A + M_B}{M_A M_B}} \quad (4)$$

予想される $V_{B,cr}$ より、十分大きめの V_B を設定することにより、FEM 解析を 1 ケースのみ実施して④式から $E_{s,cr}$ を求める。本研究では、衝突船に 20kt を与えて $E_{s,cr}$ を求めた。実際には、 $E_{s,cr}$ は歪み速度影響により変化するが、大型船舶の速力であれば、その影響は非常に小さいものと考えられる。

3. 衝突シナリオ及び解析条件

緩衝型船首構造の効果を検証するために、汎用非線形構造解析ソフト「LS-DYNA」を用いて、図 1～図 3 のように、Aframax 級（軽荷）が VLCC（満載）の左舷中央タンク 1/4 の位置に真横 90 度で衝突する場合の弾塑性 FEM シミュレーション解析を実施した。

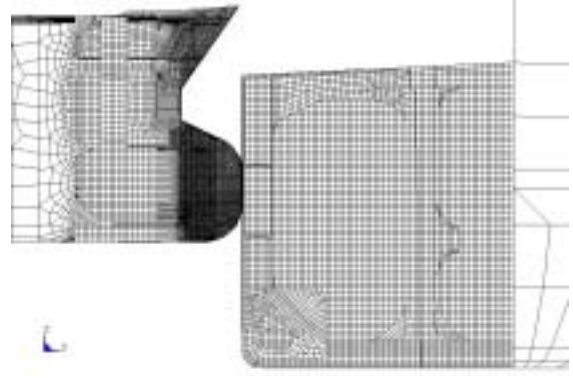


図 3 衝突条件
(側面図、被衝突船一部非表示)



図 4 船首バルブモデルの概観

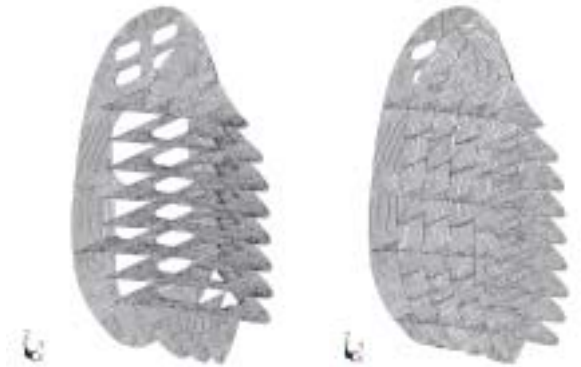


図 5 船首バルブモデルの内部構造
(左：通常型、右：緩衝型試設計)

衝突船として、図 4 及び図 5 のように、形状が等しく船首バルブの構造が異なる 2 種類のモデルを用いた。1 つは一般的に使用されている通常型（Normal）船首構造であり、もう 1 つは、本プロジェクトで試設計した緩衝型（Buffer）船首構造である。通常型モデルはより一般的に普及している縦肋骨方式（Longl.）を採用した。一方、緩衝型モデル

は、衝突方向の部材を低減する目的で、横肋骨方式（Trans.）を採用するとともに、基準及び施工条件を勘案した上で外板板厚が最小になるように肋骨心距を小さくしている（FS=750mm）ことが特長である。

衝突船モデルは、衝突隔壁より前方を、被衝突船モデルは、左舷中央3タンクを弾塑性体でモデル化している。その他の部分は、外板のみを剛体でモデル化した。要素としてシェル又はビーム要素を用い、主要な隅肉溶接部を溶接要素にてモデル化し、溶接部の破断を考慮している。また、材料定数として軟鋼及び高張力鋼を使用し、材料モデルとして、応力歪み関係を折線近似又は接線係数で与え、相当塑性歪みによる要素破断及び歪み速度影響を考慮した。衝突ケースとして、表 1の4ケースを採り上げた。計算の第一ステップとして、被衝突船にとって、厳しい真横 90 度衝突を仮定した。

表 1 解析ケース

Case	Bow Type*	Collision Angle [deg]	V _B [kt]	V _A [kt]
CASE01-N	N	90	20	0
CASE01-B	B	90	20	0
CASE02-N	N	90	12	12
CASE02-B	B	90	12	12

*N：Normal Bow、B：Buffer Bow

両船の重心位置に、付加水質量込みの慣性質量及び慣性モーメントを与えることにより、船体の剛体運動を考慮した。ただし、今時計算では、付加水質量以外の海水の影響は考慮していない。節点数・要素数は、共に約 45 万であり、1 ケースの計算に約 10 日を要した（Intel Xeon 3.0GHz×2CPU、メモリ 1 GB）。

4. 解析結果

解析結果として、t=1.2s における CASE01-N 及び CASE01-B の場合の両船の変形状況をそれぞれ、図 6及び図 7に示す。これより、通常型では、この時点で内殻を突き破ってしまっているのに対して、緩衝型では、船首船底部付近が内殻にちょうど接する程度まで貫入しているが、通常型に比べて相対的に貫

入量が小さいことが明らかである。解析結果を詳細に見た結果、内殻破断のタイミングは、通常型の場合 t=0.95s であり、緩衝型の場合、1.5s であった。

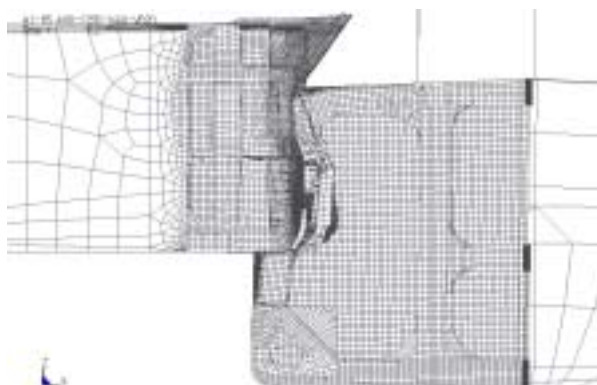


図 6 変形図例（CASE01-N、t=1.2s
図 2S-S'縦断面）

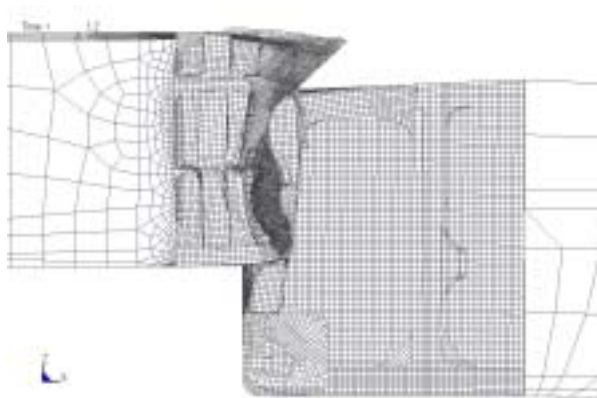


図 7 変形図例（CASE01-B、t=1.2s
図 2S-S'縦断面）

CASE01 について、t=1.0s 時点での CASE01-N 及び CASE01-B の船首部変形図をそれぞれ、図 8及び図 9に示す。これより、緩衝型船首では、船首バルブ部が大きく変形して、FP 付近まで圧潰しているのに対して、通常型船首では、バルブ先端部が変形しているが、緩衝型に比べて相対的な変形量はかなり小さいことが分かる。

次に CASE01 及び CASE02 の場合の、接触反力の履歴をそれぞれ図 10及び図 11に示す。図中、破線は通常型を示しており、実線は緩衝型を示している。また、図中のカーブ上において、外板破断の時刻に（□）を、内殻破断の時刻に（○）を示した。CASE01 及び CASE02 の両方の場合において、緩衝型の方が全体的に高い反力履歴を示しているが、これは、通

常型の場合、主に船首バルブのみで接触しており、船側外板及び内殻を貫通することにより、被衝突船の反力が急激に低下しているためである。

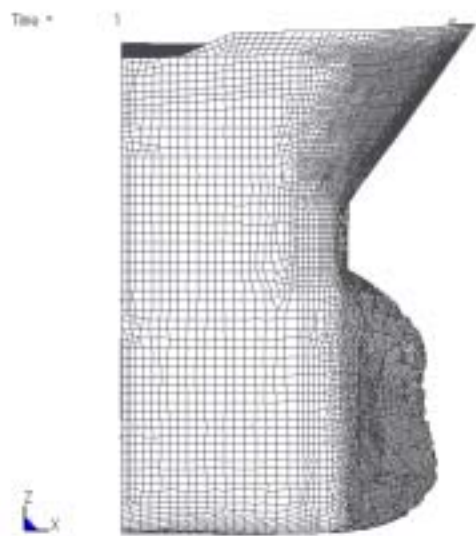


図 8 通常型船首変形図例 (CASE01-N、t=1.0s)

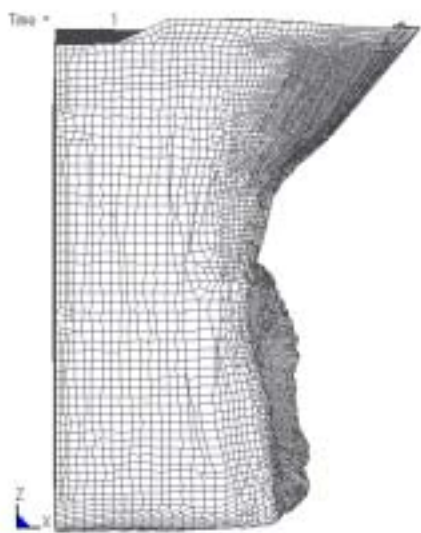


図 9 緩衝型船首変形図例 (CASE01-B、t=1.0s)

緩衝型では、衝突早期にバルブが圧潰した上に、船首バルブのみでなく、ステムを含めた船首全体で接触する（図 9）ことにより、接触面積が増大している。その結果、単位面積あたりの接触力が小さくなって、外板及び内殻の破断が遅れるものと考えられる。また、CASE01 の場合には、前述のとおり、CASE01-N 及び CASE01-B の両ケースにおいて、内殻破断を生じたが、緩衝型の場合、破断のタイミン

グが 1.5 倍に伸びており、緩衝型船首構造の効果を示している。

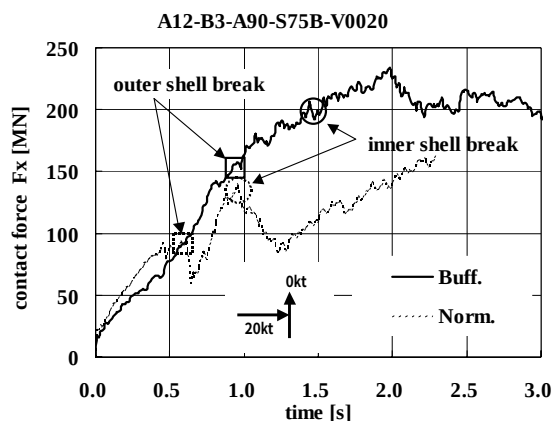


図 10 反力履歴 (CASE01)

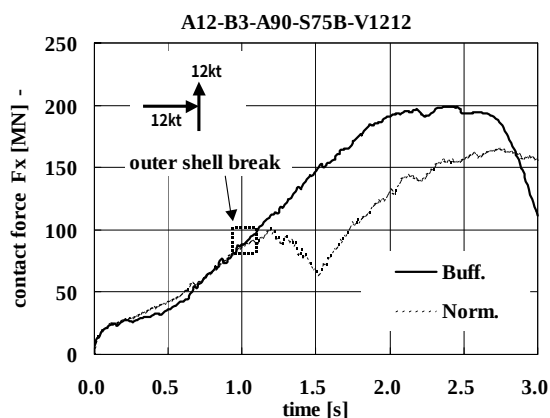
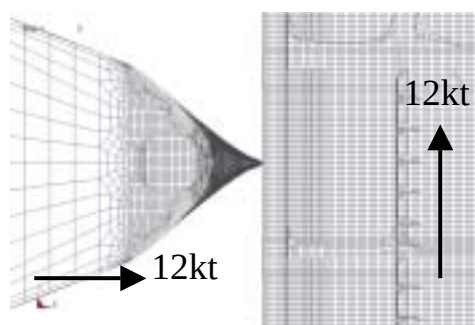


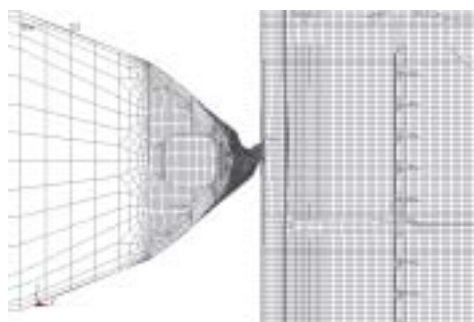
図 11 反力履歴 (CASE02)

一方、被衝突船が前進速度(12kt)を有する CASE02 の場合には、CASE02-N で、t=1.0s 付近で外板破断が生じ、船首が内殻に大きな面外変形を生じさせたが、内殻破断には至らなかった。また、CASE02-B では、外板及び内殻ともに破断には至らなかった。これは、被衝突船の前進速度影響により、船首バルブが大きく左方向に曲げられて、衝突時の接触面積が著しく増大したことによると考えられる。この結果、両船が 12kt で衝突する場合には、通常型船首であっても、計算上、油流出を生ずる恐れはないことが分かった。しかし、被衝突船の前進速度が 12kt 未満で、かつ、衝突船が Aframax ではなく、Suezmax や VLCC のようなより大きな質量を持つ船舶の場合には、内殻破断を生ずる可能性が高いことが考えられるので、今後、追加の計算を行うことによって、

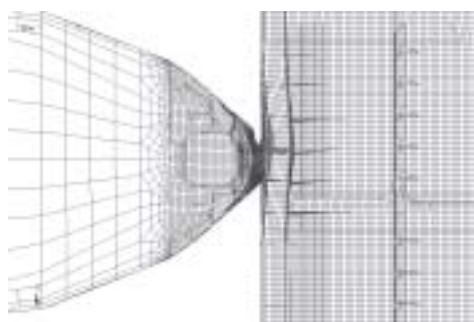
更なる検討が必要である。



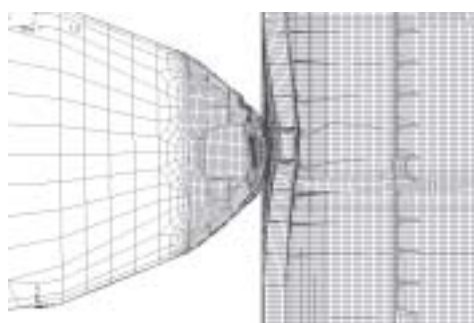
(a) $t=0.0s$



(b) $t=0.5s$



(c) $t=1.0s$



(d) $t=1.5s$

図 12 船首バルブの曲げ崩壊 (CASE02-B、
喫水線付近水平断面、喫水線上非表示)

次に、CASE01 の場合に④式を用いて、限界衝突速度を求めた結果を表 2 に示す。これより、被衝突

船にとって最も厳しいとされる 90 度真横衝突においても、緩衝型にした場合、通常型に比べて速力を 40% 程度大きくしても、VLCC 衝突時に油流出を生じないことが分かった。特に、万一油流出事故が生じた際に被害が甚大となる港内では航行制限が 12kt であるので、緩衝型船首構造を採用すれば、制限速度の最大速力で航行しても油流出を生じないと推定できた。

表 2 限界衝突速度

	unit	Long.	Trans.
time	[s]	0.95	1.50
M_A	[kg]	4.83E+08	4.83E+08
M_B	[kg]	6.38E+07	6.38E+07
$E_{s,cr}$	[MJ]	6.57E+02	1.36E+03
$V_{B,cr}$	m/s	4.83	6.93
	kt	9.66	13.87

次に、エネルギーの吸収効率の面から考察する。CASE01 及び CASE02 において、衝突船の構造破壊で吸収したエネルギー ($E_{s,B}$) を両船の構造破壊で吸収したエネルギー (E_s) で除した比率 ($R_{E,B}$) の時刻変化をそれぞれ、図 13 及び図 14 に示す。比率 $E_{s,B}$ として、ここでは衝突船バルブのみでなく、船首部全体で吸収したエネルギーの比率を示している。しかし、船首バルブの X 方向長さが 6.6m であること及び衝突船速度から換算して、CASE01 の場合で $t=0.6s$ 程度まで、CASE02 の場合で、 $t=1.0s$ 程度までは、衝突船全体のエネルギー吸収は、船首バルブ部でのエネルギー吸収にほぼ等しいと考えられる。

図 13 及び図 14 より、時間と共に比率が低下していることが分かる。これは、崩壊強度の相対関係によるものであり、衝突初期には、船首バルブが多く圧潰し、貫入が進むにつれて、船首部の構造破壊よりも、被衝突船船側内部の構造破壊が多く生じていることを表している。また、 $t=1.0s$ において、CASE01 では、衝突船の吸収エネルギー比率が 50% 以下と低いものに対して、CASE02 では、通常型船首の場合であっても、50% 以上の比率になっていることが分かる。このことより、被衝突船に前進速度がある場合には、前進速度がない場合に比べて衝突船船首バルブで吸収できる性能が高いことが分かる。また、緩

衝型のエネルギー吸収率 ($R_{S,B}$) は、通常型に比べて、10～20%程度上昇していることが分かり、今回用いた試設計モデルを用いた場合、CASE02 の曲げ崩壊モードに比べると CASE01 の軸圧潰モードの方が緩衝型の効果が大きいということが分かる。

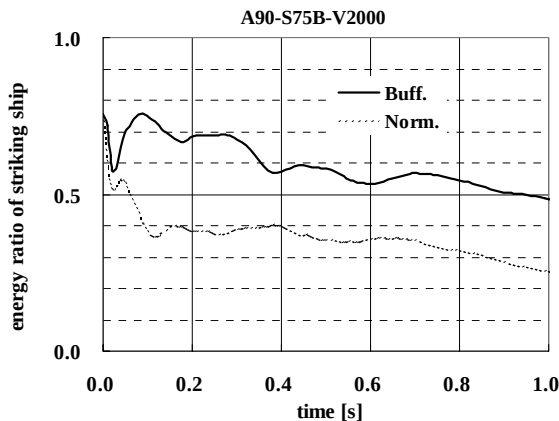


図 13 エネルギー吸収率の比較 ($R_{S,B}$) (CASE01)

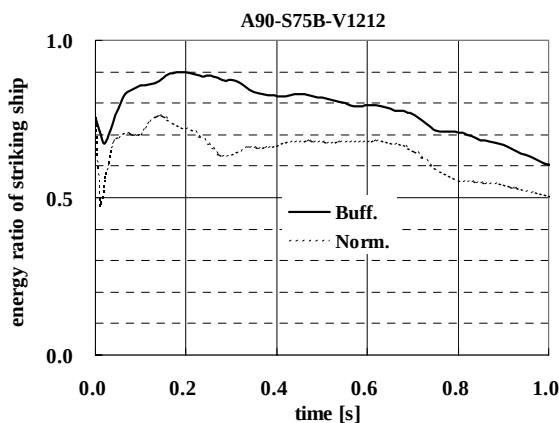


図 14 エネルギー吸収率の比較 ($R_{S,B}$) (CASE02)

5. 結 言

通常型船首又は緩衝型船首を有する 2 種類の Aframax. (軽荷) が VLCC (満載) の左舷中央タンク 1/4 の位置に真横 90 度から衝突する場合の弾塑性 FEM シミュレーション解析を実施し、緩衝型船首構造の効果を検証した結果、次のような結論を得た。

- (1) 緩衝型船首構造を採用した船舶は、被衝突船にとって最も厳しいとされる 90 度真横衝突において、通常型に比べて速力を約 40% 大きくし

ても、相手船に内殻破断を生じさせないことが分かった。特に、万一油流出事故が生じた際に被害が甚大となる港内では、緩衝型船首構造を採用すれば、港内制限最大速力 (12kt) で航行しても内殻破断を生じないことが推定された。

- (2) 被衝突船が前進速度を有する場合には、船首バルブが大きな曲げ崩壊を生ずることによって接触面積が大幅に増大し、局所的な応力集中による外板及び内板の破断が低減する傾向があると考えられる。特に、今回の計算ケースのように被衝突船の前進速力が 12kt と比較的大きい場合には、接触面積増大による影響が大きく、通常型の場合において、外板破断が生ずるが、通常型船首及び緩衝型船首の双方において、内殻破断は生じないことが分かった。
- (3) 緩衝型にした場合、船首バルブ部の構造破壊吸収エネルギー ($E_{S,B}$) が両船の構造破壊吸収エネルギー (E_S) に占める比率 ($R_{S,B}$) が 10～20% 程度上昇する。
- (4) 緩衝型船首構造を採用することにより、衝突による油流出低減に一定の効果があることが確認できた。

6. おわりに

本研究は、平成 13 年度から 4 年計画で、国土交通省からの受託研究プロジェクト「衝突時の油流出防止のための緩衝型船首構造基準に関する研究」の一環として行われたものである。東京大学の鈴木克之委員長をはじめ、ご意見・ご助言を頂いた緩衝型船首構造検討委員会委員の皆様へ深謝致します。

参考文献

- ¹⁾ 新形式タンカー構造の研究開発報告書、造船業基盤整備事業協会 (1996)
- ²⁾ 山田、遠藤ほか、バルバス・バウの圧潰特性、第 2 回海上技術安全研究所講演会講演集、pp.157-162
- ³⁾ 山田、遠藤ほか、斜め衝突を想定した船首構造圧潰実験、第 3 回海上技術安全研究所講演会講演集、pp.37-40