樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究—V. —船首の侵入位置と侵入角による反力—侵入量特性の変化—

三田重雄*・庄司邦昭*・野々村千里**・山下勝久***

A Study on the Shock Absorption Properties of Resin Elastic Body—V.

—About the Change of the Shock Absorption Characteristic by the Difference of Penetration Direction of the Ship—

Shigeo MITA, Kuniaki SHOJI,
Chisato NONOMURA and Katsuhisa YAMASHITA

Abstract

During the last few years, we are doing the research that checks the characteristics of the protective device by the model experiment and numerical analysis. In the previous paper, we discussed characteristic of the time that the ship penetrated head-on at the center of protective device. These results almost agree with the numerical analyses and experiments. In the present paper, we report about the research result in the time that the ship penetrated with the protective device and change the direction, in other words, penetration position and penetration angle.

The following results are obtained.

- (1) When the penetration position approaches the edge, the reaction force decreases and the slope of a reaction force-bow penetration curve becomes gradual. Also, the reaction force increases and the slope of a reaction force-bow penetration curve becomes steep, when the width of the protective device became enlarged.
- (2) The reaction force-bow penetration curve in the fan shape protective device becomes the curve that has 2 strange tune points when the side of ship penetrates.
- (3) Also in either condition these results almost agree with the numerical analyses and experiments.

1. はじめに

樹脂弾性体でできた緩衝工に船舶が衝突した場合の緩衝性能を把握するため、著者らは全体が均質な弾性体である軟質ポリウレタンフォームと、弾性樹脂の一種である熱可塑性エラストマでできたハニカム構造のペルプレン緩衝工を供試体とし、模型実験と有限要素法による数値解析により研究を進めている。これまでは楔形の船首が緩衝工の中央に正面から侵入した場合について供試体の奥行き寸法や船首

の寸法を変え、静的に侵入させた場合と衝突により水平方向に速い速度で動的に侵入させた場合について検討してきた。この結果、静的な船首侵入に関しては非線形な材料特性を有する軟質ポリウレタンフォームとペルプレン緩衝工について数値解析でも反力—侵入量特性を推定することが可能となり、供試体寸法や船首寸法の影響がわかった⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。また、船首を静的に侵入させた場合と衝突により動的に侵入させた場合とで、反力—侵入量特性の変化に一定の関係のあることも模型実験によってつかめた⁽⁴⁾。

* 正会員 東京商船大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

** 正会員 東洋紡績株式会社 (〒520-0292 滋賀県大津市堅田2-1-1)

*** 非会員 東洋紡績株式会社 (〒520-0292 滋賀県大津市堅田2-1-1)

しかしながら船舶が緩衝工の中央に直進して侵入する場合はまれであると考えられ、針路が変わって端部に侵入する場合や斜めに侵入する等種々の侵入状態についてどのような影響があるか検討しておくことは緩衝工の設計上必要である。このようなことから今回は船首の侵入位置と侵入角が変化したときの特性の変化について、軟質ポリウレタンフォームを供試体として模型実験と数値解析により調査した。また、従来の直方体だけでなく橋脚のコーナー部に適用できる扇形の緩衝工についても検討した。これらの結果について若干の知見が得られたので以下に報告する。

2. 研究の方法

2.1 模型実験

これまでの研究においては、ペルプレックス緩衝工の5分の1模型⁽⁵⁾を想定して供試体の基本形状を幅0.6m×厚み0.2m×奥行き0.2mの直方体とし、245 kNの大型万能試験機を使用して模型実験を行ってきた。しかしこの寸法では侵入位置や侵入角を変化させる場合に船首と供試体の配置を広い範囲で換えて設置する必要があり、装置類がさらに大型化してしまうため不向きである。このため今回の模型実験では船首および供試体の大きさを従来の2分の1の大きさとし、衝突実験装置兼用機として製作した取扱いの容易な小型試験機を使用した。写真1に小型試験機の外観を示すが、供試体への船首押し付けはインバータモータ駆動のモータシリンダ（推力0.4 kN）で行い、反力の検出は容量1kNのロードセル2個を用いた。これらは交換可能であり、例えば駆動部に高速のエアシリンダを使うとか、容量の大きいロードセルに換える等が可能である。また、駆動部を取り除くと慣性を利用して低摩擦で船首を移動さ

せることができ、衝突実験装置としても使用可能である。

使用した船首模型の形状は開き角35°の楔形で、先端半径の大きさを従来の2分の1の5mmとし、供試体の基本形状も幅0.3m×厚み0.1m×奥行き0.1mの直方体とした。本研究においては船首の侵入位置と侵入角の緩衝性能への影響を幅広く検討するため、図1に示すように、供試体の幅を0.1～0.6mとして侵入位置を変化させる、供試体幅は基本の0.3mとして侵入角と侵入位置を変化させる、供試体を取り付け面半径0.2m×奥行き0.1m×開き角90°の扇形として侵入位置を変化させる、3種類の模型実験を行って反力-侵入量特性を求めた。また、扇形供試体の実験については船首侵入だけでなく船側で押し付けられる状態についても検討した。供試体の材料は軟質ポリウレタンフォームで、従来と同じ見掛け密度45kg/m³のもので、船首の押し付け速度も従来と同じ20mm/minとした。なお、本論においてはこれ以降長さ寸法を“mm”単位に統一して表示することと

図1 実験状態と供試体の形状

写真1 小型試験機の外観

する。

2.2 数値解析

数値解析は汎用有限要素法ソフトウェア (MARC K7) により、供試体の幅寸法と船首侵入位置、侵入角等の状態を模型実験よりも範囲を広げて調査した。数値解析のモデルは船首部分を完全剛体、緩衝工部分を弾性体と仮定することで、緩衝工部分の変形挙動のみを考慮した。弾性体の材料の定義方法は大変形を伴う場合において、一般的に弾性体を取扱う場合の構成則であった Mooney-Rivlin 構成則や Ogden 構成則に代表される非線形弾性構成則⁽⁶⁾が利用されているが、船首進入時の数値解析においては緩衝工の空隙の変化があるため、体積変化を許容するフォームモデルを適用して実際の変形挙動や反力の予測が精度良く再現できるように考慮した。また、形状のモデル化において、従来は船首が緩衝工の中央に正面から侵入した場合を対象としており、解析には対称性を考慮して1/2モデルを使い、船首先端部と供試体中央の接触部との変位を拘束した境界条件を使用していた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし、今回は偏荷重のため従来のモデルが使えないので解析モデルは全体モデルとし、船首と供試体との変位は拘束せずに摩擦を考慮 (摩擦係数 $\mu=0.2$) した境界条件を使って数値解析を行った。また、要素分割にも注意を払い、船首部分のモデルでは先端のコーナー部の外周を角度 5° 毎の直線に近似して定義し、供試体のモデルでは接触部の形状による誤差が減少するように接触部付近において要素の幅を細分化して定義した。なお、幅300mm以下の直方体および扇形供試体では供試体全体の変形を精度良く再現するため、モデル全体を均等に分割した。

3. 結果および考察

3.1 直方体形供試体の供試体幅と船首侵入位置による反力-侵入量特性の変化

実験装置ならびに供試体の大きさを従来と変更したので、船首侵入実験に先立ち平板を使つての100mm角供試体の全面圧縮実験を行って圧縮特性を求めた。その結果を図2に、文献(1)に示す大型試験機による200mm角供試体の実験値を併記して示す。圧縮速度は両者とも同じで、20mm/minである。両者の圧縮特性は殆ど一致しており、本試験機の試験精度は良好で、供試体の大きさについても従来と相似関係にあることが確認できた。

次に、図3～9に供試体の幅を100～600mm(数値解析では900mmまで)とし、船首の侵入位置を25mmから供試体中央まで変化させて正面から侵入させた

図2 圧縮特性の従来の実験値との比較

図3 船首侵入位置による反力の変化 (1)

図4 船首侵入位置による反力の変化 (2)

図5 船首侵入位置による反力の変化 (3)

ときの反力-侵入量の実験値および計算値、ならびに変形図、ひずみ分布を示す。

図3、4、5はそれぞれ供試体幅100mmと200mm、300mm、600mmでの反力-侵入量特性の実験値(線で表示)と計算値(記号で表示)を示す。図によれば、いずれも侵入量60mm位まではほぼ直線的な侵入量に比例した反力の増加で、その後は増加割合を増す傾向を示しており、実験値と計算値とは侵入量60mm位までは良く一致している。供試体の幅を同一にした場合、侵入位置が端部に近づくとも反力が減少して勾配が小さくなり、エネルギー吸収量も減少することがわかる。また、大雑把に見て同じ侵入位置でも供試体の幅が広いほど勾配が大きくなっていることがわかる。なお侵入位置25mmの数値解析では、原因は明らかではないが供試体幅100mm以外の侵入量の大きいところで計算不能となった。図6は船首が端部に80mm侵入したときの供試体の変形図を、極端な例であるが供試体幅100mm、侵入位置25mmでの模型実験と数値解析とを比較して示す。両者は図中矢印で示す船首と供試体との接触位置や全体的な変形状態等概ね一致している。

図6 直方体での端部侵入時の変形図

以上のように実験値と計算値とはほぼ一致することがわかったので、図7に供試体幅を100~900mmに変化させ、侵入位置を端部から25、50mm、および供試体中央としたときの、数値解析で求めた侵入量20、40、60、80mmにおける反力の変化を示す。図によれば、反力と供試体幅の関係はわずかに右上がり、すなわち幅が広がると反力が増加してエネルギー吸収量も増加する傾向を示し、侵入位置25mmと50mmとでは供試体幅400mm以上ではほぼ平坦になり、侵入位置が供試体中央の場合では同様に供試体幅600mm以上ではほぼ平坦になっている。このことは今回対象とした奥行き寸法100mmの供試体では、供試体の幅を400mm以上に広くすれば船首の端部侵入による吸収エネルギーの減少を最小限に抑えることができ、さらに広げて600mm以上にすれば中央部への侵入も含めエネルギー吸収量をほぼ最大限にすることが

図7 供試体幅の反力におよぼす影響

できると考えられる。このような供試体幅の値は奥行き寸法と関連するものと思われるが、今回はそこまで解明が進んでいないので言及は避け、数値解析法の改善も含め今後の課題とする。図8は幅300、400、600mmの供試体について船首が50mm侵入したときの数値解析で求めたひずみ分布で、端部(端から50mm)侵入時と中央部侵入時について示す。図下の“300mm-50mm-X”等は先頭の300mmが供試体の幅を、続いて侵入位置、ひずみの方向(X:供試体の奥行き方向、Y:供試体の幅方向)を表し、図中の数値は各方向のひずみ成分で、“+”記号が引っ張りひずみ、“-”記号が圧縮ひずみを示す。なお、線の間隔はX方向が0.1、Y方向が0.025で表示してある。供試体の幅が変化した場合に、ひずみ分布状態には次のような変化が見られる。端部侵入では図中の矢印で示すX方向のひずみ0の境界が、幅300mmで中央を越えて侵入位置の反対側にあるのに対し、400mmではほぼ中央になり、供試体の幅が広がるにしたがってX方向のひずみ0の範囲も広がって相対的に侵入位置側に移る。また、Y方向に関しても同様の傾向を示す。一方、中央部に侵入した場合X、Y方向とも侵入位置に対して対称なひずみ分布を示し、600mmでひずみ0の範囲が幅方向の半分程度を占めるようになり、Y方向についても300、400mmで見られる船首両脇のわずかな引っ張りひずみの範囲が無くなって600mmでは0の境界線が底面に移動している。これらひずみの分布状態は、図7で述べた供試体幅による反力変化の特徴の裏づけとなるものと思われる。図9は実験値から求めた吸収エネルギーと侵入量の関係を、幅の異なるいくつかの供試体について侵入位置を変えて示した。図には比較のために100mm角供試体の平板による全面圧縮時の値も示した。吸収エネルギーは侵入量に対して右上がりの円弧状の滑らかな曲線を示しており、侵入量30mm位までは平板圧縮の値に対してい

図8 船首侵入位置によるひずみ分布の変化

図9 船首侵入位置による吸収エネルギーの変化

ずれも50%程度であるが、侵入量が増加して70mmに達すると65～87%にまで達しており、前述のとおり供試体の幅が大きく侵入位置が中央に近いほどエネルギー吸収量も大きくなることがわかる。

図10は厚み100mmの供試体に対し、船首の当たる範囲を厚み100mmの全範囲と27mmずらして73mmが当たるようにした場合の反力－侵入量特性を示す。当たる範囲を供試体の厚みよりも小さくした場合、供試体の変形は船首の直接当たっていない27mmの部分にもおよび、反力は100mm全範囲に均等に侵入したときよりも10%程度小さいが、厚み73mmのものに均等に侵入した場合（全範囲侵入時反力の73%）よりも20%以上大きくなった。緩衝工の高さは航行船舶の深さや潮汐・波による水面変動等を元にして決められる⁽⁹⁾が、高さを多少大きめにし

図10 厚み方向の船首侵入範囲による反力の変化

て直接接触しない範囲を設けるとエネルギー吸収量の増加が見込める。

3.2 侵入角と侵入位置による反力－侵入量特性の変化

図11～13に供試体幅を基本の300mmとして、侵入角および侵入位置を変化させたときの反力－侵入量特性を示す。なお、図中の反力、侵入量は奥行き方向に対する値ではなく侵入方向の反力、変位量で示してある。したがって、奥行き方向の変位量（＝侵入量×sin（侵入角））は侵入角が小さいほど図中の侵入量よりも小さくなる。また、数値解析を試みたが、正面から侵入したときと同様に侵入量の大きいところで計算不能となったケースが多くあった。図11は供試体の中央（侵入位置150mm）に侵入角45～90°で侵入したときの実験値（線で表示）と計算値（記号

図11 中央侵入時の侵入角による反力の変化

図12 侵入角70°での船首侵入位置による反力の変化

で表示)を示す。いずれも侵入量60~70mm位までは正面から侵入したときと同様にほぼ直線的な侵入量に比例した反力の増加を示し、その後は増加割合を増す。このような反力の全体的な変化は実験値と計算値とでほぼ一致している。また、侵入角による反力の変化は顕著ではないが、実験値と計算値とで異なる傾向を示している。すなわち、侵入角が小さくなった場合に実験値では侵入量に対する反力の増加割合が増えて勾配が大きくなっているのに対し、計算値ではごくわずかなではあるが逆に減少している。図12は侵入角70°で、侵入位置を変えたときの結果を示す。侵入位置によって反力の大きさに多少の違いが現れているが、いずれも侵入量60~70mm位まではほぼ直線的な侵入量に比例した反力の増加を示し、その後は増加割合を増している。計算値は局部的な変動を生じているが全体的な傾向は実験値と一致している。侵入位置の反力におよぼす影響はわずかに認められ、今回対象とした範囲では中央に侵入したときよりも端部に侵入した方が反力は減少し、端部を供試体の中央に向かって斜めに侵入した場合が最も小さくなる傾向を示している。図13は図12に示した侵入角70°で侵入位置を変化させたときの実

図13 斜め侵入時反力の垂直・水平分力の比較

験値について、二分力ロードセルで計測した垂直分力（太線で表示：奥行き方向に作用する分力）と水平分力（記号付細線で表示：幅方向に作用する分力）を示す。いずれも垂直分力が大半を占めており、水平分力は垂直分力の23~50%程度になっている。また、垂直分力の大きさは図12に示した各侵入位置での反力のsin成分にほぼ等しく、水平成分では侵入位置150mmだけが反力のcos成分にほぼ等しく、他は前後している。これらのことから船首が緩衝工に斜めに侵入したときでも、端部に侵入して十分に侵入しないで緩衝工から外れるような場合を除いては正面から侵入した場合と同程度の緩衝効果が得られるものと思われるが、水平方向の力が作用するので緩衝工設置に当たってはこの力も考慮する必要がある。

3.3 扇形供試体の反力-侵入量特性

図14~16に橋脚のコーナー部に設置されるような取付け面半径200mm、奥行き100mm、開き角90°の扇形供試体に、船首または船側が侵入位置を端部から15~45°に変えて直角に侵入したときの反力-侵入量特性の実験値および計算値、ならびに変形図を示す。図14は船首が侵入位置を変えて侵入した場合の

図14 扇形での船首侵入位置による反力の変化

結果で、反力—侵入量特性の実験値（線で表示）と計算値（記号で表示）を示す。いずれも直方体に船首が直角に侵入したときと同様に侵入量60mm位まではほぼ直線的な侵入量に比例した反力の増加を示し、その後は増加割合を増している。また、実験値と計算値とは侵入量60mm位まではほぼ一致しており、いずれも侵入位置が端部に近いほどわずかながら反力が減少している。図15は図中に示すように扇形供試体に船首の代わりに平板を当て、船側が侵入位置を変えて侵入した状態を模擬したときの反力—侵入量特性で、侵入位置45°の実験値（線で表示）と侵入位置15、30、45°の計算値（記号で表示）を示す。なお試験機的能力から実験では供試体の厚みを通常の半分の50mmとし、反力は計測値を2倍した値で示した。侵入位置45°では実験値、計算値とも侵入量30mmと60mm付近で変曲点を持つ右上がりの3次曲線状の変化を示しており、大きさも侵入量40mm位まで良く一致している。30°の計算値も45°と同様の傾向を示しているが、反力はわずかに減少し、侵入途中で船側が供試体から外れるため下側の変曲

図15 扇形での船側侵入位置による反力の変化

点も多少下がっている。また、15°では変曲点が侵入量10mm付近で現れ、反力はこれ以降さらに減少して45°よりも25%程度下がった値になっている。図16は扇形供試体に船首が端部から15°の位置に正面から80mm侵入したときの変形図を模型実験と数値解析とを比較して示す。図6に示した直方体の供試体に侵入したときと同じように模型実験と数値解析とで概ね一致している。

4. まとめ

船首が侵入位置と侵入角を変え、樹脂緩衝工を想定した軟質ポリウレタンフォーム供試体へ静的に侵入したときの反力—侵入量特性を模型実験と数値解析により調査した。また供試体の形状は通常の直方体と橋脚のコーナー部に設置されるような扇形の2種類で、後者については船の側面が当たるような船側侵入についても検討した。この結果、次のようなことがわかった。

- (1) 直方体の供試体に船首が侵入した場合、反力は侵入位置と侵入角によらずひずみ0.6（侵入量60mm）位まで侵入量に比例した直線的な増加を示すが、端部に近づくほど反力が減少して勾配が小さくなり、エネルギー吸収量が減少する。また、侵入位置を同一にした場合は供試体の幅が大きいほど反力の侵入量に対する勾配は大きくなってエネルギー吸収量が増加する。今回対象とした奥行き寸法100mmの直方体形供試体では600mmで中央部への侵入も含めほぼ最大限になった。
- (2) 船首が斜めに侵入した場合、侵入角による反力の変化は顕著ではないが、幅方向に作用する水平分力が生じる。
- (3) 扇形供試体に船首が直角に侵入した場合は、反力は直方体に侵入したときと同様に侵入量に比例

模型実験

数値解析

図16 扇形での船首侵入時の変形図

した直線的な増加を示す。一方、船側が侵入する状態では侵入位置 2 ヶ所で変曲点を持つ右上がりの 3 次曲線状の反力変化を示す。また、いずれの場合も端部に侵入したときは中央に侵入したときよりも反力は減少する。

また、模型実験と数値解析の結果は全てのケースではほぼ一致し、数値解析を有効に利用することができた。しかしながら数値解析では途中で計算のなくなるケースもあり、船首と供試体との接触問題と考えられるが今後更なる実用化に向けて改善が必要である。今回数値解析により端部侵入に対する供試体幅の影響について細かく検討できたが、今後は、奥行き寸法や船首寸法の影響等数値解析を有効に利用してさらに検討を進めたい。

以上のように緩衝工が直方体でも扇形でも船首や船側が端部に侵入すると、中央部分に侵入した場合よりも反力が減少しエネルギー吸収量が減少することが明らかになった。このようなことから緩衝工の設置に当たっては、①できるだけ隣り合うユニットを連結して幅を広くし、端部を少なくする。②やむを得ず連結できない場合には端部を橋脚への衝突機会の低い側に設定する。等、設置上の考慮が必要と思われる。

本研究においては高い反発弾性を有する樹脂緩衝工の設計資料を得ることを目的として、樹脂弾性体に船首が静的に侵入する模型実験と数値解析ならびに衝突により動的に侵入する模型実験とを行って緩衝性能を調査してきた。この結果、静的に侵入した状態については本報で一般的な侵入状態についての特性を明らかにすることができ、また、衝突時の特性についても静的な特性との関係を文献(4)で示すことができた。このことから、研究の目的をほぼ達成できたので本研究は終了とし、今後の応用研究については別途報告の機会をいただきたい。

参 考 文 献

- (1) 三田重雄・庄司邦昭・野々村千里：樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究－I.－軟質ポリウレタンフォームの緩衝性能－，日本航海学会論文集第99号，pp125－131 (1998)。
- (2) 三田重雄・庄司邦昭・野々村千里・船城健一：樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究－II.－船首の寸法による反力－侵入量特性の変化－，日本航海学会論文集第100号，pp145－151 (1999)。
- (3) 三田重雄・庄司邦昭・野々村千里・船城健一：樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究－III.－ペルプレン緩衝工の反力－侵入量特性の推定－，日本航海学会論文集第101号，pp211－218 (1999)。
- (4) 三田重雄・庄司邦昭・野々村千里・船城健一：樹脂弾性体の緩衝性能に関する研究－IV.－ペルプレン緩衝工の船首衝突時の特性－，日本航海学会論文集第102号，pp145－151 (2000)。
- (5) 庄司邦昭：新素材を用いた緩衝工について，日本造船学会誌第810号，pp.10－13 (1996)。
- (6) 久田・野口：非線形有限要素法の基礎と応用，丸善 (1995)。
- (7) 渡辺洋一・小林卓哉・船城健一・野々村千里・三田重雄・庄司邦昭：ポリウレタンフォーム材の圧縮変形挙動(1)，プラスチック成型加工学会成形加工シンポジア'98講演論文集，pp.331－332 (1998)。
- (8) 野々村千里・船城健一・小林卓哉・渡辺洋一・庄司邦昭・三田重雄：熱可塑性エラストマー緩衝工の船舶の衝突に対する圧縮変形挙動，日本機械学会第12回計算力学講演会講演論文集，pp.353－354 (1999)。
- (9) 本州四国連絡橋公団：複合材型緩衝工の設計要領 (案) (1981)。

質 疑 応 答

間島隆博(船舶技術研究所)：船首の侵入位置、角を変化させたということで、より一般的な調査、研究であり、貴重な御講演であると思います。より実際的な問題になると思いますが、船首の破壊等について何か御検討なされていればお教えください。

三田重雄：ご質問ありがとうございます。船首の破壊等については実験での検討はまだしていません。緩衝工側の計算がうまくできるようになってきたので、今後は船首ならびに橋脚を含めた強度についても検討する方向で進めています。数値解析についても検討したいと考えています。