樹脂緩衝工の緩衝特性に関する研究

正員 三 田 重 雄* 正員 庄 司 邦 昭*
 正員 野 々 村 千 里** 山 下 勝 久**
 山 田 敏 郎***

A Study on the Shock Absorption Characteristic of Resin Protective Device

by Shigeo Mita, *Member* Kuniaki Shoji, *Member*
 Chisato Nonomura, *Member* Katsuhisa Yamashita,
 Toshiro Yamada

Summary

The protective device that was made with the elastic resin is excellent in restoration. Therefore when the collision ship is removed, the form almost returns to an original form. Authors are performing the research that checks the characteristic of the protective device by the model experiment and numerical analysis. In this research urethane foam and pelprene protective device models are used. In the present paper, the authors report the effect of the measure of the protective device and penetration direction in the case that the ship penetrated into protective device statically.

The following results are obtained.

- (1) When ship penetrated the protective device that was made of elastic resin, reaction force-bow penetration curve shows that the reaction force increases linearly with increase of bow penetration to a certain distance. Then, reaction force rapidly increases with little increase in the penetration distance.
- (2) When location of the penetration approaches the end of the protective device, the slope of the reaction force-bow penetration curve becomes moderate. In this case, the slope of the curve at the same penetration distance increases with the increase of the width of the protective device, although this increase saturate to a certain value when the width/depth ratio exceeds six.
- (3) These results almost agree with the numerical analysis and model experiment.

1. 緒 言

船舶の航行する水域に橋脚が設置され、船舶が橋脚に衝突する事故が発生している。橋梁を守るには橋脚を強固に建設すればよいが、逆に船舶側の被害は大きくな

ってしまう。緩衝工はこの様な船舶の衝突事故に対して橋脚への直接的な衝突を避け、双方の被害を低減するために橋脚の周りに取り付ける防護施設の一つである。日本国内を例にとると、1997年に開通した東京湾横断道路、1998年に全ルート開通した本州四国連絡橋などでは、コンクリートドルフィンや鋼製緩衝工、ゴム製空気フェンダー等の防護施設が取り付けられている。著者らは、ゴムとプラスチックの中間的な特性を持ち、弾性に優れた新素材の熱可塑性ポリエステルエラストマー(商品名:ペルブレン)を材料とした、より合理的な防護施設であるペルブレン緩衝工を実用化するために研究を行

* 東京商船大学

** 東洋紡績(株)

*** 金沢大学

原稿受理 平成13年1月10日

春季講演会において講演 平成13年5月17, 18日

ってきた。この樹脂緩衝工は、ハニカム状に成形した部材を組み立てて作られていて復元性に優れ、衝突時の衝撃を緩和できるとともに、形状も除荷後ほぼ元の状態に戻ることが模型実験により確認されている²⁾³⁾⁴⁾。

本研究においてはペルブレン緩衝工のような弾性を有する樹脂材料でできた樹脂緩衝工設計のための資料を得ることを目的とし、供試模型にクッション材として広く使われている軟質ポリウレタンフォーム(以下“ウレタンフォーム”と呼ぶ)とペルブレン緩衝工を用い、圧縮試験機を使って楔形の船首を緩衝工の中央や端部に静的に侵入させる模型実験と、有限要素法の数値解析とを行って緩衝特性について検討した。この結果、船首と緩衝工の寸法や侵入位置等を変化させたときの船首侵入量と反力の関係がつかめるとともに数値解析での推定が可能となった。

2. 研究の方法

2.1 供試模型

使用したウレタンフォームは微細(数百 μ)セル構造の発泡体で、市販のウレタンフォームとしては比較的高い見掛け密度 45kg/m^3 のエーテル系・高密度タイプである。供試模型の形状は、幅(W)×高さ(H)×奥行き(D)= $600\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、 400mm と、 300 (数値解析は $100 \sim 2000$) $\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の直方体であり、これとコーナー部用として内側半径 200mm 、外側半径 300mm (奥行き 100mm) × 高さ 100mm で、開き角 90 度の扇形も供した。一方、ペルブレン緩衝工はFig.1に示す実物の1/5の縮尺模型部材(幅×高さ×奥行き= $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 50\text{mm}$)を組み立てたもので、部材は幅 40mm × 奥行き 50mm (肉厚 2mm) のハニカム形のセル構造である。材料はペルブレンP-90BおよびP-150Bと呼ばれるもので、曲げ弾性率がそれぞれ $1.62 \times 10^{-4}\text{kN/m}^2$ と $2.89 \times 10^{-4}\text{kN/m}^2$ である。供試模型は同一材料の部材を幅方向3列に組んで幅 600mm とし、奥行き方向にP-90BとP-150Bをそれぞれ単体で4段(奥行き 200mm)または8段(奥行き 400mm)組んだものと、船舶の侵入側(外周部)に剛性の低いP-90Bを4段と橋脚側に剛性の高いP-150Bを4段複合させたもの(奥行き 400mm)で、高さ方向は部材の高さと等しい 200mm とした。また、圧縮試験用供試模型はウレタンフォーム、ペルブレン緩衝工とも幅×高さ×奥行き= $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の立方体とした。

これに対して船体側は緩衝工の全面に均一に接触する平板(船側部分)と、高さ方向に均一に接触する楔形

の直立船首で、船首は先端半径(r)と開き角(2θ)を幾通りか変えた。実験用の船首模型は緩衝工に対して十分な剛性が得られるような厚さ 4.5mm 以上の鋼板製で、開き角を 0 、 35 、 65 、 120 度の4種類とし、先端半径を開き角 35 度で 5 、 10 、 50mm の3種類、他は 10mm として緩衝工との組み合わせを特定して実験に供した。

Fig.1 Product piece of pelprene protective device

2.2 模型実験

実験は圧縮試験機(アムスラー万能試験機)を使用し、送り側に船首または平板を下向きに取り付け、緩衝工は固定ベース上に取り付け治具を用いて設置し、この状態で 20mm/min の送り速度で緩衝工奥行き 75% 程度まで侵入させた(以下“船首実験”および“船側実験”と呼ぶ)。実験の概略をFig.2に示す。船首または平板が緩衝工に接触し始めた瞬間の状態を侵入量(δ)と作用する反力(F)の双方を 0 として侵入量と反力を計測し、緩衝工の変形状態も観測した。

Fig.2 Experimental model

実験に先立ち、素材の特性を調べるために幅×高さ×奥行き= $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の供試模型を使い、平板で均一に圧縮する圧縮試験を行った。

船首実験は船首が緩衝工の中央部に真っ直ぐ侵入する状態を基準に、緩衝工と船首の寸法を変えて影響を調べた。これに対し、一般的な衝突である船首が緩衝工の中心からずれて侵入する状態や斜めに侵入する状態等については、船首の侵入位置 (Wp) と侵入角 (χ) を変えて影響を調べた。この際、船首側は鉛直方向に定速度で下降させるだけとし、侵入位置の設定は緩衝工側を幅方向にずらして行い、侵入角の設定は緩衝工側を 10、20、30 度の傾斜台の上に設置して行った。供試模型の組み合わせは、前者の実験では幅×高さ×奥行き=600mm×200mm×200mm、400mm のウレタンフォームおよびペルブレン緩衝工と先端半径 10mm (開き角: 0、35、65、120 度) と 50mm (開き角: 35 度) の船首で、後者の実験では幅×高さ×奥行き=300mm×100mm×100mm のウレタンフォームと先端半径 5mm (開き角: 35 度) の船首とした。一方、橋脚のコーナー部に設置された緩衝工に船側が侵入する船側実験では、開き角 90 度の扇形のウレタンフォームを半円筒の治具に取り付け、緩衝工の中央部に侵入する状態について実験を行った。

計測した侵入量と反力の関係は生データのまま反力-侵入量曲線で特性を比較するか、次式により応力、ひずみ等に換算して比較することとした。

$$\text{ひずみ} = \text{侵入量} (\delta) / \text{奥行き} (D)$$

$$\text{応力} = \text{反力} (F) / \text{緩衝工の断面積} (D \times H)$$

$$\text{圧縮応力} = \text{反力} (F) / \text{緩衝工の平面積} (W \times H)$$

2.3 数値解析

数値解析は汎用有限要素法ソフトウェア (MARC) により、緩衝工および船首の寸法と侵入位置、侵入角等の条件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と橋脚部分を完全剛体、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り扱う場合の構成則である Mooney-Rivlin 構成則や Ogden 構成則に代表される非線形弾性構成則⁹⁾が利用されているが、船首侵入時の数値解析においてはウレタンフォームとペルブレン緩衝工とで空隙の大きさに大きな違いがあるものの、いずれもセル構造で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¹⁰⁾を適用し、実際の変形挙動や反力の予測が精度よく再現できるように考慮した。

形状のモデル化は四辺形平面ひずみ要素を使用し、船首が緩衝工の中央に正面から侵入する状態には対称性を考慮して 1/2 モデルを使い、対称面に緩衝工の幅方向における変位を拘束した境界条件を使用した。一方、船首が緩衝工の中心からずれて侵入する状態や斜めに侵

入する状態等一般的な侵入状態については偏荷重のため全体モデルを使用した。なお、侵入時における船首と緩衝工との関係において、両者間の接触を考慮して、摩擦 (摩擦係数 $\mu=0.2$) を仮定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 度毎の直線に近似して定義し、緩衝工部分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た。また、幅の比較的狭い緩衝工と扇形の緩衝工では全体の変形を精度良く再現するためにモデル全体を均等に分割した。

3. 結果および考察

3.1 圧縮特性

ウレタンフォームとペルブレン緩衝工の応力-ひずみ曲線を Fig.3 に示す。図中、実験結果は一点鎖線と実線で示し、数値解析で用いた値は一点鎖線と点線で示した。ウレタンフォームの圧縮特性は素材の厚み方向が緩衝工の高さ方向となるように圧縮したときの特性であり、実験値と数値解析で用いた値とは同じで、ひずみ 0.1 付近まで緩やかな応力の増加を示した後ひずみ 0.65 付近まではほぼ平坦に推移し、以降は急激な増加を示している。これに対してペルブレン緩衝工の材料 P-90B と P-150B の実験値はひずみ 0.05 付近まで直線的な応力の増加を示して極大値を呈し、ほぼ平坦に推移した後 0.65 以降で急激な増加を示している。数値解析で用いた値は 0.05 付近の極大値を加味すると数値解析が実行できなくなるため、0.05 付近の極大値を持たない近似値とした。

Fig.3 Compression stress-strain curves of the urethane foam and pelprene protective device

このようにウレタンフォームとペルブレン緩衝工は圧縮中期の広いひずみ範囲においてセルの座屈による応力の増加が極めて少ない領域を有する圧縮特性であり、エネルギー吸収体として有用である。

3.2 中央侵入時の特性

緩衝工に侵入する船首の寸法影響を調べるために、船首をウレタンフォームの中央に侵入させたときの模型実験と数値解析の結果を Fig.4 に示す。(a)は奥行き D が 200mm の供試模型に、船首半径 $r=10\text{mm}$ で開き角 $2\theta=0, 35, 65, 120$ 度の船首が、(b)は $D=400\text{mm}$ の供試模型に $r=10\text{mm}$ で $2\theta=35, 120$ 度と $r=50\text{mm}$ で $2\theta=35$ 度の船首が侵入したときの反力-侵入量曲線を示し、いずれも実験値と計算値はほぼ一致していて、殆どの曲線が侵入量 130mm または 260mm (ひずみ ≈ 0.65) 付近まで侵入量の増加に対し直線的な反力の増加を示し、以降急激に増加している。船首寸法の影響は、(a)で開き角の小さいうちは、開き角の増加に対し直線の傾きはわずかな増加であるが、65 度から 120 度に変化した時点で急激な増加を示している。また、(b)でも同様の結果であり、先端半径 r が大きくなった場合も傾きの増加が生じている。(b)の $2\theta=120$ 度、侵入量 170mm 付近で変曲点が現れているが、この点は侵入した船首が供試模型の幅全面に接し始める境の侵入量であり、実験値と計算値は一致した結果が得られている。緩衝装置の緩衝特性を表

(a) Effect of entrance angle 2θ ($D=200\text{mm}$)

(b) Effect of entrance angle 2θ and tip radius r ($D=400\text{mm}$)

Fig.4 Reaction force - penetration curves of the urethane foam

す値として緩衝効率 $\eta (= \text{吸収エネルギー} / (F_{\max} \times \delta_{\max}))$ があるが、ここで吸収エネルギーは反力-侵入量曲線を積分して得られる値で、この曲線が直線の場合には緩衝効率は $1/2$ となり細かな直線の傾きの変化を表現することはできない。このようなことから本論文では緩衝特性は反力-侵入量曲線を用いて論じることとする。Fig.5 は同様に奥行き $D=200\text{mm}$ のペルブレン緩衝工に開き角 $2\theta=35, 65, 120$ 度の船首が侵入したときの結果で、実験値に比べ計算値は多少直線の傾きが緩く現れているが、船首寸法の影響はウレタンフォームと同様である。なお、計算値が小さく現れた一因としては、Fig.3 に示したペルブレン緩衝工の数値解析で用いた圧縮特性が本来の特性を再現できていないことがあげられる。

Fig.5 Reaction force - penetration curves of the pelprene protective device ($D=200\text{mm}$, P-150B)

Fig.6 Reaction force - penetration curves of the composite pelprene protective device ($D=400\text{mm}$)

緩衝工の設置に当たっては剛性を奥行き方向に段階的に変化させ、規模の小さい衝突に対しては外周部の剛性の低い緩衝工部分で吸収し、橋脚と船舶のみならず緩衝工をも含めた双方の被害を低減するような配慮がされている施設もある。例えばゴム式フェンダーと鋼製緩衝工の組み合わせがある。Fig.6, 7 はこれをペルブレン緩衝工に適用し、剛性の低い P-90B を船舶の侵入側に、剛性の高い P-150B を橋脚側になるように組み合わせた

$D=400\text{mm}$ の複合体と、それぞれ単体の奥行き $D=400\text{mm}$ の緩衝工に開き角 $2\theta=35^\circ$ 、先端半径 $r=10\text{mm}$ の船首が侵入したときの反力-侵入量曲線と変形図である。Fig.6 の反力-侵入量曲線において、実験値ではP-150B単体はP-90B単体の約1.4倍の反力を示し、複合体では侵入量160mm程度まではP-90Bと同じ反力-侵入量曲線を示し、その後P-150BとP-90Bの中間的な値に移移する特性を示している。計算値は実験値に比べ全体的に小さな値をとっており、Fig.5の傾向と一致している。しかしながら、複合体において侵入量150mm付近でP-90Bの値からP-150BとP-90Bの中間的な値に移移する傾向は良く一致している。

Fig.7はベルブレン緩衝工に船首が200mm侵入したときの(a)P-150B単体と(b)複合体の変形図で、実験結果と計算結果を比較して示す。(a)、(b)いずれも実験結果と計算結果はほぼ一致し、(b)の複合緩衝工では特に図中矢印を付した剛性の異なる部材の境界面で剛性の低い図中上方の部材が大きく変形し、剛性の高い下方の部材の変形が全体的に少なくなっている。これに比べ(a)の単一部材で構成された単体では変形が広い範囲にわたっている。このことから樹脂緩衝工においても、複合体とすることで小規模な衝突に対して緩衝工をも含め

Experimental Calculation
(a) single model P-150B

Experimental Calculation
(b) composite model P-90B(above), P-150B(below)
Fig.7 Deformation of the pelprene protective device

被害を低減できると考えられる。樹脂緩衝工では剛性を部材の材料や形状によって変える事は容易であり、緩衝工を構成する部材の組み合わせを変える事でより実用的な緩衝工が実現できるものと考えられる。

3.3 端部および斜め侵入時の特性

前項では船首が緩衝工の中央に侵入する状態について述べたが、本項ではウレタンフォームの供試模型を使って調査した一般的な船首侵入について論じる。まず、船首の侵入位置の反力への影響を調べた結果をFig.8の反力-侵入量曲線に示す。幅 $W=300\text{mm}$ の供試模型に開き角 $2\theta=35^\circ$ 、先端半径 $r=5\text{mm}$ の船首を、侵入位置 $W_p=25, 50, 100, 150\text{mm}$ に侵入させたもので、いずれも実験値と計算値はほぼ一致しており、殆どの曲線が中央に侵入したときと同様に侵入量65mm(ひずみ ≈ 0.65)付近まで侵入量の増加に対し直線的な反力の増加を示し、以降急激に増加している。侵入位置が端部に近づくると反力が減少しており、反力-侵入量曲線を積分して得られる吸収エネルギーも減少する。特に $W_p=25\text{mm}$ では中央($W_p=150\text{mm}$)に侵入した場合に比べ反力は25%程度減少しており、端部に近いほど影響が大きい。

Fig.8 Reaction force · penetration curves of eccentric penetration

以上のように侵入位置を変えたときの反力の推定が数値解析で可能となったので、緩衝工の幅と侵入位置ならびに船首の寸法を広範囲に変え、船首が奥行き半分まで侵入したときの反力を、数値解析により求めた結果をFig.9に示す。(a)の侵入位置は中央($W_p=W \times 0.5$)、(b)の侵入位置は端部($W_p=D \times 0.5$)で、横軸は W/D 、縦軸は反力を船首侵入面の断面積で割って得た応力です。(a)、(b)いずれも W/D の値が小さい(奥行きに比べて幅が狭い)場合は応力が小さくなり、反力と吸収エネルギーも減少するが、逆に W/D が大きくなった場合には応力は一定量以上には増加しない、即ち(a)の中央部侵入では $W/D > 6$ 、端部侵入では $W/D > 3$ で曲線の傾きがほぼ0になり、 W/D を6以上に大きくすれば船首がどの位置に侵

入しても W/D による吸収エネルギーの変化は減少する。したがって緩衝工の設置に当たっては、幅方向は細分化せずにできるだけ連結する等で広くした方がよい。Fig.10 は、開き角 $2\theta=35$ 度、先端半径 $r=5\text{mm}$ の船首が幅 $W=300, 400, 600\text{mm}$ の供試模型の(a)端部と(b)中央に侵入したときの侵入量 50mm でのX方向(船首侵入方向)のひずみ分布の比較を示す。図中の線は 0.1 刻みの等ひずみ線を示し、“-”記号は圧縮ひずみを示す。いずれも船最先端部で最大ひずみを示しており、図中矢

Fig.9 Relation of compression stress and width

印で示すひずみ 0 の等ひずみ線の位置が幅の増加とともに相対的に船首侵入位置側に近づく、(a)では $W=400\text{mm}$ で、(b)では $W=600\text{mm}$ で引張ひずみの範囲が圧縮ひずみの範囲よりも広がっていることがわかる。Y 方向のひずみ分布についても同様な結果が得られており、前述した Fig.9 の応力変化の様子とも一致している。

船首が斜めに侵入したときの影響を Fig.11 に示す。(a)

Fig.11 Reaction force · penetration curves of oblique penetration

Fig.10 Calculated distributions of strain ($D=100\text{mm}, 2\theta=35\text{deg}, r=5\text{mm}, \delta=50\text{mm}, X\text{-direction}$)

は緩衝工の中央に侵入角 $\chi=60, 70, 80, 90$ 度で侵入した状態、(b)は侵入角 $\chi=70$ 度で侵入位置を中央と左右両端とした状態の模型実験と数値解析の反力-侵入量曲線を示す。なお、グラフ横軸の侵入量は船首侵入方向の値である。(a)、(b)いずれも実験値と計算値はほぼ一致しており、侵入量 65mm (ひずみ=0.65) 付近まで侵入量の増加に対し直線的な反力の増加を示し、以降急激に増加している。また、調査した範囲では船首の斜め侵入による影響は僅かであり、侵入位置が極端に端部に偏らない限り充分なエネルギー吸収が可能と考えられる。

3.4 船側侵入時の特性

船側が橋脚のコーナー部に設置された緩衝工に侵入したときの反力-侵入量曲線の比較を Fig.12 に示す。実験は90度の扇形緩衝工の中央(侵入位置 $\alpha=45$ 度)に侵入する状態のみで、数値解析は $\alpha=15, 30, 45$ 度について行った。 $\alpha=45$ 度の実験値と計算値は侵入量 40mm までは良く一致しており、それ以降で実験値の方が小さくなっている。差が生じた理由として、模型実験において侵入量の大きいところで高さ方向に歪みが見られたので、座屈を生じて反力が減少したものと考えられる。また、反力-侵入量曲線はこれまで検討してきた船首侵入の直線状の変化とやや異なり、侵入量 15mm 付近までは直線的な反力の増加を示した後、やや増加割合を減少しながら推移し、60mm 付近から増加割合を増す変曲点を2点有する変化を示している。侵入位置による影響は、計算値によると侵入位置が端部に近寄った場合は最初の変曲点が侵入量の小さい側に移り、それ以降は全体的に反力が下がる傾向を示す。これらのことからコーナー部に設置する緩衝工についても細分化せずにできる限り隣接部と連結することが望ましいと考えられる。

Fig.12 Reaction force - penetration curves of corner model (ship-side penetration)

4. 結 言

クッション材として広く使われているウレタンフォームと、弾性樹脂を素材とするセル構造のペルブレン緩衝工を供試模型とし、楔形の船首または平らな船側が静的に樹脂緩衝工に侵入する模型実験と有限要素法の数値解析を行った。この際、船首と緩衝工の寸法、侵入位置や侵入角等を変化させ、反力-侵入量曲線を比較して影響を調べた。この結果次のようなことがつかめた。

- (1) 樹脂緩衝工に船舶が船首側から侵入した場合、反力-侵入量曲線は侵入量に比例して反力が増加する直線状の変化をひずみ 0.65 付近まで示す。この際、侵入する船首の開き角や先端半径がある程度以上大きくなると直線の勾配は増す。
 - (2) 船首の侵入位置が端部に移動した場合、反力-侵入量曲線の勾配は緩くなる。また、緩衝工の幅が広くなると同一位置での反力-侵入量曲線の勾配は増すが、幅/奥行き値が6以上では勾配の増加は殆どなくなる。
 - (3) コーナー部の緩衝工に船側が侵入した場合には、反力-侵入量曲線は船首侵入時とやや異なり、侵入量の少ないところでも変曲点を有する反力変化を示す。
 - (4) 模型実験の結果と有限要素法の数値解析の結果とはウレタンフォーム、ペルブレン緩衝工ともほぼ一致した。大きなセルを有するハニカム形のペルブレン緩衝工も、全体を均質なフォームモデルとして扱うことで、比較的容易に数値解析ができるようになった。
- 等である。また、今後の課題として、推定精度の向上、動的な船首侵入に対する数値解析の検討、侵入船首および橋脚側の強度調査等があげられる。

参 考 文 献

- 1) 庄司邦昭：船舶の航行水域につくられる橋梁の安全対策，航海，第108号，(1990)，pp.26-36.
- 2) 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，(1996)，pp.10-13.
- 3) 三田重雄，庄司邦昭：ペルブレン緩衝工の緩衝効果について，日本航海学会論文集，第97号，(1997)，pp.93-101.
- 4) 庄司邦昭，三田重雄，野々村千里：船舶の衝突に対する新素材橋脚防護施設の開発，第14回海洋工学シンポジウム，(1998)，pp.365-370.
- 5) 久田俊明，野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用，丸善(1995).
- 6) 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，(1999)，pp.353-354.
- 7) 森口繁一：初等力学，(1959)，培風館