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—

三田 重雄*・庄司 邦昭*・野々村 千里**

A Study on the Shock Absorption Properties of Resin Elastic Body — I . —Basic Research on Soft Polyurethane Form—

Shigeo MITA, Kuniaki SHOJI and Chisato NONOMURA

Abstract

In the previous papers, we discussed an experimental study on effect of shock absorption of pelprene protective device which is made from polyester elastomer named pelprene.

This time we made a study on the shock absorption of soft polyurethane form as the basic research for the study of resin protective device. Though this study is still continuing we reached condition. This report deals with model experiments used bow model and its numerical analysis by finite element method.

The following results are obtained.

- (1) The shock absorption properties of soft polyurethane form become clear and it's the same as pelprene protective device.
- (2) Numerical analysis result gives fairly good agreement with the static penetration test result.

1. はじめに

著者らはゴムとプラスチックの中間的な材料特性を有する熱可塑性ポリエステルエラストマー(商品名: ペルブレン)でできたペルブレン緩衝工の実用化研究を行っている。この緩衝工は材料自体が弾性に優れた樹脂であるとともに、ハニカム状のソリッド構造をしている。これまでは模型実験を主体とし、ペルブレン緩衝工に船舶の船首部を模擬した楔形船首模型を圧縮試験機で押し付ける船首静的侵入試験⁽¹⁾、衝突実験装置で衝突させる船首部衝突実験⁽²⁾等により性能調査を進めてきた。この結果ペルブレン緩衝工は衝突時の衝撃を緩和でき、形状も除荷後ほぼ元の状態に戻ることを確認した。また、ペルブレン緩衝工を橋脚に取り付けた時の波力を推定するための波力実験⁽³⁾も行い、同規模の平板で構成された箱形よりも受ける波力が小さいことを確認した。

本研究においては、ペルブレン緩衝工のような高い反発弾性を有する樹脂材料で作られた樹脂緩衝工の緩衝性能を対象に、その特徴を把握するための基礎的な研究を行い、樹脂緩衝工設計のための資料を得ることを目的とする。今回は全体が均質な弾性体であって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に着目し、模型実験による緩衝性能の調査を行うとともに、新たに有限要素法による数値解析を試みた。この結果、軟質ポリウレタンフォームを供試体とした弾性体の船首衝突時の緩衝性能がつかめ、速度の遅い静的な船首の侵入については反力—侵入量特性が実験と数値解析の結果とで良い一致を得た。これらについてペルブレン緩衝工との比較も含めて報告する。

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

**非会員 東洋紡績株式会社 (〒520-0292 大津市堅田2-1-1)

2. 実験の概要

2.1 供試模型

軟質ポリウレタンフォームは微細(数百 μ)セル構造の発泡体であり、軽くて柔軟性に富み、クッション性、保温性、緩衝性等の特性を備えている。実験に用いた素材は見掛密度 45kg/m^3 のエーテル系・高硬度タイプの軟質ポリウレタンフォームで、入手した素材の寸法は厚み $0.2\text{m} \times$ 長さ $2\text{m} \times$ 幅 1m である。この素材をこれまで衝突実験を行ってきたペルブレン緩衝工模型(縮尺 $1/5$)に合わせ、図1に示すような 0.2m 角の立方体と厚み $0.2\text{m} \times$ 幅 $0.6\text{m} \times$ 奥行き 0.2m および 0.4m の直方体のブロックに裁断した。また、各ブロックは素材の表面に識別用の供試体番号を記入し、実験状態によって使い分けた。なお、供試模型はすべての実験で乾燥状態とした。

2.2 模型実験

2.2.1 全面圧縮実験

圧縮試験機に平面圧縮用の平板を取り付け、 0.2m 角の供試模型を素材の幅方向または厚み方向の一軸方向に均一に圧縮し、荷重-ひずみ曲線を求めた。使用した試験機はアムスラー万能試験機(オリエンテック UCT-25T、測定範囲 $0.01\text{N} \sim 245\text{kN}$)で、圧縮速度を 20mm/min とし、奥行き寸法の75%まで圧縮した。なお、この試験機はパソコンを使って運転操作やデータ収録を自動的に行う方式のものである。

2.2.2 船首静的侵入実験(侵入実験)

前述の圧縮試験機に開き角が 35° で、先端半径が 10mm と 50mm の鋼板製楔形船首模型(以下前者を“小船首”、後者を“大船首”と呼ぶ)を取り付け、これを厚み $0.2\text{m} \times$ 幅 $0.6\text{m} \times$ 奥行き 0.2m と 0.4m の供試模型に対して直角方向に押し付けて反力-侵入量曲線を求めた。写真1に船首静的侵入実験(以下“侵入実験”と呼ぶ)の様子を示す。圧縮条件は全面圧縮実験に合わせて押し付け速度 20mm/min で奥行き寸法の75%まで船首を侵入させた。また、供試体の船首侵入による部分的な変形状態が観察できるように表面に 50mm 間隔の格子線を記入し、奥行き寸法の25%、50%、75%船首侵入時の変形状態を正面から写真撮影した。なお、供試模型の試験機への取り付けは完全固定とはせず、両面テープを使っての貼り付け(容易に剥がれる)状態とした。

2.2.3 船首衝突実験(衝突実験)

斜面走行台車を利用した衝突実験装置(参考文献(2)参照)を使い、供試模型に船首模型を衝突させる実験を行って反力-侵入量曲線を求めた。写真2に船首衝突実験(以下“衝突実験”と呼ぶ)の様子を示す。供試模型と船首模型は侵入実験と同一とし、走行台車に船首模型を取り付け、質量調整用の重りを積み込んで衝突質量を 192kg とした。また、衝突速度については侵入実験時と同程度の侵入量が得られるよ

図1 素材から裁断した供試模型の寸法

写真1 船首静的侵入実験の状況

写真2 船首衝突実験の状況

う、侵入実験の圧縮エネルギーと衝突時の運動エネルギーが等しくなるように設定した。なお、供試模型の実験装置への取り付けは接着剤を使つての完全固定状態とし、1個の供試体に対して同一条件で2度衝突させて特性の変化も調べた。この実験では速度と侵入量は走行台車側に取り付けたロータリエンコーダ(オムロン:E6A2-360p)とポテンシオメータ(緑測器:CP-2FK)で検出し、反力は供試体固定側に取り付けた4.9kN(500kgf)ロードセル(共和電業:LTZ-500KA)で検出した。また、検出したデータはモニター用のオシロレコーダ(NEC三栄:RT3208N)とパソコン入力用のデジタル式データレコーダ(ティアック:DR-F1、記録速度0.01sec)に記録し、時系列データをパソコンにとり込んで解析を行った。

2.3 数値解析方法

供試模型に船首模型が侵入した時の数値解析(静解析)を、有限要素法(汎用有限要素法ソフトウェア:MARC K6)を用いて行った。使用した要素は、四辺形平面ひずみ要素で、供試模型の対称性を考慮し1/2の領域に対して要素分割を行った。2種類の船首形状(先端半径)に合わせて剛体壁をそれぞれ定義し、船首の侵入方向に強制変位を与えた。また、供試模型の底面にも剛体壁を定義し、船首模型侵入方向には変位拘束を行わない境界条件を設定した。構成則には、フォームモデルを用いた。軟質ポリウレタンフォームの全面圧縮実験により得られた荷重-ひずみ曲線より構成則を推定し、材料の圧縮性を考慮できる構成則を適用した。前述の侵入実験に合わせ、2種類の船首形状と2種類の供試模型に対して、幾何学的非線型と接触を考慮した増分解析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 全面圧縮実験結果

図2に素材の幅方向と厚み方向にそれぞれ圧縮した時の荷重-ひずみ曲線と、ペルブレン緩衝工の実験値(メーカ実験値)を示す。軟質ポリウレタンフォームの圧縮荷重(1kN $\div$ 102kgf)は、いずれも圧縮初期に急増した後ひずみ130mm(高さ寸法の65%)までは緩やかな増加を示し、それ以降は再び急増している。また、圧縮方向の違いで大きさが異なっており、圧縮初期の立ち上がり部分を除いては幅方向に圧縮した方が0.2kN以上小さくなっている。このため船首模型による実験では、素材の幅方向が供試体の奥行き方向になるように統一した。軟質ポリウレタンフォームとペルブレン緩衝工とは全体的に似通った特性を示しているが、軟質ポリウレタンフォームの荷重増加だけの傾向に比べ、ペルブレン緩衝工は圧縮初期において一時的にピーク値を示した後、ひずみが増しても130mm程度までピーク値よりわずかに減少した値を保っている。なお、ここに示したペルブレン緩衝工は圧縮荷重が軟質ポリウレタンフォームの実験値に近いもので、ペルブレン緩衝工としては比較的柔らかい(素材の曲げ弾性率:107.8N/mm²)ものである。

3.2 船首静的侵入実験および船首衝突実験結果

つぎに図3～6に船首模型を用いた侵入実験および衝突実験の結果を示す。なお、ここに示すペルブレン緩衝工の衝突実験結果は参考文献(2)から引用したものである。図3は船首と供試模型の奥行き寸法を変えた時の侵入実験の結果であり、いずれも船首

図2 全面圧縮時の荷重-ひずみ曲線の比較

図3 侵入実験での船首と供試体寸法の反力に及ぼす影響

の侵入量に対して反力はほぼ直線的に増加しており、大船首は小船首に比べ全体的に0.2kN程度反力が大きい。また、奥行き0.2mと0.4mの供試模型とでは直線部分の傾きがほぼ等しく、奥行き0.2mの供試模型は侵入量130mm程度から、0.4mの供試模型は侵入量260mm程度から(ともに奥行き寸法の65%)反力の増加割合が急激に大きくなっている。図4は同様に船首と供試模型の奥行き寸法を変えた時の衝突実験の結果を示す。図には比較用に奥行き寸法0.2mのペルブレン緩衝工の実験結果も示した。軟質ポリウレタンフォームでは、衝突してから徐々に速度を減じつつ反力-侵入量曲線は直線とはならず侵入量100mm位までは上に膨らんだ緩い弓形の曲線を描いて推移しており、

それ以降は直線に近づいている。これに対してペルブレン緩衝工の反力-侵入量曲線は直線的な推移を示している。更に進んで最大侵入量に達すると、供試模型の反発力によって跳ね返され、船首模型が供試体から離れるまで反力の減少割合が徐々に減るような下に膨らんだ弓形の曲線を描いている。また、船首の違いと奥行き寸法の変化に対し、反力の大小の関係は侵入実験の結果と一致している。小船首、奥行き0.4mの供試模型については衝突2回目の値も示したが、1回目の衝突に比べ幾分緩やかな変化を示しており、反力と侵入量の最大値はともに大きくなっている。このような衝突の繰り返しによる反力-侵入量曲線の変化の傾向はペルブレン緩衝工も同様であった。図5は奥行き0.4mの供試模型について、小船首と大船首の侵入実験と衝突実験の結果の一部を比較したものである。衝突実験では侵入実験の侵入量と同程度の船首侵入量が得られるように衝突速度を0.8~1.8m/secに設定したが、押し付け速度の速い衝突実験の方が侵入実験に比べて反力の増加割合(反力-侵入量曲線の傾き)が50%程度大きくなり、侵入量は300mmに至らなかった。この反力の大きくなる原因は、押し付け速度が速いと供試模型セル内の空気が容易に移動できずに圧縮されるためと思われる。なお、このような現象はペルブレン緩衝工では見られなかった。図6は船首衝突時の緩衝効率(=衝突エネルギー/(最大反力×最大侵入量))とエネルギー吸収率(反力-侵入量線図から求めた衝突エネルギーと吸収エネルギーの割合)とを衝突回数をパラメータとして示す。衝突船首の大小と供試模型の奥行き寸法、衝突回数により多少の変動があるが緩衝効率、エネルギー吸収率は48~63%の範囲にあり、2回目の衝突ではいずれも1回目の衝突に比べ3~10%減少している。これらの緩衝効率、エネルギー吸収率の変化のようすはペルブレン緩衝工の実験結果とよく似ており、1回目の衝突の値はペルブレン緩衝工よりも幾分大きくなっている。

3.3 数値解析結果

最後に、数値解析の結果を変形図および反力-侵入量曲線で示す。まず、図7(a)、(b)に小船首が奥行き0.2mと0.4mの供試模型に、奥行き寸法の

図4 衝突実験での船首と供試体寸法の反力に及ぼす影響

図5 実験方法の違いによる反力の比較

図6 船首衝突時の緩衝性能

図7 変形図の実験と数値解析の比較(小船首)

図8 変形図の実験と数値解析の比較(大船首75%侵入)

25%ずつ75%まで侵入した時の侵入実験の写真と変形図とを示し、図8(a)、(b)に大船首が奥行き0.2mと0.4mの供試模型に、奥行き寸法の75%侵入した時の侵入実験の写真と変形図とを示す。なお、数値解析の変形図はメッシュが細かいため供試模型の表面に記入した50mm間隔の格子線に相当する部分の端部を太線にして目印とした。供試模型の変形は両図とも数値解析と実験とで供試体の船首先端部分の厚み変化や

図9 反力-侵入量曲線の実験と数値解析の比較

船首の供試体との接触長さ、横端面の曲がり状態等ほぼ一致している。また、奥行き0.2mの供試模型については、実験、数値解析とも75%侵入した時に小船首、大船首とも端部の底面が端から3～4ます付近でそり上がっているが、0.4mの供試模型についてはともにそり上がりは見られず良く一致している。つぎに、図9(a)、(b)に奥行き0.2mと0.4mの供試模型に、小船首と大船首が侵入した時の反力-侵入量曲線を実験の結果と比較して示す。いずれの状態でも数値解析と実験とは良く合っている。特に小船首においては実線で示す実験値と破線で示す数値解析値はほとんど重なる程度に合っており、大船首においても誤差は最大で11%程度に過ぎず、実用上問題のない精度である。

4. まとめと今後の課題

今回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を供試体とし、模型実験と有限要素法を用いた船首模型侵入時の数値解析を行い、船首先端半径の大きさや供試模型の寸法等を変えるとともにペルプレン緩衝工の実験結果と比較した。この結果以下のようなことがわかった。

- (1) 軟質ポリウレタンフォームの圧縮荷重は圧縮初期に急激な増加があるが、それ以降ひずみが高さ寸法の65%程度になるまでは緩やかな増加傾向を示す。ただし、素材の幅方向と厚み方向とで荷重-ひずみ特性が異なるので船首模型による船首静的侵入実験、船首衝突実験では素材の幅方向を供試模型の奥行き方向とした。
- (2) 軟質ポリウレタンフォームに船首模型を静的(船首静的侵入実験による)あるいは動的(船首衝突実験による)に押し付けた場合、反力は船首先端半径の大きいほど大きく、奥行き寸法の65%程度までは侵入量に比例してほぼ直線的に増加するがそれ以降は急増する。また、動的に押し付け速度を速くした方が静的にゆっくり押し付けた場合よりも反力は大きくなる。
- (3) 軟質ポリウレタンフォームとペルプレン緩衝工の実験結果とでは、反力-侵入量曲線やエネルギー吸収率等で細かな違いは有るものの全体的には似た傾向を示す。しかしながら、前項に示した船首押し付け速度の影響はペルプレン緩衝工では見られなかった。
- (4) 有限要素法による船首侵入の数値解析を試みたところ、変形状態および反力-侵入量曲線とも船首静的侵入実験の結果とよく一致し、有限要素法による数値解析が船首侵入による反力推定に有効な手法であることが分かった。

これらにより、市販材料である軟質ポリウレタンフォームを供試体とすることで、ペルプレン緩衝工のように特殊な形状をした樹脂緩衝工の緩衝性能を推定する手がかりが見出せた。今後の課題としては、船首の形状や押し付け速度の違いによる反力-侵入量特性の調査、有限要素法を利用したペルプレン緩衝工の数値解析の検討等がある。

参 考 文 献

- (1) 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，平成8年12月。
- (2) 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，pp.93-101，平成9年9月。
- (3) 三田重雄・庄司邦昭 他：ペルブレン緩衝工に働く波力について，日本航海学会論文集第94号，pp.51-57，平成8年3月。

質 疑 応 答

久保雅義(神戸商船大学)：従来の鋼製緩衝工とコスト的な比較をされていたら教えてください。

三田重雄：緩衝工として鋼製緩衝工やゴム製(空気式)緩衝工が広く使われています。ペルブレン緩衝工はこれらと比較しますと材料費が高いためインシタルコストは高くなってしまいます。しかし、通常の衝突であれば除荷後変形は元に戻りますので繰り返し使用が可能で、耐候性もあり保守が容易です。これに対し、鋼製緩衝工では衝突により塑性変形を生じるので繰り返し使用はできず、交換が必要です。また、腐食防止のための定期的な塗装も必要であり、ランニングコストは高くなってしまいます。ゴム製についても破裂やロープ切断等があるため定期的な保守が必要で、ランニングコストは高くなってしまいます。これらを考慮するとトータルコストは変わらないと言われています。