

樹脂フォーム材料による車体フレーム軽量化の試み

Weight Reduction with Plastic Foam for Structural Components of Vehicle

利 光 康* 藺 田 晃 史**
Yasushi TOSHIMITSU Akifumi SONODA

要 旨

車体のサイドフレームが前面衝突時に圧縮変形する時の吸収エネルギーに着目し、ウレタンフォームを充填することで、車体フレームのエネルギー吸収効率を向上し、軽量化を図った。具体的には、車体フレームに対して吸収エネルギーと曲げ剛性を維持した上で、ウレタンフォーム充填および断面構造の変更により、30%程度の軽量化が可能であるということが分かった。同時に樹脂フォーム材料を充填した軽量車体フレーム構造検討を可能とするCAE技術の構築にも取り組んだ。具体的には、アルミニウムパイプ(シェル要素)にウレタンフォーム(ソリッド要素)を充填したハイブリッドフレーム単体で、50%以上の圧縮変形において、実験とCAEの吸収エネルギーの差が10%程度にシミュレートできた。

ABSTRACT

Focusing on absorbed energy of a vehicle side frame as compressive deformation occurs on frontal impact, an improvement in energy absorptance and a weight reduction of the structural components of a body by filling urethane foam are performed. Especially, it was found that it is possible to achieve approximate 30% weight reduction by filling urethane foam and modifying cross-section structures with insuring flexural rigidity and absorbed energy equal to a body frames. At the same time efforts were also made to construct CAE technology that enables to investigate a lightweight body frame structure filled with plastic foam. Concretely, the difference in absorbed energy between CAE simulations and actual tests with an actual hybrid frame unit consisting of aluminum piping (shell element) filled with urethane foam (solid element) was approximately 10% under the condition of 50% compressive deformation or more.

1. まえがき

近年、自動車に衝突安全性能の向上が求められ、その性能が飛躍的に向上している中で車体重量が増加してきていることは否めない。一方で温室効果ガス排出削減に向け、CAFEの目標値が定められる等、燃費向上が義務付けられるような状況の中で、車体に対しては軽量化という相反する要求が高まっている。

樹脂フォーム材料は、従来主に遮音等の目的で車体に用いられてきており、衝突性能向上の目的で車体フレームに取り込んだ事例は希である。そのような公知の適用例としては、樹脂フォーム材料を充填した車体フレームの曲げ変形時の吸収エネルギー向上及び車体変形量低減⁽¹⁾に着目したものであり、主にエポキシフォームを用いている。

本テーマでは衝突安全性能を維持した上で軽量化が可能で、樹脂フォーム材料を充填した車体フレーム構造についての研究を行ったので、これについて報告する。

2. 軽量化の概念

まず樹脂フォーム材料を用いた時の軽量化の概念について説明する。車体の所謂サイドフレームのように、閉断面を長手方向に構成する金属パイプを圧縮変形させると、一般的にFig. 1のような変形形態を示し、その時の変形量に対する荷重はFig. 2-aのようになる。またその時の吸収エネルギーと変形量の関係はFig. 3-aとなる。一方同じ金属パイプに樹脂フォーム材料を充填すると、変形量に対する荷重、変形量に対する吸収エネルギーはそれぞれFig. 2-b, Fig. 3-bのようになる。衝突時に車体のメインフレーム(例えばサイドフレーム)が圧縮変形をしたとすると、正にFig. 2・Fig. 3のような性能を持つことになる。特に重要な吸収エネルギー(Fig. 3)を見てみると、同じ変形量に対しても樹脂フォーム材料を充填したものの方が吸収エネルギーが高い。これが樹脂フォーム材料充填の効果である。逆に吸収エネルギーを同じとした場合、Fig. 4のよ

* 栃木研究所

** (株)PSG

うに金属パイプの肉厚を落す等が可能になる。このとき、充填した樹脂フォーム材料の重量は増加するが、金属パイプの薄肉化によりそれ以上の重量低減が図れ、これが軽量化の取り分となる。

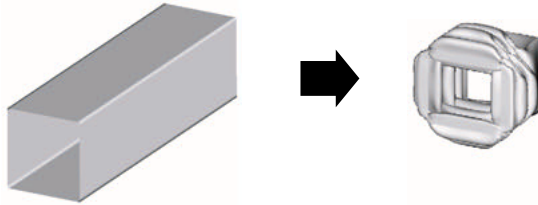


Fig. 1 Compressed deformation shape of metal frame

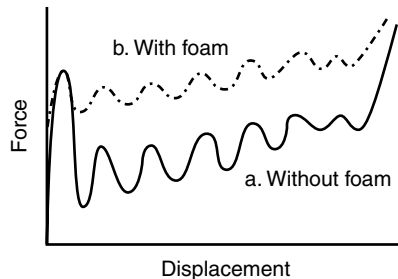


Fig. 2 Force vs. axial displacement

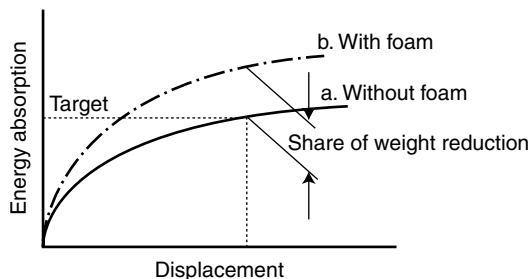


Fig. 3 Energy absorption

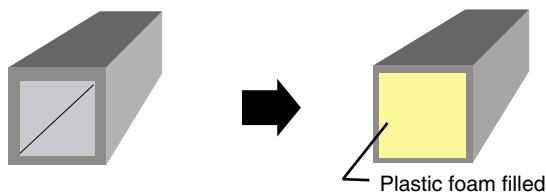


Fig. 4 Concept of weight reduction by means of plastic foam

3. 研究のアプローチ

本研究に際しては、下記三つの観点でアプローチを行った。

3.1. 樹脂フォーム材料の選択

樹脂フォーム材料には、ウレタン系・エポキシ樹脂系・ラバー系・PET 系等さまざまなものがあるが、ねらいとしては圧縮率50%以上という大きな変形が可能で、その過程において、より大きな荷重を発生するものを選択することにした。

3.2. 樹脂フォーム材料充填による効果検証

既存の軽量なエネルギー吸収構造体(例えばサイドフレーム先端に取り付けられているフレーム構造物の一種：クラッシュボックスと呼ぶ)に対し、樹脂フォーム材料充填フレーム(ハイブリッドフレームと呼ぶ)の肉厚・断面の大きさ・構造等を変化させることにより、吸収エネルギーと曲げ剛性について性能検証を行うことにした。

3.3. 軽量化構造検討の為の CAE 技術の構築

ハイブリッドフレームの構造仕様に対する性能をCAEにより予測可能とする為に、フォーム部と金属部それぞれの性能予測技術構築を初期課題として、その後にハイブリッドフレームの性能予測技術構築を行うことにした。

4. 目標設定

本研究における目標設定の考え方は下記の通りである。

- (1) 既存のエネルギー吸収構造に対して大幅な軽量化が可能であること。具体的には、クラッシュボックスに対し、車体フレーム性能(圧縮吸収エネルギー・曲げ剛性)を同等とした上で重量-30%とする。
- (2) ハイブリッドフレームの衝突性能予測を可能とする CAE 技術が構築できること。

5. 検討経過

5.1. 樹脂フォーム材料の選択

各種樹脂フォーム材料を Fig. 5 に示す形状のテストピースに成形し、アムスラー試験機により圧縮試験を行い、荷重と変形量を測定したものを Fig. 6 に示す。発泡倍率は等しく3倍とした。これより、硬質ウレタン系フォーム材料⁽²⁾が樹脂フォーム材料の選択のねらいに最も当てはまるので、樹脂フォーム材料としては、硬質ウレタンを選択した。また、Fig. 7 から分かるように、重量に対する吸収エネルギーはほぼ線形であり、50%以上の変形、即ち2倍以上の圧縮が可能で、かつより大きな吸収エネルギーが要求されることから、発泡倍率は3倍とした。

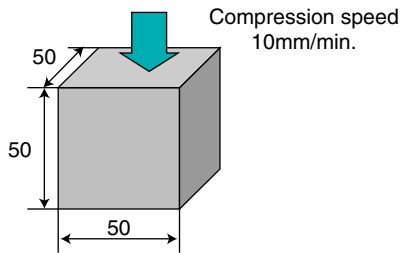
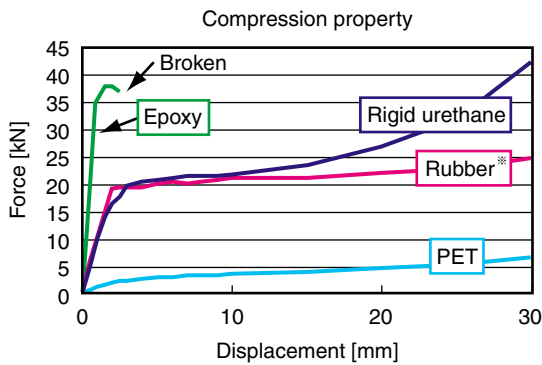


Fig. 5 Plastic foam test piece and compression test



※ Rigid plastic foam using rubber principal-based material

Fig. 6 Compression test result of plastic foam

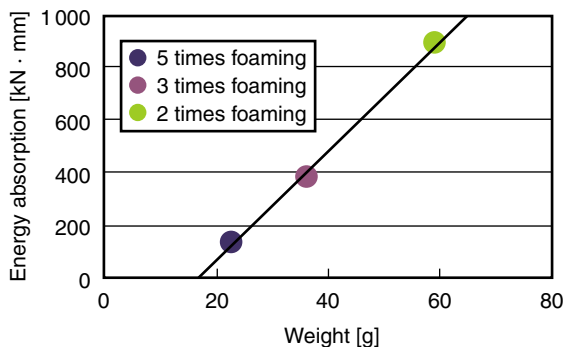


Fig. 7 Axial compression test result

5.2. ハイブリッドフレームの軽量化効果検証

軽量化効果を定量的に明らかにするために、試験品を製作し、圧縮・曲げ試験を行った。試験に供したものは、その一覧を Table 1 に示す通り、さまざまな断面の大きさと肉厚をもったものを製作した。サイドフレームに相当する金属パイプにはクラッシュボックスに用いているものと同等のアルミニウム材料を用いた。圧縮試験用には長さを一様に 240mm とし、曲げ試験用には同じく 800mm とした。試験方法はアムスラー試験機を用い、圧縮試験は Fig. 8、曲げ試験は Fig. 9 に示す要領で行い、荷重と変形量を測定した。

Fig. 10 は、Table 1 に示す試験品の圧縮試験結果を、重量と吸収エネルギーで表したもので、図中矢印はウレタンフォーム有無の変化を示したものである。これより、圧縮吸収エネルギーが同等以上で、重量 - 30% を可能にする仕様は、Table 1 に示す④-a であることが分かる。更に Fig. 11

Table 1 Section form for supplied test pipes

1. Aluminum pipe

①-a	①-b	②-a	②-b	③-a	③-b
φ 60-t2 Foam filled	φ 60-t2	φ 50-t2 Foam filled	φ 50-t2	φ 50-t3 Foam filled	φ 50-t3

2. Aluminum dual pipe

④-a	④-b	⑤-a	⑤-b
φ 60-t2/φ 40-t1 Foam filled	φ 60-t2/φ 40-t1	φ 55-t2/φ 40-t2 Foam filled	φ 55-t2/φ 40-t2

3. Aluminum hexagon pipe

⑥-a	⑥-b	⑦
Width50 All holes filled	Width50	Width90 (Crash box)

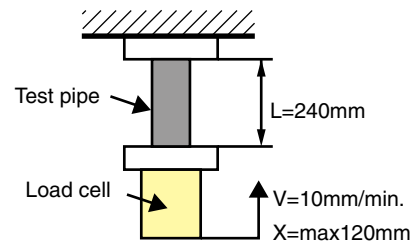


Fig. 8 Axial compression test setup

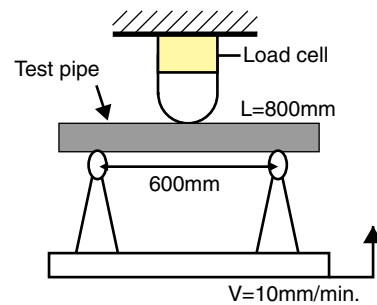


Fig. 9 Bending test setup

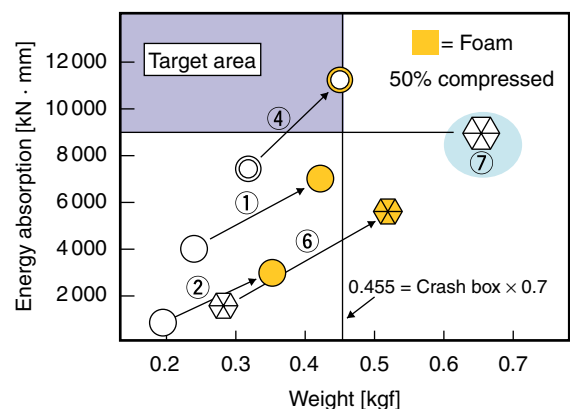


Fig. 10 Axial compression test result

は、この仕様とクラッシュボックスの圧縮性能・吸収エネルギー・曲げ剛性の比較を示しており、本仕様は曲げ剛性においてもクラッシュボックスと同等以上の性能を有していることが分かる。これらから、前記試験品の中で目標を満足する結果が得られたハイブリッドフレームは Table 1 に示す二重管アルミニウムの中にウレタンフォームを充填する仕様(④-a)であることが明らかになった。

5.3. 軽量化構造検討のための CAE 技術の構築

樹脂フォーム材料を使用した、ハイブリッドフレームの大変形シミュレーションの数少ない事例⁽³⁾において、実験結果に対しCAEの結果が必ずしも精度良く再現されているとはいえない。本研究では、変形量に対する荷重の波形および吸収エネルギーの大きさの再現を目差した。解析には陽解法ソフトの RADIOSS を用いて検討を行うことにした。

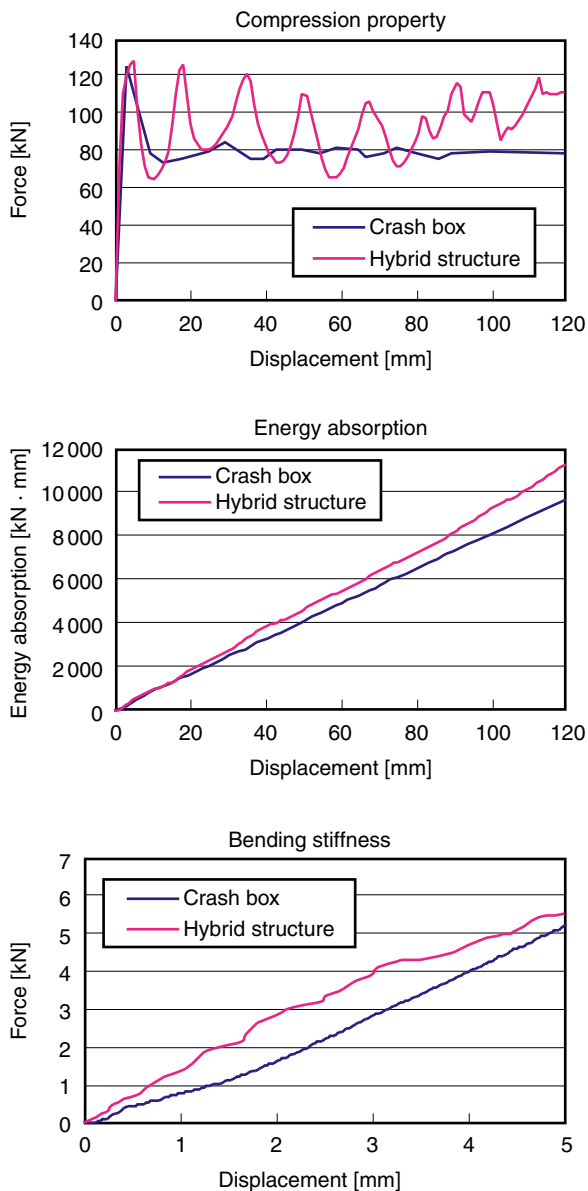


Fig. 11 Test result of compression and bending test

5.3.1. フォーム部シミュレーション

Fig. 6 に示す樹脂フォーム材料の変形量に対する圧縮荷重の中でウレタンフォームの線図に最も近いシミュレーション結果が得られる材料則を選択した。計算モデルは、実験と同様1辺が 50mm の立方体をソリッド要素で Fig. 12 のようにモデル化した。

Fig. 13に実験と先に選択した材料則で行ったシミュレーションの圧縮変形後の形態を示す。樽状に膨らみ圧縮変形した様子も実験結果をほぼ再現することができた。また、Fig. 14は変形量に対する荷重および吸収エネルギー線図であるが、どちらも実験との差は2~3%と良く合っている。

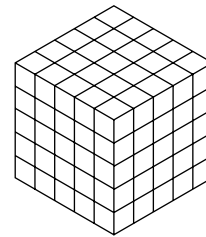


Fig. 12 CAE model for plastic foam

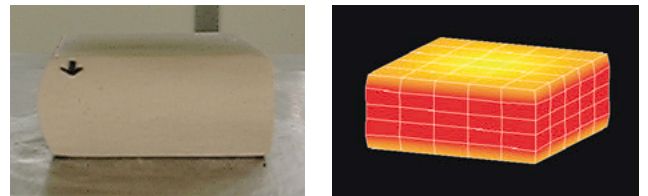


Fig. 13 Compressed deformation shape of plastic foam

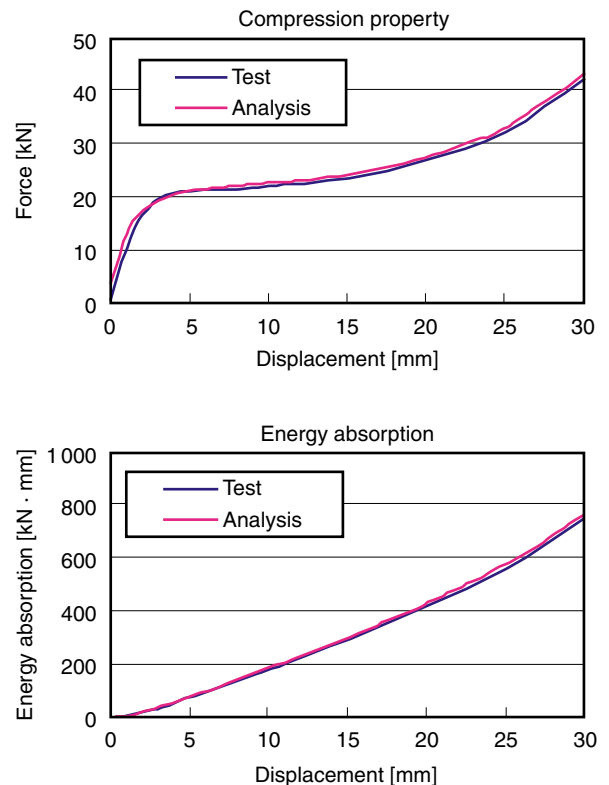


Fig. 14 Comparison of compression quality for plastic foam

5.3.2. 金属部シミュレーション

金属部は Table 1 のアルミニウムパイプ(①-b)を用い、計算モデルとしては Fig. 15 のような径方向の 1/4 断面をもつ長さ 240mm のモデルを作成し、メッシュピッチは蛇腹状に変形する部分を精度良く再現することと、計算時間とのバランスを考慮して作成した。このとき、クラッシュボックス相当の材料物性データを使用した。

Fig. 16 にアルミニウムパイプの実験とシミュレーションの圧縮変形後の形態を示す。蛇腹部分もほぼ再現することが出来た。また、Fig. 17 に示す通り、荷重の変動成分の実験結果を精度良く再現しているとはいえないものの、吸収エネルギーについては、約 10%の差で再現することができた。



Fig. 15 CAE model for metal pipe

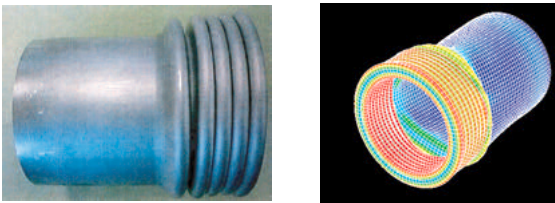


Fig. 16 Compressed deformation shape of aluminum pipe

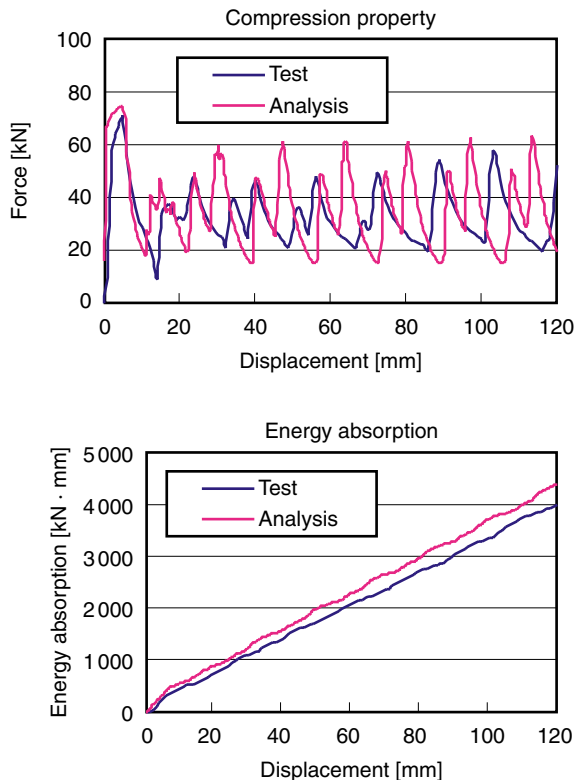


Fig. 17 Comparison of compression quality for aluminum pipe

5.3.3. ハイブリッドフレームシミュレーション

フォーム部および金属部で行ってきたシミュレーション内容を反映し、ハイブリッドフレームのモデルを作成した。モデルは Table 1 のアルミニウムパイプにウレタンフォームを充填した仕様(①-a)で、Fig. 18 のように長さ 240mm の 1/4 断面モデルを作成し、ソリッド要素のメッシュピッチを、複雑な変形をする部分を細かくし、他を粗くすることで計算時間を削減した。

Fig. 19 にハイブリッドフレームの実験とシミュレーションの圧縮変形後の形態を示す。また、Fig. 20 に荷重に対する変形量と吸収エネルギー線図を示す。両側から蛇腹状に

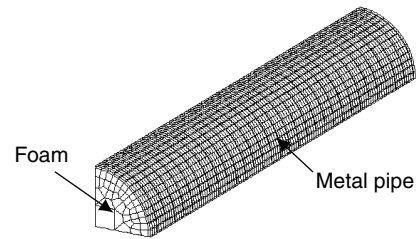


Fig. 18 CAE model for hybrid structure

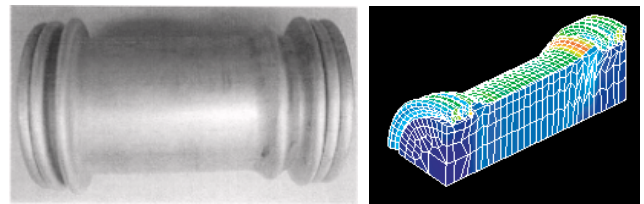


Fig. 19 Compressed deformation shape of hybrid structure

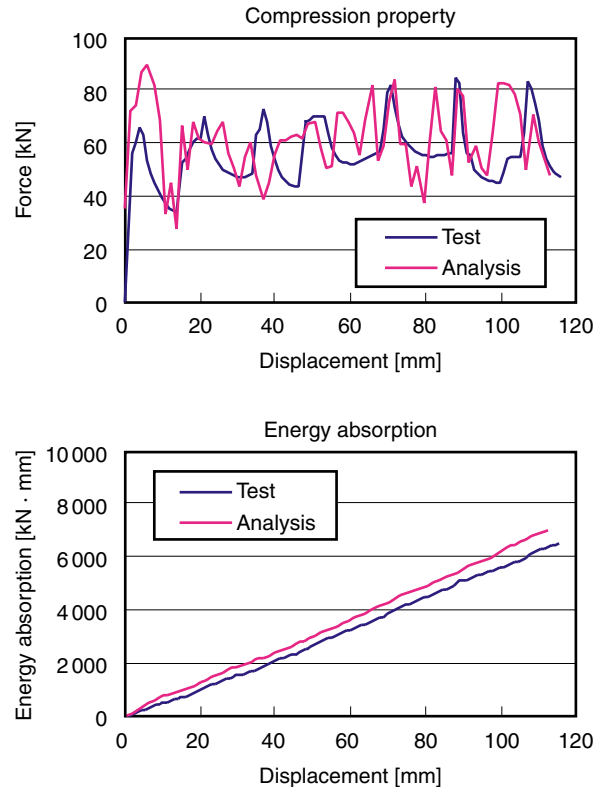


Fig. 20 Comparison of compression quality for hybrid structure

つぶれるところまで再現されているものの、荷重変動で見ると再現できているとはいえない。しかし、吸収エネルギーについては、約 10%の差で再現することができた。

7. まとめ

- (1) Table 1に示すクラッシュボックス(⑦)に対し、アルミニウム二重管中間充填構造(④-a)とすることで、圧縮吸収エネルギーと曲げ剛性の性能を維持した上で、軽量化が可能になることが証明できた。
- (2) RADIOSSを用いて Table 1に示すハイブリッドフレーム(①-a)で検討した結果、吸収エネルギーで見た場合、実験結果と10%程度の差で予測できたものの、変形量に対する荷重の変動成分を含めた波形では相関が不十分であり、今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご協力頂いた東海ゴム工業株式会社 防振開発室および研究開発部の関係者の方々に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 石田恭聡, 深堀貢, 花川勝則, 田中英昭, 松田健二: 樹脂充填によるボディーフレーム強化技術の開発, 自動車技術会, 学術講演会前刷集, No.7, p.21-24 (2000)
- (2) 今井嘉夫: 硬質ポリウレタンフォーム, ポリウレタンフォーム, 京都, 高分子刊行会, 1987, p.79-91
- (3) Jamil M.Alwan, Chi-Chin Wu, Clifford C.Chou: Effect of Polyurethane Foam on the Energy Management of Structural Components, SAE Paper 2000-01-0052

■ 著 者 ■



利光 康



田田 晃史