エアバッグにおける緩衝特性に関する研究*

鮑 力 民^{*1}, 西城 英 莉^{*2}, 錢 丹 娜^{*3}
高 寺 政 行^{*1}, 劔 持 潔^{*1}

A Study on Shock Absorbing Properties of Airbags

Limin BAO^{*4}, Eri SAIJO, Danna QIAN,
Masayuki TAKATERA and Kiyoshi KEMMOCHI^{*4} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University,
3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567 Japan

The promise of airbags for crew protection when automobiles collide has been realized. In previous airbag development, the prevailing purpose has been to protect the lives of the automobile's crew. It is necessary to understand in detail, as basic data, the impact of the airbag upon the crew, the crew's physique, and the specific accident situation, in order to minimize injuries due to airbag inflation for various accident situations and crews. There are two kinds of impact contact phenomena between the airbag and the crew. One occurs when the airbag is inflated then contacts the crew. The other occurs when the crew collides with the already inflated airbag. We focused our attention in the latter case in this research, designing an experiment apparatus based on a model of the airbag and the crew. The impact force is measured when the airbag contacts the crew under various conditions. The shock-absorbing characteristics of the airbag depend on the fabric's mechanical properties and contact conditions.

Key Words: Impact Load, Fabrics, Airbag, Evaluation, Inflation, FEM, Mechanical Properties, Shock Absorbing

1. 緒 論

乗用車の各種エアバッグの開発により, 車両衝突時の乗員保護効果は確実に向上している. 衝突事故における乗員死亡の軽減を実現する一方で, エアバッグ展開が原因となる負傷例も報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾. そこで, エアバッグ展開によるけがを軽減するため, 乗員に対するエアバッグの攻撃性について詳しい研究が必要である. 前報では, エアバッグが高速展開する際の衝撃力の測定とシミュレーション方法を提案し, それを利用して, 衝撃力とエアバッグの織物の力学特性, 各影響因子との関係を明らかにした⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

一方, 歩行者を保護するエアバッグの開発も盛んに行われている. 硬い車体との間に展開されたエアバッグにより, 歩行者の負傷を軽減させる効果がある. また, 事故時, 車内に展開されていたエアバッグは人間が車体との2次, 3次衝突による衝撃力を緩和し, 緩衝効果を果たしている.

構造材料の緩衝特性に関する研究は多く行われてい

て, その成果は [衝撃と振動工学ハンドブック]⁽⁶⁾に纏められ, 緩衝特性を利用した構造が各分野で応用されている. 著者ら⁽⁷⁾はゴルフシャフト, ロボットアーム, 自動車のプロペラシャフト等の構造材料として用いられたFRP積層円筒の緩衝特性に対して, FRP積層理論を応用し, FRP積層円筒の緩衝特性と繊維配向角の関係を実験と数値計算で明らかにした. 深谷⁽⁸⁾は墜落災害における被害を少しでも減らすために開発された墜落防護用エアバッグについて, エアバッグをつけたダミーの落下試験を行い, エアバッグによる頭部への衝撃の緩和を確認し, エアバッグの適用範囲(高さ, 体重)についても検討した. しかし, 各パラメータ(材料, 圧力, 衝撃物の質量など)によるエアバッグの緩衝特性への影響に関する基礎研究は見当たらず, 未知なことがまだ多い.

事故や乗員のさまざまな状況に対応し, できるだけエアバッグ展開によるけがを軽減させるため基礎データとして, 本報は, 展開されたエアバッグの緩衝現象について, エアバッグと乗員が接触した際の衝撃力に注目し, エアバッグと乗員をモデルとした実験装置を考案・作製し, それを利用してさまざまな接触条件についての衝撃力を測定する. また数値計算による各衝突条件下での衝撃力導出を試みる. それより緩衝のメ

* 原稿受付 2008年4月15日.

^{*1} 正員, 信州大学繊維学部 (☎ 386-8567 上田市常田 3-15-1).^{*2} 信州大学繊維学部.^{*3} 信州大学大学院工学系研究科.

E-mail: baolimi@shinshu-u.ac.jp

カニズムと各影響因子を検討する。

2. 実験装置と試料

2.1 実験装置と方法 エアバッグの緩衝特性を測定するために、図1の装置を試作した。

エアタンクの前面にサンプルを固定する装置を設けている。図2はその固定部分の写真である。サンプルの織物をOリングが取り付けられた板で挟みこみ、6本のボルトで固定する。圧縮空気によりこの織物を展開させる。タンク中の圧力は圧力センサー〔共和電業(株)PGM-10 KC〕で測定し、エアバッグ内の圧力とする。エアタンクは直径100 mm、深さ120 mmの円柱形で最大容積は 9.42×10^5 [mm³]、織物の展開面の直径は100 mmである。タンク内に厚さ10 mmの円形アクリル板を複数枚入れることにより容積を調整することができる。この容積の変化をエアバッグにおける容積の変化とする。また本研究では、エアタンク前面の金属円周部分に発泡スチロールシールを取付けて反発後の金属ブロックの再衝突によるセンサの破壊を防いでいる。

衝撃力の測定について、圧電式加速度トランスデューサを利用することが普通であるが、エアバッグの緩衝特性では、周波数が低いため、図3のようなひずみゲージ式のセンサを作製し、その衝撃力を測定することとした。金属ブロックと衝撃接触部との間にひずみゲージを取付けたりん青銅板を挟む。衝撃力による板

の曲げ変形をひずみゲージとデータ収集システム (KEYENCE Co. Lite NR-500) より収集し、パソコンに取り込む。衝撃接触部と織物との接触面の直径は20 mmである。図3に示したように、2個のおもりをねじで固定し、取り外しによって金属ブロックの質量調整が可能である。織物との接触部、金属ブロックおよびおもりにはアルミを用いており、質量はセンサ部分と織物との接触部を含めた金属ブロック全体が0.150 kgであり、おもりはいずれも0.075 kgである。センサーの固有振動数は2 kHz程度で、本研究に活用できると考える。

金属ブロックの重さ、接触部の径と織物サンプルの径の比、エアタンクの容積などの選定は、運転席エアバッグのデータを参考し、その容積の1/125のスケールで作製した。

実験を以下の手順で行う。

(1) サンプルの織物をエアタンクの前面に装着する。エアコンプレッサで圧縮した設定圧力の空気を、エアタンクに流し込み、織物を膨らます。レギュレータでエアタンク内部圧力を調整する。

(2) 金属ブロックを持ち上げて所定の高さから静かに開放し、織物の展開面に衝突させる。

(3) 織物との接触によるセンサーの出力はデータ収集システムより収集し、コンピュータに取込む。サンプリング間隔は20 μsecである。収集したひずみのデータを荷重に変換し、衝撃力とする。

以上の手順で、以下の条件を系統的に変化させ、各条件において5回ずつ実験を行う。

衝突速度：3.43, 3.96, 4.43, 4.85, 5.24 [m/s]

タンク内部圧力：0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 [MPa]

センサ質量：0.150, 0.225, 0.300 [kg]

タンク容積： 2.36×10^5 , 4.71×10^5 , 7.07×10^5 , 9.42×10^5 [mm³]

2.2 試料 今回実験に用いた試料は豊田紡織

Fig. 1 Experimental equipment

Fig. 2 Air tank and acrylic disk

Fig. 3 A sensor to measure the impact force

(株)から提供され、表1に示す。すべて自動車に使用されているエアバッグ用のノンコート平織りの織物である。繊維の原料は沸水処理済ナイロン66である。

また、数値計算に必要な織物の力学特性は測定により得た⁽³⁾。

3. 実験結果と考察

3・1 衝撃力の測定 周囲を固定した織物を圧縮した空気によって膨らませ、金属ブロックをある衝突速度でそれに衝突させ、その衝撃力を2・1項で提案した装置で測定する。図4はその結果の一例で、エアタ

Table 1 Physical characteristics of airbag fabric samples

Type No.	Material	Yarn Linear Density dtex / Filaments	Ends and Picks/in ch	Weave
N4256	Nylon 66	470/72	55×55	Plain
N3562	Nylon 66	350/73	63.5×60.5	Plain

Fig. 4 Time-strain curve when a metal block collides to the air bag

Fig. 5 Relationship between impact force and collision velocity (Sample: N 3562, Block mass: 0.225 kg, Air pressure of the air tank: 0.1, 0.3, 0.5 MPa, Air tank volume: $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$)

クの圧力が0.3 MPa、衝突速度が3.96 m/sを設定した際、測定したセンサーのひずみと時間の曲線である。織物はN 3562である。ひずみと時間の曲線に対して、事前にセンサーのキャリブレーションで得られた荷重とひずみの関係で換算し、荷重-時間曲線を求める。その曲線の最大値を衝撃力とする。図4の場合、衝撃力が349.6 Nであることを示す。同一条件5回の実験で得られたデータはほぼ重なり、ばらつきが少ないことが分かった。

3・2 衝突速度とエアタンク内部圧力の影響 タンク内部圧力と衝撃力と衝突速度の関係を調べた。図5はその一例である。織物がN 3562、金属ブロック質量が0.225 kg、エアタンク容積が $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$ である。図より、衝突速度の増加にともない衝撃力が増加することがわかった。これは、衝突速度の増加によって衝突時の金属ブロックの運動エネルギーが増加するためだと考えられる。

図6に衝突速度3.43, 4.43, 5.24 m/sでの衝撃力とエアタンク内部圧力の関係を示す。図より、エアタンク内部圧力の増加にともない衝撃力が増加することを示している。これは、エアタンク内部圧力の増加により、その圧力と釣り合う織物の張力が増加し、衝撃力が増加するものと考えられる。

本実験範囲で、各種の織物、すべてのタンク容積とブロックの重さでの変化傾向は図5と図6と同じであることが確認された。

3・3 金属ブロックの質量とエアタンク容積の影響 2種類の織物、各種エアタンク容積において、衝突速度またはエアタンク内部圧力を変化させて測定を行い、金属ブロック質量が衝撃力へ及ぼす影響について調べた。図7と図8はその測定の一例である。

Fig. 6 Relationship between impact force and air pressure in air tank (Sample: N 3562, Block mass: 0.225 kg, Collision speed: 3.43, 4.43, 5.24 m/s, Air tank volume: $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$)

図7は各金属ブロック質量における衝撃力と衝突速度との関係を示す。織物がN 3562, エアタンク容積が $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$, エアタンク内部圧力が0.3 MPaである。図8は各金属ブロック質量における衝撃力とエアタンク内部圧力との関係を示す。織物がN 3562, エアタンク容積が $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$, 衝突速度が3.43 m/sである。

いずれの図においても, 金属ブロック質量の増加にともない衝撃力が増加することがわかる。これは, 金属ブロック質量の増加によって衝突時の金属ブロックの運動エネルギーが増加するためと考えられる。

2種類の織物, 各種金属ブロックの質量において, 衝突速度またはエアタンク内部圧力を変化させて測定を行い, エアタンク容積が衝撃力に及ぼす影響について調べた。図9はその測定の一例である。各エアタン

ク容積における衝撃力と衝突速度との関係を示す。織物がN 3562, エアタンク内部圧力が0.3 MPaである。いずれにおいても, エアタンク容積の増加にともない衝撃力への影響は見られない。これは, 金属ブロックの織物展開面への押込み量に対してエアタンク容積が大きく, 織物に変形しやすく, エアタンクにおける容積変化の効果が現れなかったためと考えられる。しかし, エアタンク容積をさらに小さくした場合について内部圧力の変化の影響が表れるものと考えられ, その場合の検討が必要である。

3・4 織物の力学特性の影響 各種金属ブロックの質量とタンク容積において, 衝突速度またはエアタンク内部圧力を変化させて測定を行い, 織物の種類による影響について調べた。図10はその測定された結果の一例である。エアタンク容積が $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$,

Fig. 7 Relationship between impact force and collision velocity in various block mass (Sample: N 3562, Block mass: 0.150, 0.225, 0.300 kg, Air tank volume: $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$, Air pressure: 0.3 MPa)

Fig. 9 Relationship between impact force and collision velocity in various air tank volume (Sample: N 3562, Block mass: 0.225 kg, Air tank volume: 2.36, 4.71, 7.07, $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$, Air pressure: 0.3 MPa)

Fig. 8 Relationship between impact force and air pressure in various block mass (Sample: N 3562, Block mass: 0.150, 0.225, 0.300 kg, Air tank volume: $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$, Collision velocity: 3.43 m/s)

Fig. 10 Relationship between impact force and air pressure in various fabrics (Sample: N 3562 and N 4256, Block mass: 0.225 kg, Air tank volume: $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$, Collision velocity: 4.43 m/s)

衝突速度が3.43 m/s, 金属ブロック質量が0.225 kgである。

いずれにおいても、織物の違いによる衝撃力への影響は見られない。これは2種類ともに現在自動車に使用されているエアバッグの織物で、前報⁽⁵⁾で示したように2種類の織物の力学的特性が類似しているためだと考えられる。

ここで、織物の力学特性の影響を確認するために、N 3562を2枚重ねた場合について測定し、先に測定したN 3562の1枚の場合と比較した。図11はその測定された結果である。織物が2枚の場合で衝撃力が大きくなっている。これは、2枚の場合では織物の剛性が大きく、伸びにくく、緩衝作用が小さいためと考えられる。これらより織物の特性は衝撃力に影響していることを示している。

本実験装置は実際のエアバッグより小さく、衝突物に鼻など凹凸などを取り入れていないので、エアバッグ展開によるけがを軽減させるため緩衝基礎データとしては、さらに検討する必要がある。

4. エアバッグ緩衝のシミュレーション

圧縮空気によって展開された織物に一定速度を持つ金属ブロックを衝突させ、その衝撃力のシミュレーションを試みる。

前報⁽⁵⁾で提案した方法を利用して、エアバッグの織

物を直交異方性平面膜として、織物の主軸(たて糸とよこ糸)を L , T 方向における面内合応力ベクトル $\{N_p\}$ とひずみベクトル $\{\varepsilon_p\}$ の関係は式(1)で表す。

$$\{N_p\} = [D_p] \{\varepsilon_p\} \quad (1)$$

$$[D_p] = \frac{1}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \begin{bmatrix} E_L & \nu_{LT}E_T & 0 \\ \nu_{TL}E_L & E_T & 0 \\ 0 & 0 & G(1 - \nu_{LT}\nu_{TL}) \end{bmatrix}$$

ここで、 E_L , E_T はそれぞれ L 方向および T 方向の見かけの引張り剛性率 [N/m], G は見かけのせん断剛性 [N/m] である。 ν_{LT} , ν_{TL} はそれぞれ L 方向と T 方向の見かけのポアソン比である。

織物の力学特性は前報⁽⁵⁾と同様、実測で求めた。

本研究では大たわみ問題の解を、三角要素分割によるFEMと増分法を用いて求める。

まず、圧縮空気により膨らんだエアバッグの形状に対して、前報⁽⁵⁾のように、先細ノズルの臨界流れ理論を用いて、膨らんだエアバッグ内の体積、エアバッグ内とタンクとの空気圧力差などを考慮し、断熱状態エアバッグ内の圧力増加を算出し、エアバッグの形状を計算する。指定された圧力に至るまでその計算を繰り返す。

その後、図12のモデルに示されたように展開されたエアバッグに金属ブロックを一定な速度で衝突させ

Fig. 12 Model of the airbag for shock absorbing

Fig. 11 Relationship between impact force and air pressure in single and double of fabrics (Sample: N 3562, Block mass: 0.225 kg, Air tank volume: $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$, Collision velocity: 4.43 m/s)

Fig. 13 Comparison between experimental value and calculative value

ていく。織物の変位ベクトルを $\{u\}$ とすると、金属ブロックおよび織物の変位は次の式で示すことができる。

$$[m]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=0 \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ただし、 $[K]$ は大変形剛性マトリクスと初期応力マトリクスを含めた剛性マトリクスである⁽⁵⁾。 $[m]$ は質量マトリクスで、織物の慣性力を無視した。金属ブロックは剛体とする。

金属ブロックと接触部分のエアバッグの抗力は衝撃力とし、前報⁽⁵⁾で提案した方法で計算する。織物へのブロックの押込みより、エアバッグ内の体積が変化し、断熱状態を仮定したエアバッグ内の圧力増加を算出した。式(2)を用い、直接時間積分の陽解法により、各時間増分間で収束するまで反復計算する。

図13はその計算結果の一例である。織物サンプルはN3562、金属ブロック質量が0.225 kg、エアタンク容積が $9.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 、エアタンク内部圧力が0.1, 0.3 MPaである。●は測定値である。実線は本研究で提案されたモデルで計算されたものである。高い速度部分で若干誤差があるものの、計算値と測定値はほぼ傾向が一致しているので、シミュレーション方法の有効性が確かめられた。

5. ま と め

エアバッグの緩衝に関する基礎データを収集するために、物体がいろいろな条件での展開した布に衝突する際の衝撃力を測定できる装置を考案し、試作した。2種類のエアバッグ用の織物を用いて、織物内の衝突速度などいろいろな条件を変化させ、衝撃力への影響を調べた。

衝突速度の増加にともない衝撃力が増加する。エアタンク内部圧力の増加にともない衝撃力が増加する。衝突物体(金属ブロック)質量の増加にともない衝撃力が増加する。ただし本実験の範囲では、エアタンク容積の衝撃力への影響は見られなかった。織物の特性が

衝撃力に影響していることが分かった。

また、文献(3)で提案した計算法を利用して、エアバッグの緩衝特性をシミュレーションした。試作した装置を用いて測定した結果は、計算結果と一致し、その有用性が確認できた。

本研究で協力をいただいた豊田紡織(株)と東洋紡(株)に謝意を表します。また、本研究前期段階の仕事に参加した当時信州大学大学院生の若林康郎君にお礼を申し上げます。

本研究は文部科学省科学研究費補助金(COE形成基礎研究費; 10 CE 2003)および[(C)(2)11555070-00]の補助を受けて行った。

文 献

- (1) Simamura, M. et al., Injuries of car drivers depending on with or without Srs airbag In-depth accident study, *Spring Meeting of the Society of Automotive Engineers of Japan*, 20005270 (2000).
- (2) Oyama, M., A consideration of air bag deployed cases in collisions, *JARI Research Journal*, Vol. 20, No. 3 (1998), pp. 20-26.
- (3) Arai, Y. and Tateishi, K., Comparison of injuries to male and female occupants in real-world automobile accidents, *JARI Research Journal*, Vol. 24, No. 9 (2002), pp. 13-16.
- (4) Bao, L., Sakurai, M. and Kemmochi, K., Measurement of Impact Force when Airbag Inflates at High Speed, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72 (2006), pp. 2214-2218.
- (5) Bao, L., Takatera, M. and Kemmochi, K., Effect of Mechanical Properties of Fabrics on Impact Force, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 12 (2007), pp. 3193-3197.
- (6) Harris, M. and Crede, E., *Shock and Vibration Handbook*, (1990), McGraw-Hill.
- (7) Bao, L., Umeda, D., Sakurai, M. and Kemmochi, K., Shock Absorbing Characteristic of Laminated FRP Cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71 (2005), pp. 380-385.
- (8) Fukaya, K., Study on Usage of Safety Belt and Scope of Airbag for Fall Protection, *Research Reports of the National Institute of Industrial Safety*, NIIS-RR-2002 (2003), pp. 95-104.