面外圧力の作用下におけるゴム平板の貫通強度評価†

足立 忠晴* 猪狩 溪太** 石井 陽介***

Evaluating Penetration Strengths of Rubber Sheets under Transverse Pressure

by

Tadaharu ADACHI*, Keita IGARI** and Yosuke ISHII***

In this paper, penetration strengths of the natural and syntactic rubber sheets with thicknesses of 3.0 and 2.3 mm subjected to transverse pressure were determined when the small impactor having a weight of 24.8 g collided with the sheets by using the measurement system of impact load and sheet deflection based on electromagnetic induction phenomena. The rubber sheet set at the end of the pressure chamber was deformed initially by vacuuming or pressurizing the inside of the chamber before the penetration tests of the sheets. The histories of the impact force and sheet deflection were analyzed from the electromotive force generated in five coils near the deformed sheet when the impactor containing a neodymium magnet collided with the sheets according to Faraday's law of induction. Every sheet was penetrated when the impactor collided at approximate 60 m/s with the sheet under the initial transverse pressure of 40 or -40 kPa. Determining the absolute deflections from the position before applying the transverse pressure, the impact load-absolute deflection curves of the impact tests under the different transverse pressure conditions were mutually compared to evaluate the penetration strengths of the sheets. As a result, the critical condition for penetrating the rubber sheets was clarified not to be the maximum impact load but the absolute deflections at the maximum impact loads independently of the transverse pressure.

Key words:

Impact, Penetration, Rubber sheet, Transverse pressure, Impact load, Deflection, Electromagnetic induction.

1 緒 言

圧力容器または真空容器は、気体または液体の貯蔵容器、航空機、水中構造物、宇宙構造物などのように高い安全性と信頼性が要求される構造部品である。飛来物の衝突などにより容器の内外から気体または液体が漏洩することで、火災、爆発などの大規模な重大事故を引き起こすことがあり、容器の貫通強度の評価は重要な課題である。

貫通試験において、衝撃体の大きさは一般的に小さく、衝撃体にセンサーを取り付けることが難しく、また取り付けたととしてもセンサーからケーブルが衝撃体の運動を拘束することがある。また、試験体の慣性力により準静的な力学的平衡条件が満足されないため、衝撃体の支持反力から衝撃荷重を求めることが困難となることがある。以上のことから小形衝撃体が衝突したときの衝撃荷重を測定することが一般に難しい^{1),2)}。このような背景のために、構造物の貫通強度を評価するパラメータとして、衝撃体の衝突速度、運動エネルギーなどを採用しているのが現状である^{3)~12)}。衝突問題は衝撃体と試験体とが相互作用する2体問題であるので、異なる衝撃体が衝突する場合にはこれらのパラメータを直接使って貫通強度を評価

することができない。

以上のような背景に対して著者ら^{13)~17)}は電磁誘導現象に基づく新しい衝撃荷重の非接触測定法を提案している。磁石が埋め込まれた衝撃体が試験体であるゴムに衝突し貫通するとき、試験体近傍に置かれたコイルに発生する誘導起電力から衝撃体の変位および速度を測定する方法を提案し、高速度カメラにより撮影された結果と比較して定量的に妥当性を確認している¹³⁾。さらに複数のコイルを試験体近傍に設置し直列に接続することで誘導起電力の測定精度を向上させることで、衝撃体がゴム平板を貫通するときの衝撃荷重およびゴム平板のたわみを非接触に測定することを可能にし¹⁴⁾、高速度カメラにより撮影された衝撃体の挙動を撮影し、測定される衝撃荷重の時間変化の妥当性を定性的に確認している¹⁵⁾。さらに衝突速度を同様にコイルで測定することで衝撃荷重と試験体の変形を非接触に測定するシステムを構築した¹⁶⁾。また1 g未満の衝撃体を使用した小形落錘試験機をも開発している^{17),18)}。

実際の圧力容器の貫通現象を考えたとき、圧力容器には内圧が作用しており、貫通強度を評価するには作用する圧力の影響を考える必要がある。しかしながら面外圧

† 原稿受理 令和3年4月6日 Received Apr. 6, 2021 ©2021 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 豊橋技術科学大学 機械工学系 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘。

Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology, Hibarigaoka Tempaku, Toyohashi 441-8585.

** 豊橋技術科学大学 機械工学系 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 (現 凸版印刷)。

Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology, Hibarigaoka Tempaku, Toyohashi 441-8585. (Present, Toppan Printing Co. Ltd.,)

*** 正会員 京都大学 航空宇宙工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京大が丘。

Department of Aeronautics and Astronautics, Kyoto University, Kyoto daigaku-katsura, Nishikyoku-ku, Kyoto 615-8540.

力下における貫通強度について明らかにされていないのが現状である。

そこで本論文では面外圧力を受けた状態のゴム平板に衝撃体が衝突したときのゴム平板に作用する衝撃荷重およびたわみを電磁誘導現象に基づいて測定する装置を作製するとともに測定システムを構築し、ゴム平板の貫通強度に及ぼす面外圧力の影響を明らかにすることを目的とした。試験体であるゴム平板を圧力容器に取り付け、容器内を加圧あるいは減圧することで面外圧力を試験体に作用させた状態で磁石を埋め込んだ衝撃体を衝突、貫通させた。ファラデーの電磁誘導の法則¹⁹⁾に従って、試験体付近に置かれたコイルに生じる誘導起電力から衝撃荷重および試験体のたわみを測定し、その結果より貫通条件に及ぼす面外圧力の影響を明らかにした。

Table 1 Components of synthetic rubber.

Specimen component	Weight ratio (wt%)
Butadiene rubber	17.7%
Natural rubber	41.3%
Zinc oxide	1.8%
Stearic acid	1.5%
Carbon black	35.4%
Antioxidant	1.2%
Sulfur	1.1%

2 実験方法

2・1 試験片

試験片として、厚さ 3.0 mm の天然ゴムシートおよび厚さ 2.3 mm のカーボンブラックを混合した合成ゴムシートを使用した。合成ゴムの成分を Table 1 に示す。いずれのゴムシートとも直径 128 mm の円形とした。

2・2 衝撃体

衝撃体の先端形状が大きく影響する¹⁵⁾ことから、Fig. 1 に示されるように、ゴム平板を貫通させるために直径 14.9 mm および全長 41.6 mm の先端を尖らせた円柱状の形状の衝撃体を使用した。衝撃体の先端は曲率半径 3 mm、先端角 30° の軟鋼製の円錐であり、その後ろに直径 6 mm、長さ 6 mm のネオジウム磁石をシアノアクリレート接着

Fig. 1 Impactor. Unit: mm. Upper and lower parts with respect to center line are external and cross sectional views of impactor, respectively.

Fig. 2 Impact testing machine. Unit: mm.

Fig. 3 Details of coils and pressure chamber. Unit: mm.

剤により接着した。磁石の磁場を遮へいしないようにするとともに、後述される衝撃試験装置のバレル内との摩擦を軽減するために、ネオジム磁石全体を、旋盤で加工されたポリアセタール円筒で囲んだ。磁石とポリアセタール円筒ともシアノアクリレート接着剤で接着した。なお衝撃体全体の質量は 24.8 g であった。

2・3 衝撃試験装置

面外圧力を作用させた試験片に衝撃体を衝突させるために開発した衝撃試験装置の概要を Fig. 2 に示す。コンプレッサにより加圧された空気が溜められたエアチャンバのバルブを開放することで、内径 15 mm、長さ 500 mm のバレル内で衝撃体を加速して、試験片に衝突させた。衝撃体を加速する定格圧力は 1.0 MPa であり、本論文においてはバレル内の空気圧を 0.85 MPa とし衝撃体の衝突速度は 55 から 65 m/s の範囲であった。

試験片は圧力容器の左端部にフランジで挟むことにより固定した。コイルの詳細については後述される。試験片を固定し、さらに試験片に面外圧力を加える圧力容器の詳細を Fig. 3 に示す。圧力容器は、両端に衝撃体の磁場に影響を及ぼさないようにアルミニウム合金製のフランジを取り付けた内径 90 mm、外径 120 mm のアクリル円筒構造とした。試験片は内径 80 mm のフランジ A および内径 120 mm のフランジ B の間に挟むことにより固定され

た。圧力容器の他端はフランジ C および D にて閉じられ、フランジ D からコンプレッサあるいは真空ポンプにより圧力容器内を加圧あるいは減圧して、衝撃体を衝突させる前の試験片に面外圧力を作用させた。衝撃体の衝突により試験片がフランジから引き出されずに試験後も固定されていることを確認した。

本論文では、圧力容器内部の圧力を 40 あるいは -40 kPa として面外圧力を試験片に作用させ初期たわみを生じさせた。このときの試験片のたわみをレーザ変位計(LK-500, Keyence)により中心から半径方向に測定を行った。それぞれの試験片について測定された結果を Fig. 4 に示す。図中のたわみは面外圧力バレルと反対側(衝撃体が進行する方向)を正方向として表されている。フランジ A の内径がフランジ B の内径より小さいために、減圧のときの初期たわみの絶対値が大きい結果となっている。

3 測定システム

3・1 衝突速度の測定

磁石が埋め込まれた衝撃体が試験片に衝突するとき、試験片近傍に置かれたコイルに発生する誘導起電力より衝撃体の速度・変位、衝撃荷重および試験片のたわみを測定する。コイルはいずれもポリウレタンで被覆された直径 0.5 mm の銅線(2UEW-0.16, JIS C32022)を巻くことで作製した。

Fig. 3 に示されるように、衝突速度を求めるために、コイル 1 および 2 を試験片の手前に設置した。コイル 1 および 2 はそれぞれ 40 巻きとした。衝撃体内の磁石がコイルの位置に到達したとき、コイルの誘導起電力が 0 になることを利用する^{13), 20)}と、コイル 1 および 2 の誘導起電力が 0 となる時間 t_1 および t_2 より、次式で衝突速度 v_0 が求められる。

$$v_0 = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

ここで x_1 および x_2 はコイル 1 および 2 の位置を示す。

3・2 衝撃荷重と試験片のたわみの測定

衝撃体の速度・変位、衝撃荷重、試験片のたわみの時間変化を求めるために、Fig. 3 に示される試験片の反対側に設置されたコイル 3 から 5 を使用した。試験片に大きなたわみが生じたときにも精度良く測定するために、コイル 3 から 5 の巻数を試験片に近いコイル 3 から 5 まで、順次、巻数を増加させるものとして 60、120 および 180 とし、それらのコイルを直列に接続し誘導起電力を測定した¹⁴⁾。

誘導起電力の強度は磁石が埋め込まれた衝撃体の速度に比例し、単位速度あたりの誘導起電力は衝撃体の位置にのみ依存することが明らかになっている¹³⁾。そこで、まず試験片を設置しないで衝撃体を一定速度 v_0 で通過させて直列に接続されたコイルに発生する誘導起電力 V_0 を測定する。測定された結果より次式により単位速度あたりの誘導起電力 e を求め基準データとする。

(a) Natural rubber.

(b) Syntactic rubber.

Fig. 4 Radial distributions of initial deflection due to transverse pressure.

$$e(x) = \frac{V_0(x)}{v_0}, \quad (2)$$

ここで x は衝撃体の位置を示す。

試験片に衝撃体を衝突させたときの直列に接続されたコイルの誘導起電力を $V(t)$ とすると衝撃体の速度の時間変化 $v(t)$ は次式で求めることができる。

$$v(t) = \frac{V(t)}{e(x)}, \quad x = x(t). \quad (3)$$

以下の初期条件

$$t = t_1 \text{ のとき } x = x_1, \quad (4)$$

または

$$t = t_2 \text{ のとき } x = x_2, \quad (5)$$

のもとに式(3)を時間積分することで衝撃体の変位を求めることができる。

$$x(t) = x_i + \int_{t_i}^t v(\tau) d\tau \quad (i = 1 \text{ or } 2). \quad (6)$$

また式(3)を時間微分することで衝撃体の加速度 a が次のように求められる。

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt}. \quad (7)$$

試験片の固有振動数に対して衝撃体の固有振動数が十分に高いものとすれば、衝撃体を剛体として近似することが可能となるので、次式のように衝撃体の加速度に衝撃体の質量 m を乗じることで衝撃荷重 F を得ることができる。

(a) Transverse pressure: -40 kPa.

(b) Transverse pressure: 0 kPa.

(c) Transverse pressure: 40 kPa

Fig. 5 Specimens near collision point after impact tests. Specimen: natural rubber.

Fig. 6 Histories of electromotive forces. Specimen: natural rubber.

Fig. 7 Histories of impactor velocities. Specimen: natural rubber.

Fig. 8 Histories of impact loads. Specimen: natural rubber.

Fig. 9 Impact load-deflection curves. Specimen: natural rubber.

$$F(t) = m\alpha(t). \quad (8)$$

衝撃荷重が作用している時間範囲内では衝撃体と試験片は接触していることから、衝撃体の衝突開始からの変位 x を試験片のたわみとすることができる。

4 実験結果および考察

4・1 天然ゴムシート

天然ゴムシートを試験片として使用し、圧力容器内の初期圧力を $-40, 0$ および 40 kPa の 3 種類として、バレル内の加速圧力を 0.85 MPa とし約 60 m/s の速度で衝撃体を試験片に衝突させ、いずれも衝撃体が貫通した。試験後のそれぞれの試験片について、衝撃体の衝突点付近を衝撃面側から撮影した写真を Fig. 5 に示す。いずれの試験片とも、衝撃体の衝突点付近に約 12 mm の長さのき裂が生じたことがわかった。

測定された誘導起電力の時間変化の例を Fig. 6 に示す。図の横軸は誘導起電力が 0 となるコイルの位置に衝撃体内の磁石があるときからの時間を示す。細い実線は基準データであり試験片がなく一定速度でコイルを通過したときの結果であり、他の線は試験片に衝撃体に衝突、貫通したときの結果である。圧力容器内が加圧されている場合は外側に試験片が初期変形していることから、衝撃体が試験片に衝突するために最も早く基準データより低い誘導起電力となり、圧力が作用していない場合、減圧されていない場合の順に低い誘導起電力を示していることが確認される。

Fig. 7 に誘導起電力から衝撃体の速度の時間変化を求めた結果を示す。横軸は衝突開始からの時間を示す。圧力容器内が加圧されていない場合には減速した後一定の速度となっていることがわかる。これは試験片を衝撃体が貫通した後に一定速度で試験片から離れていることがわかる。これに対して加圧されている場合は衝撃体が減速を続け、逆に減圧されている場合は衝撃体が加速していることがわかる。これは空気が圧力容器から噴出あるいは容器内に吸い込まれ、貫通後の衝撃体の運動に影響しているものと考えられる。

Fig. 8 に衝撃荷重の時間変化を示す。横軸は衝撃体の衝突からの時間である。圧力容器内を加圧した場合（初期圧力 40 kPa）に衝突直後に荷重の変動がみられるが、直線状に荷重が増加し最大値となった後に荷重が直線状に減少している。最大値で衝撃体の先端が試験片を貫通したものと判断される。しかし、試験片が貫通したときに放射状にき裂が進展するように破壊することはなく、シートに生じたき裂を進展させながら衝撃体が移動するために徐々に荷重が減少している。また、荷重の時間変化は初期面外圧力に依存していることがわかる。

衝撃荷重および衝撃体変位の時間変化から衝撃荷重—試験片のたわみ曲線を Fig. 9 のように求めた。なお衝撃荷重の作用開始のときの試験片のたわみを 0 として曲線を作成した。面外圧力 40 kPa のときは荷重に若干の変動がみられるが、衝撃荷重の最大に至るまでの荷重とたわみは、ほぼ同様の線形関係を示しており、初期圧力の大きさにかかわらず、試験片の同じ曲げ剛性となることが明

(a) Transverse pressure: -40 kPa.

(b) Transverse pressure: 0 kPa.

(c) Transverse pressure: 40 kPa

Fig. 10 Specimens near collision point after impact tests. Specimen: syntactic rubber.

Fig. 11 Histories of impact loads. Specimen: syntactic rubber.

Fig. 12 Impact load-deflection curves. Specimen: syntactic rubber.

らかになった。しかし、貫通が生じた衝撃荷重の最大値およびそのときのたわみに一定の相関がないように思われ、天然ゴムシートの貫通条件と考えられる衝撃荷重の最大値あるいはたわみの値には初期圧力が影響することが明らかとなった。

4・2 合成ゴムシート

合成ゴムシートを試験片として使用し、压力容器内の初期圧力を -40 、 0 および 40 kPaの3種類として、バレル内の加速圧力を 0.85 MPaとし約 60 m/sの速度で衝撃体を試験片に衝突させた。いずれの場合とも衝撃体は貫通した。試験後のそれぞれの試験片について、衝撃体の衝突点付近を衝撃面側から撮影した写真をFig. 10に示す。いずれの試験片とも衝撃体の衝突点付近に約 15 mmの長さのき裂が生じることがわかった。

天然ゴムシートと同様に誘導起電力から求められた衝撃荷重の時間変化をFig. 11に示す。天然ゴムシートとは異なり、最大値までの荷重速度に対して貫通が生じた後の荷重が急激に減少していることがわかる。

衝撃荷重－試験片のたわみ線図をFig. 12に示す。たわみが 20 mm付近までは曲線の勾配がほぼ同じであること

がわかる。その後、加圧されている場合は勾配が小さいが、加圧しない場合および減圧されている場合は、ほぼ初期と同じ勾配で荷重が増加し最大値に至り、荷重が減少している。初期加圧されている荷重が急激に減少しており、最大値のときに試験片にき裂が生じて衝撃体が試験片を貫通したと考えられる。

4・3 考察

面外圧力を負荷し試験片が変形している状態で衝撃試験を行っていることから、Fig. 4におけるゴムシート中心の初期たわみを用いて、面外圧力を作用させる前の位置を 0 としたときのたわみに移動させた衝撃荷重－たわみ線図を改めて作成し、その結果を天然ゴムシートおよび合成ゴムシートについてそれぞれFig. 13および14に示す。衝撃荷重－たわみ線図において、いずれのゴムシートとも貫通が生じたと思われる衝撃荷重の最大値には特に相関がみられないことがわかる。これに対して、荷重が最大となるときの移動させたたわみでは、それぞれのゴム材料ごとに、ほぼ同様の値となっている。

そこで衝撃体が貫通したとき、すなわち衝撃荷重の最大値および最大荷重のときのたわみについて、天然ゴム、

Fig. 13 Impact load–shifted deflection curves. Specimen: natural rubber.

Fig. 14 Impact load–shifted deflection curves. Specimen: synthetic rubber.

Fig. 15 Impact loads and deflections at penetrations of specimens.

合成ゴムの結果を Fig. 15 にまとめる. グラフにおいて白抜きおよび黒色の点はそれぞれ天然ゴムおよび合成ゴムの結果を示す. 試験片ごとの衝撃荷重の最大値については合成ゴムでは大きな差がみられる. これに対して面外圧力が作用する前に移動させたたわみはゴムごとに近い値となっていることがわかる. 以上のことから, ゴムの貫通は荷重ではなく, ゴムの圧力が作用する前からのたわみにより決定されることが明らかになった.

5 結 言

面外圧力を受けた状態のゴム平板に衝撃体が衝突したときのゴム平板に作用する衝撃荷重およびたわみを電磁誘導現象に基づいて測定する装置および測定システムを構築し, ゴム平板の貫通強度に及ぼす面外圧力の影響を明らかにすることを目的とした. 試験体であるゴム平板を圧力容器に取り付け, 容器内を加圧あるいは減圧することで面外圧力を試験体に作用させた状態で磁石を埋め込んだ衝撃体を衝突, 貫通させた. 試験体付近に置かれたコイルに生じる誘導起電力から衝撃荷重および試験体のたわみを測定した. その結果, ゴム平板の貫通強度は, 面外圧力が作用する前からのたわみにより決定されることが明らかとなった.

参 考 文 献

- 1) T. Adachi and Y. Ishii, "Impact load", *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, Vol. 17, pp.167–170 (2017).
- 2) T. Adachi and Y. Ishii, "Measurement method of impact load based on the electromagnetic induction phenomena", *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol. 69, pp.192–197 (2020).
- 3) J.A. Zukas, T. Nicholas, H.F. Swift, L.B. Greszczuk and D.R. Curran, "Impact dynamics", (1982) John Wiley & Sons.
- 4) H. Matsumoto, M. Arai, T. Adachi and S. Ujihashi, "Evaluation of perforation strength for CFRP laminates", *Transactions of the JSME, Series A*, Vol.57, No.535, pp.583–590 (1991).
- 5) T. Adachi, M. Okazaki, S. Ujihashi and H. Matsumoto, "Residual bending strengths of CFRP laminates after impact", *JSME International Journal, Series A*, Vol.38, pp.370–377 (1995).
- 6) H. Morita, T. Adachi, Y. Tateishi and H. Matsumoto, "Characterization of impact damage resistance of CF/PEEK and CF/Toughened epoxy laminates under low velocity impact tests", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.16, pp.131–143 (1997).
- 7) S. Abrate, "Impact on composite structures", (1998) Cambridge University Press.
- 8) J.D. Walker, "Hypervelocity penetration modeling: Momentum vs. energy and energy transfer mechanism", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.26, pp.809–822 (2001).
- 9) N.K. Bourne, "On the failure and dynamic performance of materials", *Experimental Mechanics*, Vol.52, pp.152–159 (2012).
- 10) M. Omidvar, M. Iskander and S. Bless, "Response of granular media to rapid penetration", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.66, pp.60–82 (2014).
- 11) T.L. Warren, "The effect of target inertia on the penetration of aluminum targets by rigid ogive-nosed long rods", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.91, pp.6–13 (2016).
- 12) V. Antonucci, F. Caputo, P. Ferraro, A. Langella, V. Lopresto, V. Pagliarulo, M.R. Ricciardi, A. Riccio and C. Toscano, "Low velocity impact response of carbon fiber laminates fabricated by pulsed infusion: A review of damage investigation and semi-empirical models validation", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol.81, pp.26–40 (2016).
- 13) T. Adachi, M. Osada and K. Watanabe, "Measuring behavior of impactor penetrating through polymer sheet based on electromagnetic induction", *Key Engineering Materials*, Vol.715, pp.122–127 (2016).
- 14) T. Adachi, N. Matsukawa, C. Takamizo and Y. Ishii, "Measuring method of impact load in collision of small impactor based on electromagnetic induction", *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, Vol.17, pp.231–236 (2017).
- 15) T. Adachi, N. Matsukawa, C. Takamizo and Y. Ishii, "New diagnostic method for evaluating penetration strength of rubber sheet by measuring electromagnetic induction", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.121, pp.172–179 (2018).
- 16) T. Adachi, Y. Mochizuki and Y. Ishii, "Chapter 1. Measurement system of impact force and specimen deflection based on electromagnetic induction phenomena", *Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines*, Eds. V.P. Matveenko, M. Krommer, A. Belyaev and H. Irschik, pp.1–9 (2019) Springer.
- 17) T. Adachi and Y. Ishii, "Application of electromagnetic induction for impact load measurement", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.920 (2020), p.012027 (pp.1–6).
- 18) T. Adachi, T. Ozawa and Y. Ishii, "Development of small drop-weight testing machine based on electromagnetic induction", *Experimental Mechanics*, (in press).
- 19) K. Ida, "Engineering electromagnetics, 3rd ed.", pp.515–563, (2015), Springer.
- 20) R.L. Moody and C.H. Konrad, "Magnetic induction system for two-stage gun projectile velocity measurements", *Sandia Report, SAND84-0638 UC-13* (1984).