

衝撃力を受ける膜の損傷挙動

小川 欽也, 杉山 文子

梗概

衝撃荷重をうける耐ガス透過性高分子膜の変形挙動を引張試験によって調べるとともに、二種類の形状の圧子を用いた貫通試験を行い、貫通挙動に及ぼす衝突速度の影響を調べた。引張変形での応力-ひずみ関係はひずみ速度の影響を強く受け、ひずみ速度の増加とともに、応力の上昇と、破断ひずみの低下が観測された。貫通挙動は速度の影響を受けるが、慣性効果の寄与は低く、主として変形挙動のひずみ速度依存性に依存していることが明らかになった。有限要素解析により、大きなたわみを伴わずに衝撃貫通が行われる要因が、高ひずみ速度での破断伸びの低下によることを明らかにした。

1. 緒言

宇宙における展開構造物や地上における大規模空間構造物を形成する上で、膜構造は極めて有効であり、今後益々発展してゆくものと考えられる。しかしながら、膜構造を広範に応用するためには、静的荷重下での変形や強度のみならず、突発的な衝突や、急激な振動荷重での変形や強度を明らかにすることが不可欠である。特に、気球や飛行船に用いられる耐ガス透過性膜においては、気密性の確保が不可欠で、高速飛来物による貫通損傷を評価することは極めて重要である。

金属材料を始めとする従来の構造物材については、衝撃荷重下での挙動が徐々に明らかになってきた[1]が、膜構造の主要構成要素である高分子材料の衝撃強度については、近年ようやく強い関心[2]が払われるに至っている段階で、特に膜状態での衝撃強度や変形挙動についてはいまだに十分明らかにされていない。

そこで本研究では、衝撃荷重下での膜構造の損傷として貫通挙動を取り上げ、材料強度のひずみ速度依存性に注目しながら明らかにすることを目的とする。

2. 試料および試験方法

2.1 膜材

用いた膜材はポリエチレンラミネートエポキシフィルム (厚さ $27\mu\text{m}$, 単位面積当たり質量 26g/m^2) であり、まず引張り特性を調べるため、幅 900mm の反物状素材より幅方向と巻き取り方向 (90° 方向) にダンベル状の引張試験片を採取した。試験片両端のつかみ部表裏には塩化ビニール

板を接着し、これを試験機チャック部に装着して変形試験を行った。オートグラフを用いた準静的試験での引張速度は 1mm/min から 500mm/min 、後に述べるホプキンソン棒型衝撃試験装置を用いた衝撃試験での引張速度は $2\sim 6\text{m/sec}$ の範囲である。

貫通試験は内径 60mm の円環に周辺を固定された膜の中心部に図1に示した二種類の先端形状の圧子を押し込むことで行った。膜に接触する円環表面には研磨紙を貼付し、上下の円環をネジで締め付けることによって十分な摩擦力を発生させ、固定縁での膜のすべりの生じるのを防止した。圧子の押し込み速度は準静的試験では 1mm/min から 500mm/min 、衝撃試験では、 1m/sec から 7m/sec の範囲であった。試験温度はいずれの場合も、室温 ($12\pm 2^\circ\text{C}$) である。

2.2 衝撃試験装置

図2には衝撃引張り試験に用いたホプキンソン棒型衝撃試験装置[3]並びに測定回路を示す。空気圧で加速された打撃管が入力棒左端のヨーク部に

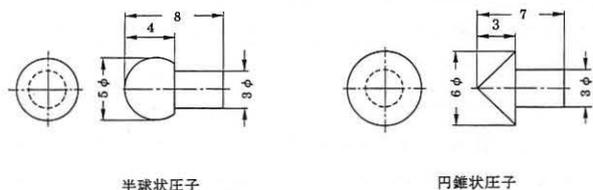


図1 圧子の形状と寸法

衝突すると、入力棒に持続時間 $T=2L_0/C_0$ (L_0 : 打撃管長さ, C_0 : 縦弾性波速度) の引張り入射応力波 σ_I が発生し、入力棒の右端に接続された試験片に到達する。入射応力波の一部は試験片を急激に変形させながら透過応力波 σ_T として出力棒に伝播し、残りは反射応力波 σ_R として入力棒を左方へ伝播する。衝撃変形中の試験片の応力 σ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、ひずみ ϵ は次のように与えられる[4]。

$$\sigma = \frac{A}{A_0} (\sigma_I + \sigma_R + \sigma_T) / 2 \cong \frac{A}{A_0} \sigma_T$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{L\rho C_0} (\sigma_I - \sigma_R - \sigma_T) \cong \frac{2}{L\rho C_0} (\sigma_I - \sigma_T) \quad (1)$$

$$\epsilon = \int \dot{\epsilon} dt$$

ここに、入、出力棒の断面積を A 、密度を ρ 、試験片の断面積を A_0 、長さを L とする。入射、反射、透過応力波は入、出力棒に貼付したひずみゲージによって捉えられ、ホイートストブリッジによって電圧出力に変換され、60dB 程度増幅された後、トランジェントレコーダに高速記録される。本研究では、膜材の変形応力が非常に小さいため、拡大図に示すように、試験片取り付け部近傍に設けた小断面の荷重感知部に半導体ひずみゲージを貼付し、透過応力波を高精度に測定することを試みた。

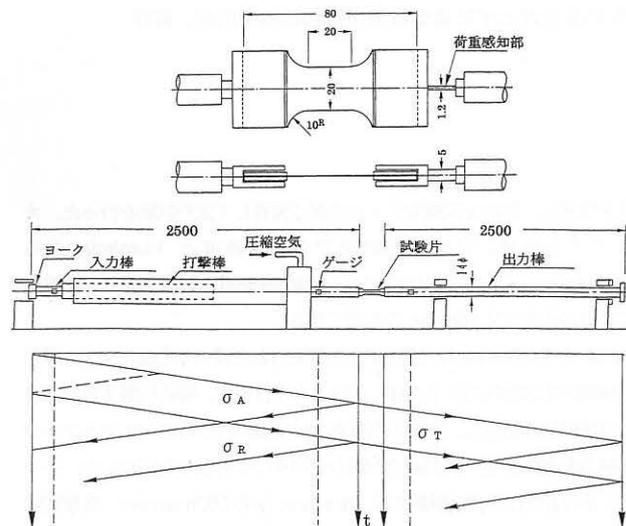


図2 ホプキンソン棒型衝撃引張試験装置と応力波伝播

図3には、衝撃貫通試験装置を示す。圧子を取付けた打撃棒(直径12mm、長さ300mmの不銹鋼)は空気圧によって加速され、設置された膜に衝突する。打撃棒の初速度は、速度測定装置内に設けた二本の平行な赤外線打撃棒が遮る時間間隔を測定することで得られる。膜を貫通する際の貫通力は数kgfで、貫通が完了するまでの時間は数msであるから、この間に生じる速度変化は数cm/secとなり、初速度に比べて十分無視できる。したがって、貫通はほぼ一定の速度で行われると見なせ、貫通時の変位量は初速度と経過時間を用いて評価できる。荷重は圧子近傍の小断面積部に貼付した半導体ひずみゲージからの出力として捉えた。この小断面積部は長さ10mmであり、この部分での応力波は短時間に繰り返す往復するため、圧子先端部にかかる荷重は十分な精度で捉えることができる。

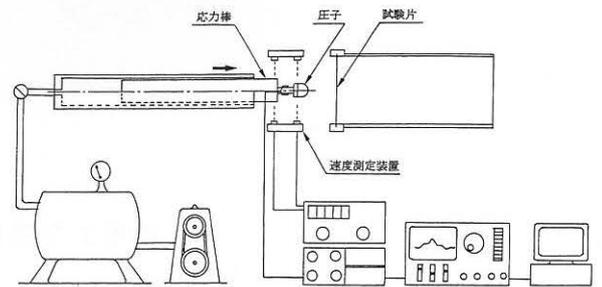


図3 衝撃貫通試験装置と測定回路

3. 試験結果ならびに考察

3.1 引張応力-ひずみ関係

図4a,bには幅方向と、それに直角方向(巻き取り方向)の引張試験によって得られた応力-ひずみ関係をひずみ速度をパラメータに示す。ここに、応力として単位幅あたりの引張力をを用い、ひずみは伸びを平行部長さで除した公称ひずみで表した。いずれの場合も、応力-ひずみ関係は、弾性領域を過ぎるとわずかな遷移領域を示した後、ほぼ一定の加工硬化率を伴って応力が上昇するが、くびれなどの局所変形を生じることなく、急激な破断が生じる。ひずみ速度の増加によって塑性変形応力は上昇するが、加工硬化率は殆ど変化しない。また、破断応力はひずみ速度の増加によって上昇する傾向が認められる。一方、破断の生じるひずみは、ひずみ速度の増加とともに減少し、衝撃変形では小さな値を示す。引張方向の違いは降伏応力と加工硬化率に顕著に現れているが、ひずみ速度依存性については大きな違いは認められない。また、破断ひずみは巻き取り方向では小さい。

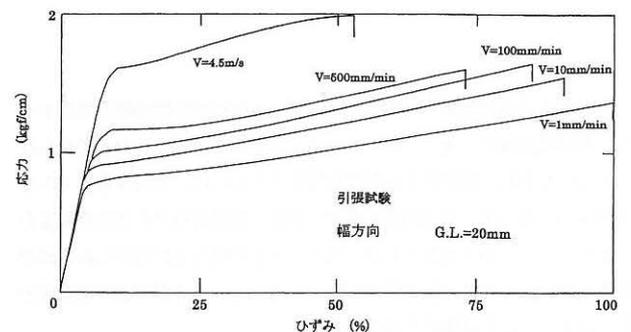


図4a 引張応力-ひずみ関係(幅方向)

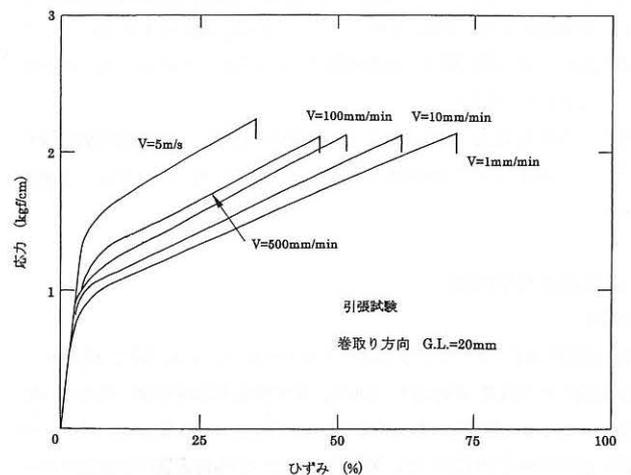


図4b 引張応力-ひずみ関係(巻き取り方向)

図 5a,b には幅方向と、それに直角方向について、ひずみ 10, 30, 50% での応力と、破断ひずみのひずみ速度依存性をそれぞれ示す。いずれの場合も、ひずみ速度の増加とともに強度は上昇し、大きいひずみ速度依存性を示すことが分かる。また、破断ひずみはひずみ速度の対数に対してほぼ線形に減少することがわかり、より高いひずみ速度においては極めて小さな伸びしか示さず、脆性的に破断する危険性のあることが推測できる。

図 6 には、衝撃引張試験で得られた幅方向の試験片の破断状況を示す。変形速度の違いによっても破断の様子は殆ど変わらず、一様な変形が進行した後、局所的な変形、すなわち、くひれを殆ど生じないで破断する。したがって、破断そのものは極めて脆性的である。なお、巻き取り方向の場合にも、破断そのものは同様に極めて脆性的である。

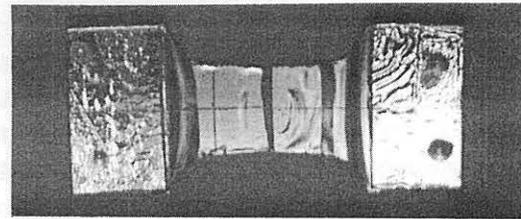


図 6 衝撃引張破断後の試験片(幅方向)

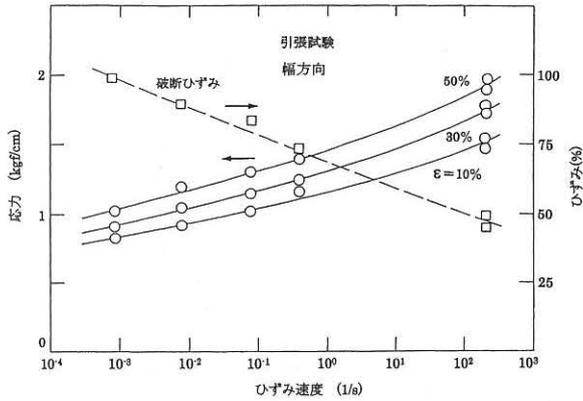


図 5a 応力と破断ひずみのひずみ速度依存性(幅方向)

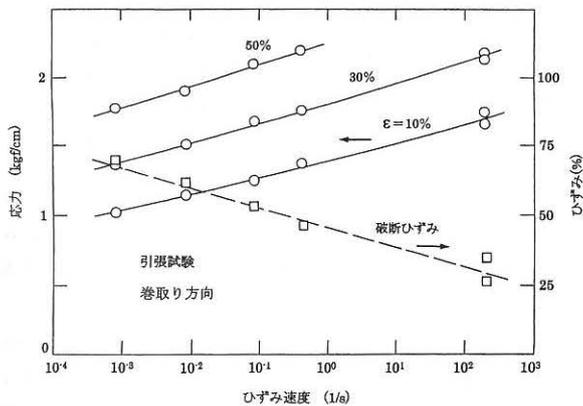


図 5b 応力と破断ひずみのひずみ速度依存性(巻き取り方向)

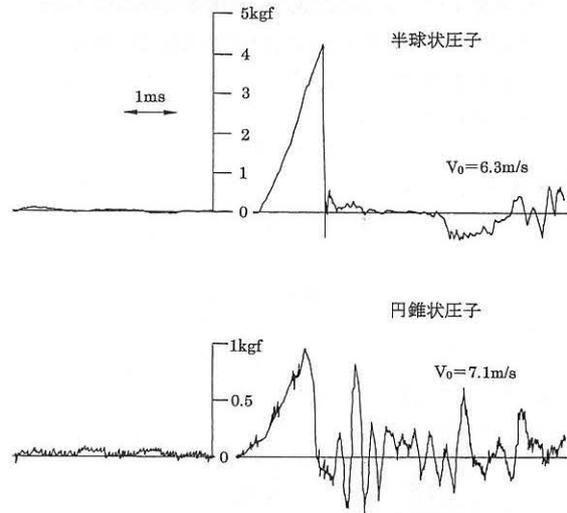


図 7 衝撃貫通時の荷重—時間関係

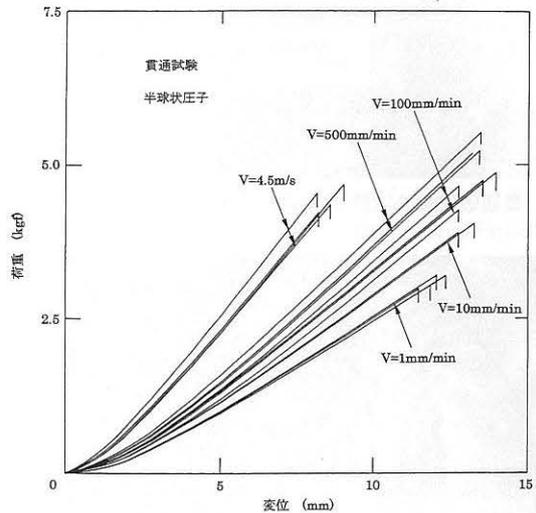


図 8 貫通試験での荷重—変位関係(半球状圧子の場合)

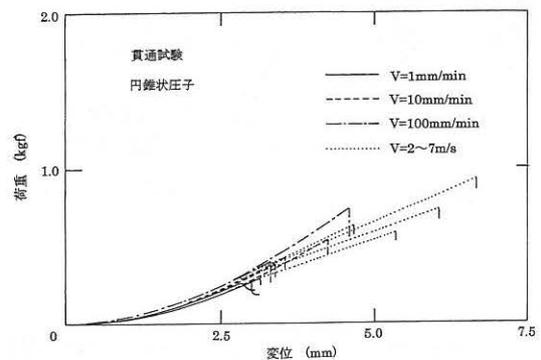


図 9 貫通試験での荷重—変位関係(円錐状圧子の場合)

3.2 貫通試験での荷重—変位関係

図 7 には、衝撃貫通試験での荷重の時間的変化の例を初速度 V_0 の値とともに示す。半球状の圧子を用いた場合、最高荷重に到達後、急激な荷重低下が見られ、以後殆ど無荷重で圧子が進んでいることが分かる。このことは膜の破壊が一度に生じ、貫通が短時間に終了することを示している。一方、円錐状の圧子の場合には、最高荷重に到達後、急激な荷重低下が起こるが、その後再び荷重の上昇するのが見られる。後に試験片に生じた亀裂について示すが、ここでの最高荷重は亀裂の発生に対応するものと考えられる。このような亀裂によって膜の一部は開口されるが、その開口量は圧子全体を貫通させるには不十分であり、圧子の進行に伴って徐々に開口量を増すための荷重が必要である。これが、最高荷重後に見られる荷重の再上昇である。

図8には、半球状の圧子による貫通試験での荷重-変位関係を示す。変位とともに徐々に荷重が上昇した後、破壊によって急激に荷重が低下し、膜が貫通される。貫通速度が増加すると、荷重-変位曲線の勾配は増加し、貫通強度も上昇する。また、貫通時の変位量もやや増加する傾向を示す。しかし、衝撃変形の場合には、貫通時の変位は著しく減少し、速度100mm/minから500mm/minの準静的な貫通試験に比べて貫通荷重はやや低下する傾向が認められる。

図9には、円錐状の圧子による貫通試験での荷重-変位関係を示す。半球状の圧子の場合と同様に変位とともに徐々に荷重が上昇した後、亀裂の発生によって急激に荷重が低下する。この時点では亀裂による開口量は十分でないため、図7について述べたように、引き続き圧子が膜を貫通するための荷重が僅かに観測される。貫通時の荷重は極端に低く、亀裂発生は材料の局所的な状況に左右されるため、貫通速度の増加による変化は明瞭ではないが、破壊荷重は増加する傾向が認められる。

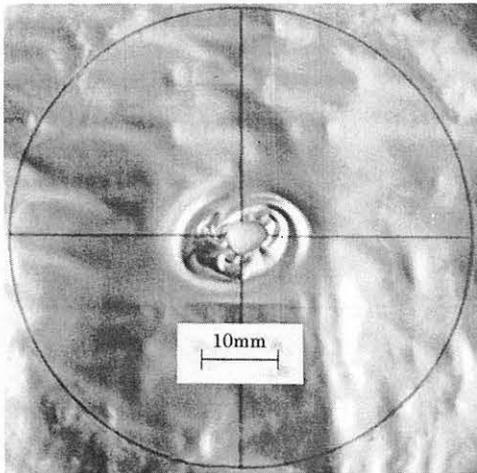


図10a 貫通破壊後の試験片(半球状圧子, 貫通速度 1mm/min)

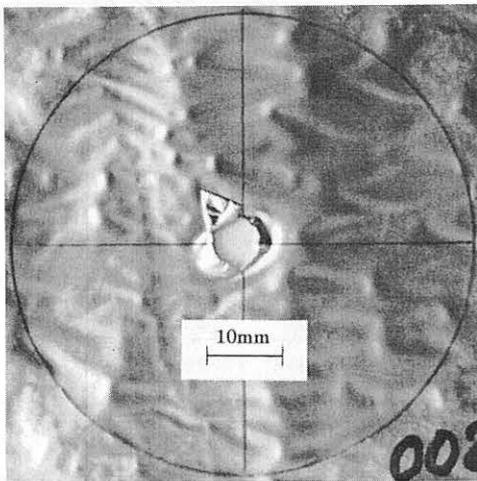


図10b 貫通破壊後の試験片(半球状圧子, 貫通速度 2.3m/s)

3.3 破壊状況

図10aには、半球状の圧子による貫通速度1mm/minでの破壊状況を示すが、ほぼ円形状の貫通穴周辺には顕著な皺が見られる。これは、大きな塑性変形が生じた後、貫通が行われたことを示している。図10bには、

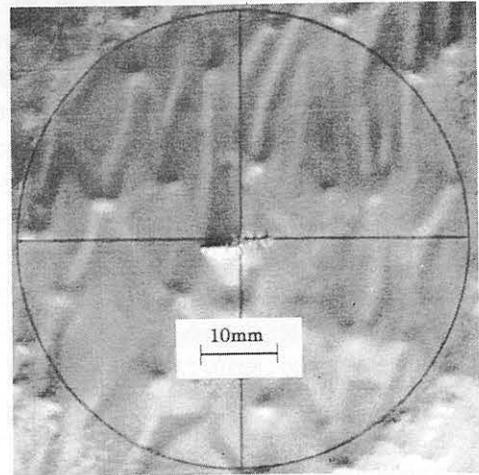


図11a 貫通破壊後の試験片(円錐状圧子, 貫通速度 1mm/min)

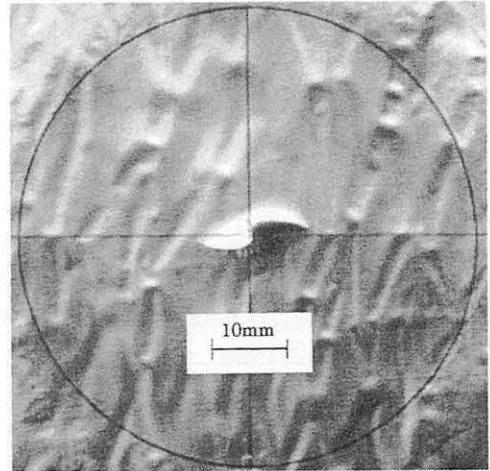


図11b 貫通破壊後の試験片(円錐状圧子, 貫通速度 7.0m/s)

貫通速度約2.3m/sで得られた破壊状況を示す。ほぼ円形状の破壊片が貫通穴に付着しており、圧子径とほぼ同径の円形状の亀裂発生によって貫通が行われたことが分かる。この状況は低速の貫通試験でも同じである。貫通孔周辺には僅かの皺が認められるのみである。

図11aには、円錐状の圧子による貫通速度1mm/minでの貫通破壊状況を示す。二方向に進展する亀裂が観察されるが、これらの亀裂による開口量が不十分であるため、この時点では貫通は完了しておらず、最大荷重値後の急激な荷重の低下はこれらの亀裂の発生に対応している。これら亀裂の進展方向は素材の幅方向(図の横方向)に一致しており、フィルムの巻き取り方向への延伸によって大きな予変形を与えられた結果、図4bの応力-ひずみ関係に見られるように巻き取り方向の破断ひずみが幅方向に比べて小さくなり、モードI型の亀裂が幅方向に進展しやすくなったものとして理解できる。亀裂周辺には皺は認められず、殆ど塑性変形を伴わないで亀裂が発生したことを示している。

図11bには、貫通速度7m/sでの貫通破壊状況を示す。亀裂は最初、幅方向(図の横方向)とは異なった方向に発生するが、急速に進展方向を変化させて、幅方向へ進展しているのが分かる。すなわち、衝撃荷重下では、材質的な不均一性や局所的な応力状況によって支配される方向に亀裂が発生しても、マクロな進展は材質に固有な方向に沿っておこることが分かる。図11aの場合と同様に、亀裂周辺に顕著な皺は認められない。

このように、いずれの圧子についても、衝撃貫通の場合には準静的な場合とはことなった挙動をすることが分かった。このことは、変形そのもの

が準静的な場合と異なっていることを示唆している。そこで、有限要素法を用いて半球状圧子による貫通時の変形状況をシミュレートした。

3.4 有限要素解析

用いたプログラムはANSYS(Ver.5.7)であり、軸対称1/4円膜モデルについて解析を行った。構成式は等方性材料として取り扱い図4a,bに示した応力-ひずみ関係を平均化したbi-linearとして近似した弾塑性応力-ひずみ関係にひずみ速度効果を取り入れた。また、圧子と膜との間には摩擦が働かないとした。

図12には、貫通速度1mm/minと4.5m/sの場合について求めた、荷重-変位関係を先に示した実験結果と比較して示す。ここに示した結果では高速貫通試験に対してひずみ速度の効果を取り入れた応力-ひずみ関係を用いて動解析しているが、ひずみ速度効果を見捨てた準静的な応力-ひずみ関係を用いて4.5m/sの貫通速度に対する解析を行うと、貫通速度1mm/minの場合と殆ど同じ荷重-変位関係が得られた。このことは、ここで取り扱うような薄膜の場合、5m/s程度の貫通試験では、慣性力項の効果は殆ど無視できることを意味している。すなわち、荷重-変位関係の変化は構成式の変化によるものであり、材料のひずみ速度依存性が大きく影

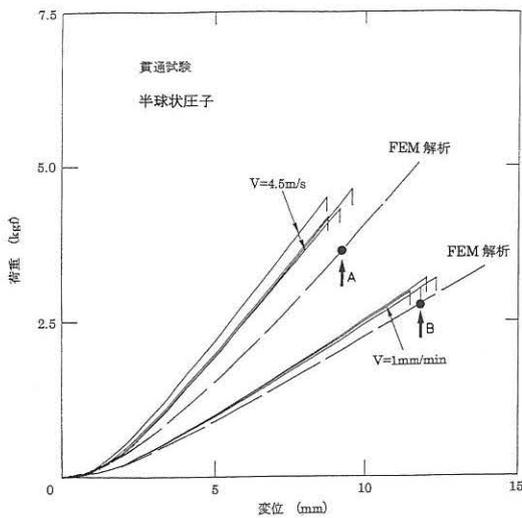


図12 貫通時の荷重-変位関係(FEM解析と実験結果)

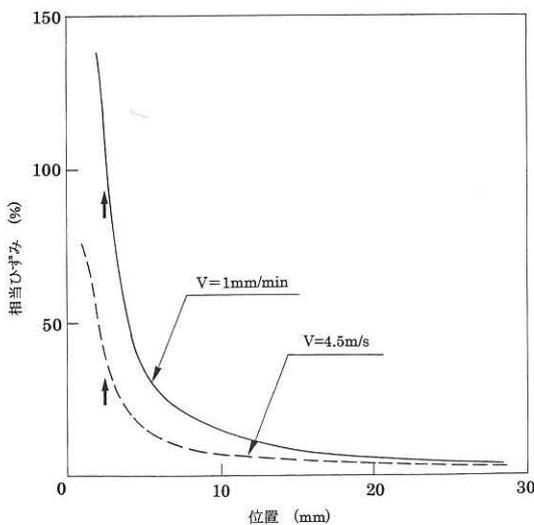


図13 貫通時の相当ひずみ分布(FEM解析結果)

響していることになる。いずれの場合も、解析結果は実験結果に比べて荷重が低くなっているが、この原因としては圧子と膜との間に働く摩擦の効果が考えられる。実験で貫通が生じた変位に対応するA,B点での相当ひずみの分布を図13に示す。

圧子近辺での急激な変形の増加が見られ、矢印で示した圧子と膜とが接する境界付近での相当ひずみは、貫通速度1mm/sの場合には約100%、貫通速度4.5m/sの場合には約40%となる。これらの値は図5に示した結果とほぼ対応しており、小さな変位で高速貫通が生じるのは、高ひずみ速度下で、膜の破断ひずみが低下するためであると考えられる。また、低速の貫通では、貫通穴周辺に大きな変形が生じるため、貫通後にはこれが皺として残存することになる。一方、衝撃貫通では、貫通穴周辺での変形は相対的に小さいため、貫通後も目立った皺は発生しないと考えられ、実験結果と良く対応する。ここでの解析では、圧子と膜の間に摩擦が働かないと仮定しているため、膜の最大ひずみは圧子の先頂部に接した膜の中心部で生じ、亀裂はそこから発生することになるが、図10に示した実験結果では、圧子とほぼ同径の円形状破片が生じ、圧子と膜とが接する境界付近に亀裂が生じたことが分かる。このことは、摩擦によって圧子に接した膜部分の変形が拘束され、圧子と膜とが接する境界付近に変形が集中した可能性を示唆している。

4. 結論

耐ガス透過性膜材ポリエチレンラミネートエポキシフィルムについて引張り試験および貫通試験を実施して、衝撃力を受ける膜の強度と変形挙動を調べた。得られた結果は次の通りである。

- (1) 膜の強度はひずみ速度依存性を示し、ひずみ速度の増加とともに上昇する。
- (2) 破断ひずみはひずみ速度依存性を示し、ひずみ速度の増加とともに低下する。
- (3) 衝撃荷重下での貫通においては、塑性変形によるエネルギー吸収効果は減少し、大きなたわみや変形を伴わないで貫通が生じ得る。

今後の課題としては、膜を構成しているそれぞれの要素(エポキシ、ポリエチレン、等)について強度のひずみ速度依存性を明らかにし、目的に応じて最適な膜構成を実現することが必要である。

謝辞

本研究の遂行に際して、能村膜構造技術振興財団より研究助成をいただきました。ここに、記して感謝いたします。

参考文献

- (1) 例えば、J.A.Zukas: High Velocity Impact Dynamics, Wiley-Interscience Pub., 1990.
- (2) F.J.Zerelli and R.W.Armstrong: Thermal activation based constitutive equations for polymers, 6th Intern. Conf. on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, DYMAT2000, pp.3-8, 2000.9.
- (3) 小川欽也: チタン合金時効材の衝撃引張強度, 材料, pp.198-203, 2001.3.
- (4) H.Kolsky: An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading, Proc. Phys. Soc., B62, pp.676-685, 1949.

DAMAGE CHARACTERISTIC OF MEMBRANE UNDER IMPACT LOADING

Kinya Ogawa*¹
Fumiko Sugiyama*¹

SYNOPSIS

In this paper, perforation of polymer membrane under impact load has been focused. Uni-axial tensile tests were carried out to confirm the strain rate effect on the stress-strain relations. It is found that the stress increases with rise of strain rate, while the fracture strain significantly decreases. Two kinds of indenter, semi-spherical and circular cone, were used for the perforation experiment, and load-deflection relations were identified in the wide range of loading rate. Perforation under impact load proceeded at much smaller deflection than the case of static loading, and large plastic deformation was not associated in the adjacent region of penetration. Dynamic finite element analysis(FEM) was performed to clarify the characteristics of the present experiment as well as to predict the load-deflection relations. It is convinced that dynamic perforation behaviour mainly depends on the constitutive equation of membrane material at high strain rate, while the inertia effect does not play a predominant role in the circumstances employed here.

*1 Division of Aeronautics and Astronautics, Graduate School of Engineering, Kyoto University