繊維・織物の衝撃強さ

石 川 欣 造*

1. はし が き

繊維材料の衝撃時の挙動の検討は実用面よりの必要性和ともに、内部構造との関連においても重要性を増大している。

たとえば人員、物資投下用、航空機減速用パラシュート、パラシュートロープ、各種ロープ、タイヤコード、ベルト類、縫糸など多分野において実用上の解決を要請されている。一方高速下の大変形についての研究は粘弾性的検討をさらに進めるものとして意義も大きい。繊維材料の衝撃挙動の詳細については幸い近年アメリカでよくまとめられた参考書¹⁾が出版されているので、これらを有効に利用されることをおすすめしたい。本文でもこれらの本を参考にした点が多い。

2. 測定方法

繊維であるために特殊な測定方式をとることは少ないが、単繊維のようにきわめて小さい断面積の試料を用いる場合には測定量の絶対値がきわめて小さく、摩擦などの影響も相対誤差の大きな原因となり、高感度ひずみ計の利用は測定を著しく困難にする。ここで現在まで繊維関係に使用されたものの概略を述べる。(1) 振り型 金属材料で多く用いられる形式に似ている。普通破壊エネルギーを求める。簡便であるが高速衝撃はできない。第1図はその原理図で衝撃エネルギー (A_d) は

$$A_d = M_g l_g \left[\cos \theta - \left(1 - \frac{\theta + \theta_0}{\theta_1 + \theta_0} \right) \cos \theta_0 - \frac{\theta + \theta_0}{\theta_1 + \theta_0} \cos \theta_1 \right]$$

で与えられ近似的には $A_d = M_g l_g (\cos \theta - \cos \theta_1)$ である。 (θ) は試料のある時、 θ_1 は試料のないとき、 θ_0 は初めの角) 衝撃速度 (V_0) は $V_0 = \sqrt{2 g h l_g / l_p}$ で与えられる。小型化が容易なため、辻氏²⁾ により古くから製作され広く利用されている。この種の測定機で強伸度関係を求めるには張力測定用の変換器を用い、シンクロスコープ

などで記録すればよい。(2) 落錘型 原理的には非常に簡単で重錘を用い、ある高さにおいて重錘の有する位置エネルギーを利用する。その速度 (V_0) は高さ h に対して $V_0 = \sqrt{2 g h}$ で与えられる。

Leaderman³⁾ は試料を破断したときに有する重錘のエネルギーと $M_g h$ の差から破壊エネルギーを求めるか、またはちょうど試料が

破壊するときの重錘の高さを求めている。後者では速度0になる。これはロープ類の試験に利用される。荷重-伸長関係を必要とするときは試料の上部クランプにひずみ計を設置し荷重を求め、重錘は破壊エネルギーにより速度変化をあまり受けないものを用い、落下距離をプーリー、ケーブル系でポテンシオメーターを摺動させ求めるか、規定周波数の録音された電磁テープを用いて⁴⁾ オシログラフで記録する。

第1図 振り型試験機の原理図

電磁テープの利用は 100 ft/sec 以下の速度に限られる。Backer ら⁴⁾ は2個以上の電磁テープを用い織物などの各部分における変形挙動の差を検討し、つかみ部分におけるひずみの不均一性を除去している。(3) 回転円板式 前の2方式は衝撃速度がせいぜい数 m/sec である。回転式はわが国でも高速衝撃試験を行なうのに比較的多く用いられ、われわれ⁵⁾ もこの形式の重さ2トンの回転円板で最高速度 140 m/sec の装置を利用した。タイヤコード程度までの試験機としては牛刀の感があるが、定速度試験のためには衝撃時に円板の回転速度にほとんど変化を与えないことは必要である。繊維、糸に使用された Meredith⁶⁾ の回転円板式の装置が第2図で、試料 Y は回転円板 D の突起 F が電磁石で G 部分を下げた時に打撃される。張力は L の板バネにつけられた鏡により反射光として C の定速回転ドラムの印画紙に記録される。この装置では 13 cm 試長で 2.6 cm~130 cm/sec の比較

* Kinzo ISHIKAWA 東京工業大学助教授・工博
Rupture Properties of Textile Materials under
Impact Loading

A: 光源, B: レンズ, C: ドラム, 映画紙, D: 回転円板,
E: 絞り, F: 突起, L: 板バネ, S: 電磨石, Y: 試料

第2図 Meredith⁶⁾の回転円板式試験機

的低速度しか得られていない。一方 Schiefer⁷⁾ らは高速回転円板を用い、試料の前後部にそれぞれついた質量の打撃による運動を高速度カメラで撮影し、運動方程式で解析後、荷重-伸長関係を得ている。その速度範囲は10~100 m/sec であった。ひずみ計を用いないので問題は少ないが、毎度高速度カメラで撮影するのはかなりやっかいである。彼らはこの装置を用い多数の研究報告を発表している。タイヤコードの衝撃試験用に Parker⁸⁾ らは試料を直角方向から打撃し、試料の破断による円板の回転速度の変化から次式で破壊エネルギー (A_d) を出している。

$A_d = 1/2 I_d (\omega_0^2 - \omega_1^2)$ ここで衝撃前後の角速度をそれぞれ ω_0, ω_1 , 回転円板一軸系の慣性モーメント I_d とする。回転角速度の変化は Polaroid を用い正確に求めうるのが特徴である。速度は3~26 m/sec であった。(4) **ガス圧または液圧を利用するもの** これは近年発展したもので、ガス圧または液圧を利用し、ピストンを高速移動する。衝撃速度は比較的遅く2~3 m/sec 程度であるが、非常に簡便に利用できる。比較的小型にもかかわらず荷重容量が大きい。張力測定はビエゾ方式または半導体ゲージのひずみ計を用い、ひずみ測定は電磁テープを用いて、オシロに入れ、ポラロイドカメラで荷重-伸長曲線を簡便に記録している。商業的には Plastechon⁹⁾ があり、国産化も試みられている。この形式で高速化するには水平試料の両端にそれぞれピストンをつけて反対方向に同時に伸長し、20 m/sec を得ているといわれる。この種の試験機の例を第3図に示したが今後広く利用されるものと思われる。(5) **弾丸などの打撃 (Ballistic)** による方法 銃より発射された弾丸を用い多くの場合、織物、糸に直角に当てる方式できわめて高速度が得られる。弾丸の速度は距離のわかった2点間を通過するに要する時間を光学的手段、電気伝導的手段などを利用して決定する。衝撃エネルギーを保護板の変形の高速度撮影から求めるとか、糸などに直角に当たったときの変形過程を高速度のストロボフラッシュを用いて1枚のフィルム

A: 圧力調節器, B: バルブ, C: ガス貯蔵器, D: ガスポンプ, E: 調節オリフィス, F: 電磁テープ, G: テープピックアップ, H: オシロ, I: 下部クランプ, J: 上部ドラム, K: 調温箱, L: ひずみゲージ, M: 増幅器, N: ブローア, O: 試料, P: オシロ用トリガー

第3図 ガス圧による引張衝撃試験機²³⁾

にとり解析する。この方式で変換器を用いた例は少ないが Holden¹⁰⁾ は第4図のような装置を用いている。ひずみ計 (C_1, C_2) の固有振動数を大きくするため水晶を用い、一方Dの真ちゅう棒は長さ10 m あり、反射波の影響を防いでいる。弾丸を用いたときは数百 m/sec に及ぶこともできる。

ここで衝撃試験機全般について、応力値を求めるひずみ計の固有振動数ができるだけ高く、増幅器の増幅帯域はなるべく広いことが望ましい。特にひずみ計では固有振動数と感度が相反する要素であるため、小張力測定時に忠実な追従ができず誤った荷重-変形曲線を得ることがある。これらの検討を試料系も含めて行なった例¹¹⁾を参考にされたい。

A: 棒, B: 試料, C_1, C_2 : ひずみ計, C_3 : 真ちゅう板, D: 真ちゅう棒, の方向に弾丸が進み H にあたる

第4図 Ballistic な方法による試験機の一例¹⁰⁾

3. 衝撃下の繊維材料の挙動

高速度変形の理論的解析¹²⁾は Von Karman をはじめ多数の研究者が行なっているがここでは省略する。わが国では振子型の衝撃試験機を用いた各種繊維についての研究が伊東氏¹²⁾によって行なわれ、破壊エネルギーと衝撃速度の関係より機構的に種々論ぜられているが、衝撃速度は比較的低い。

最近では各種の装置を用いた Hall¹³⁾ のポリプロピレンについての結果がある。各ひずみ速度と荷重-伸長関係は第5図のようで低速度 ($<3.3 \times 10^{-2}$ sec) ではわずかな降伏挙動がみられるが、高速では消滅し、切断伸長が著しく減少する。これらの結果を Nutting の式 $\epsilon = E\sigma^m t^n$ (ここで ϵ, σ, t, E はそれぞれひずみ、応力、時間、弾性率である)、および $\dot{\epsilon} = \epsilon/t$ を用いて、 $\sigma = \epsilon^{(1-n)/m} \dot{\epsilon}^{n/m} E^{-1/m}$ を得た。log σ と log $\dot{\epsilon}$ とをプロットすると高速度では1~10%, 低速度では3~12%の間で、ひずみ速度に関係なく直線関係が得られた。一方 log σ と log $\dot{\epsilon}$ を一定の ϵ についてプロットすれば、ひずみに独立した直線群が得られるはずであるが、得られたものは実際直線ではなく、わずかにひずみに依存した(第6図)。前式を若干変更して $\sigma = \epsilon^{(1-n)/m} \cdot [f(\epsilon)]^{n/m} \cdot E^{-1/m}$ とすれば大略表現できるとしている。Celanese の研究者¹⁴⁾が各

第5図 iso ポリプロピレンの各ひずみ速度における応力-伸度曲線¹³⁾

第6図 iso ポリプロピレンの各ひずみ量におけるひずみ速度と応力値の関係¹³⁾

種繊維について $10\%/min \sim 1.8 \times 10^6\%/min$ の範囲の衝撃速度で得た結果によれば、オーロン42に高速時においてもぜい性破壊はみられず、また、アセテート、強力レーヨンも同じ傾向にあった。しかし、ポリプロピレン、ポリエチレンのようなポリオレフィン系の繊維では Hall らの結果と同様に $0.23/sec$ ($1.4 \times 10^3\%/min$) 以上のひずみ速度ではぜい性破壊を示した。ポリエチレンでは $100 \sim 2 \times 10^4\%/min$ の間で第7図にみられるように分子の緩

第7図 ポリエチレン繊維の3%, 6%ひずみにおける応力値と到達時間の関係¹⁴⁾

和に対してひずみ速度の影響が大きい。66ナイロンでも同様な傾向はみられたがそのひずみ速度依存性は異なる。Ballisticな方法により $23000\%/sec$ の高速で、ナイロン、アセテートなどについて行なった Lewis¹⁵⁾ の結果では、ナイロンは Schiefer らと大体似ており、12%付近に第2降伏点が見られるのが特徴的である。アセテートでは切断伸度が16%程度に減少している。ひずみ速度が増大すると切断伸度は必ずしも減少するとは限らない。たとえば前出の装置を用いて $66000\%/sec$ までのひずみ速度で行なった。Holden¹⁰⁾ の第8図の結果からも明らかである。ここでは1%/secを基準値にとり、相対値として Meredith, Schiefer らの結果とも比較している。伸度は一度低下した後に高速において増大する。他の研究者が行なっている速度範囲では速度増大は伸度の低下をもたらす場合が多く、この結果についての明確な

第8図 中延伸度ナイロンの相対的切断伸度の速度依存性¹⁰⁾

解釈がされていないので、このような高速下での検討がさらに必要である。破壊伸度と破壊荷重の積より求めた破壊仕事量を第1表に示すが、未延伸繊維を除いていずれも速度依存性が少ない。ライフル銃を用いて繊維と垂直方向に弾丸で打撃を与えた Smith¹⁶⁾ の結果ではナ

第1表 種々の糸の異なったひずみ速度下の相対破壊仕事量¹⁰⁾

ひずみ速度 (%/sec)	0.033	3.3	4400	66000
試料				
ナイロン “type 100”	0.80	1.08	0.83	1.05
ナイロン “type 300”	0.91*	1.12	1.31	1.50
ナイロン未延伸	0.80	1.09	2.71	3.30
ナイロン単繊維	0.82	1.07	0.89	1.15
テリレン	1.0	1.0	1.06	1.0
アセテート	0.98	1.03	1.06	1.03

* は 0.33%/sec の値

イロンは 650 m/sec と 495 m/sec の衝撃速度では強度が 77 g/tex, と 52 g/tex, 切断伸度は10%と7.8%で、ポリエステル繊維でも 620 m/sec, 420 m/sec で、強度 67 g/tex と 40 g/tex, 伸度は10.5%と6.5%であり、やはり若干高速の方が切断伸度が大きい。PVA 繊維に対して 20%/min~200万%/min までの伸長速度で測定した Morgan¹⁷⁾らは20, 5, 8%の各ひずみ量に到達する時間と張力値より形式的に緩和曲線を求め、緩和スペクトルを出している。緩和スペクトルの高さは試験速度の大きい方、いいかえれば短時間側が高くなっている。また彼ら¹⁸⁾は iso ポリプロピレンについても同様な測定を行ない、2, 6, 12, 16%の各ひずみ量について見かけの緩和曲線を求め 10⁻², 10² sec 付近に緩和時間を有する2個の Maxwell 模型で説明している。この種の取扱はこのような大変形で線型性がどの程度なりたっているか疑問であり、単に形式的な応用にすぎないとみられる。

糸、コードについては実用上の見地からミシン糸に対して古くから研究されている。たとえば落錘式で綿縫糸

について Lester¹⁹⁾は衝撃破断エネルギーが静的伸長破壊エネルギーよりも大きいことを認め、また試料長が変化すると破壊エネルギーは長さに比例して変化しないことも見出している。さらにこれらの点について Denham²⁰⁾らが詳細に検討した。この結果絹糸では試長 (l_0) と衝撃破壊エネルギー (A_r) の間に $A_r = al_0 + b$ の関係があり、 a は 30.6 g, b は 5.2 g-cm の値であった。また衝撃速度を 0.82 m/sec~1.37 m/sec の範囲で変化した際の破壊エネルギーは速度とともにわずかに増大した。Shiefer²¹⁾らは各種の糸について測定したが、糸の破壊強度と衝撃破壊エネルギーの間、または衝撃破壊エネルギーと切断伸度の間に一般的な関係を得ることができなかった。各種タイヤコードでは静的な引張試験と 3.8 m/sec の落錘式の衝撃試験より出したそれぞれの “toughness index” (erg, cm⁻¹, den⁻¹) は直線的なよい正相関があることが見出²²⁾されている。最近の Lothrop²³⁾の報告ではレーヨンとナイロンタイヤコードを 75~300°F の温度範囲で衝撃試験を行ない、レーヨンコードでは、3000%/sec のひずみ速度で 225°F の方が 75°F よりも切断伸度が大きくなり toughness も大になる結果を得ているが、内部構造的原因についてはふれていない。前出の回転式装置で Meredith⁶⁾ はアセテート、絹、ナイロン糸について、切断強度は近似的にやはり速度の対数に比例して増大するとしている。一方切断伸度はアセテートでは伸長速度に関係なく、絹糸は速度とともに増大し、ナイロンでは 2%/sec で極大値をもつとしているが、これらについてはいずれも機構に立入った考察がされなければならない。Shiefer, Smith 一派は各種糸について各種の条件で多数の報告を出しており、特に Critical Velocityなどを詳細に検討している。彼らはそれらの中²⁴⁾でナイロン糸の湿潤の影響を求めている。湿潤ナイロンは乾燥時に見られた初期降伏域は消滅し、その荷重-伸長関係は上に凹の曲線になり、水により水素結合が多く切断され、緩和機構の大きな変化がみられた。

登山用ロープ、工業用ロープなどに対しては落錘式の

第2表 種々材料のロープの静的および衝撃的破壊値の比較²⁷⁾

試料	66 ナイロン		デクロン		マニラ麻		鋼線
性能							
直径 (in)	0.5		0.5		0.75		0.25
lb あたりの長さ (ft)	14.8		12.1		6.0		9.1
静的破断強さ (lb)	7875		6275		5700		8000
衝撃試験値	乾	湿	乾	湿	乾	湿	—
破壊エネルギー (ft-lb/lb)	15,660	15,000	7,300	7,300	1,800	1,120	600
相対値							
等重量に対して	870	835	400	400	100	62	35
等直径に対して	800	750	450	450	100	62	200
等破断強さに対して	255	245	180	180	100	62	16

試験²⁵⁾が多い。各種繊維からつくられたロープの静的測定値と衝撃値の比較を第2表に示す。速度は4~7 m/secである。重量、直径、強度についての相対的な比較をマニラ麻ロープ乾燥時を100として示してある。

織物ではパラシュート布と防弾具関係の研究が主で、いずれも軍の受託研究によるものが多く、それぞれ関連したもの報告されており、これらはわが国では防衛庁の技術研究本部第2研究所に大体そろえられている。ナイロン、綿の組織の異なった布について静的試験と落錘式の衝撃試験の結果の例を第9図に示す。綿布の方が差

第9図 ナイロン、綿織物の静的(——)および衝撃試験(---)の結果²⁶⁾

が大きく現われている。パラシュート布と構成糸の関係は Backer²⁶⁾ らが研究しており、それぞれ糸と布の切断強度、伸度を比較して、布が構成されたときの効率をたて、よこ方向について求めた。衝撃時には布の荷電効率が大きいことを認め、使用糸のより数が少ないことで説明している。ナイロンパラシュート布に縫目を入れて、その効果を調べた Krizik²⁶⁾ によると、衝撃時には縫目を有するものは著しく強度低下をきたしており、応力の急激な集中によるものとみられる。防護具用布については弾丸が試料の半数を貫通する速度 (V_{50}) により評価することがあり、 $V_{50}=456(\rho h)^{0.367}$ の実験の結果が得られている。ここで ρ は試料の密度、 h は防護布の有効厚さ、それぞれの単位は oz, ft を用いてある。また上式は ρh が 2 oz/yard² 以下ではなりたたない。

以上きわめて簡単に繊維などの衝撃について述べたが、今後繊維に対しては内部構造との関係を中心に、緩和機構との関連で検討がさらに進められる必要がある。

また糸、織物についてはそれぞれの構成様式との関係を明確にするように研究が進められることが望ましい。

文 献

- 1) A) W. J. Lyons: "Impact Phenomena in Textiles", (1963) M. I. T. Press
B) A. G. M. Dietz et al.: "High Speed Testing. II", (1961) Interscience
- 2) 桜田一郎, 辻和一郎: 人絹界, 11, 1 (昭18)
- 3) H. Leaderman: *Text. Res.*, 13, 21 (1943)
- 4) M. I. T. 落錘式試験機, S. Backer, J. G. Krizik: *J. Appl. Polymer Sci.*, 4, 277 (1960)
- 5) 津村利光他: "Proc. 3 rd. Japan Cong. on Testing Materials, 95, (1960, 3月); 白樫侃, 石川欣造, G. K. Joardar: 材料, 12, 404 (1963); *Rep. Prog. in Polymer Physics Japan*, 4, 171 (1963)
- 6) R. Meredith: *J. Text. Inst.*, 45, T 30 (1956)
- 7) W. K. Stone, H. F. Schiefer, G. Fox: *Text. Res. J.*, 25, 520 (1955)
- 8) J. P. Parker, S. L. Kemick: *J. Appl. Polymer Sci.*, 6, 255 (1962)
- 9) Plas-Tech Equipment Corp. Natic. Massachusetts U. S. A.
- 10) G. Holden: *J. Text. Inst.*, 50, T 41 (1959)
- 11) J. W. Ballow, J. A. Roatling: *Text. Res. J.*, 28, 631 (1958)
- 12) 伊東平八郎: "高分子の物性 I", 201 (昭33年) 共立出版
- 13) I. H. Hall: *J. Polymer Sci.*, 54, 505 (1961)
- 14) H. M. Morgan et al.: 1) A) 125
- 15) G. M. Lewis: 1) A) 145
- 16) J. C. Smith, C. A. Feustermaker, P. J. Shouse: *Text. Res. J.*, 33, 919 (1963)
- 17) R. C. Laible, H. M. Morgan: *J. Polymer Sci.*, 54, 53 (1961)
- 18) R. C. Laible, H. M. Morgan: *J. Appl. Polymer Sci.*, 4, 269 (1962)
- 19) J. H. Lester: *J. Text. Inst.*, 1, 63 (1910)
- 20) W. S. Denham, W. Brash: *J. Test. Inst.*, 15, T 291 (1924)
- 21) H. F. Schiefer et al.: *Text. Res. J.*, 23, 489 (1953)
- 22) W. J. Lyons, I. B. Prettyman: *Text. Res. J.*, 23, 917 (1953)
- 23) E. W. Lothrop: Subcommittee A-9, ASTM Committee D-13 (1964, 3月)
- 24) H. F. Schiefer et al.: ASTM Special Technical Publication No. 185, 47 (1955)
- 25) S. B. Newman, H. G. Wheele: *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 35, 417 (1945)
- 26) J. G. Krizik: 1) A) 152 ページ
- 27) 1) A) 150 ページ
- 28) A. H. Stang et al.: *J. Res. Natl. Bur. Std.*, 36, 44 (1946)