衝撃力による繊維集合体の硬さ表示*

(昭和41年11月28日受理)

吉 田 幸 吉**
片 山 勝 巳
加 藤 三 千 夫

→ 摘 要 ←

目 的

原綿、ラップ、ウェブ、カード スライバ、ローブおよび糸の各種繊維集合体に試作の衝撃を与える装置で衝撃を加え、その物理的量を測定し、実験結果から得られた曲線群から硬さに関連すると考えられる因子を選定し、その因子に基づいて各種繊維集合体の硬さを数値で表示すること。

また一方、その数値から各種繊維集合体の工程順の硬さを比較検討すること。

成 果

原綿、ラップ、ウェブ、カード スライバ、ローブおよび糸の各種繊維集合体の硬さを数値例で示すことができた。

筆者らが考察した硬さ表示式はつぎのようである。

$$H = \frac{K \cdot \eta \cdot m}{X}$$

H : 繊維集合体の硬さ

K : ばね定数 (kg/cm)

η : 粘性による減衰係数 (kg・sec/cm)

m : 出力—変位曲線より決定される各試料についての定数

X : 各試料の最大ひずみ量 (cm)

各試料についての硬さをつぎに示す。

硬 さ	原 綿	ラ ッ プ	ウ ェ ブ	カ ー ド ス ラ イ バ	ロ ー ブ	糸
H	11.1	8.6	3.1	0.7	10	70

ま え が き

繊維はそれ自体単繊維として使用されることは少なく、大部分の場合が繊維集合体として取り扱われている。

また単繊維についての特性の研究は数多くあるが、繊維集合体の特性についての研究は最近になり活発に行なわれようとしている。そこで筆者らは繊維集合体の1特性すなわちその硬さに注目して、それを解明することを試みた。

元来繊維集合体の硬さ、柔らかさに関連する研究とし

ては若山、服部氏をはじめとして多くの人達が^{1,2)} Van-Wyk の理論をもとにして理論を展開している。その実験方法としてシリンダ内部に繊維集合体を導入し、ピストンによって圧縮する方式 [(1) 最高圧力規定方式, (2) 圧縮率規定方式]³⁾、また容器を使用しないで圧縮する方法などが採用され、それぞれの装置に順じた実験方法が考案された。

しかし筆者らは従来の研究が一般の金属材料の硬さ試験法とは異なった繊維集合体の独自の方法を考案しているという点に注目して、その独自な方法に金属材料の硬さ試験法を一部採用して繊維集合体の硬さを新方式でも

* Expressing Fiber Assembly Hardness by Impulse Method.

** K. Yoshida, K. Katayama and M. Kato, Members. 福井大学工学部

って表示しようとするものである。

この新方式の概略は、円盤状に積み重ねた繊維集合体に試作装置により一定の高さから鉄錘を落下させることによって衝撃を与え、繊維集合体に生ずる物理的現象を測定し、繊維集合体を模型化してそのばね定数、粘性係数などを求めて硬さ、柔らかさを解明していく方法を採用した。

繊維集合体の硬さ、柔らかさが数値で表示されれば繊維工學上好都合であろうと考えられる。たとえば混打綿工程においてタフトは柔らかいほど次工程のカードに供給するときに負荷が少ないと考えられるので、混打綿機械の性能を評価することも可能であるし、日常使用している寝具、耐衝撃材としての繊維集合体および吸力率などその利用面は多数存在するという意味からも意義のある研究であると考えられる。

1. 理 論

原綿、ラップ、ウエブ、カード スライバ、ローブおよび木綿糸の各種繊維集合体を簡単のために第1図に示すようなモデルで近似できるものと仮定する。ついでそ

のモデルに入力（衝撃）を入れ、その変位曲線から各種繊維集合体の試料固有のばね定数、粘性係数を求める。また一方、出力—変位曲線から求まる各試料固有の定数と最大ひずみ量を求める。上記定数を硬さを表示できると考えられる一般式で表示して、各繊維集合体の硬さを数値化する。

1.1 入 力（衝撃力）

筆者らの実験においては各繊維集合体に与える入力はい鉄錘の落下によるものである。

本実験においては装置、測定器の都合上、実際の入力を確認することができない。それゆえに第2図に示すような4種類の入力を推定し、その応答を求めて得られた変位曲線にもっとも近似できるものを本実験の入力と見なすことにする。その結果第2図(4)が適当であると

(第2図) 推 定 入 力

考えられる。しかも実際の場合と比較しても、鉄錘が落下して衝撃力が与えられ、ついで定荷重が効果を示してくると思われられるので、筆者らが推定した入力正しいと考えられる。

1.2 変 位 曲 線

繊維集合体のモデルに入力を与えたときの変位曲線は(1)式の運動方程式を解いて求められる。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + Kx = f(t) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで M : 質量 (潜在荷重)

η : 粘性による減衰係数

K : ばね定数

x : 変位

$f(t)$: 入力

t : 時間

である。また $f(t)$ は1.1の第2図(4)であるので(2)式で表示される。

$$f(t) = k_1 \delta(t) + k_2 C \cdot u(t-d) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで $\delta(t)$ はデルタ関数で、 $C \cdot u(t-d)$ は $t=d$ 以後表われてくる鉄錘の重量であるステップ関数であり、 $\delta(t)$ は衝撃力である。ただし、 k_1, k_2 は定数である。(2)式を(1)式に代入すると(3)式になる。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + Kx = k_1 \delta(t) + k_2 C \cdot u(t-d) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$x(+0) = 0, \frac{dx}{dt}(+0) = 0$ であるから(3)式をラプラス変換すると(4)式になる。

$$x(S) = \frac{k_1}{M} \frac{1}{(S^2 + 2\alpha\omega S + \omega^2)} + \frac{k_2 C}{M} \cdot \frac{1}{S(S^2 + 2\alpha\omega S + \omega^2)} e^{-as} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし $\omega = \sqrt{K/M}$, $\eta/M = 2\alpha\omega$ である。

したがって(4)式をラプラス逆変換すると(5)式になる。

$$x(t) = \frac{k_1}{M\omega\sqrt{1-\alpha^2}} e^{-\alpha\omega t} \sin \omega\sqrt{1-\alpha^2} t + \frac{k_2 C}{M} \left\{ 1 - e^{-\alpha\omega(t-d)} \cos \omega\sqrt{1-\alpha^2} \cdot (t-d) - \frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} e^{-\alpha\omega(t-d)} \sin \omega\sqrt{1-\alpha^2}(t-d) \right\} \cdot u(t-d) \quad \dots\dots\dots(5)$$

(5) 式を変形して (6) 式を得る。

$$x(t) = \frac{k_1}{M\omega\sqrt{1-\alpha^2}} e^{-\alpha\omega t} \sin \omega\sqrt{1-\alpha^2} t + \frac{k_2 C}{M} \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\alpha^2}} e^{-\alpha\omega(t-d)} \cdot \sin \left\{ \omega\sqrt{1-\alpha^2} \cdot (t-d) + \theta \right\} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし $\theta = \sin^{-1}(1-\alpha^2)$ である。

(6) 式が理論変位曲線である。

つぎに (6) 式において未知数である α , ω , C , d , M , k_1 , k_2 および θ の各定数を測定, 実験値曲線より決定する。ただし α , ω , θ は各試料固有定数であり, C , d , k_1 , k_2 (k_1 , k_2 は各実験値曲線におけるの平均値を使用する) は, 各試料についての共通定数である。

上記のようにして各定数を求め (6) 式に代入して, 実験値曲線との差を検定する。

これによって近似性が確認できれば求めた各定数が正しいことが判明し, かつ, 各定数が各種繊維集合体の性質を端的に表示しているものと考えられる。

また一方, 一般的に知られているストレス-ストレイン曲線から繊維の性質推定が可能であるということに注目して, この出力-変位曲線から各種繊維集合体の特有な性質をも見つけ出そうとするものである。

以上のように各試料についての性質に注目して繊維集合体の硬さ表示式を検討する。

1.3 硬さ表示式

(a) ばね定数 K ばね定数を具体的に考察すると単位からもわかるように単位長当たりの変位を与えるのに必要な力として考えられるから, ばね定数が大であることは, その試料が材質的に硬いと考えられる。つまり, いま硬さを H で表わすと $H \propto K$ という関係が成立するものとする。

(b) 粘性による減衰係数 η ばね定数と同様な考え方をすると, 粘性による減衰係数 η は単位⁴⁾の速度を与えるのに必要な力と考えられるから, したがって粘性係数が大であるものは筆者らが求めようとしている硬さという点に結びつけて考えるならば, $H \propto \eta$ という関係が考えられる。

(c) 出力-変位曲線から求まる定数 m 出力としてはストレイン メータによって表示される伝達力を使用するものとする。

一般にはストレス-ストレイン曲線については第3図のように考えられている。これによるとストレス-スト

(第3図) ストレス-ストレイン曲線と繊維の性質

レイン曲線の立ち上がりの急なもののほど硬いということである。この考え方が筆者らの求めた出力-変位曲線にも適用できるとし, 出力-変位曲線の最初の部分を2次関数 $y = mx^2$ に近似し, 定数 m が大であるほど硬いとして $H \propto m$ の関係を採用する。

(d) 最大変位 X 試料に対して同じ力が加わるとき最大変位 X が小であるならば硬く, 大であるならば柔らかいと考えられるから, $H \propto 1/X$ という関係を採用する。

(e) 硬さ H の表示式

上記 (a), (b), (c) および (d) に述べた内容を考慮して (7) 式で定義する H で硬さを表示することにする。

$$H = \frac{K \cdot \eta \cdot m}{X} \dots\dots\dots (7)$$

1.4 実験方法についての考察

筆者らが本実験を企画するにあたって, 試料の作成および試料に潜在荷重を与えるという点では, 従来の繊維集合体の特性を研究するのに採用されていた方法に順じ, 試料に衝撃力を与えて, その物理的量を測定するという点では金属⁵⁾の硬さ試験法を参照した。

金属材料の硬さ試験法には, つぎのようなものがある。

- 1) ブリネル硬さ
- 2) マイヤーの硬さ
- 3) ビッカース硬さ
- 4) ロックウェル硬さ
- 5) ショア硬さ

上記のような硬さ試験法があるが, 圧子の種類, 形状, 圧痕の測定基準などの異なるにしたがって測定結果が異なり, 硬さ表示の定義も種々である。したがって, それぞれの結果が異なり, 測定方法間の理論的関連も明らかにされていないので, それらの各種方法による測定結果の比較, 換算などは非常にむずかしいといわれている。しかし, 筆者らが対象としている繊維集合体の硬さについても, その表示法は決定的なものが確立していな

いので、そういう点からも繊維集合体の硬さ表示の一助になればさいわいである。

2. 実 験

2.1 実 験 装 置

第4図は本実験に使用した衝撃を与える試作装置である。その概略をつぎに述べる。第4図において(A)は

(第4図) 衝撃力を与える試作装置

自在調整装置であり、(B)は試験器でベース(C)の上に試料を置き、(D)のジュラルミン板(直径150mm, 厚さ5mm)で潜在荷重(508g)を与えるためのものである。またDの中央には鉄柱(直径6mm)が立ててあり、これが軸継手(E)で差動トランス(F)のコアに連結している。なお、Fは自在調整装置Aに固定されている。一方、ハンドル(G)を回転することによってFは上下に動き、測定における校正に役立つようにしてある。

鉄錘(H)は重量708gで半球状をなし、ジュラルミン板Dの中央に衝撃が加わるようにしてある。ベースCには4本の鉄柱(直径6mm)が立ててあり、鉄錘Hがジュラルミン板Dに衝撃を与える際に、Dの横振れを少なくする動きをする。また4本の鉄柱の上部には、ねじが切っており、穴あき円板(I)が任意の高さで固定され、自由に落下させることができる手動式落下装置が備えつけてある。ベースCにはストレインゲージが中央に取り付けられてあり、出力を検出できるように設計してある。

2.2 実験方法および試料の採取、作成方法

(a) 実験方法

第5図に概略の実験線図を示す。つぎに実験方法を簡単に述べる。まず試料(採取方法は後述する)をジュラルミン板Dを上げて挿入し、Dを試料の上に静かに置いて潜在荷重をかけ、手動式落下装置をはずせば自動的に

(第5図) 実験装置図

鉄錘Hが落下し、試料に集中衝撃力を与える。

この入力によって試料が変位すればDも同変位をなし、それが差動トランスFで電気的信号に変化されて測定付属回路、増幅器を通して電磁オシロに記録される。この曲線が衝撃力を与えたときの各試料の変位曲線として明確に表示される。

また一方、この衝撃力によって試料に与えられた入力、試料をかいしてベース上にはりつけてあるストレインゲージに伝達され、ストレインメータを経て変位曲線と同様に出力曲線が電磁オシロに記録される。

(b) 試料の採取、作成方法

試料には原綿から糸までの工程における代表的中間製品6種類を使用した。第6図に各試料を示す。

全試料について共通な条件は直径150mmのボール紙を使用して試料を上下より軽くはさみ、試料になるべく力が掛からないように、はさみでボール紙の円盤に沿って薄円盤状のものを作成する。ついでそれらを積み重ね全試料とも潜在荷重状態で50mmの高さになるように試料を調節した。

つぎに各試料についての採取法の概略を述べる。

(i) 原綿 混打綿工程にかける前の状態のものを採取した。

(ii) ラップ フィニシア スカッチア 揚げラップを採取した。

(iii) ウエブ カードの後部にあるカレンダーローラ

原綿 ラップ

ウェブ カードスライバ

ロープ 木綿糸

(第6図) 各試料の形状

とトランペットをはずして試作の木枠を設置し、この木枠をウェブの送り出し速度に応じて一樣な速さで回転させ、できるだけウェブの回転によるウェブ層のむらをなくするようにくふうして採取した。以上のようにして巻き取ったウェブ層を広げて所定の試料を採取した。

(iv) カードスライバ ため、よこおのおの 500 mm のボール紙の上にたがいにくまなく並べて両端をセロテープで固定する。ついで、できたものを積み重ねていて所定の試料を採取した。

(v) ロープ ロープは単紡機揚りのものを用いた。これもため、よこおのおの 500 mm のボール紙をなるべく張力を与えないように一樣な厚さになるまで巻き取る。ついでボール紙を抜き取って所定の試料になるまで積み重ねたものを使用した。

(vi) 木綿糸 20 s のものを使用し、総繰り機により総状に巻きなおし、糸の一端を切断しスライバ状の糸層を作成し、カードスライバと同様にして所定の試料を作成した。

上記のようにして試料を採取、作成し試料箱に入れ、

恒温恒湿室 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, $65 \pm 5\%$) で 24 hr 放置して実験に使用した。

3. 結 果

第7図に求められた原綿、ラップ、ウェブ、カードスライバ、ロープおよび木綿糸の変位曲線および出力曲線を示す。

3.1 変位曲線

第7図の各試料の変位曲線より、周期 T を求め、 $\omega = 2\pi/T$ より ω を算出、また変位曲線の減衰項より減衰係数 $\alpha\omega$ を求め、その結果を第1表に示す。

(第1表) 変位曲線から求まる定数

試料	周期 T (sec)	角速度 ω (rad/sec)	減衰係数 $\alpha\omega$	α ($\times 10^{-2}$)
原綿	16/100	39	4.4	11.00
ラップ	17/100	37	3.2	8.65
ウェブ	17/100	37	2.4	6.51
カードスライバ	18/100	35	2.3	6.57
ロープ	14/100	45	1.7	3.70
木綿糸	13/100	48	4.7	9.70

一方、この変位曲線に相当する理論曲線式すなわち(6)式を対応させるために、おのおのの定数 M , θ , C , d , k_1 , k_2 を求めなければならない。 M , C はそれぞれその重量 (508, 708 g) を重力加速度で除せば算出できる。また、 d については第7図の出力曲線より 4/100 sec とした。また、第1表より $\alpha^2 \ll 1$ より(6)式を(6')式と変形して理論曲線とした。(6')式をつぎに示す。

$$x(t) = \frac{k_1}{M\omega} e^{-\alpha\omega t} \sin \omega t + \frac{k_2 C}{M} \left[1 - e^{-\alpha\omega(t-4/100)} \cdot \sin \left\{ \omega \left(t - \frac{4}{100} \right) + \theta \right\} \right] u(t-4/100) \dots\dots (6')$$

ただし $\theta = 1.57$ (rad) である。

(6')式に上記求めた定数を代入して各試料について曲線群を描いてみる。その結果、定数 $k_1 = 0.0575$, $k_2 = 1.12$ が求められた。

上記のようにして理論曲線式(6')式が各試料について算出される。(6')式をインパルス応答、インディシャル応答の2成分にわけて計算し、それぞれの合成曲線を第7図の実験値の変位曲線とともに第8図に示す。

3.2 出力曲線

第7図の出力曲線より(7)式における各試料の定数 m を見つけ出すために、 x 軸に変位、 y 軸に出力をそれぞれ取り、最大変位までの曲線を第9図に示した。この

(a) 原綿の変位曲線と出力曲線

(d) カードスライバの変位曲線と出力曲線

(b) ラップの変位曲線と出力曲線

(e) ロープの変位曲線と出力曲線

(c) ウェブの変位曲線と出力曲線

(f) 木綿糸の変位曲線と出力曲線

(第7図) 各試料の変位曲線と出力曲線

(第2表) 各試料の m, X, K, η の値

試料	$y=mx^2$ の m の値	最大変位 X (cm)	ばね定数 K (kg/cm)	粘性 η による減衰 係数 (kg・sec/cm)
原綿	0.82	2.6	0.79	0.0045
ラッブ	0.88	2.4	0.71	0.0033
ウエブ	0.56	3.2	0.71	0.0025
カードスライバ	0.31	3.3	0.64	0.0012
ロープ	1.24	2.3	1.05	0.0018
木綿糸	2.37	2.0	1.19	0.0049

(第3表) 各試料の硬さ H

試料	硬さ H
原綿	11.1
ラッブ	8.6
ウエブ	3.1
カードスライバ	0.7
ロープ	10.0
木綿糸	70.0

(a) 原綿の変位曲線の解析

(d) カードスライバの変位曲線の解析

(b) ラップの変位曲線の解析

(e) ローブの変位曲線の解析

(c) ウェブの変位曲線の解析

(f) 木綿糸の変位曲線の解析

(第8図) 各試料の実験および理論曲線

(第9図) 各試料の変位—出力曲線

曲線を2次曲線 $y = mx^2$ に近似させ m を求めた。また各試料の最大変位 X および第1表から求めたばね定数 K 、粘性係数 η をまとめて第2表に示す。

4. 考察

3.2 で求めた各定数 m 、 X 、 K および η を(7)式に代入して硬さ H を求めるが、その前に(7)式の比例

定数を求めなければならない。そこで筆者らは(7)式の比例定数として $\left[10^4 \times \frac{(\text{cm})^3}{(\text{kg})^2 \cdot \text{sec}}\right]$ を取ることにする。各試料の硬さの比較であるから無次元でよいと考えた。そこでいま決定した比例定数と上記の各定数を(7)式に代入して各試料の硬さ H を求め、その結果を第3表に示す。

各試料の硬さ順位は木綿、原綿、ロープ、ラップ、ウェブ、カード スライバである。ここでウェブがかなり試料中において硬いということは、一般的概念から考察すると矛盾している。これは試料の作成、採取方法に問題があると考えられる。木綿糸が他の試料と比較して非常に大である。これはやはり試料作成方法と加撚および集合体密度による影響と考えられる。原綿が硬さ大であるということは、それが強い圧縮のもとで俵につめられ

ていること、また繊維以外に夾雑物を含んでいることなどの理由によるものと考えられる。また、ラップが原綿より柔らかいのはラップ比積が原綿のそれよりも大であることを考慮すれば妥当であると考えられ、ロープについては加撚、集合体密度および繊維の平行の程度の影響を考えれば当然であると考えられる。また、第8図より実験値曲線と理論値曲線との対応が見られるが、その相違を知るために χ^2 検定を試みた。その結果を原綿のみについて第4表に示す。第4表より自由度19より χ^2 の値は有意水準5%で30.1になり、1.965より大となり、理論値曲線と実験値曲線とが違ふと考えないでよいことになる。すなわち筆者らが考察推定した入力および使用モデルが一応意味がある(デタラメではない)と考えてよいことになる。

5. む す び

以上を総括すれば本研究では原綿、ラップ、ウェブ、カード スライバ、ロープおよび糸の各繊維集合体に衝撃力を与え、それから生ずる物理的変化量を測定して、各試料の硬さ表示の式を考察することができ、硬さを数値で表示することもできた。しかし実験装置、試料作成法、試料採取方法などに問題があり、一般的概念とは相反する結果が一部示され、硬さ表示の確立化の困難性を考えさせられた。

しかし筆者らは今後の課題として、各方面から繊維集合体の硬さを表示し、その確立化に向かって努力するつもりである。

最後に本実験に協力された奥田照夫、増田繁雄の両君に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 若山, 服部; 本誌, 11, 167 (1958)
- 2) 若山, 服部; 本誌, 15, 262 (1962)
- 3) 滝川, 川村; 繊維学会誌, 17, 301 (1961)
- 4) 井本; レオロジー入門, 高分子化学刊行会, P 49
- 5) 葉山; 金属材料および試験法, コロナ社, P 148
- 6) 加藤, 吉田; 本誌, 11, 625 (1958)

(第4表) χ^2 検 定

時 間 (sec)	実 験 値 f (mm)	理 論 値 f_m (mm)	$\frac{f-f_m}{f_m}$
1/100	0.90	1.05	0.021
2/100	1.85	1.91	0.002
3/100	2.60	2.38	0.021
4/100	2.40	2.44	0.001
5/100	2.00	2.36	0.055
6/100	1.75	1.97	0.025
7/100	1.45	1.80	0.068
8/100	1.10	1.50	0.106
9/100	0.85	1.19	0.097
10/100	0.70	1.01	0.095
11/100	0.60	0.85	0.074
12/100	0.60	0.85	0.074
13/100	0.65	0.88	0.060
14/100	0.80	1.06	0.064
15/100	0.90	1.39	0.173
16/100	1.05	1.46	0.115
17/100	1.15	1.67	0.163
18/100	1.20	1.84	0.223
19/100	1.25	1.93	0.240
20/100	1.20	1.95	0.288

$$\Sigma = 1.965$$