紙の衝撃引張り破断特性について (第4報) 繰返し衝撃試験によるシート構造変化*

東京大学農学部 木 村 実, 門 屋 卓

Mechanical Properties of Paper under Impact Conditions (4) Change in Sheet Structure by Repeated Impulsive Forces*

Minoru Kimura, and Takashi Kadoya
Faculty of Agriculture, University of Tokyo

It seems to be valid that mechanical properties of paper obtained in laboratory scale cannot be applied to a runnability in paper mills or an usage of paper, if its dynamic properties or response under high speed excitation are neglected. In this study, rupture mechanism of pulpsheet by repeated impulsive forces was investigated from view point of change in reflectance properties and irreversible deformation of paper.

Main points obtained here are as follows.

All of the bleached softwood kraft pulp sheets used were failed when increase in specific scattering coefficient ($4S$) reached to value of $40 \text{ cm}^2/\text{g}$, despite a hammer swing angle or repeated impulsive times. The repeated times to failure at the same swing angle varied widely from sample to sample in the case of lower swing angle. On the other hand, $4S$ corresponded well to the irreversible deformation of sheet. These results lead to the assumption that the irreversible deformation or the increase in specific scattering coefficient is a more dominant factor than the subjected total impact energy in the fatigue or impact rupture properties of paper.

1. 緒 言

今までに紙の力学的性質に関して数多くの研究が行われてきた^{1)~4)}が、紙の衝撃あるいは高速度の諸特性を扱った研究^{5)~7)}は非常に少ない。しかし、最近の紙の取扱いの高速化という情勢からみると、紙の基礎的特性と操業上、利用上の諸問題とを結びつけるためには、高速現象を含めた動的特性を把握する必要がある。このような考えに基づいて、著者らは紙の衝撃引張り破断挙動に関して、過渡現象解析器を用いた新しい測定方法を確立する⁸⁾とともに、衝撃時における諸

特性の水分依存性⁹⁾¹⁰⁾ 衝撃速度依存性¹¹⁾について検討し、既に報告した。

一方、一度の力学的作用で破壊するような条件下で紙を使用することはほとんどなく、実際には紙はその破壊強さよりかなり低いレベルの外力をうけることが多い。そしてこのような外力により多少のシート構造変化が生じ、結局疲労としてシート内に蓄積されるようになる。ここで述べたような実際の紙の取扱いに対応する基礎的研究として、繰返し荷重処理に対する紙の諸物性変化を追跡するようなことが考えられる。これに関してはいくつかの知見が得られている¹²⁾¹³⁾が、

* 本報告の一部は第27回日本木材学会大会(1977年4月、京都)において発表した。

これらの研究は主として繰返し荷重に対する紙の力学的性質の変化に着目しており、疲労現象とは必ずしも結びついていない。

本研究は以上のような点を考慮して、シートの疲労現象並びに衝撃破断のメカニズムに関する知見を得ることを目的とし、繰返し衝撃試験を行い、そのときシート中に生ずる光学特性変化及び不可逆伸びに着目し、検討を行った。比較のために、併せて静的な荷重—伸長試験時における光学特性変化、不可逆伸びをも測定した。

2. 実験の部

2.1 試料

市販重包装針葉樹材未晒クラフトパルプを亜塩素酸ナトリウムで漂白した NBKP を用いた。これを PFI ミルで 500 回叩解 (クリアランス 0.2 mm, 650 ml C.S.F.) し、JIS (P 8209) に基づいてシートを抄造した (坪量 65~66 g/m², 厚さ 0.105~0.110 mm)。これを 13.5×1.5 cm の形状に切断し、紙片を作成した。これら試料を既報^{9)~11)}と同様に 20°C, 相対湿度 100% のデシケーター中に 1 週間放置し、取り出した後、20°C, 相対湿度 60% の恒温恒湿室中に 10 日間放置し、実験に供した。

2.2 測定装置及び測定条件

2.2.1 衝撃試験

既報^{9)~11)}と同様、シャルピー型縦引張り用衝撃試験器を用いた。装置の概要についてはこれらを参照されたい。本研究ではハンマーの振り上げ角を 70° 以下 (スパン: 10 cm) にして、一回の衝撃ではシート破断が生じないようにした。一本の試料を完全に破断するまで、同一ハンマー振り上げ角で衝撃試験を繰返した。そして、その都度シートをチャックから外し、これの比散乱係数と寸法変化を求めた。なお衝撃試験後、シートに寸法回復 (遅延回復) があると思われるので、チャックから外して 10 分後にシート寸法をカセットメーターで測定した。反射率測定にはハンター白色度計を用いた。

2.2.2 静的引張り試験

インストロン型定速引張り試験機を用いた。引張り速度 4 mm/min, スパン 10 cm であり、衝撃試験の場合と同様に、一本の試料について、荷重—脱荷重試験を破断に至るまで数回繰返し、その都度シートをチャックから外し、10 分後に寸法変化を、次いで反射率を測定した。

3. 結果及び考察

Fig. 1 Number of strike to failure vs. swing angle of hammer.

図 1 にハンマー振り上げ角と破断に至るまでの繰返し衝撃回数との関係を示す。振り上げ角が小さくなると繰返し衝撃回数は多くなり、さらに衝撃回数が多くなるにしたがって、このバラツキが目立ってきた。

材料全般について言えることであるが、破壊強度の実測値は全く欠陥がないとした場合の計算値の 100~1,000 分の 1 にすぎない。このことは材料の破壊が組織敏感性 (structure sensitive property) であることを示すものであり、紙もまた例外ではない¹⁴⁾。従って破壊強度などはその測定値にバラツキが大きく、確定値としてではなく、統計的な量として定義されるべきものと考えられる¹⁵⁾。このような考えに基づいて二宮ら¹⁶⁾は紙の破壊に確率過程を導入し、検討を行っている。従って、図 1 における繰返し衝撃回数のバラツキの主な原因は、確率過程がシートの破壊機構を支配していることによるものと推定できる。

図 2 にハンマー振り上げ角が 60° から 20° までの、繰返し衝撃回数の対数と比散乱係数増加分 (以下 4S と略す) との関係を示す。振り上げ角が大きい場合には両者はほぼ直線関係にあるが、振り上げ角が小さくなるにしたがって下に凸の曲線になる。ここで図 2 の星印はシート破断を意味するが、シート破断後の比散乱係数測定は不可能であり、この値は反射率の最終測定からの予測値である。しかし、同一シートを用いての測定であるので、衝撃回数の対数と 4S との関係にバラツキはなく、この予想値は比較的信頼性があるものと思われる。そして図 2 より明かなように、この値は振り上げ角及び衝撃回数にかかわらず、40 cm²/g 前後であった。また第一回目の衝撃による 4S はハンマ

Fig. 2 Increase in specific scattering coefficient vs. number of strike. (Numbers mean swing angle.)

Fig. 3 Increase in specific scattering coefficient vs. number of strike under the same swing angle of 40°.

一振り上げ角が大きくなるにしたがって大きくなった。図1に示すように、ハンマー振り上げ角が70°以上になるとシートは一回の衝撃で破断した。このことを図2に対応させる限りでは、ハンマー振り上げ角が70°以上では一回目の衝撃で4Sが40 cm²/g以上になると考えればよく、この意味ではこの種の疲労試験が、既に報告した衝撃試験^{9)~11)}の延長上にあると考えることも可能である。

図3にハンマーの振り上げ角が40°の場合の各シートについての衝撃回数の対数と4Sとの関係を示す。図1から明かなように、同一ハンマー振り上げ角でも、破断衝撃回数にバラツキがみられたが、図3からは衝撃回数にかかわらず、図2の結果と同じように、4Sが40 cm²/g前後でシート破断が生じた。以上の結果から、繰返し衝撃試験において、20°C、相対湿度60%という測定条件のもとでは、ハンマー振り上げ角、衝撃回数に関係なく、シートの4Sがあるレベル(本

Fig. 4 Increase in specific scattering coefficient vs. irreversible deformation under impact condition.

実験の場合は40 cm²/g)に達すると破断が生じることが示された。

静的引張り試験の場合では、シートの不可逆伸びと4Sとは非常に密接な関係がある。すなわちNordman¹⁷⁾によれば引張り過程での散乱係数変化は繊維間結合破壊によるものであり、Pageら¹⁸⁾、Ebeling¹⁹⁾によればむしろ繊維内結合破壊の方が大きく寄与するものであるが、いずれにせよシートの不可逆変形は比散乱係数変化を伴う。そこで静的試験と比較するという意味で、次に繰返し衝撃試験において生ずる不可逆伸びに着目した。

衝撃試験での不可逆伸びと4Sとの関係を図4に示す。同一条件で抄造したシートなら試料間に変動はなく、両者は直線関係にあった。図2、3に示したように4Sが約40 cm²/gのときシートは破断したわけであるが、この図からこれはほぼ不可逆伸び1.8%に対応していることが明らかになった。

図1~4の結果は以下のことを示している。すなわちシートに同じ衝撃エネルギーを与えても生ずる不可逆伸び及び4Sは試料間での変動が大きい。また、同一衝撃エネルギーを繰返し与えても、シート破断に至る繰返し衝撃回数は、特に小さな衝撃エネルギーでは、大きく異なる。このことからシートの衝撃的な疲労、破断メカニズムは、そのシートに与えられた衝撃エネルギーに対応しているものではないことが示される。そして、あるレベル以上の4Sすなわち不可逆伸びがみられたとき、与えられた衝撃エネルギーに関係なくシートは破断する。また衝撃に対する応答という現象のメカニズムに、他の材料と同じく、確率過程が関与しているために、同一衝撃エネルギーを与えても、生ずる不可逆伸びはシート間で大きく変動するものと思

Fig. 5 Load-elongation curve and increase in specific scattering coefficient vs. elongation (4mm/min).

われる。

図5に衝撃試験で用いた試料と同じNBKPを用いた場合の静的引張り試験結果を示す。すなわち、シートの荷重-伸長曲線と、シートにこの曲線に対応するそれぞれのレベルまで引張力を加えた時に生ずる $4S$ との関係が示されてある。従来から認められているように、静的な荷重-脱荷重サイクルにおいて、前にうけた履歴以上の荷重がシートにかかると、それ以降は再びもとの荷重-伸長曲線の延長上にある特性曲線が観測できる。従って本実験では同一シートを用いて、あるレベルまで荷重をかけ、チャックから外した後、衝撃試験の場合と同様の手順で比散乱係数と不可逆伸びを測定し、次いでさらに大きな荷重をかけるということを繰返して、図5の結果を得た。ここでは4本の試験片についての結果を同時に示してあるが、この図から明らかなように、シートに加えられた引張力に対する $4S$ の関係は試料間に変動がみられず、ほぼ一定であった。さらに $4S$ が約22 cm²/gになるとシートは破断した。これは衝撃試験の場合に比べてほぼ半分値である。また、荷重が約2.3 kN/m(伸び: 約1.4%)になるまで比散乱係数は変化しなかった。

図6に静的試験における不可逆伸びと $4S$ との関係を示す。図4と同じく試料間の変動はなく、両者は直線関係にあった。

さらに図4と6におけるそれぞれの直線のこう配は大きく異った。すなわち同一不可逆伸びで比較する

Fig. 6 Increase in specific scattering coefficient vs. irreversible deformation under static condition.

と、衝撃試験の $4S$ の方が2倍以上も大きい。この結果に対して2つの理由が考えられる。1つは引張り速度の問題である。本実験は20°C、相対湿度60%の雰囲気中で行ったが、この条件ではシート中に約10%(W/W)の水分が存在する。ゆっくりと変形させた場合、シート中に存在する水分のために、繊維間、ラメラ間で剥離することなく塑性変形する部分の割合が比較的多いが、引張り速度を速くすると、このような形でのシートの変形応答ができず、応力集中部分が切断されてしまう。いわば粘弾性的な緩和時間の問題である。他の1つは既報⁸⁾⁻¹¹⁾でも度々言及しているように、衝撃時にシート内で強い振動が生ずるが、このために繊維間、ラメラ間が剥離し、結果として同一不可逆変形でも衝撃試験の $4S$ の方が大きくなるという考え方である。

静的な荷重-伸長特性の引張り速度を十分に大きくすれば衝撃特性に近づくという考え方²⁰⁾からすると、ここでも、このような実験により、図4と6との結果の相違に対する原因がある程度明らかにできるはずである。しかし、高速度の引張り試験を行えば引張り試験開始時に衝撃的な力が加わるため、恐らく試料内に強い振動が生ずるようになるであろう。従ってこのような実験による結果から、本実験で得られた衝撃試験と静的試験の挙動の違いに対する解析を行うことは困難であると思われる。

また図6の結果に示されるように、静的試験においても、不可逆伸びと $4S$ との関係に試料間の変動はなかった。一方、図5から、引張り変形(可逆変形も含む)と $4S$ との間の関係にも試料間のバラツキはなかった。従って衝撃試験とは異なり、静的な引張り試験の場合、与えられた荷重や吸収エネルギーに対して、シート破断機構を支配していると思われる不可逆伸び及び $4S$ の試料間変動は非常に少ないと考えられる。

Fig. 7 Load vs. irreversible elongation.

図7にシートに与えられた荷重に対する不可逆伸びの関係を示す。この図から静的試験の場合、与えられた荷重、引張りエネルギーに対するシートの不可逆変形の試料間の変動は非常に少ないことが理解できる。すなわち、静的試験では同一試料、同一条件下で抄造したシートの品質（主に力学的性質であるが）は、ほぼ均一と判断される。この点で、度々衝撃力が加わり、変形、破断機構に確率過程が含まれると思われる紙の実際の利用にあたり、静的試験だけで、用いる紙の適否を判定することには問題がありそうである。

4. 結 言

繰返し衝撃試験を行い、ハンマー振り上げ角を変化させたときの、シート破断に至るまでの繰返し衝撃回数、比散乱係数変化、不可逆伸びを測定し、静的引張り試験における光学特性変化、不可逆伸びの結果と比較しながら破断のメカニズムを検討した。

本実験で用いたシートでは、ハンマー振り上げ角の大小にかかわらず比散乱係数増加が $40 \text{ cm}^2/\text{g}$ 前後になったとき破断が生じた。一方、同一ハンマー振り上げ角でさえ、破断に至るまでの衝撃回数は、特に振り上げ角が小さい場合には、大きな変動を示したわけであり、同じ衝撃エネルギーを加えてもシートによって比散乱係数変化は大きく異なることが明らかになった。また、比散乱係数と不可逆伸びの関係にはシート間の変動がほとんどなく、衝撃による光学的特性の変化は不可逆伸びに置き換えて考えることができる。

以上のことから、シートの衝撃的な疲労、破断は、

そのシートに与えられた衝撃エネルギーに対応するものではなく、衝撃の結果生じた不可逆伸びと対応していることが明らかになった。同一衝撃エネルギーに対するシートの応答（すなわち比散乱係数変化や不可逆変形）が変動する原因は、ここでは詳しく検討しなかったが、恐らく衝撃破断メカニズムに確率過程が関与しているためであろう。

静的引張り試験では、与えられた荷重、エネルギーに対して生じる比散乱係数変化、不可逆伸びの試料間の変動は非常に少なかった。従って同一条件下で抄造したシートでは、ほぼ同じ荷重-伸長特性を示すものと考えられ、衝撃的、動的な刺激をうけるような紙の利用に際しては、引張り試験が必ずしも紙の品質評価の良い指標になるとは限らないことが、本実験から明らかになった。

(受理 53. 5. 29)

文 献

- 1) H. F. Rance, Tappi, **39**, 104(1959)
- 2) J. A. Van den Akker, *ibid.*, **53**, 388(1970)
- 3) C. T. J. Dodson, In "The Fundamental Properties of Paper Related to Its Uses" (F. Bolam, Ed.), Tech. Div. B. P. B. I. F., London (1976) p 202
- 4) 門屋 卓, 角 祐一郎, 吉野 勇: 紙の科学, 中外産業調査会 (1977)
- 5) O. Andersson and B. Steenberg, Svensk Papperstidn., **53**, 1 (1950)
- 6) O. Andersson, *ibid.*, **56**, 403 (1953)
- 7) J. Mardon, R. E. Monahan, R. A. Caeter and J. E. Wilder, In "Consolidation of the Paper Web" (F. Bolam, Ed.), Tech. Sect. B. P. B. M. A., London (1966) P576
- 8) 木村 実, 太田正光, 門屋 卓: 紙パ技協誌, **30**, 598 (1976)
- 9) 木村 実, 門屋 卓: *ibid.*, **30**, 665 (1976)
- 10) M. Kimura, M. Usuda and T. Kadoya, In "Fibre-Water Interaction in Papermaking" Transactions of Symposium held at Oxford, Sept. (1977)
- 11) 木村 実, 門屋 卓: 紙パ技協誌, **32**, 471(1978)
- 12) J. Kubát, L. Nyborg and B. Steenberg, Svensk Papperstidn., **66**, 754 (1963)
- 13) 門屋 卓: 紙パ技協誌, **25**, 475 (1971)
- 14) O. Andersson and L. Sjöberg, Svensk Papperstidn., **56**, 615 (1953)

- 15) 横堀武夫: “材料強度学”, I 編, V 編, 技報堂 (1967)
 - 16) 二宮正義, 桑原五郎, 門屋 卓: 紙パ技協誌,
 - 17) L. Nordman, In “Fundamentals of Paper-making Fibres” (F. Bolam, Ed.), Tech. Sect. B. P. B. M. A., London (1958) p 333
 - 18) D. H. Page, P. A. Tydeman and M. Hunt, In “Formation and Structure of Paper” Tech. Sect. B. P. B. M. A., London (1962) p 249
 - 19) K. Ebeling, In “The Fundamenal Properties of Paper Related to Its Uses” Tech. Div. B. P. B. I. F., London (1976) p 394
 - 20) L. E. Nielsen, 小野木重治訳 “高分子の力学的性質” 化学同人 (1969) p 121
-