

# 衝撃を受けた木材ばりの破壊に関する一考察

最上 幸夫\*・阪本 紀博\*\*

A Study on the Fractures of Wooden Beams under Impulsive Loading

Sachio MOGAMI and Michihiro SAKAMOTO

## Abstract

The writers have been studying the plastic deformations of steel beams, i. e. ductile materials, under large impulsive loading. At the same time we studied the theory and carried out some experiments on the response of wooden beams, i. e. brittle materials, under impulsive loading. When the wooden materials are fractured by impulse, whether the breaking stress in the breaking instant is the same value as the static breaking stress or not, is not yet declared. So we had experimental studies on the fractures of some kinds of wooden beams under impulsive loading and investigated the relations between static yielding stresses and dynamic ones. These details are described in this paper.

## 1. 緒 言

著者らは従来から延性材料とみなされる鋼材ばかりがかなり大きい衝撃を受けて塑性変形を生ずる場合について若干の実験を行ない、また理論的考察を加えて種々検討を進めているが、これと並行して脆性材料とみなされる木材ばかりの衝撃に対する応答についても若干の実験と考察を試みた。木材が衝撃を受けて破壊した場合、破壊瞬間に生ずる破壊応力が静的荷重によって生ずる破壊応力とはたして同一の値をとるものであるかどうかなどについては、従来余り明らかにされていないようである。一般的にいえば、いかなる材料の場合でも、静的荷重に対する抵抗力よりも衝撃を受けた場合に瞬間的に発揮しうる抵抗力の方が大きいことは良く知られた事実のようであるが、静的な場合のなん倍ぐらいになるものかということについては、材料の種類によって異なるものと考えられ、鋼材などについては、かなり明らかにされている。しかし木材の場合については、著者の知る範囲では、ほとんど取り扱われたものは見当たらないようである。そこで2, 3の樹種について衝撃による木材ばかりの破壊実験を実施し、また参考のために同じ材料について静的破壊の実験も行なって、それらの相関性をしらべるとともに、静的降伏応力と動的降伏応力との関連性などについて検討を進めた。以下その概要について報告する。

## 2. 実験の概要

実験に使用した木材ばかりとしては2.6cm×2.6cmの正方形断面のものを用い、樹種としては現在かなり広く実用されているひのき、杉、ラワンの3種を採用した。これは地元で容易に入手できるという便宜上から決めたものである。はり形式としては、片持ちばりおよび単純ばりの2種類とし、スパンは30~100cmの範囲で10cmずつ変化させた。はりに加える衝撃としては9.6kgの鋼製おもりを鋼製のガイドに沿って自然落下させて衝撃を加えた。この場合おもりの落下高さは予備実験として各スパン長ごとに任意高さから自然落下させ、試片本数の約半数程度が破壊する高さを見出し、その高さを基準として、上下2, 3cmずつ増減した高さから落下させることにした。実験は各高さ、各スパンごとに同一条件のもとで20本のはりについて実験し、そのうち破壊した本数の相対度数を求め、衝撃量の大きさと相対度数との関係を実験的に求めた。もちろん20本の試片では試料の数がやや少なすぎて統計的取り扱いをするには不十分ではあるが、時間、労力、経費などの点から考慮して止むを得ないと判断したためである。木材の場合は材料の不均一性がかなり著しいものと考えられるので、材料の選択には特に注意し、なるべくふしを多く含むような材料は使用しないように心がけた。またはりが衝撃を受けた瞬間から破壊を生ずるまでの時間を推定するために、片持ちば

\* 土木工学教室

\*\* 福山コンサルタント

りではスパン中央に、単純ばりではスパンの1/4点に変位計(東洋測器製 DB-40型)を設置し、リード線で動ひずみ測定器(新興通信 DS6-RJ型)に接続し、ラピコーダー(共和電業 RMV-100701)によって、はりの変位状態をオッシュロペーパー上に記録させ、その最大変位を生じた時刻までの時間をもって、一応近

似的に破壊時間とみなすことにした。同一状態については3個の試片について記録を採り、その平均値によって破壊時間を決め、実験結果を整理した。なお実験に用いた材料の諸元は Table 1 のとおりである。ただし、各試片5個の測定値の平均値を採ったものである。

Table 1 Various values of materials

Items	Japanese cypress	Cedar	Rowan
Specific gravity	0.49 g/cm <sup>3</sup>	0.44 "	0.56 "
Young modulus	1.61×10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup>	0.71×10 <sup>5</sup> "	1.56×10 <sup>5</sup> "
Static yield stress	456 kg/cm <sup>2</sup>	371 "	508 "
Total plastic moment	2005 kg·cm	1628 "	2230 "

3. 実験結果

まず各材料、すなわちひのき、杉、ラワン材について、片持ちばりおよび単純ばりの状態で、上述のように、そのスパンを30~100cmの間で10cmごとに変化させ、片持ちばりの場合はその先端に、単純ばりの場合はスパン中点に衝撃量  $I$  を作用させ、衝撃量を種々に変化させて特定のはり状態に対して特定の衝撃量  $I$  を加えた実験を20回行なったうち、はりの破壊を生じた回数を実験的に求めてみると、そのはり状態がその衝撃量  $I$  によって生ずる破壊の確率が求められることになる。はり状態を固定して、衝撃量  $I$  のみを変化せしめ、同様の実験を行なえば、各  $I$  の値に対するそのはり状態の破壊の確率が得られ、これらの点を連結すれば、そのはり状態の衝撃量  $I$  に対する破壊の確率分布曲線  $F(I)$  が得られる。このような  $F(I) - I$  の関係を各材種および片持ちばり、単純ばりの各スパンについて実験的に求めてみた。それらの結果によると、

$F(I) - I$  の関係はほとんどの実験の場合ほぼ直線関係によって近似できると考えられる。実験結果の一例を示すと、Fig. 1~3 のようである。

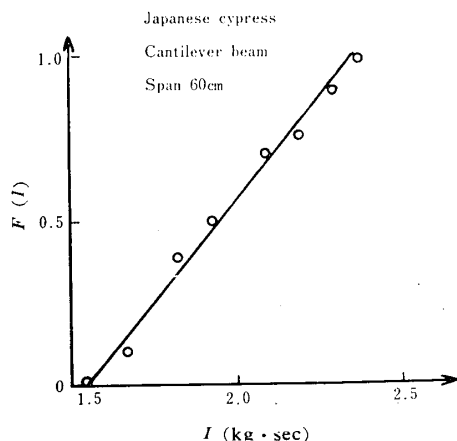


Fig. 1 Relations between  $F(I)$  and  $I$

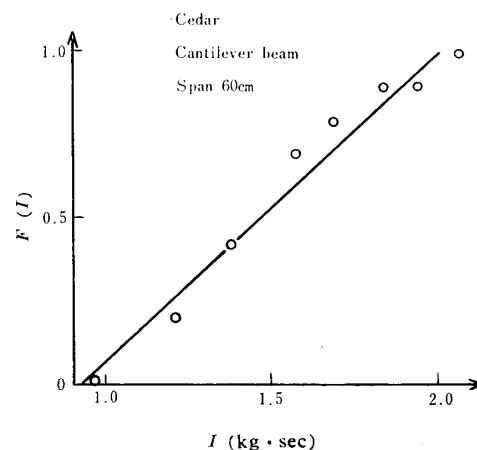


Fig. 2 Relations between  $F(I)$  and  $I$

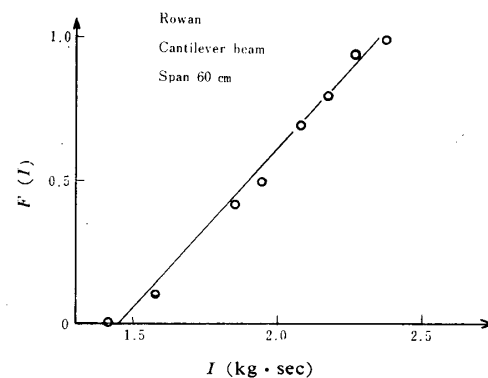


Fig. 3 Relations between  $F(I)$  and  $I$

そこで  $F(I) - I$  関係は直線分布で表わしうるも

のと仮定し、最小2乗法によって直線を決定した。

これらの結果をまとめた一例を示せば、Fig. 4~ Fig. 6のごとくである。

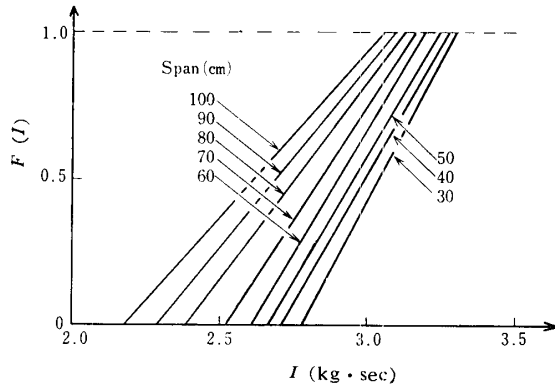


Fig. 4 Relations between  $F(I)$  and  $I$

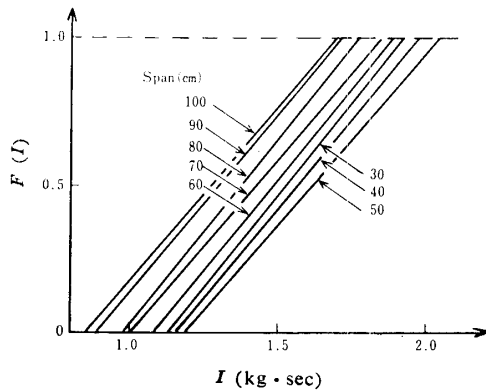


Fig. 5 Relations between  $F(I)$  and  $I$

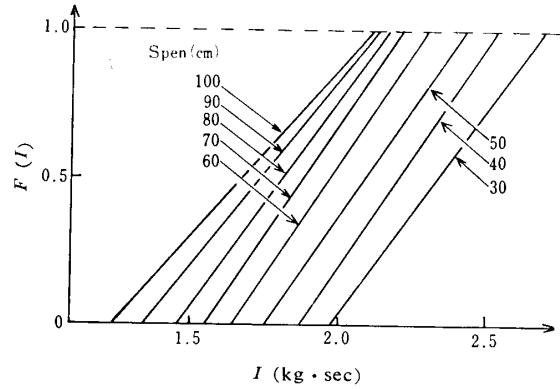


Fig. 6 Relations between  $F(I)$  and  $I$

以上のごとく、 $F(I)$  分布が直線で近似できるので、破壊衝撃の平均値は上限値と下限値との平均値で簡単に表わされることになり、これを破壊衝撃量  $I_b$  と定義する。この  $I_b$  の値を求めると、Table 2のごとくなる。また上述の破壊時間  $t_f$  の測定例を Table 3に示す。

#### 4. 木材ばりの破壊応力に関する考察

前節までに述べた方法によって木材ばりに対する破壊衝撃量  $I_b$  が決まったが、このような  $I_b$  に対して木材内部に生ずる破壊応力がどのような値を示すものであるかについては、現在のところ余り論じられたものは見当たらない。周知のごとく、静荷重に対しては、曲げモーメント最大となる断面の曲げモーメントが全塑性モーメント  $M_0$  に達すれば、この断面に降伏ヒンジが発生し、片持ちばりでは固定端に、単純ばりでは

Table 2 Values of breaking impulse  $I_b$  (kg·sec)

(a) The case of cantilever beams

Span(cm)	30	40	50	60	70	80	90	100
Materials								
Japanese cypress	2.067	1.964	1.884	1.814	1,795	1.260	1.736	1.638
Cedar	1.618	1.564	1.527	1.484	1.423	1.373	1,304	1.372
Rowan	2.330	2.201	2.088	1.969	1.880	1.813	1.740	1.678

(b) The case of simple beams

Span(cm)	30	40	50	60	70	80	90	100
Materials								
Japanese cypress	3.040	3.002	2.954	2.905	2.843	2.753	2.688	2.619
Cedar	2.573	2.518	2.428	2.354	2.256	2.179	2.124	2.059
Rowan	2.851	2.792	2.714	2.642	2.580	2.535	2.490	2.418

Table 3 Measured values of breaking time  $t_f$  (sec)

## (a) The case of cantilever beams

Span(cm)	30	40	50	60	70	80	90	100
Materials								
Japanese cypress	0.020	0.022	0.023	0.025	0.026	0.028	0.030	0.032
Cedar	0.026	0.029	0.031	0.032	0.035	0.036	0.037	0.038
Rowan	0.051	0.022	0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.030

## (b) The case of simple beams

Span(cm)	30	40	50	60	70	80	90	100
Materials								
Japanese cypress	0.008	0.010	0.011	0.012	0.013	0.013	0.014	0.015
Cedar	0.011	0.013	0.014	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018
Rowan	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016

は集中荷重作用点に降伏ヒンジが発生して、はりは崩壊することになる。このときの荷重が崩壊荷重であるが、ある任意の静的集中荷重  $P$  が片持ちばり先端および単純ばり中点に作用した場合、これらのはりが崩壊（破壊）するときのスパン長を崩壊スパンと名付け、これを  $l_b$  で表わせば、

$$\text{片持ちばり: } l_b = M_o/P \quad (1)$$

$$\text{単純ばり: } l_b = 4M_o/P \quad (2)$$

となる。ここに、 $M_o$ : 静的全塑性モーメント ( $M_o = \sigma_o bh^2/4$ ,  $\sigma_o$ : 静的降伏応力,  $b, h$  は矩形断面ばりの幅および高さ)。

式(1), (2)によれば、崩壊スパンは荷重  $P$  に逆比例するから、 $P-l_b$  の関係は双曲線で表わされる。いずれにしても静的荷重によって木材ばりが破壊する場合には、破壊断面における応力分布は全断面に一樣な降伏応力  $\sigma_o$  が発生する。この静的降伏応力  $\sigma_o$  は実験的に比較的容易にその値を得ることができる。しかし衝撃による破壊のような場合には、その内部における動的降伏応力  $\sigma_d$  の値を測定することは實際上困難である。鋼材のような延性材料の場合には、動的降伏応力  $\sigma_d$  の測定も可能と考えられ、 $\sigma_d$  はひずみ速度の影響を受けて、静的降伏応力  $\sigma_o$  よりも増大し、一般に次式で表わされることが Manjoine 氏の実験結果から明らかにされている。

$$\sigma_d = \sigma_o [1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/P}] \quad (3)$$

あるいは上式は近似的に次式によって表わされる<sup>1)</sup>。

$$\sigma_d = \sigma_o [1 + \{v_o/(2DI)\}^{1/P}] \quad (4)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}$ : ひずみ速度,  $D, P$  は材料によって決ま

る定数,  $v_o$ : 衝撃瞬間の衝撃点の初速度,  $l$ : スパン長。鋼材のような延性材料でかなり均質なものは、式(3)または(4)が適用されるが、木材のような脆性で、しかも不均質な材料では、その性質はかなり異なるものと考えられ、 $\sigma_d$  と  $\sigma_o$  の相関性はかなりの不規則性を含むことが推測される。一応両者の関係に最も密接な影響を与える要素としては、衝撃時の初速度  $v_o$ 、スパン長  $l$  などが考えられるが、木材の場合は鋼材と異なり、ひずみ速度 (すなわち、初速度  $v_o$ ) の影響は比較的小さく、スパン長  $l$  の影響が最も顕著になるものと推定される。そこで木材ばりに対しては、最も単純な仮定として、 $\sigma_d$  と  $\sigma_o$  の関係をつぎのようにおく。

$$\sigma_d = \sigma_o \{1 + \alpha(l)\} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha(l)$  はスパン  $l$  の関数。

また近似的には、モーメントに対しても同様の関係があるものとする。すなわち、

$$M_d = M_o \{1 + \alpha(l)\} \quad (6)$$

以上のような仮定を設けると、片持ちばりおよび単純ばりに対し、既報の理論<sup>1)</sup>を適用すれば、次式の関係が得られる。

$$\text{片持ちばり: } \alpha(l) = \frac{I_b l}{M_o t_f} - 1 \quad (7)$$

$$\text{単純ばり: } \alpha(l) = \frac{I_b l}{4 M_o t_f} - 1 \quad (8)$$

ここに、 $I_b = GV$  = 破壊衝撃量,  $G$  = 落体の質量,  $V$  = 落体がはりに衝突した瞬前の速度, 落高を  $H$  とすれば、 $V = \sqrt{2gH}$  となる。ただし、 $g$  = 重力の加速度,  $l$  = はりのスパン長,  $M_o$  = 木材の静的全塑性モー

メント,  $t_f$  = 衝撃瞬間から塑性変形を完了するまでの時間に相当するものと考えられるが, この値はすでに述べたように実験的に求めた。

したがって式(7)および(8)によって,  $\alpha(l)$  の値を求め, スパン  $l$  との関係を図示すると, Fig. 7~8 のようになる。

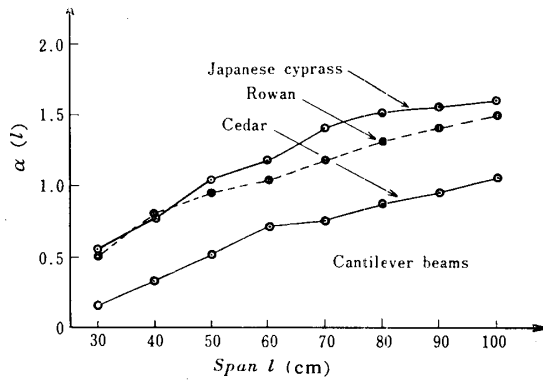


Fig. 7 Relations between  $\alpha(l)$  and  $l$

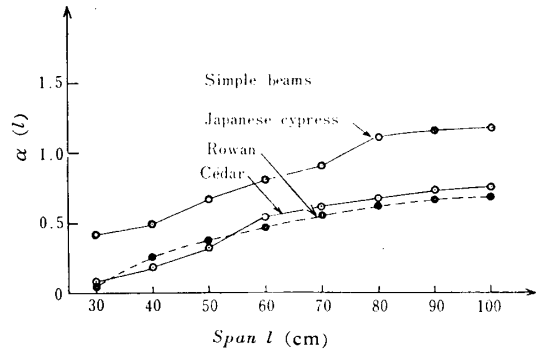


Fig. 8 Relations between  $\alpha(l)$  and  $l$

そこで  $\alpha(l)$  曲線を近似的に,

$$\alpha(l) = a + bl - cl^3 \quad (9)$$

と表わし, 実験曲線より最小2乗法によって定数  $a$ ,  $b$  および  $c$  の値を決定し,  $\alpha(l)$  の修正値を求めると, Table 4 のごとくなる。

Table 4 Adjusted values of  $\alpha(l)$

(a) The case of cantilever beams

Span(cm)	30	40	50	60	70	80	90	100
Materials								
Japanese cypress	0.546	0.781	1.042	1.177	1.410	1.508	1.553	1.598
Cedar	0.347	0.325	0.513	0.709	0.748	0.874	0.948	1.056
Rowan	0.493	0.795	0.951	1.037	1.183	1.323	1.422	1.508

(b) The case of simple beams

Span(cm)	30	40	50	60	70	80	90	100
Materials								
Japanese cypress	0.421	0.497	0.674	0.811	0.909	1.112	1.155	1.177
Cedar	0.078	0.190	0.332	0.549	0.617	0.673	0.727	0.757
Rowan	0.065	0.252	0.383	0.481	0.557	0.624	0.675	0.694

これらの  $\alpha(l)$  の値は, 片持ちばりに対しては, その大きさは, ひのき, ラワン, 杉の順となり, 単純ばりに対しては, ひのき, 杉, ラワンの順となっており, 構造によって順位が逆になっている。いずれにしても, これら3種のうちでは, ひのきが最も衝撃に対して強いことを示しており, 静的破壊試験では, ラワンの方がひのきよりも降伏応力が大きいにもかかわらず, 衝撃に対してはひのきの方がラワンよりもすぐれていることがわかる。Table 4 の結果を用いて, 式(6)により  $M_d$  の値を求め, 3種の木材について比較してみると, Fig. 9~10 のようになる。

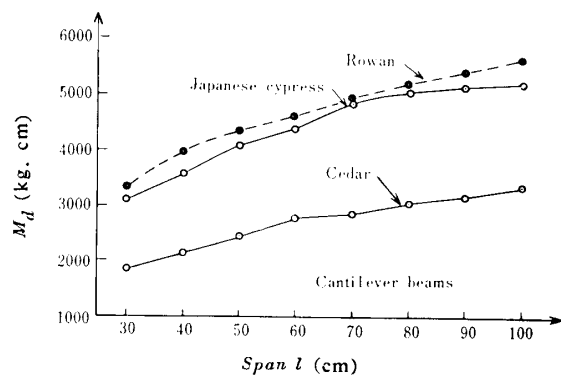
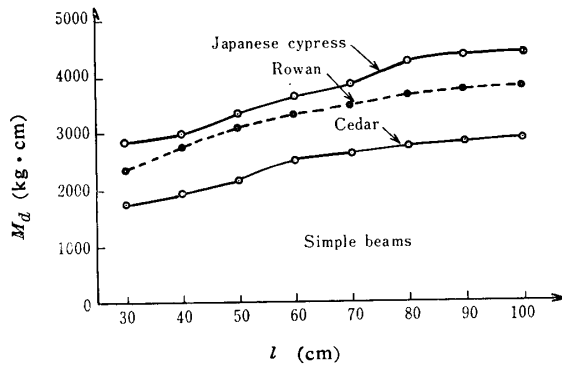


Fig. 9 Relations between  $M_d$  and  $l$

Fig. 10 Relations between  $M_d$  and  $l$ 

## 5. 結 言

本文においては、3種の木材ばりに衝撃を加えて、どの程度の衝撃量に加わったとき、木材が破壊するかについて、スパンや衝撃量を種々変えて実験を行ない、破壊衝撃量とスパン長あるいははり構造との関連性について検討を行なった。その結果明らかになった主な事項をまとめると、およそつぎのとおりである。

1) 一般に木材は鋼材などと異なり、脆性材料とみなされるが、せんいやふしなどに材料の不均一性が著しいため、衝撃実験に対しては、かなり実験結果にばらつきが目立ち、したがって実験値の処理に当っては、統計的な考慮を必要とする。

2) 上述の不均一性によって、はり構造が変われば、破壊衝撃量も変動し、またスパン長によっても変動するという、きわめて複雑な特性が認められた。

3) 静的破壊荷重と衝撃による破壊衝撃量とは必ずしも単純な対応関係にはないことが実験的に明らかに

なった。

4) 衝撃破壊時における動的全塑性モーメント  $M_d$  と静的全塑性モーメント  $M_0$  との関係は、ほぼスパン長  $l$  の関数によって結びつけることが明らかとなった。すなわち、式(6)の形で表わしうるが、この場合  $\alpha(l)$  の係数が片持ちばりと単純ばりなどのはり構造によって変わってくる点に不便が認められる。したがって、今後さらに合理的な表現の可能な方法を検討することが望ましいと考えられるが、木材の不均一性が著しいことを考えると、かなり困難なものと思われる。

5) 一般に衝撃による破壊時間  $t_f$  および  $\alpha(l)$  はスパン長が大となるほど、その値が大きくなる傾向は、はり構造のいかんに関係なく共通的に認められる傾向である。これらの事実は木材のような脆性材料の場合でも静的全塑性モーメント  $M_0$  と衝撃による動的全塑性モーメント  $M_d$  とは一致せず、スパン長が大きくなるほど  $M_d$  が増大することを示すものとして注目しなければならない。

終わりに本研究に協力された半田重美(大本組)、宮本憲(熊谷組)の両君に深謝の意を表わす次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 最上幸夫・阪本紀博：山口大学工学部研究報告，20，No. 2 (1969)

(昭和45年4月3日受理)