

木材のねじりせん断強さにおける寸法効果について

鈴木直之・大河平行雄

On the Size Effects in the Torsional Shearing Strength of Wood

Naoyuki SUZUKI and Yukio OKOHIRA

I. はじめに

前報¹⁾では、せん断強さ測定に、ねじり試験を使用できるか否かの検討をし、十分使用できるものと判断した。最終的には、この試験方法により得られたせん断強さを実大構造部材に適用することを目的とするが、このように小さな試験体で得られた値を、そのまま実大材のデータとして用いることは、極めて危険なことである。材料がぜい性破壊を起こすとき、局在する最弱部の強さにより強度が決定するという最弱リンク説に従い、寸法が大きくなるにつれて強度が低下する、いわゆる寸法効果が認められる。せん断破壊もぜい性破壊にかなり近いと考えられるので、本報では、ねじりによるせん断破壊試験を行い、寸法効果についての検討と寸法効果定数の測定を行った。

なお、本研究は、昭和59年度文部省科学研究費一般研究(B) (代表者大河平行雄) の補助を受けておこなわれた。また、本論文をまとめるにあたり有益な助言をいただいた増田助教教授に対し、ここにつつしんで感謝の意を表する。

II. ねじり試験について

試験体にねじりモーメントを与えると、Fig. 1 に示すような4種類のせん断応力、 τ_{LR} , τ_{RL} , τ_{LT} , τ_{TL} が作用する。これらの応力のうち、 τ_{LR} と τ_{RL} , τ_{LT} と τ_{TL} は、それぞれ共役なため、 $\tau_{RL} = \tau_{LR}$, $\tau_{TL} = \tau_{LT}$ が成立する。本報のように、試験体の軸方向と繊維方向とを一致させた場合、繊維を断ち切るようなせん断破壊は起こらないので、せん断破壊に関与する応力は、 τ_{RL} と τ_{TL} の2つ

のみとなる。ねじりモーメント M が作用する時、 τ_{TL} , τ_{RL} は、次式で与えられる²⁾。

$$\tau_{TL} = G_{LT} \cdot \omega \cdot \phi_1 \quad \dots(1)$$

$$\tau_{RL} = G_{LR} \cdot \omega \cdot \phi_2 \quad \dots(2)$$

$$\omega = \frac{M}{G_{LR} \cdot a^3 \cdot b \cdot \psi}$$

$$\phi_1 = -2 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{a}{k} \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \cdot$$

$$\frac{\sinh \frac{(2n+1)\pi \cdot y \cdot k}{a}}{\cosh \frac{(2n+1)\pi \cdot b \cdot k}{2a}} \cdot \cos \frac{(2n+1)\pi \cdot x}{a}$$

$$\phi_2 = 2x - 2 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \cdot a \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \cdot$$

$$\frac{\cosh \frac{(2n+1)\pi \cdot y \cdot k}{a}}{\cosh \frac{(2n+1)\pi \cdot b \cdot k}{2a}} \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi \cdot x}{a}$$

$$\psi = \frac{1}{3} - \frac{2a}{b \cdot k} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \right)^5 \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \cdot \tanh \frac{(2n+1)\pi \cdot b \cdot k}{2a}$$

$$k = \sqrt{\frac{G_{LT}}{G_{LR}}}$$

ここで G_{LT} , G_{LR} は、それぞれ板目面および柁目面におけるせん断弾性係数、 a , b は、それぞれ接線および半径方向の寸法である。

τ_{TL} は、A点 $(0, \pm \frac{a}{2})$ で最大、 $x = \pm \frac{a}{2}$ および x 軸上で最小値0となる。また、同様に、 τ_{RL} は、B点 $(\pm \frac{a}{2}, 0)$ で最大、 $y = \pm \frac{b}{2}$ および y 軸上で最小値0となる。従って、破壊時のA点またはB点に作用するせん断応力をせん断強さと定義すれば、 τ_{TL} および τ_{RL} に対するせん断強さ、すなわち柁目面せん断強さ τ_{Tmax} および板目面せん断強さ τ_{Rmax} は、次式で与えられる。

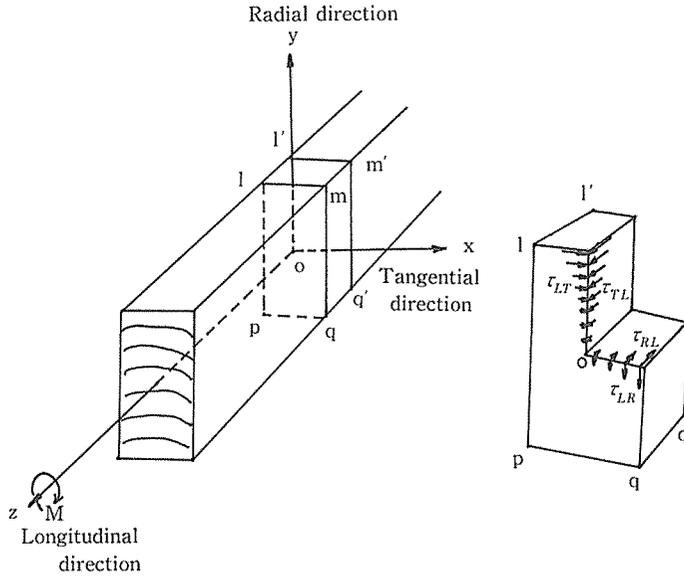


Fig. 1. The distribution of shearing stress.

$$\begin{aligned}\tau_{T\max} &= \frac{\phi'_1 \cdot M_{\max}}{a^2 \cdot b \cdot \psi} \\ &= \frac{f_T \cdot M_{\max}}{a^2 \cdot b} \quad \dots (3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{R\max} &= \frac{\phi'_2 \cdot M_{\max}}{a^2 \cdot b \cdot \psi} \\ &= \frac{f_R \cdot M_{\max}}{a^2 \cdot b} \quad \dots (4)\end{aligned}$$

$$\phi'_1 = -2 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \cdot k \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \cdot \tanh \frac{(2n+1)\pi \cdot b \cdot k}{2a}$$

$$\phi'_2 = 1 - 2 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \left\{ \cosh \frac{(2n+1)\pi \cdot b \cdot k}{2a} \right\}^{-1}$$

M_{\max} : 最大ねじりモーメント

f_T, f_R は、断面寸法の比 (b/a) と k によってきまる係数である。本研究で使用したベイツガおよびレッドラワンの k は、ほぼ $0.8 \sim 1.0$ の範囲にあった。 k が 0.8 から 1.0 の値に対して、 LT 試験体 ($b/a=1/2$) では、 $f_T=7.85 \sim 8.15, f_R=7.45 \sim 6.45$, LR 試験体 ($b/a=2$) では、 $f_T=2.88 \sim 3.24, f_R=4.26 \sim 4.06$ である。 k のこの区間では、 k と f_T, f_R とは、ほぼ直線関係にあり、 f_T, f_R は、実測の k 値に対して、補間により求めることができる。

III. 実 験

1. 試験体

供試材に、ベイツガおよびレッドラワンの2樹種を使

用した。1辺が 10 cm 、長さが 3 m のベイツガ二方桁心去り正角材6本 (採取箇所が不明であるため、各1本を1ロットとみなし、それぞれA~Fの記号を割り当てる) から、寸法 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ のブロックを、1ロットあたり2~3ブロック、計16個、1辺が 10 cm 、長さ 4 m のレッドラワン4本 (二方桁、心去り、 $a \sim d$) から、上記同寸法のブロックを、1ロットあたり4ブロック、計16個採取した。ベイツガおよびレッドラワンの諸性質を、ロットごとに、Table 1 に示す。

試験体の長さ方向およびそれと直交する2軸方向を、木材の繊維方向、半径方向、接線方向にそれぞれ一致させた。従って、ねじり試験により、試験体は、桁目面せん断または板目面せん断により破壊する。桁目面せん断破壊と板目面せん断破壊の現われ方は、樹種によって異なる。そこで、本報では、これら2種類のせん断強さを測定するため、試験体の断面寸法比 (幅対高さ) が1対2の長方形断面とし、長辺側に板目面が現われるものを LT 試験体、桁目面のものを LR 試験体と名付けた2種類の試験体 (Fig. 2) を使用した。

Fig. 3 で示されるように、試験体は、長方形断面の板材と補強材が木工用ボンド (酢酸ビニルエマルジョン接着剤) で接着された、引張試験体に準じた形状のものである。なお、この試験体は、前報¹⁾で使用されたねじりせん断強さ測定用試験体と同一寸法であり、これを

Table 1. Values of specific gravity, moisture content and average annual ring width of wood.

Species	Lot	Specific gravity	Moisture content (%)	Average annual ring width (mm)
Western hemlock	A	0.41±0.022	13.5±0.20	1.2±0.13
	B	0.44±0.025	14.9±0.39	1.0±0.11
	C	0.48±0.035	14.6±0.59	1.3±0.20
	D	0.46±0.010	14.2±0.95	1.1±0.18
	E	0.45±0.011	14.6±0.65	1.2±0.14
	F	0.43±0.014	14.8±0.36	1.7±0.26
	Average	0.45±0.029	14.5±0.72	1.2±0.26
Red lauan	a	0.67±0.020	15.9±0.97	
	b	0.63±0.020	15.5±0.36	
	c	0.66±0.011	16.0±0.95	
	d	0.63±0.022	16.5±0.94	
	Average	0.65±0.025	16.0±0.90	

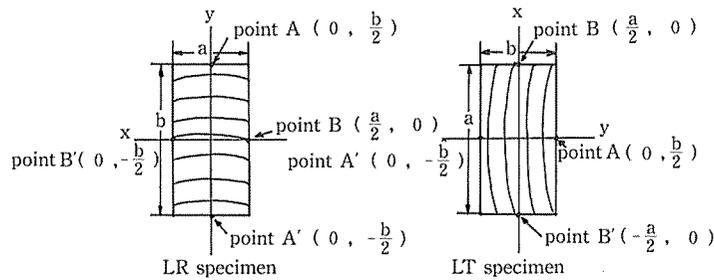


Fig. 2. The maximal point of shearing stress.

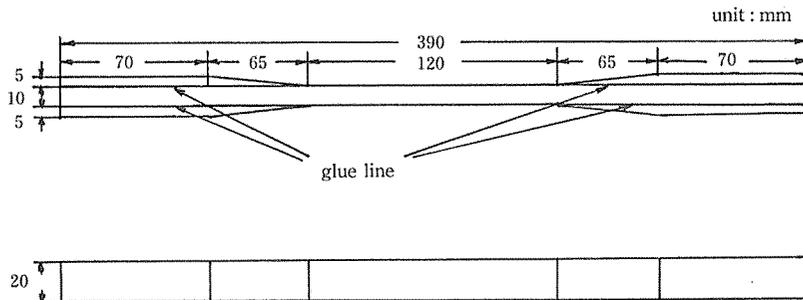


Fig. 3. Type III specimen.

Type III 試験体とし、この試験体の各寸法を1/4倍、1/2倍、2倍したものを、それぞれ、Type I、Type II、Type IV 試験体とする。

ベイツガ、レッドラワン両樹種とも、LT および LR 試験体用に、それぞれブロックを8個ずつ割り当て、各ブロックから Type I~Type IV 試験体用に板材を各4枚ずつ、計32枚採取した。なお、補強部材は、中板と同

樹種のものを使用した。採取の部位は、中板とは、必ずしも一致していない。

2. 実験方法

Fig. 4 に、ねじり試験装置の概略を示す。この試験装置は、自作のもので、ハンドルを手で回転させることでトルクを与え、ハンドルとチャックとの間に取り付けら

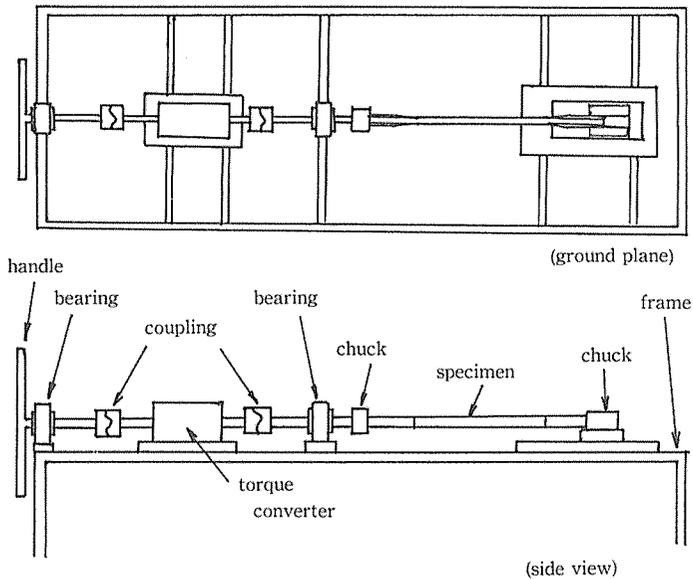


Fig. 4. The torsional test apparatus.

れたトルク変換器 (Type I, II 試験体では, 最大容量が 1 kgf・m の TP-1KMC 型, Type III, IV 試験体では, 最大容量が 10 kgf・m の TP-10KMC 型, とともに共和電業製) でトルクを検出し, 動ひずみ測定器 (共和 DPM-120A) を通して X-Y レコーダ (横河3086型) の Y 軸に記録させた。なお, X 軸方向へは, 記録紙を時間送りさせ, 各試験体とも, 負荷開始から破壊までの時間が, ほぼ 20 秒くらいになるようにした。

せん断強さの算出にあたっては, せん断弾性係数 G_{LR}, G_{LT} の値が必要である。せん断弾性係数は, 同一樹種内においても値にかなり大きなバラツキがみられるが, 全試験体について測定するためには, かなり多くの労力を費さなければならず, 能率的ではないので, 同一ロット内では一定値をとるものと仮定し, ロットごとに, せん断弾性係数の測定を行った。せん断弾性係数の測定は, Type III 試験体を用いて, ねじり試験¹⁾により行われた。

破壊試験後, 破壊箇所を確認を目視で行った。

3. 寸法効果定数について

一様な応力が分布し, 最弱リンク理論に従い, 破壊が材料の最弱部より起こると考えられるとき, 強度と体積との間には, 確率論から導き出された次の関係式が成立する³⁾。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{2\alpha} \quad \dots (5)$$

ここで, σ および σ_0 は, 体積がそれぞれ V および V_0 の時の強度であり, 2α は, 寸法効果の大きさを示す寸法効果定数で, この数値が小さい時, 寸法効果は大きい。

ねじり試験のように, 応力勾配がある場合も, ある厚さにわたっての負荷応力の平均値を考えることにより, 寸法効果が現われ⁴⁾, 均一応力分布の時と同様に取り扱うことができるものと考えられる。

いま, (5) 式の両辺の対数をとると

$$\log \sigma - \log \sigma_0 = \frac{1}{2\alpha} (\log V_0 - \log V) \quad \dots (6)$$

となり, 2α は, y 軸に $\log \sigma$ (本研究の場合, $\log \tau$), x 軸に $\log V$ をとった時の直線の傾きの絶対値の逆数として得られる。

IV. 実験結果および考察

Table 2 に, ねじり試験により得られた, ロットごとのせん断弾性係数 G_{LR}, G_{LT} の値を示す。Table 3 には, ねじり破壊試験により測定された最大トルクの平均値を示す。また, Table 4, Table 5 には, (3) 式および (4) 式により算出されたロットごとのせん断強さの平均値が,

Table 6 には、樹種ごとに、試験体全体のせん断強さの平均値および標準偏差が示されている。ベイツガおよびレッドラワン両試験体において、ともに、寸法が大きくなるにつれてせん断強さは低減している。寸法効果定数を求めるため、各試験体の体積 V およびせん断強さ τ_{Tmax} , τ_{Rmax} の対数をとり図に示したものが Fig. 5~8 である。図中の実線は、最小二乗法により求めた回帰直線式、 r は相関係数で、Fig. 5~8 いずれも、かなり高い負の相関を示しており、かなり大きな寸法効果が現われているように思われる。しかし、これらの図を注意深く観察すると、これら4つの平均値は、回帰直線にあまり良くはあてはまっていない。これに対し、Type I 試験体を除く3種類の試験体について回帰直線 (Fig. 5~8 の破線) を求めると、どの場合も、3つの平均値は、ほ

Table 2. Values of the shearing modulus.

Species	Lot	G_{LR} ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	G_{LT} ($\times 10^3$ kgf/cm ²)
Western hemlock	A	5.6	5.1
	B	5.6	5.3
	C	8.0	8.2
	D	6.5	4.8
	E	6.2	5.9
	F	5.3	5.4
Red lauan	a	7.4	5.3
	b	6.9	6.1
	c	7.1	6.0
	d	5.6	5.9

Table 3. Values of maximum torque in various specimens.

Western hemlock	Type I	II	III	IV
<i>LT specimen</i>				
Average of maximum torque (kgf·cm)	3.47	15.3	89.7	618
Variation coefficient (%)	13.7	15.6	18.1	20.7
Number of specimen	32	31	32	32
<i>LR specimen</i>				
Average of maximum torque (kgf·cm)	3.23	13.9	83.9	569
Variation coefficient (%)	12.6	14.5	20.1	22.8
Number of specimen	32	31	32	32
Red lauan				
<i>LT specimen</i>				
Average of maximum torque (kgf·cm)	2.90	13.0	79.0	547
Variation coefficient (%)	15.9	11.3	5.16	4.90
Number of specimen	32	32	32	32
<i>LR specimen</i>				
Average of maximum torque (kgf·cm)	2.98	13.1	76.0	522
Variation coefficient (%)	13.3	13.5	5.79	3.70
Number of specimen	32	32	32	32

Table 4. The means of shearing strength on each lot in various Western hemlock specimens.

τ_{Tmax} (kgf/cm ²)				
Lot	Type I	II	III	IV
A	338	191	146	116
B	371	269	206	160
C	418	269	247	212
D	407	192	165	145
E	326	224	170	148
F	340	198	154	138

τ_{Rmax} (kgf/cm ²)				
Lot	Type I	II	III	IV
A	298	168	113	82.4
B	410	248	224	164
C	380	225	189	165
D	355	195	166	137
E	345	195	170	153
F	327	203	171	154

Table 5. The means of shearing strength on each lot in various Red lauan specimens.

τ_{Tmax} (kgf/cm ²)				
Lot	Type I	II	III	IV
a	349	221	168	139
b	356	214	166	137
c	367	205	165	141
d	337	205	162	138

τ_{Rmax} (kgf/cm ²)				
Lot	Type I	II	III	IV
a	334	218	171	144
b	388	232	166	141
c	404	211	161	132
d	361	204	150	135

Table 6. Values of shearing strength in various specimens.

Western hemlock				
	Type I	II	III	IV
τ_{Tmax} (kgf/cm ²)	371±45.1	222±37.3	182±34.5	153±31.6
Number of specimen	33	33	32	37
τ_{Rmax} (kgf/cm ²)	351±49.6	205±29.2	169±34.9	142±31.4
Number of specimen	44	46	41	49

Red lauan				
	Type I	II	III	IV
τ_{Tmax} (kgf/cm ²)	352±52.1	210±24.0	165±7.9	139±6.3
Number of specimen	42	39	32	32
τ_{Rmax} (kgf/cm ²)	370±48.0	216±28.1	162±9.9	138±6.3
Number of specimen	39	41	33	33

ば一直線上にあり、Type I 試験体のみが、強度の大きな側へ突出しているように思われる。この原因の一つとして、試験体の長さ方向の拘束力の影響が考えられる。試験体のねじりによるせん断変形の結果、長さが短くなるが、これを拘束すると、破壊させるためには、より大きなトルクが必要となり、過大なせん断強さが得られる¹⁾。これを防ぐため、Fig. 4 の右側のチャックは、試

験体の長さの変化に応じて自由に移動できるようになっている。しかしチャックで試験体が締めつけられることにより、せん断変形の拘束がある程度起こることは避けられず、試験体が小さい時、この影響が大きく現われるものと考えられる。これがどの程度関与しているか等について、目下のところ検討中である。しかし、実際には、Type I 試験体のようにきわめて小さな試験体でせん断

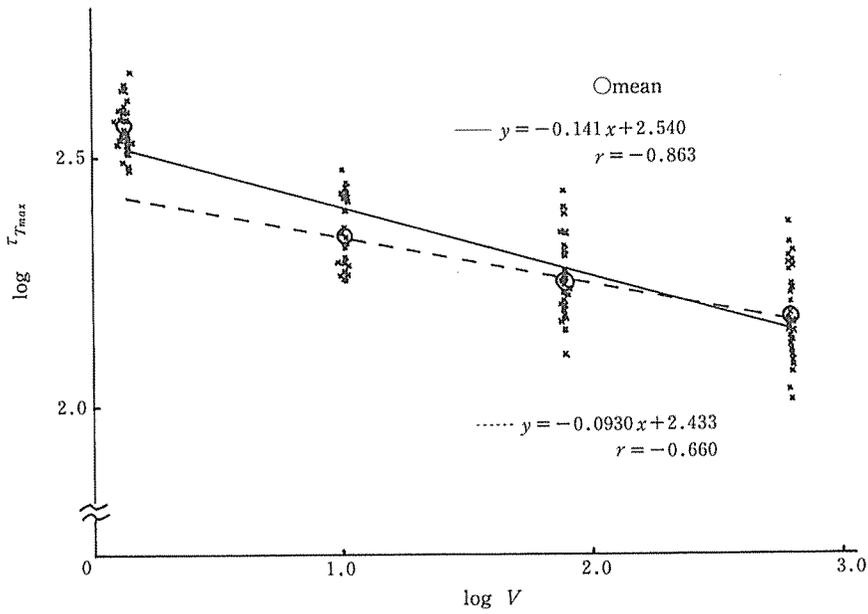


Fig. 5. The relationship between $\log V$ and $\log \tau_{Tmax}$ in Western hemlock specimens.

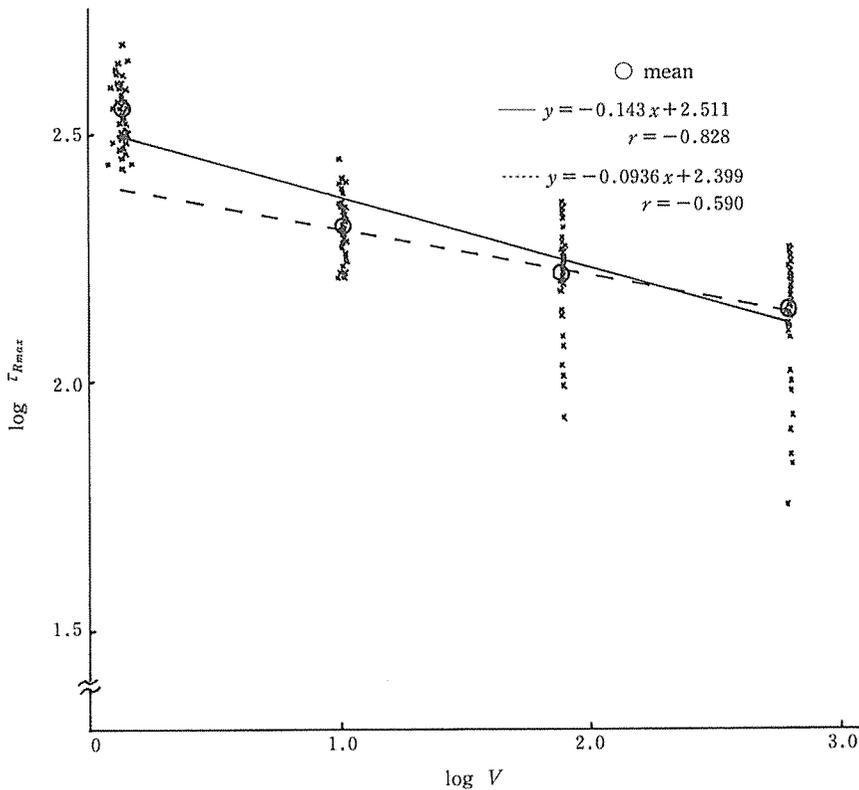


Fig. 6. The relationship between $\log V$ and $\log \tau_{Rmax}$ in Western hemlock specimens.

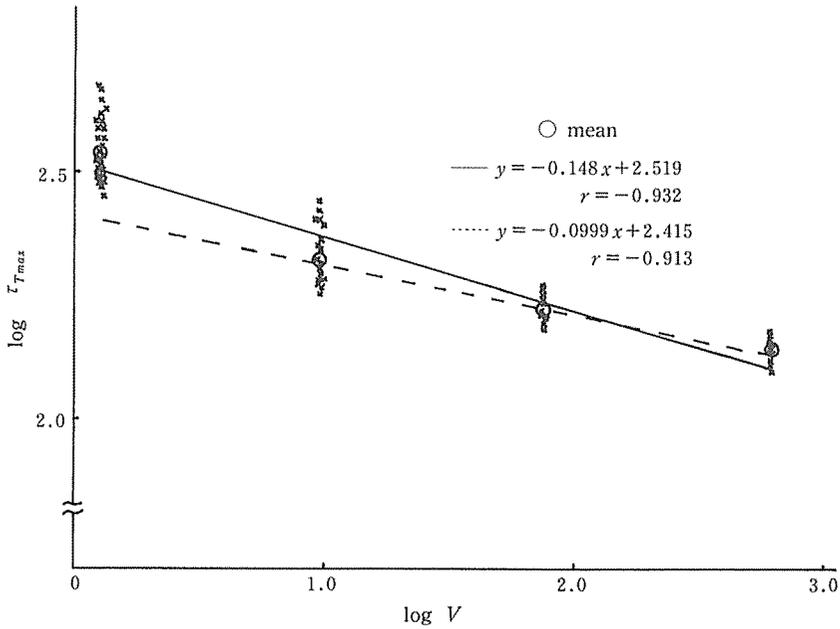


Fig. 7. The relationship between $\log V$ and $\log \tau_{Tmax}$ in Red lauan specimens.

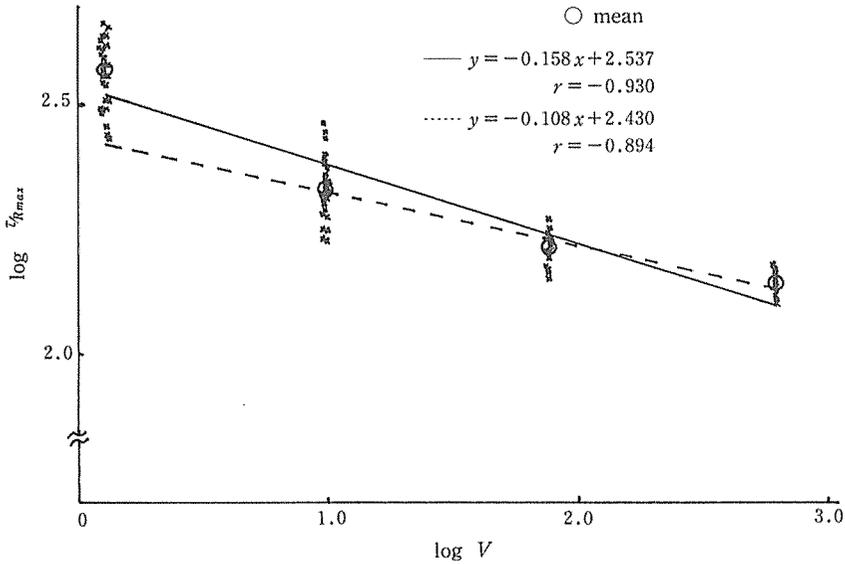


Fig. 8. The relationship between $\log V$ and $\log \tau_{Rmax}$ in Red lauan specimens.

強さを測定したり、小さな材を構造用部材として使用することは、ほとんどなく、Type I 試験体を除いた 3 種類の試験体について求められた寸法効果定数は、かなり

有用なものと考えられる。Table 7 に、種々の寸法効果定数を示す。

Table 7. Constants of size effect.

	$2\alpha_1$	$2\alpha_1^*$	$2\alpha_2$	$2\alpha_2^*$
Western hemlock				
τ_{Tmax}	7.09	7.40 ± 1.12	10.8	11.4 ± 3.60
τ_{Rmax}	6.99	7.22 ± 1.36	10.7	12.2 ± 4.02
Red lauan				
τ_{Tmax}	6.76	6.75 ± 0.20	10.0	10.0 ± 0.94
τ_{Rmax}	6.33	6.41 ± 0.72	9.26	9.34 ± 0.80

$2\alpha_1, 2\alpha_2$: Constants of size effect calculated on all lots with Type I~IV specimens and with Type II~IV specimens, respectively

$2\alpha_1^*, 2\alpha_2^*$: Means and standard deviations of constants of size effect calculated on each lot with Type I~IV specimens and with Type II~IV specimens, respectively

V. む す び

文 献

ベイツガ、レッドラワン両樹種において、最小寸法の試験体である Type I 試験体を除けば、 $\log \tau/\tau_0$ と $\log V/V_0$ との間に直線関係が成り立ち、せん断破壊に対し、比較的大きな寸法効果の存在が認められた。ねじり試験により得られたせん断強さの寸法効果定数は、柾目面せん断で10.8 (ベイツガ)、10.0 (レッドラワン)、板目面せん断で10.7 (ベイツガ)、9.26 (レッドラワン) であった。

- 1) 鈴木直之, 大河平行雄, 三重大農学報, No. 65, : 41-49, 1982
- 2) 倉西正嗣, 弾性学, 東京, 国際理工研究社: 581-583, 1970
- 3) FREUDENTHAL, A. M., Fracture II, New York, Academic Press: 591-619, 1968
- 4) 横堀武夫, 材料強度学 (第2版), 東京, 岩波書店: 301-302, 1974

Summary

The size effects in shearing strength were investigated by means of the torsional test in two species of Western hemlock and Red lauan. The torsional tests were carried out by using four kinds of specimens whose size were two times, four times and eight times as long as the smallest specimens respectively. The shearing strength of these specimens was measured.

The results obtained are summarized as follows:

1) It was observed that there was a high negative correlation between logarithms of the shearing strength ($\log \tau_{max}$) and logarithms of the volume of the specimens ($\log V$). Particularly, the regression line in three kinds of specimens, except the smallest one (Type I specimen), was very nearly identical. Accordingly, it was considered that the shearing fracture coincided with the weakest link theory.

2) The constants of the size effect of Western hemlock specimens were 10.8 (shearing strength in radial section) and 10.7 (shearing strength in tangential section). The constants of Red lauan specimens were 10.0 (shearing strength in radial section) and 9.26 (shearing strength in tangential section).