



Title	わん曲集成材における曲率半径と挽板厚に関する研究
Author(s)	生田, 晴家; IKUTA, Haruie
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 43(3), 789-801
Issue Date	1986-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21191
Type	departmental bulletin paper
File Information	43(3)_P789-801.pdf



わん曲集成材における曲率半径と 挽板厚に関する研究*

生 田 晴 家**

Studies on the Relationship between the Radius
of Curvature and Board Thickness
in Curved Glued-Laminated Timbers*

By

Haruie IKUTA**

要 旨

現行の針葉樹わん曲集成材の製造基準では、製造時の挽板（ラミナ）の内縁に対する曲率半径 R と挽板厚（ラミナ厚） t との関係を、 $R \geq 100t$ とするように規定している。この $R \geq 100t$ という基準においては、当然のことながら、集成作業の省力化のために、挽板に最もきつい曲率を与える $R=100t$ が採用されることになる訳であるが、この $R=100t$ 基準については製造時の挽板の安全性に関し、経験上または理論上からも疑問の持たれるところである。本研究では、5種類の挽板厚（ $t=10, 15, 20, 25, 30$ mm）に対し、この $R=100t$ 基準の問題点および適正な曲率半径と挽板厚との関係について、実験的検討を加えた。その結果、この製造基準では合計50体の挽板のすべてが曲げ比例限度を大きく超えてしまい、過半の27体に圧縮破壊線が発生したこと、また、挽板を破損の認められない比例限度内で使用するという立場をとるならば、適正な曲率半径と挽板厚との関係は $R \geq 150t$ とすべきであること等が示された。

キーワード：わん曲集成材，挽板，曲率半径，圧縮破壊線，相対撓み。

目 次

1. 緒 言	790
--------------	-----

* 1986年2月28日受理 Received February 28, 1986.

** 北海道大学農学部木材加工学講座

Laboratory of Wood Engineering, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

2. わん曲集成時の挽板の曲げ応力	790
3. 材料および試験方法	791
3.1 使用材料	791
3.2 $R=100t$ の変形試験	792
3.3 曲げ破壊試験	794
4. 結果および考察	794
4.1 $R=100t$ の変形試験	794
4.2 曲げ破壊試験	799
5. 結 言	800
文 献	801
Summary	801

1. 結 言

現行の木構造設計規準¹⁾においては、針葉樹わん曲集成材の製造基準に関して、製造時の挽板（ラミナ）の内縁に対する曲率半径 R と挽板厚（ラミナ厚） t との関係を、 $R \geq 100t$ とするよう規定している。旧規準では $R > 125t$ とされていたが、設計上の要求や、集成作業の省力化の要求から、1973年に改訂されたものである。 $R \geq 100t$ という新基準のもとでは、当然のことながら、集成作業の省力化のために、挽板に最もきつい曲率を与える $R=100t$ が採用されることになる。しかしながら、この $R=100t$ については、製造時の挽板の安全性に関して、経験上からも、また理論上からも疑問の持たれるところである。そのため本研究は、5種類の挽板厚に対し、 $R=100t$ 基準の問題点について、また、適正な曲率半径と挽板厚との関係について、実験的検討を加えたものである。

なお、本研究を行なうにあたり、御助言をいただいた北海道大学農学部木材加工学講座教官各位、ならびに当時専攻生として実験に協力された現株式会社コピア藤本幸士君に対し、心より感謝の意を表する。

2. わん曲集成時の挽板の曲げ応力

治具に沿ってわん曲集成する際、各挽板には曲げ応力が発生する。この曲げ応力は、挽板のヤング係数 E と治具からの距離によって決まり、 E が高いほど、また治具に近いほど、挽板に発生する応力は大きくなる。いま、 $R=100t$ 基準で製造する際の、治具に接する最内縁の挽板の曲げ応力 σ の分布を、純曲げを受けて同一円弧状に変形する挽板の応力分布と見做すならば、最大曲げ応力 σ_{\max} は次のように計算される。なお、この仮定は、同一円弧状をなす治具に沿って曲げられる挽板の応力分布を完全に再現するものではないが、両者の「同一変形」に着目して採用したものである。

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I} = \frac{E}{R_0} \quad (1)$$

(1)式より,

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I} \times \frac{t}{2} = \frac{Et}{2R_0} \quad (2)$$

ここに、 y ：挽板の中立軸からの距離、 M ：曲げモーメント、 I ：挽板の断面 2 次モーメント、 R_0 ：挽板の中立軸における曲率半径、 t ：挽板厚であり、(2)式中に $t/R_0 \doteq t/R = 1/100$ 、また後述する本研究における挽板の平均ヤング係数 $E \doteq 110 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ を代入すると、最大曲げ応力は平均で $\sigma_{\max} = 550 \text{ kg/cm}^2$ と試算される。ここで、木材の平均縦圧縮強さ σ_c を、 $\sigma_c = \epsilon_{oc}E = 0.0037 E$ により推定してみると²⁾、 $\sigma_c = 407 \text{ kg/cm}^2$ となり、わん曲集成時の試算値 $\sigma_{\max} = 550 \text{ kg/cm}^2$ は、この推定値 $\sigma_c = 407 \text{ kg/cm}^2$ を大きく上回ることになる。それ故、緒言で述べたごとく、理論上からも製造時の挽板の圧縮破損の確率が非常に高く、その安全性に関して疑問が持たれる訳である。事実、この $R = 100 t$ 基準で工場生産された針葉樹わん曲集成材のわん曲部最内縁ラミナには、必ずと言って良いほど、明瞭な圧縮破壊線が認められる。このことは、我が国を含めた許容応力度の算定方式において、いずれも木材を如何なる破損も認められない比例限度内で使用する、という精神とは明らかに矛盾するものと思われる。

3. 材料および試験方法

3.1 使用材料

使用材料は、北海道大学雨竜地方演習林産のアカエゾマツおよびトドマツの JAS 204 材であり、出来るだけ欠点のないものを選別した。これをまず長さ 110 cm に鋸断した後、スパン 100 cm、分銅による中央集中荷重 (5 kg ごとに 25 kg まで) により、原板の大まかなヤング係数 E を求めた。これら原板から、長さ 110 cm、幅 9~10 cm、厚さ 10, 15, 20, 25, 30 mm の挽板を各厚さにつき 10 体、計 50 体作製したが、原板の E により各グループの平均ヤング係数がほぼ等しくなるように努めた。また、本研究において挽板厚を 10~30 mm の範囲としたのは、実用上ならびにこれまでの実験³⁾からも、この範囲のラミナが多用されていることを考慮したためである。次に、各厚さに仕上げられた挽板について、スパン 100 cm、分銅による中央集中荷重方式により、それぞれのヤング係数 E_0 を求めた。この時、荷重は 10 mm 厚のものでは 0.2 kg ごとに 1.2 kg まで、15, 20 mm 厚のものでは 1 kg ごとに 6 kg まで、また 25, 30 mm 厚については 2 kg ごとに 10 kg までそれぞれ加えた。これにより得られた E_0 を用いて、後述するところの曲率半径 R が挽板厚 t の 100 倍となる変形 (以後、 $R = 100 t$ の変形、と記す) に要する荷重を計算し、それぞれの挽板厚に対して、試験機の容量と荷重きざみを決定した。各厚さごとの試験体の性質を、これら E_0 とともに Table 1 に示す。

Table 1. Properties of test specimens

No		b (mm)	t (mm)	E_o (10^3kg/cm^2)	r	u (%)	R_w (mm)
10	Av.	95.44	10.14	111.5	0.44	11.4	3.1
	Max.	99.80	10.30	132.9	0.47	12.9	3.6
	Min.	90.33	10.00	95.9	0.38	10.1	2.3
15	Av.	95.92	15.08	113.1	0.44	11.7	3.4
	Max.	99.05	15.20	134.3	0.49	12.1	4.5
	Min.	91.00	15.00	93.1	0.40	11.1	2.7
20	Av.	96.23	20.17	112.8	0.43	11.6	3.5
	Max.	98.95	20.25	133.2	0.46	12.9	5.3
	Min.	91.45	20.00	90.0	0.38	11.1	2.0
25	Av.	96.42	25.13	109.9	0.44	11.9	3.2
	Max.	99.00	25.20	132.3	0.47	12.5	3.8
	Min.	91.00	25.00	95.7	0.40	11.4	2.9
30	Av.	95.42	30.11	109.4	0.43	11.8	4.0
	Max.	99.95	30.20	136.2	0.47	12.5	6.8
	Min.	91.50	30.05	94.8	0.38	10.8	2.4

(Notes) b : Width, t : Board thickness, E_o : Modulus of elasticity, r : Specific gravity, u : Moisture content, R_w : Average width of annual rings.

3.2 $R=100t$ の変形試験

各挽板について Fig. 1 に示されるスパン ($40+2a$) cm, 荷重点間 40 cm の 2 点荷重によ

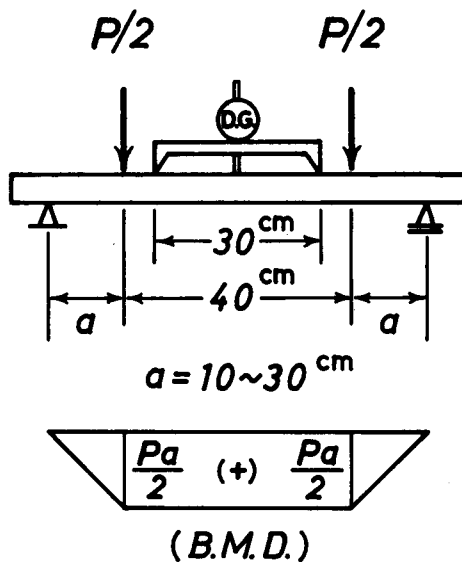
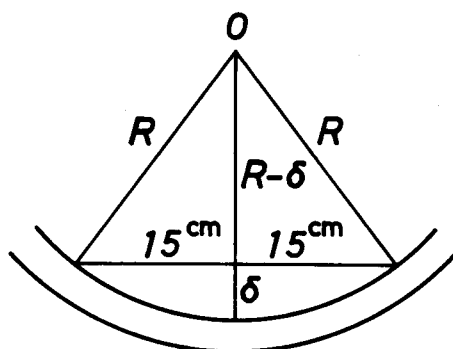


Fig. 1. Testing method and bending moment diagram.



$$R^2 = (R - \delta)^2 + 15^2$$

$$R = \frac{1}{2\delta}(\delta^2 + 15^2)$$

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - 15^2}$$

Fig. 2. Relationship between radius of curvature (R) and relative deflection(δ).

る曲げ試験を行なったが、スパンは撓みの関係で 10 mm 厚のもののみ 90 cm ($a=25$ cm) とし、他はすべて 100 cm ($a=30$ cm) とした。Fig. 1 の曲げモーメント図からも明らかなように、荷重点間の曲げモーメントは一定となり ($M=Pa/2$)、この部分の挽板の性質を一様と見做すならば、荷重点間で挽板は同一円弧状をなして曲がる。そのため、同図の測定区間 30 cm で測定される相対撓み δ と、挽板の圧縮面における曲率半径 R との間には、Fig. 2 に示されるような関係があり、これより任意の相対撓みに対するその時の曲率半径が、また逆に任意の曲率半径に対するその時の相対撓みが、容易に求められる。すなわち、 $R=100 t$ の変形における相対撓み値 δ_{100t} は、(3)式で $t=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ cm としてそれぞれの R を求め、これを(4)式に代入することによって与えられるが、 R を求める際、実際の挽板厚 t の端数は無視した。これらの相対撓み値を Table 2 に示す。表中の撓み値に達するまで、30 cm 区間の相対撓みを精度 1/100 mm のダイヤルゲージにより測定しながら挽板を変形させ、所定の撓み値に達した後、1 分間その状態を保持し、除荷後、各挽板の圧縮面における圧縮破壊線の有無を観察した。

Table 2. Values of the relative deflection δ_{100t} .

t (mm)	10	15	20	25	30
δ_{100t} (mm)	11.31	7.52	5.63	4.50	3.75

(Note) t : Board thickness.

なお、この時の荷重きざみは、挽板厚 10, 15, 20, 25, 30 mm に対して、それぞれ 2.5, 5, 10, 20, 25 kg とし、得られた荷重—撓み線図より比例限荷重および比例限撓みを求め、これらから曲げ比例限度 σ_{bp} 、比例限曲率半径 R_p およびヤング係数 E を算出するとともに、 $R=100 t$ の変形時の曲げ応力 σ_{100t} を求めた。また、各挽板の残留変形量を、試験直後とその 1 週間後とにおいて測定した。

$$R=100 t \quad (3)$$

$$\delta=R-\sqrt{R^2-15^2} \quad (4)$$

3.3 曲げ破壊試験

試験方法は、 $R=100 t$ の変形試験と同様であるが、スパン $(40+2 a)$ cm については、変形の大きい 10 mm 厚のもので 60 cm ($a=10$ cm)、15 mm 厚のもので 80 cm ($a=20$ cm) とした以外はすべて 100 cm ($a=30$ cm) とした。また、荷重きざみは 10, 15, 20, 25, 30 mm の挽板厚に対して、それぞれ 10, 10, 12.5, 20, 25 kg とし、破壊時まで相対撓みを測定することにより、曲げ比例限度 σ'_{bp} 、ヤング係数 E' 、曲げ強さ σ'_b および破壊時曲率半径 R_b を求めた。なお、試験体にはすべて残留変形があったため、試験に先立ち、毎回、荷重点間内 30 cm 区間の相対撓み測定具を、水平な面上に置いてそのダイヤルゲージをゼロセットし、それを試験体上に置くことにより、残留変形を考慮に入れて試験を行なった。

破壊試験終了後、支点側の非破壊部より、長さ 32 cm の試験体をコントロール材として取り、25, 30 mm 厚のものについては、破壊試験における圧縮側の面を切削して 20 mm 厚に仕上げた。これらについて、スパン 28 cm、中央集中荷重方式による曲げ破壊試験を行ない、コントロール材の曲げ強さ σ_b を求めた。なお、荷重きざみは、材厚 10, 15, 20 mm に対し、それぞれ 10, 20, 25 kg とした。

4. 結果および考察

4.1 $R=100 t$ の変形試験

結果を Table 3 に、また各挽板厚について得られた代表的な荷重—撓み線図を、Figs. 3 ~ 7 にそれぞれ示す。

これらの荷重—撓み線図にも示されるように、本試験における合計 50 体の試験体はすべて、 $R=100 t$ の変形時点では既に曲げ比例限度を大きく超えており、さらに過半の 27 体の試験体において圧縮破壊線が認められた。この圧縮破壊線の生じた試験体は、挽板厚 10, 15, 20, 25, 30 mm の各 10 体について、それぞれ 3, 5, 7, 6, 6 体であった。 $R=100 t$ の変形時の応力 σ_{100t} は、表中に示されるように各グループの平均で 472~529 kg/cm²、総平均で 504 kg/cm² のかなり高い応力値であり、いずれもその曲げ比例限度 σ_{bp} を平均で 101~139 kg/cm²、平均比率で 24~41 % も上回っている。そのため、欠点等を含む低品質の挽板においては、

Table 3. Results of bending test up to the relative deflection δ_{100t}

No.		E (10^9kg/cm^2)	$\frac{R_p}{t}$	σ_{bp} (kg/cm^2)	σ_{100t} (kg/cm^2)	$\frac{\sigma_{100t}}{\sigma_{bp}}$	$\delta_{res.}$ (mm)	$\delta'_{res.}$ (mm)
10	Av.	102.6	152	344	472	1.38	7.2	5.3
	Max.	125.3	184	449	581	1.60	12.0	9.5
	Min.	81.6	133	292	395	1.24	3.0	2.0
15	Av.	109.2	154	358	497	1.41	5.3	3.8
	Max.	132.0	199	484	609	1.78	7.5	6.0
	Min.	88.9	125	275	423	1.18	2.0	1.0
20	Av.	112.2	133	428	529	1.24	3.3	2.5
	Max.	132.6	146	531	618	1.34	4.5	4.0
	Min.	88.4	119	355	431	1.14	2.0	1.0
25	Av.	109.2	152	365	502	1.39	3.4	2.9
	Max.	137.5	171	490	621	1.54	5.0	4.5
	Min.	93.8	129	308	443	1.20	2.0	1.5
30	Av.	110.8	147	385	520	1.36	2.0	1.9
	Max.	136.9	177	517	639	1.58	3.0	3.0
	Min.	100.0	130	296	467	1.23	1.0	1.0

(Notes) E : Modulus of elasticity, R_p : Radius of curvature at proportional limit, t : Board thickness, σ_{bp} : Stress at proportional limit, σ_{100t} : Stress at deformation of $R=100t$, $\delta_{res.}$: Residual deflection measured immediately after unloading, $\delta'_{res.}$: Residual deflection measured after a week.

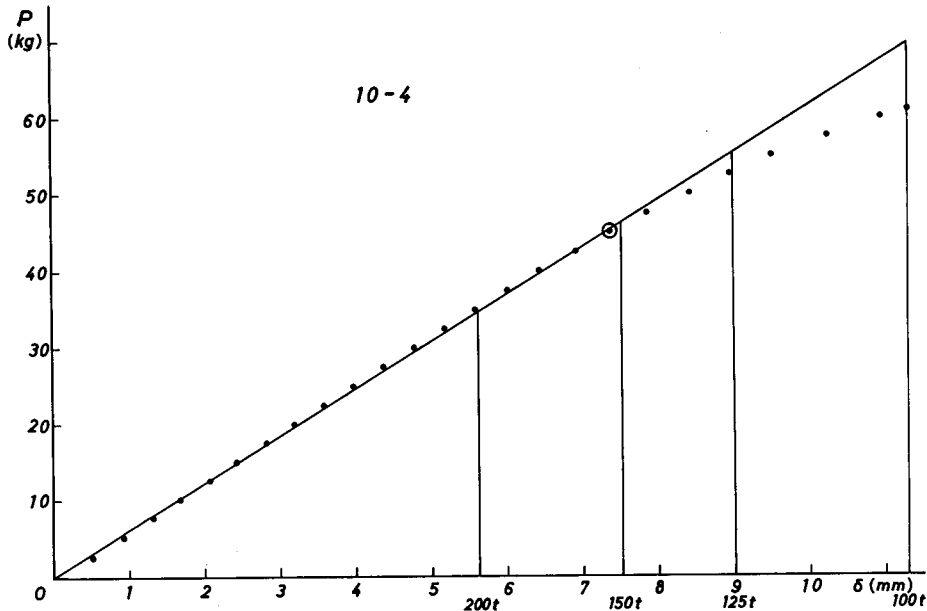


Fig. 3. Load-deflection diagram ($t=10\text{mm}$).

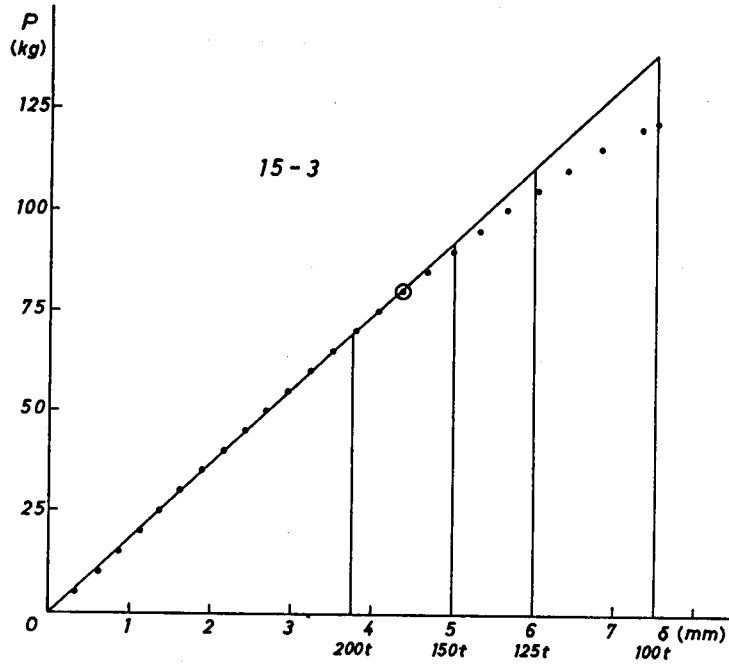


Fig. 4. Load-deflection diagram ($t=15\text{mm}$).

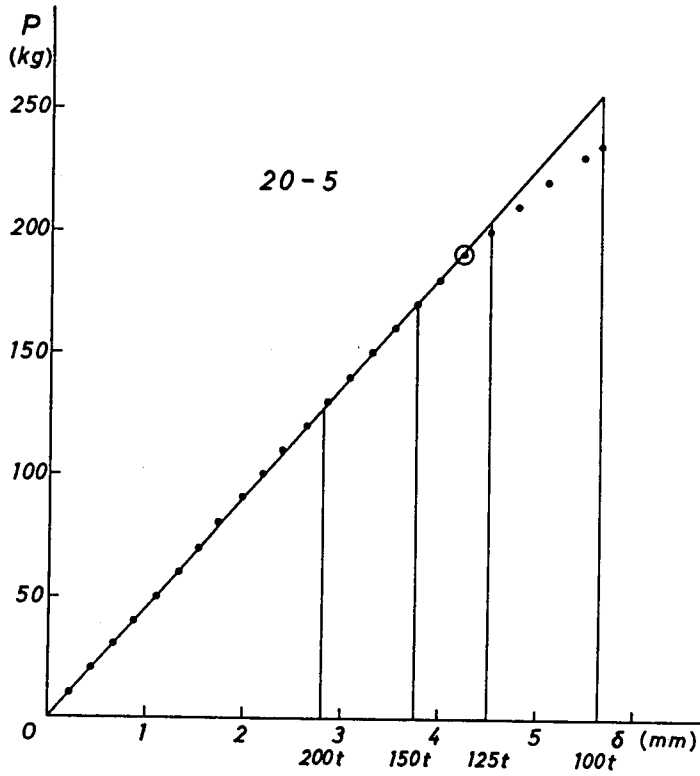


Fig. 5. Load-deflection diagram ($t=20\text{mm}$).

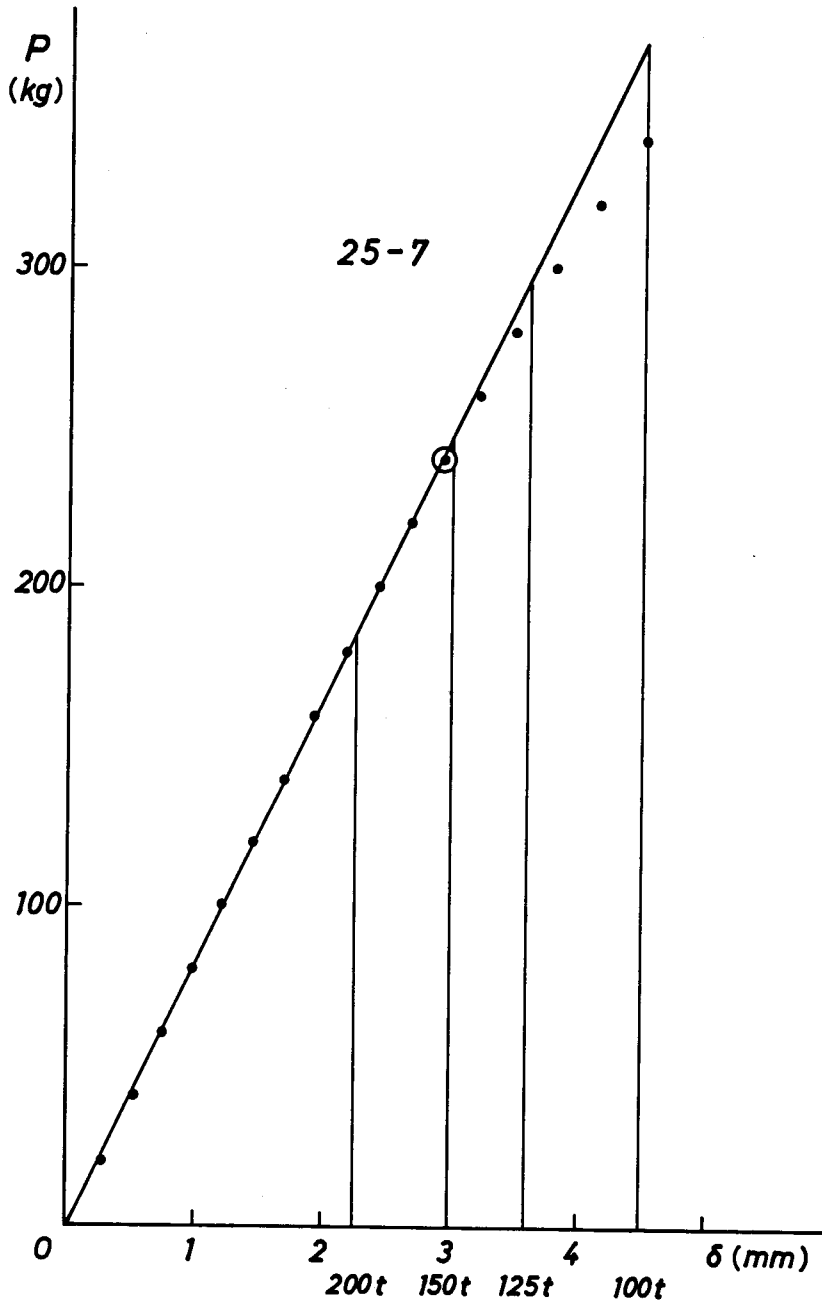


Fig. 6. Load-deflection diagram ($t=25\text{mm}$).

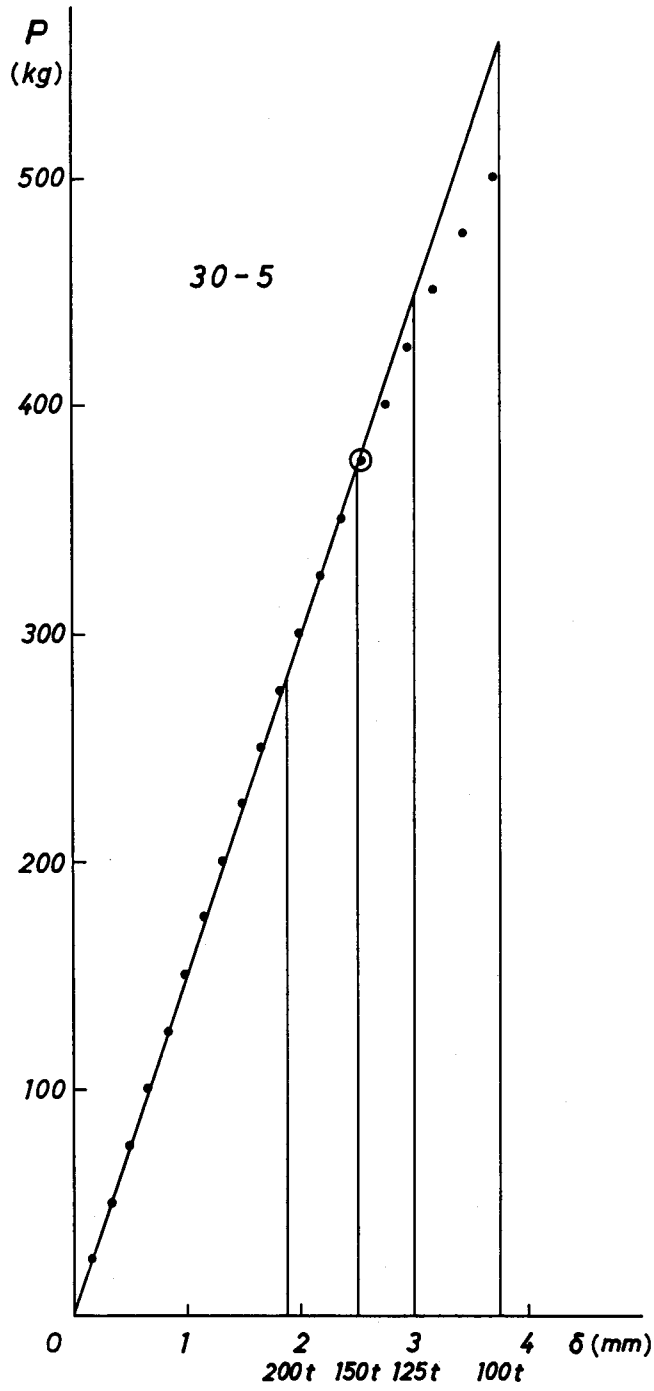


Fig. 7. Load-deflection diagram ($t=30\text{mm}$).

引張側の破断による製造時の曲げ破壊の確率も高いものと思われる。

比例限曲率半径 R_p と挽板厚 t との間には、板厚にあまり関係なくほぼ同様な傾向が認められるようであり、 R_p/t について平均 133~154、総平均で 147 の数値が得られた。また、この R_p/t 値については、一元配置法による検定の結果、各挽板厚間に有意差は認められなかった。それ故、木材を比例限度内で使用するという立場をとるならば、適正な曲率半径と挽板厚との関係は、 $R/t \geq 150$ すなわち $R \geq 150t$ とすべきであろう。なおこの数値は、澤田による提案⁴⁾とも一致するものである。

また、第 2 節で挽板の平均ヤング係数から計算した $R=100t$ 変形時の曲げ応力値は、平均で 550 kg/cm^2 であったが、前述したように実際の応力は総平均で、それを下回る 504 kg/cm^2 であった。これは、計算では撓みは荷重に比例するという直線仮定に基づいているが、実際には途中で比例限度を超えているために、計算されるよりも低い荷重で所定の撓み量に達してしまうことが主たる理由である。

なお、Table 3 の残留撓み δ_{res} 、および δ'_{res} は、いずれも材長 110 cm に対する中央矢高の測定値である。

4.2 曲げ破壊試験

結果を Table 4 に示す。なお、表中(2) Bending test の項に示した曲げ強さ σ_b は、コントロール

Table 4. Results of destructive test

No	(1) Destructive test					(2) Bending test			(1)/(2)			
	E' (10^4 kg/cm^2)	$\frac{R'_p}{t}$	$\frac{R_b}{t}$	σ'_{bp} (kg/cm^2)	σ'_b (kg/cm^2)	E (10^4 kg/cm^2)	σ_{bp} (kg/cm^2)	σ_b (kg/cm^2)	$\frac{E'}{E}$	$\frac{\sigma'_{bp}}{\sigma_{bp}}$	$\frac{\sigma'_b}{\sigma_b}$	
10	Av.	115.6	98	55	556	739	102.6	344	872	1.13	1.63	0.85
	Max.	134.5	121	62	623	878	125.3	449	1059	1.23	2.10	0.92
	Min.	98.5	86	46	476	645	81.6	292	757	1.07	1.33	0.70
15	Av.	109.2	107	47	485	684	109.2	358	823	1.00	1.37	0.83
	Max.	130.6	125	65	591	800	132.0	484	927	1.02	1.62	0.96
	Min.	89.9	97	37	393	577	88.9	275	711	0.98	1.15	0.65
20	Av.	109.0	100	52	518	681	112.2	428	853	0.97	1.22	0.80
	Max.	127.2	114	73	603	765	132.6	531	921	1.01	1.41	0.88
	Min.	85.1	90	36	446	596	88.4	355	701	0.93	1.13	0.73
25	Av.	106.1	115	51	434	679	109.2	365	820	0.97	1.19	0.83
	Max.	125.9	131	66	605	792	137.5	490	951	1.03	1.36	0.93
	Min.	91.4	101	40	369	579	93.8	308	706	0.92	1.07	0.69
30	Av.	106.2	107	47	471	674	110.8	385	805	0.96	1.23	0.84
	Max.	129.8	116	53	594	808	136.9	517	900	0.98	1.36	0.96
	Min.	93.8	101	37	395	476	100.0	296	676	0.93	1.13	0.63

(Notes) E : Modulus of elasticity, t : Board thickness, R'_p : Radius of curvature at proportional limit, R_b : Radius of curvature at rupture, σ_{bp} : Stress at proportional limit, σ_b : Modulus of rupture.

ール材の曲げ強さである。

比例限曲率半径一板厚比 R_p/t についてみると、平均で 98~115 となり、いずれも 100 前後の数値を示した。このことは、一度挽板を $R=100t$ の変形となるまで曲げたことにより、直線域が前に受けた荷重領域まで伸びたことを示すものである。これを直線域上限での曲げ応力値（曲げ比例限度）を用いて比較してみると、10 mm 厚挽板では平均で 63 %、次いで 15 mm 厚のもので 37 %、他についてはいずれも 20 % 前後、直線域が伸びたことになる。しかしながら、このように直線域が伸びた反面、曲げ強さ σ_b については平均で 15~20 % の低下が認められた。また、破壊時の曲率半径一板厚比 R_b/t については、これも板厚にはあまり関係なくほぼ同様な傾向が認められるようであり、各挽板厚に対し平均で 47~55、総平均で 50 の数値が得られた。この R_b/t 値についても一元配置法による検定の結果、各挽板厚間に有意差は認められず、破壊時の曲率半径と挽板厚との関係は、 $R=50t$ 程度と評価される。この場合厳密には、比例限度を超えると荷重点間内の挽板の変形は一様ではなくなる訳であるが、ここでは荷重点間内の挽板は常に一様な円弧を描くものと見做した。

ヤング係数 E' に関しては、挽板厚 20, 25 および 30 mm のものでほんの僅か低下しているとも思われるが、これについては明らかではない。

なお、本試験における圧縮破壊線の発生した挽板の曲げ変形挙動については、別の機会に述べたい。

5. 結 言

5 種類の挽板厚（ラミナ厚）（ $t=10, 15, 20, 25, 30$ mm）に対し、現行の針葉樹わん曲集材材製造基準に示されている $R \geq 100t$ （すなわち $R=100t$ 基準）の問題点について、また、適正な曲率半径と挽板厚との関係について実験的検討を加えたが、結果は以下のように要約される。

1) 合計 50 体の試験体はすべて、現行の製造基準である $R=100t$ の変形時には既に曲げ比例限度を大きく超えており、過半の 27 体において圧縮破壊線が認められた。

2) 比例限曲率半径 R_p と挽板厚 t との間には、板厚にはあまり関係なくほぼ同様な傾向が認められるようであり、いずれも $R_p=150t$ 前後の数値を示した。このことから、木材を比例限度内で使用するという立場をとるならば、適正な曲率半径と挽板厚との関係は $R \geq 150t$ とすべきであろう。

3) 一度、挽板を $R=100t$ の変形となるまで曲げたことにより、破壊試験においては、前に受けた荷重領域までの直線域の伸びが認められた。逆に、曲げ強さは平均で 15~20 % 低下したが、ヤング係数の低下については明らかではなかった。また、挽板の最終破壊は、いずれの板厚においても平均でほぼ $R=50t$ で生じた。

文 献

- 1) 日本建築学会：木構造設計規準・同解説。丸善，1973。
- 2) 澤田 稔：木材の力学的材質指標。第29回日本木材学会大会特別講演要旨，1979。
- 3) たとえば FINNORN, W.J. and RAPAVALI, A.: Safe bending radii for curved laminates. Forest Prod. J., 6(10), 437-442, 1956.
- 4) 澤田 稔：木材の変形挙動。材料，32-359, 838-847, 1983。

Summary

In the current criterion for manufacturing softwood curved glued-laminated timbers, the relationship between the radius of curvature R and board thickness (lamination thickness) t is prescribed as $R \geq 100 t$. In this criterion the relationship $R = 100 t$, in which the boards are bent to the most severe curvature, is adopted practically because of the reduction of labor in the process of laminating. There are indications, however, that this permitted radius of curvature is too sharp.

In this paper, the problems of this relationship $R = 100 t$ and the proper relationship between the radius of curvature and board thickness were experimentally investigated using Akaezomatsu and Todomatsu boards. They were 9~10cm wide and 110 cm long and their thicknesses were 10, 15, 20, 25 and 30mm.

The results are summarized as follows;

- 1) All the fifty boards tested went over the proportional limits by 24~39% on the average at the deformation of $R = 100 t$ and the compression failures occurred in the greater part of them (27/50).
- 2) Between the radii of curvature at proportional limits and the board thicknesses the similar relationship might be recognized, and the relationship between them was shown as $R \approx 150 t$ in any board thickness. Therefore the proper relationship between the radius of curvature and the board thickness should be $R \geq 150 t$ from the standpoint of using the materials within the proportional limit.
- 3) The extension of the linear region in load-deflection diagram was recognized in the destructive test and the linear region reached to the load level subjected in the previous bending test. In contrast with this, modulus of rupture was reduced by 15~20% on the average. The boards were broken at the radius of curvature-board thickness relationship $R \approx 50 t$ in any thickness.