ネイルプレートを用いた接合部の強度性能[†]

金 谷 紀 行*

Mechanical Properties of Timber Joints with Metal Plate Connectors

by

Noriyuki KANAYA

(Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki)

Mechanical properties of timber joints with metal plate connectors have been empirically estimated for determining the design load. The following variables were included in the test program: plate size, plate angle (angle between directions of force and the principal axis of the plate), grain angle (angle between directions of force and the grain of wood), specific gravity of timber and the effect of long term loading.

The results obtained are as follows;

- (1) The strength of joints at plate angle 90° is the lowest when changing the plate angle, and the modifying factor to that of 0° is about 0.8.
- (2) The strength of joints at grain angle 90° is the lowest when changing the grain angle, and the modifying factor to that of 0° is about 0.6.
- (3) The strength of joints is proportional to the specific gravity of timber.
- (4) The critical load ratio corresponding to the creep limit is about half of the static maximum load.
- (5) Failure patterns of joints may be classified into five categories;
 - (a) Tension failure of the plate
 - (b) Withdrawal of teeth of the plate
 - (c) Cleavage along the timber grain
 - (d) Shear failure of the plate
 - (e) Break of a wood part into which the teeth have been driven.

(Received Dec. 10, 1982)

キー・ワード：接合金物，木材の継手・仕口，強度性能，クリープ特性

1 はじめに

木質住宅においては、和小屋または洋小屋形式の小
屋組を用いることが一般的であるが、最近になって、
プレファブ住宅や枠組壁工法住宅の小屋組に工場生産
によるトラスが使われるようになった。工場生産によ
るトラスの部材節点の接合には、合板ガセットを釘着
したり、ネイルプレートを用いるものなどがある。

ネイルプレートによる接合については、わが国では
未だ歴史が浅く、研究者によって実験的な検討が加え
られてきてはいるものの、なお、多くの未解決の問題
を残している。本論文では、ネイルプレートの接合設
計のための基本的な問題のいくつかを実験によって検
討したので、その結果を報告する。

2 試 験

2・1 試験体

2・1・1 試験A ^{1)4)~7)} この試験実施にあたって、各国
の試験方法を参照し検討した結果、ネイルプレートの
接合部に加わる力は基本的には、縦引張り、横引張り
およびせん断の3種類と考え、Fig. 1 に示すような形
状の試験体を作製した。この試験では主として次の点
に着目した。すなわち、耐力に及ぼす接合形態の影響
をみるには、

- (1) 加力方向とネイルプレートの主軸方向との関係
- (2) 加力方向と木材の繊維方向との関係

を把握しておく必要がある。そのため(1)ではプレートの打込み角度が 0° 、 45° 、 90° の3種類について公称寸法 $4'' \times 3.7''$ のプレートを用い、縦引張り、横引張りおよびせん断について試験し、(2)では木材の繊維方向の角度が 0° 、 45° 、 90° になるような部材の構成とし、公称寸法 $2'' \times 4''$ のプレートを対象に試験した。

[†] 原稿受理 昭和57年12月10日

* 正 会 員 農林水産省林業試験場 茨城県稲敷郡基崎町松の里

Fig. 1. Test specimen of metal plate connected joints.

Table I. Characteristics of wood member used in test A.

Species	Specific gravity	Moisture content (%)	Compressive strength (kg/cm ²)
W. Hemlock	0.45 0.39-0.53	19.0 17.5-20.5	358 304-497
Kapur	0.70 0.66-0.72	20.5 19.0-23.5	512 475-561

Table II. Plate size used in tests.

Nominal size b×1	Actual size			Tooth		
	Thick- ness	Width	Length	Number	Length	Distance 1 2
	mm				mm	
2''×4''	1.23	71.0	119.0	60	14	20
4''×3.7''		71.0	99.0	100		
2''×7''		107.0	75	75		
2''×6''	1.88	57.0	173.0	36	15	29

また、ネイルプレートの種類による強度性状と破壊形態の違いも重要であるため、この試験シリーズの中に組入れた。使用木材は、Table I に示すような基礎材質をもつベイツガ (Western Hemlock : *Tsuga heter-*

ophylla Sarg.) およびカプール (Kapur : *Dryobalanops*) で、ベイツガは断面が 30 cm×30 cm のフリッチから、カプールは末口径 96 cm の丸太からそれぞれ製材し、天乾後所要の断面に仕上げたものを用いた。なお、使用したネイルプレートの形状・寸法は Table II に示すとおりである。試験体数はいずれも 5 体である。

2・1・2 試験 B Fig. 1 に示す試験体形状のうち、縦引張りおよび横引張りの 2 種類の試験体を作製し、木材の比重と接合部の強度性能との関係のみた。木材はスギ (Sugi : *Cryptomeria japonica* D. Don), ヒノキ (Hinoki : *Chamaecyparis obtusa* Endl.), カラマツ (Karamatsu : *Larix leptolepis* Gordon), ベイマツ (Douglas fir : *Pseudotsuga menziesii* Franco) および前出のベイツガ、カプールを加え計 6 樹種を、プレートは公称寸法 2"×4" のもののみを対象に試験を行った。

2・1・3 試験 C ネイルプレートを用いた接合部試験体 (縦引張り型) に長期载荷を行い、そのクリープ特性を調べた。荷重レベルを決めるための静的引張試験用およびクリープ試験用として十分にマッチングしたベイツガ材 (比重 0.45, 圧縮強度 349 kg/cm², 含水率 16.1%) を用い、ネイルプレートは公称 2"×4" 寸法のものを対象にして試験を行った。試験体数はそれぞれ 2 体である。

2・2 試験方法

2・2・1 試験 A および B 縦引張り、横引張りおよびせん断試験は Fig. 2 に示す方法で行った。縦引張りおよび横引張りにはオルセン型材料試験機 (最大容量 5 ton), また、せん断にはアムスラー型材料試験機 (最大容量 10 ton) をそれぞれ用いた。接合試験体の 2 材間の相対変位は、左右 2 個のダイヤルゲージ (最小目盛 1/100 mm) を用いて測定し、その平均値

Fig. 2. Test method of joints.

を接合部の変位とした。負荷の方法は各荷重階での相対変位を測定しながら破壊にいたるまで定速の荷重を加え、最大荷重に達する所要時間が10～15分程度になるようにした。せん断試験では、負荷に伴い両側の部材が開くことが予想されるため、これを防止するための適当な治具を配した。

2・2・2 試験C この試験では前述したごとく、十分にマッチングした材料を用いて10体の静的引張試験を行い、それらの平均最大荷重の25, 33, 40, 50, 60, 67および100%の割合の荷重をクリープ荷重とし

て採用した。

静的引張試験は Fig. 2 と同様の方法で行い、クリープ試験は Fig. 3 に示すような引張クリープ試験機(最大容量 4 ton, レバー比 1:20)に各荷重比のもの2体ずつをかけて試験した。変位は左右2個の変位計(共和電業社製ダイヤルゲージ型変位変換器, ストローク 20 mm)を用いて測定した。なお、負荷初期の段階ではひずみ測定器(共和電業社製 UCAM-8B)を用いて自動記録したが、その後はダイヤルゲージの目盛を読み取った。これらの試験はすべて20℃, 65%

Fig. 3. Apparatus for tensile creep test.

$a=12.7\text{mm}$, $b=6.4\text{mm}$
The effective area (A_e)
=Hatched portion
The effective tooth number (N_e)
=Number of tooth in the effective area (A_e)

Fig. 4. Definition of the effective area of plate and the effective number of tooth.

Table III. Results of test A.

Kind of tests	Plate size	Angle		Western Hemlock					Kapur					
				(1) (2)		(2)/(1)	Types of failure	(1) (2)		(2)/(1)	Types of failure			
		$P_{0.76}$	P_{max}	$P_{0.76}$	P_{max}									
		α	β	kgf/tooth	C. V.			kgf/tooth	C. V.					
Tensile tests	1	2''×4''	0	0	24.1	43.7	(5.7)	1.81	Tp	42.8	80.2	(1.0)	1.87	Fp
	2	4''×3.7''	0	0	29.3	46.6	(5.8)	1.59	Tp	45.9	82.1	(1.2)	1.79	Tp
	3	4''×3.7''	45	0	35.7	47.0	(8.3)	1.32	Tp	54.1	65.2	(1.2)	1.21	Fp
	4	4''×3.7''	90	0	24.8	34.2	(7.0)	1.38	Tp	35.6	41.0	(2.1)	1.15	Fp
	5	2''×7''	0	0	23.7	38.8	(6.5)	1.64	Fp	37.1	43.4	(1.0)	1.17	Fp
	6	2''×6''	0	0	48.4	98.7	(7.8)	2.04	Fp	74.8	148.3	(1.2)	1.98	Tp
Transverse tensile tests	7	2''×4''	0	45	29.2	42.5	(3.6)	1.46	Cw	44.6	68.1	(7.2)	1.53	Cw
	8	2''×4''	0	90	14.5	26.2	(2.7)	1.81	Tp, Cw	34.4	55.4	(10.7)	1.61	Cw
	9	4''×3.7''	0	90	13.9	20.9	(3.6)	1.50	Cw	29.7	44.1	(3.6)	1.48	Cw
	10	4''×3.7''	45	90	16.3	29.6	(3.3)	1.82	Tp, Cw	28.5	51.1	(3.8)	1.79	Cw
	11	4''×3.7''	90	90	12.8	22.9	(2.0)	1.79	Cw	24.8	38.5	(1.0)	1.55	Fp
Shear tests	12	2''×4''	0	0	24.2	50.5	(4.9)	2.09	Sp	38.6	60.3	(1.0)	1.56	Sp
	13	4''×3.7''	0	0	17.8	31.7	(3.6)	1.78	Sp	26.3	35.0	(1.5)	1.33	Sp
	14	4''×3.7''	45	0	16.5	33.9	(2.2)	2.05	Sp, Tp	34.5	55.4	(1.0)	1.61	Sp
	15	4''×3.7''	90	0	18.2	39.8	(7.2)	2.19	Sp	32.9	57.8	(2.7)	1.76	Sp

Each value is an average of 5 tests.

α =angle between directions of force and the principal axis of the plate

β =angle between directions of force and the grain of wood

Tp=Withdrawal of the plate teeth accompanied by deformation of the plate

Fp=Tension failure of the plate

Sp=Shear failure of the plate

Cw=Cleavage of wood member

$P_{0.76}$ =Load at slip 0.76 mm, P_{max} =Maximum load.

Table IV. Results of test B.

Species	Test	S. G.	Fc (kg/cm ²)	M. C. (%)	(1) $P_{0.76}$	(2) P_{max}	(2)/(1)
					kgf/tooth		
Sugi	1	0.38	360	14.1	33.4 (3.1)	61.6 (5.7)	1.84
	2	0.37	346	15.0	21.2 (6.5)	28.8 (6.0)	1.36
Hinoki	1	0.45	407	14.1	41.1 (4.5)	71.1 (5.1)	1.73
	2	0.46	430	13.5	27.2 (8.0)	34.4 (7.2)	1.26
W. Hemlock	1	0.50	439	14.5	37.0 (8.8)	68.4 (6.1)	1.85
	2	0.50	457	13.5	26.9 (12.2)	36.8 (13.0)	1.37
Karamatsu	1	0.52	479	16.0	39.5 (4.9)	67.9 (6.3)	1.72
	2	0.52	462	15.5	27.8 (5.9)	38.5 (7.0)	1.38
Douglas fir	1	0.53	456	16.0	40.2 (9.2)	71.3 (7.8)	1.77
	2	0.52	479	13.5	27.4 (4.5)	35.6 (7.0)	1.30
Kapur	1	0.68	478	18.5	42.8 (3.3)	80.2 (1.0)	1.87
	2	0.70	493	20.2	34.4 (6.1)	55.4 (10.7)	1.61

Each value is an average of five tests. The value in bracket is the coefficient of variation (%)

Test 1=Tensile test, Test 2=Transverse tensile test

S. G.=Specific gravity at the moisture content indicated.

Fc=Compressive strength of the wood member in grain direction.

RH の恒温恒湿室内にて行った。

3 試験結果および考察

試験結果を Table III~VII, Fig. 5~7 に示した。なお, Table III, IV に示される $P_{0.76}$, P_{max} は, 部材間の相対変位が 0.76 mm に達したときの荷重および最大荷重をプレートの有効歯数で除した値を表す。相対変位 0.76 mm は, 北米やオーストラリアで採用されている許容変位であり, 日本でも許容耐力を決める際にとられている変位である。ネイルプレートの耐力表示には2通りあり, Fig. 4 に示すように, 接合形態によってそれぞれ決められた縁端距離を除いた斜線の部分をプレートの有効面積 (A_e) と定め, この面積で荷重を除する方法と, 有効面積内に存在する歯数を有効歯数 (N_e) として, その数で荷重を除する方法とである。この論文では後者を採用して結果を検討することとした。

3・1 加力方向とプレートの接合角度との関係

Table III にみられるように, 接合部の耐力はプレートの角度 α および接合形態によって影響を受けることがわかる。いま, 加力方向に対してプレートの角度が 0° のときの耐力を基準値として他の角度のものと比をとってみると Table V に示すような値となる。

すなわち, 引張りおよび横引張りとも $\alpha=45^\circ$ のときでは一般に 1.0 を越え, $\alpha=90^\circ$ では常に 1 より小さく, Kapur で 0.78 となっている。また, Kapur について $\alpha=45^\circ$ の横引張りの場合 0.96 と 1 より小さくなっているのは破壊が木部で生じたための例外であろう。 $\alpha=90^\circ$ における破壊形態は, W. Hemlock の場合歯の引抜けと木部破壊であるのに対し, Kapur の場合にはプレートの引張破断である。このように破壊形

Table V. Ratio of maximum load at given angle α to that at $\alpha=0^\circ$.

Kind of test	Plate angle ($^\circ$)	Species	
		W. Hemlock	Kapur
Tensile	0	1.00	1.00
	45	1.22	1.13
	90	0.85	0.78
Transverse tensile	0	1.00	1.00
	45	1.17	0.96
	90	0.92	0.84
Shear	0	1.00	1.00
	45	0.93	1.31
	90	1.02	1.25

が異なるにもかかわらず常に $\alpha=0^\circ$ や 45° の場合より 90° で耐力が劣るのは歯の形や歯を打抜かれたプレートの形がこの方向の荷重に対して最も悪い応力条件を与えるためと考えられる。これに対しせん断の場合には, $\alpha=90^\circ$ の方が $\alpha=0^\circ$ よりも大きな耐力をもっている。このことは加力の方向と歯や歯を打抜かれたプレートの形との関係が引張りの場合と 90° 異なることから容易に類推される。設計に際して, もし $\alpha=0^\circ$ を基準にとるならば, $\alpha=90^\circ$ の引張りおよび横引張りに対しては修正係数 0.8 を乗ずる必要がある。他については係数を 1.0 としておくことと安全であろう。

3・2 加力方向と繊維方向との関係

Table III, IV の結果を, 加力方向に対して繊維方向とのなす角度 β が 0° のときの値を基準値として比較してみると Table VI のようになる。 $\beta=45^\circ$ の耐力は $\beta=0^\circ$ のそれよりも一般に高く, $\beta=90^\circ$ のそれは低い。 $\beta=0^\circ$ の耐力に対する $\beta=90^\circ$ の耐力の比は,

Table VI. Ratio of maximum load at given angle β to that at $\beta=0^\circ$.

Species	Grain angle $^\circ$		
	0	45	90
W. Hemlock	1.00	1.20	0.60
W. Hemlock	1.00	—	0.73
Sugi	1.00	—	0.63
Hinoki	1.00	—	0.66
Karamatsu	1.00	—	0.70
Douglas fir	1.00	—	0.68
Kapur	1.00	1.04	0.80

樹種によって若干の差はあるが0.60~0.80の範囲にある。これらの結果から、設計に際してもし $\beta=0^\circ$ を基準に考えるとすれば、 $\beta=90^\circ$ の場合の耐力は $\beta=0^\circ$ の場合のそれに修正係数0.6を乗じた値を用いる必要がある。しかし、 $\beta=45^\circ$ については、 $\beta=0^\circ$ の値と同等か幾分高い耐力を有しているので修正係数を1としても十分安全であろう。これらのことは垂直材、水平材および斜材から構成されるトラスの設計には重要である。

3.3 比重との関係

¹⁾ 樹種内での比重と耐力との関係については徳田ら³⁾、²⁾ 林の報告があるが、本論文では6樹種について検討し

Table VII. Correlation between the strength of joint and specific gravity (ρ) of wood.

Kind of test		a	b	Correlation coefficient
Tensile	P_{max}	55.67	41.78	0.911
	$P_{0.76}$	25.84	25.87	0.766
Transverse tensile	P_{max}	36.52	-5.54	0.978
	$P_{0.76}$	40.70	6.86	0.977

$$\text{Strength of joint } (P/N_e) = a \cdot \rho + b$$

た。結果はTable IVに示すとおりであり、Table VIIに示すごとく比重(ρ)と接合部の強さ(P/N_e)とは非常に相関が高く、比重が大きくなるほど耐力は増大する。

3.4 安全率について

金物による接合の場合、日本建築学会の木構造設計⁶⁾規準では、強さの安全率として2.0~1.5をとっている。そこで本論文で行ったネイルプレートについても許容変位0.76 mmのときの耐力と最大耐力との比を安全率とみてそれぞれ計算するとTable III, IVに示すような値がえられた。くぎ接合に関する安全率1.5をネイルプレートにも適用してみると、Table IIIではプレートの角度をかえた引張りにおけるKapur, W. Hemlockの1部のもので1.5を下回るものがあるほか、Table IVでは針葉樹すべてが横引張りで1.5以下となっている。

これらの結果から針葉樹材では特に横引張りを受けよう接合では、許容変位を0.76 mmより小さく設定することが必要となろう。

3.5 クリープ特性について

Fig. 5, 6にクリープ試験の結果の一部を示した。Fig. 5は静的引張試験10体の平均的な荷重-変位曲線と各荷重比における時間-変位の曲線である。同じ荷重レベルにおける静的引張試験とクリープ試験の変位は1, 2のものを除いてほぼ一致していることが図から読みとれる。荷重比100%のものでは約24時間で破壊に達し、60~67%のものでは約5か月間の載荷でクリープ破壊を生じた。荷重比25~50%のものでは徐々に変位が増加するが、この傾向は約6か月間は定常状態にある。なお、図に見られるように6か月後にクリープ変位が急激に増えているが、恒温室のコントロールに不備があり高湿度になったことが原因である。

ネイルプレートを用いた接合部について、クリープ限度を求めるため、杉山・徳田ら³⁾が用いたクリープ関

Fig. 5. Load-displacement curve in static tensile test and displacement-time curves in creep test (2'' x 4'' plate).

Fig. 6. Relation between creep function and load ratio.

Creep function is defined by $\delta_c/\delta_0 \times 100\%$.

δ_c : creep displacement,

δ_0 : initial displacement

Load ratio means the ratio of applied load in creep test to the static maximum load for the control specimen.

数と荷重比との関係を用いて検討した結果を Fig. 6 に示した。荷重比50%までを最小自乗法により関数のあてはめを行ったところよい直線関係がえられ、50%以上の荷重比のものはこの直線から大きくはずれる。この結果は徳田らの結果と酷示した傾向を示し、クリープ限度に相当する限界荷重比は、最大荷重の1/2とみ

て差支えない。なお、Fig. 6 は負荷24時間後の例であるが、その他のものでもほぼ同様の傾向を示している。

3・6 接合部の破壊性状

接合部の耐力は、そこに加わる外力の種類、使用するプレートの形状・寸法、使用木材の材質、接合形態などに影響を受ける。本研究で観察された破壊形態は次のように分類されたが、耐力の内容は一樣ではない。なお、破壊性状の例を Fig. 7 に示した。

- (1) プレートの引張破断 (Fig. 7 (a))
- (2) プレートの歯の引抜け (Fig. 7 (b))
- (3) 木材の引裂け (Fig. 7 (c))
- (4) プレートのせん断破損 (Fig. 7 (d))
- (5) プレートの歯打込み部の木材ブロックのはがれ (Fig. 7 (e))

(1)は比重の高いものおよびプレートの寸法の大きいものに見られ、(2)は主に針葉樹材で、(3)は横引張りの試験で多くみられ、(4)は樹種、プレートの角度に関係なくすべてのせん断試験で生じ、(5)は引張りまたはクリープ試験においてみられる破壊性状である。

3・7 プレートの形状・寸法と耐力との関係

この試験で4種類のプレートについて試験を行ったが、プレートの形状・寸法と耐力との関係をみると、

- (a) Tensile failure of the plate (W.Hemlock: 2''×7'' plate, $\alpha=\beta=0^\circ$).
- (b) Withdrawal of teeth (W.Hemlock: 4''×3.7'' plate, $\alpha=90^\circ$, $\beta=0^\circ$).
- (c) Withdrawal of teeth and cleavage of timber (W.Hemlock: 2''×4'' plate, $\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$).
- (d) Shear failure of the plate (Kapur: 4''×3.7'' plate, $\alpha=90^\circ$, $\beta=0^\circ$).
- (e) Break of a wood part into which the teeth have been driven (W.Hemlock: 2''×4'' plate, $\alpha=\beta=0^\circ$, creep test).

Fig. 7. Failure patterns of the metal plate connected joints.

(1) プレートの寸法が大きいものほど荷重は増大するが歯1本あたりの耐力は同程度か若干下回る。

(2) プレートの厚さ、歯の形状を大きくしたものの方が耐力が大きく、歯の長さの長いものの方が大きい。これらのことからプレートの選定に当っては、厚さが厚く、寸法が大きくかつ歯の長いものが望ましいことがわかる。なお、部材断面によっては圧入時に割れを生じたり、歯の配置が余り密なものでは荷重を受けることによって割れることも十分考慮してプレートの選定を行うことが必要となろう。

3・8 許容耐力について

ネイルプレートを用いた接合部の許容耐力を実験値から求める場合、現行では次の方法がとられている。

- (1) 許容変位が 0.76 mm に達したときの荷重
- (2) 最大荷重の 2/3

これらのうちのいずれか小さいものにばらつきを考慮して3/4を乗じたものを短期許容耐力とするものである。(2)の最大荷重の2/3は安全率1.5を考慮したものであるが、 $P_{0.76} \leq 2/3 \cdot P_{max}$ なる条件が本研究の中では必ずしも満足していないものもみられるので、今後接合形態などによっては更に許容耐力決定指針を細かく検討する必要がある。

長期と短期の関係については、本研究および徳田らの結果から1:2の比として差支えないものと考えられる。許容耐力については、プレートの角度および繊維方向の角度に対する修正係数を乗ずるなどの設計上の注意が必要であるほか、部材の含水率、プレートの歯数と耐力低下、使用環境による温湿度の影響、耐久性なども考慮しなければならないが、今後の研究成果に期待したい。

4 ま と め

実験結果を要約すると以下のごとくである。

(1) 加力方向に対するプレートの角度(α)と耐力の関係はせん断を除くと、45°, 0°, 90°の順に耐力が低下しており、90°のそれは0°のその約80%に見積られる。

(2) 繊維方向と加力方向のなす角度(β)と耐力との関係は、90°の場合の耐力が最も低く、0°の場合の60%に見積られる。

(3) 接合に使われる木材の比重と耐力とは高い相関をもち、比重が高いものほど耐力は大きい。

(4) クリープ限度に相当する限界荷重比は最大耐力の1/2である。

(5) 接合部の破壊性状は接合形態や木材の性質などによって異なり、おおよそ五つに分類できる。

(6) 接合に用いるプレートの形状・寸法は、プレートの厚いもの、歯の長いものが有利である。

(7) 現行の許容耐力を求める方法ではほぼ妥当と考えられるが、横部材の引裂きの生ずるものなどでは必ずしも適合しないものもみられるので、安全を確保するための配慮を含めた精細な検討が必要である。

なお、この研究に際してご助言、ご協力をいただいた関係者各位に対して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) G.F. Reardon, Lab. Rep. No.1, CSIRO (1966).
- 2) 林 知行, 学位論文 (1982).
- 3) 徳田迪夫, 竹下昌彦, 杉山英男, 木材誌, **25**, 339 (1979).
- 4) ASTM, ASTM-D1761 (1974).
- 5) Truss Plate Institute, TPI-1974 U.S.A (1974).
- 6) Australian Standards, AS-A188 (1972).
- 7) B. Norén and G. Edlund, Nordic Standards for Timber Joint with Nail Plate, IUFRO Section 41 (1969).
- 8) 日本建築学会, “木構造設計規準・同解説” (1973).