

針葉樹高温乾燥材の強度性能評価

戸田正彦 前田典昭

Evaluation of High Temperature Dried Softwood for Structural Use

Masahiko TODA Noriaki MAEDA

Some strength tests of Todomatsu (*Abies sachalinensis*) and Karamatsu (*Larix leptolepis*) dried in high-temperature conditions and conventional conditions were done. The following results were obtained.

1) In a bending test, a difference of modulus of rupture (MOR) between the different drying conditions was hardly recognized for Karamatsu, but the MOR of Todomatsu dried in high-temperature conditions was about 10% lower than under medium temperature conditions. No meaningful difference of the modulus of elasticity between the two drying conditions was found for either Karamatsu or Todomatsu.

2) As a result of lateral compression tests, the compression strength of high-temperature conditions was lower than for conventional conditions, and the decrease in strength was more remarkable in Todomatsu.

3) In shearing tests of nailed timber joints, the decrease in strength was greater in the direction perpendicular to the grain than parallel to the grain, particularly, in the case of using steel plates as side members. No difference was found in the case of using plywood as side members.

4) Anisotropy was recognized in the decrease in strength caused by high-temperature drying, and the decrease was greater in the direction perpendicular to the grain than parallel to the grain.

Key words : high temperature drying , lateral compression , nailed timber joint , anisotropy
高温乾燥 , 横圧縮 , 釘接合 , 異方性

高温条件および通常条件で乾燥されたトドマツおよびカラマツの強度試験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 曲げ試験の結果、カラマツの場合は乾燥条件による最大曲げ応力度の差がほとんど認められなかったが、トドマツでは高温乾燥材の最大曲げ応力度が中温乾燥材に比べて10%程度低下した。曲げヤング係数は、カラマツ、トドマツともに、乾燥条件による有意差は認められなかった。
- 2) 横圧縮試験の結果、カラマツ、トドマツともに高温乾燥材の強度性能は通常乾燥材に比べて低くなることが認められ、カラマツよりもトドマツにおいて顕著であった。
- 3) 釘接合部せん断試験の結果、高温乾燥による強度低下の程度は加力方向が繊維に平行方向の場合よりも直角方向の場合に大きく、側材を鋼板にした場合に顕著であった。側材が合板の場合には差は認められなかった。
- 4) 高温乾燥による強度低下には異方性が認められ、繊維直角方向において大きかった。

1. はじめに

近年，人工乾燥のコスト削減や生産性向上の目的から，高温条件で乾燥された製材の流通量が増大している。高温乾燥による強度変化について，これまで実大の曲げ試験および縦方向の圧縮試験が行われており，いずれも若干強度は低下するものの，その程度は実用的には許容範囲内である^{1,2)}と報告されている。しかし実際の構造物においては，部材の性能よりも接合部の性能が重要となる場合も多い。本研究では，接合部の強度性能を評価する観点から，高温条件で乾燥された北海道産針葉樹材の曲げ試験および横圧縮試験，釘接合部のせん断試験を行い，通常の乾燥によるものとの差異について検討した。

なお，本報告の一部は日本木材学会北海道支部研究発表会（1999年10月，旭川市）で発表したものである。

2. 供試体

供試体は，北海道産カラマツおよびトドマツの心持正角材であり，原木径級はいずれも16～22cm程度である。人工乾燥した後の仕上がり寸法は，断面105×105mm，長さ3,650mmである。

乾燥条件は，これまで行われている標準的な温度条件と，林産試験場で検討されたスケジュールに基づく高温条件の2種類とした。なお標準的な条件とは，トドマツでは中温条件（55～70），カラマツの場合は脱脂処理を行うため中高温条件（80～95）である。それぞれの乾燥条件を第1表に示す。なお乾燥後は100日程度の間，試験室内で養生した。

3. 試験方法

3.1 曲げ試験

曲げ試験の方法を第1図に示す。曲げ試験は，油圧式強度試験機（（株）東京衡機製造所製，曲げ容量200kN）を使用して行った。荷重の計測には容量200kNのロードセルを使用し，スパン中央部のたわみ量の計測には最大ストローク100mm・分解能1/100mmのひずみゲージ式変位変換器を使用した。各測定値は，荷重の増減約100Nごとに記録した。なお，曲げ試験を行う前に打撃法による動的ヤング

第1表 乾燥条件
Table 1. Drying conditions.

樹種 Species	乾燥条件 Drying conditions	温度条件（ ） Temp. conditions （最低 - 最高） （lowest - highest）
カラマツ Karamatsu	中高温乾燥 Medium-high-temp. drying	80 - 95
	高温乾燥 High-temp. drying	80 - 140
トドマツ Todomatsu	中温乾燥 Medium-temp. drying	55 - 70
	高温乾燥 High-temp. drying	80 - 140

係数も測定した。試験体数は40体ずつである。

3.2 横圧縮試験

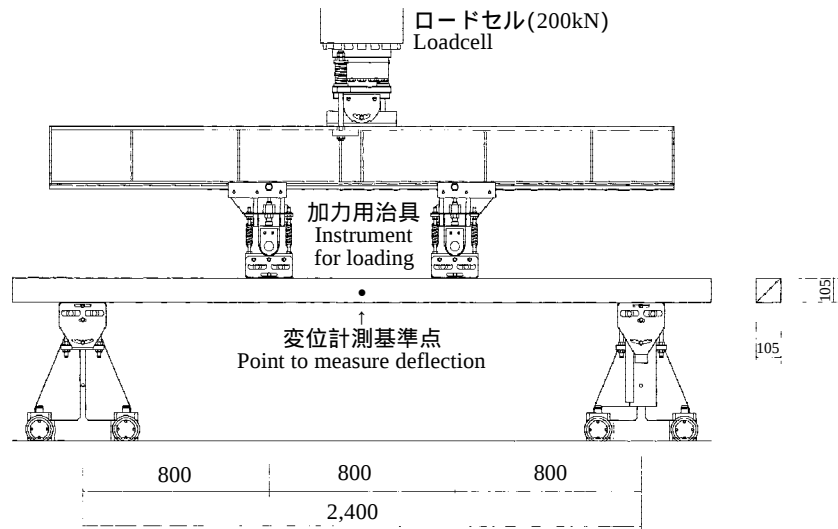
横圧縮試験の方法を第2図に示す。横圧縮試験は，全面圧縮試験および部分圧縮（めり込み）試験の2種類とした。いずれの試験も，インストロン型強度試験機（（株）島津製作所製，曲げ容量10tf）を使用して行った。荷重の計測には容量10tfのロードセルを使用し，圧縮変形の計測には最大ストローク10mm・分解能1/1,000mmのひずみゲージ式変位変換器を使用した。

試験体は，曲げ試験終了後の非破壊部分から作製し，全面圧縮試験用は長さ100mm，また部分圧縮試験用は長さ500mmとした。なお，断面は95×95mmに再鋳削した。これは断面を正方形にし，かつ表面を平滑にするためである。

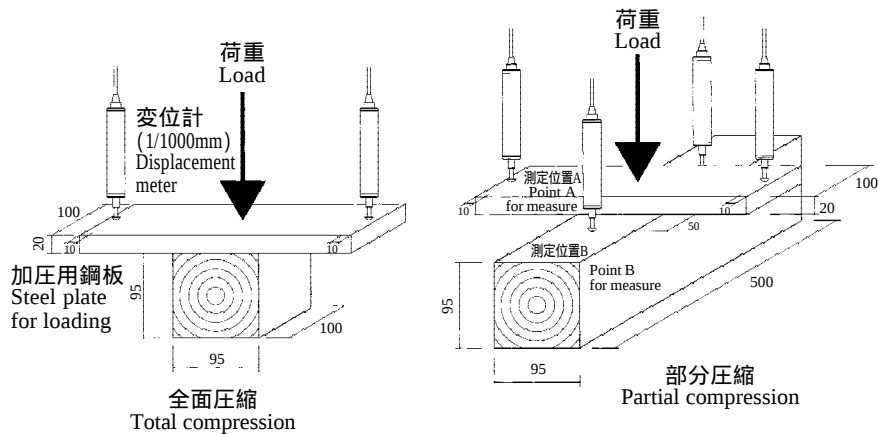
全面圧縮試験は，1面について長期許容応力度に達するまで加力したのち，直交する1面について変形が材せいの4%程度になるまで加力した。変位の計測位置は加圧鋼板の両端から10mmの位置とした。なお，ヤング係数は2面のデータから得られた値の平均値とした。

また部分圧縮試験は，3面について許容応力度に達するまで加力した後，残り1面について変形が材せいの4%程度に達するまで加力した。変位の計測位置は，加圧鋼板（測定位置A）およびその端から50mmの位置（同B）とした。加圧面積を見かけ断面積とするヤング係数は，4面のデータから得られた値の平均値とした。

試験体数は全面圧縮および部分圧縮に供するもの



第1図 曲げ試験方法
Fig. 1. Method of bending test.



第2図 横圧縮試験の方法
Fig. 2. Method of lateral compression tests.

が各種類11体ずつ(カラマツ中高温乾燥条件のみ13体)である。

3.3 釘接合部せん断試験

釘接合部せん断試験の方法を第3図に示す。

釘接合部せん断試験は、インストロン型強度試験機((株)島津製作所製、容量10tf)を使用して行った。荷重の計測には容量2tfのロードセルを使用し、せん断変形の計測には最大ストローク50mm・分解能1/100mmのひずみゲージ式変位変換器を使用した。

加力方式は圧縮型とし、変形量が20mmに達するか荷重の明確な低下が確認されるまで行った。

試験体は、横圧縮試験終了後の非破壊部分から長

さ150mmずつ2個採取し、ひとつを構造用合板(厚さ12mm)を側材とする試験体に、もう一方を鋼板(厚さ3.2mm)を側材とする試験体とした。加力方向は繊維平行方向と繊維直角方向であり、使用した釘はすべてCN50である。試験体数は、横圧縮試験の場合と同数である。

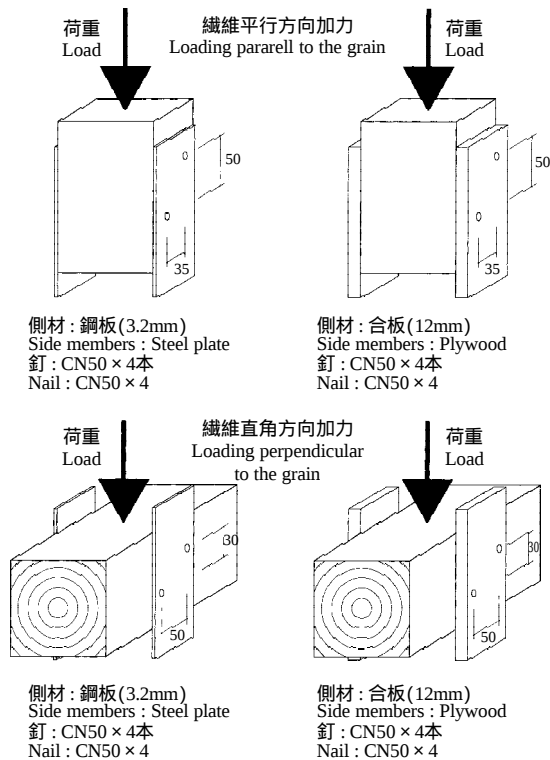
4. 結果と考察

4.1 曲げ試験結果

曲げ試験の結果を第2表に示す。

カラマツに関しては、すべての項目について乾燥条件による有意差は認められなかった。

一方トマツに関しては、最大曲げ応力度 σ_b に



第3図 釘接合部せん断試験の方法
Fig. 3. Method of shearing tests of nailed timber joints.

ついて有意差(1%)が認められ、高温乾燥材が中温乾燥材に対して10%程度低い結果となった。トドマツの曲げヤング係数 E_b 、 σ_b および曲げ破壊仕事量 W に関して、乾燥条件が高温なほど低下する³⁾ことはすでに報告されているが、今回の実験で得られた E_b はほぼ等しく、また W は10%強の低下がみられたものの、有意差は認められなかった。

E_b と σ_b との関係を第4図、第5図に示す。相関係数は、両樹種とも高温条件のほうがやや高い結果となった。

なお、 E_b と動的ヤング係数 E_f との相関関係は、両樹種とも乾燥条件による差は認められず、相関係数は0.80～0.95であった。

4.2 横圧縮試験結果

横圧縮試験の結果を第3表に示す。

カラマツについては、全面圧縮・部分圧縮ともに、すべての項目で高温乾燥材が中高温乾燥材よりも5%程度低い値となったが、部分圧縮における変形エネルギー W' のみ有意差(5%)が認められた。これに対してトドマツでは、全面圧縮・部分圧縮ともにすべての項目で、高温乾燥材が中温乾燥材よりも15～

25%程度低く、有意差(1%)が認められた。

部分横圧縮ヤング係数の全面横圧縮ヤング係数に対する比 E'/E は、樹種および乾燥条件に関わらず2.0程度と一定であった。

ここで、高温乾燥処理中の材中の温度分布は、材の外側のほうが内側よりも高い⁴⁾ため、仮に温度と強度低下との間に正の相関があるとする、外側のほうが強度低下が大きいことになる。部分圧縮による変形は、弾性床上の梁の曲げ変形とみなすことができる⁵⁾ので、外側の剛性の変化は、たわみ曲線の違いとなって表れると考えられる。だが今回の部分圧縮試験では、たわみ曲線のパラメータである測定位置A、Bにおける変形の比 k は、乾燥条件によらず比例限度内ではほぼ一定であり、比例限を越えた範囲においても樹種および乾燥条件による明確な差は認められなかった。

今回は断面の中層以下を弾性床とみなしたが、その幅方向における外側の部分も高温にさらされているため、弾性床自体の剛性も低下している。そのため、今回の測定条件では試験結果に反映されなかった可能性が考えられることから、今後、部位ごとの強度性能を確認するなど、試験方法を含めて再検討する必要があると思われる。

4.3 釘接合部せん断試験結果

釘接合部の強度性能は「枠組壁工法建築物構造計算指針」⁶⁾に示されている基準許容耐力 P_y および基準剛性 K を算出して評価した。この結果を第4表に示す。

P_y については、乾燥条件による大きな差は認められなかった。しかし K についてみると、カラマツ、トドマツともに、側材に鋼板を使用した場合には高温乾燥材のほうが通常乾燥材よりも低い値となり、高温乾燥による剛性の低下が認められた。トドマツでは繊維平行方向加力で20%弱、直角方向で30%の低下が認められ、カラマツでは繊維平行方向では大きな差はないが、直角方向で20%程度の低下が認められた。一方、側材に合板を使用した場合には、乾燥条件による差は認められなかった。これは、合板の強度性能が主材よりも低く、接合部のせん断変形に占める側材の変形の割合が大きかったためと思われる。

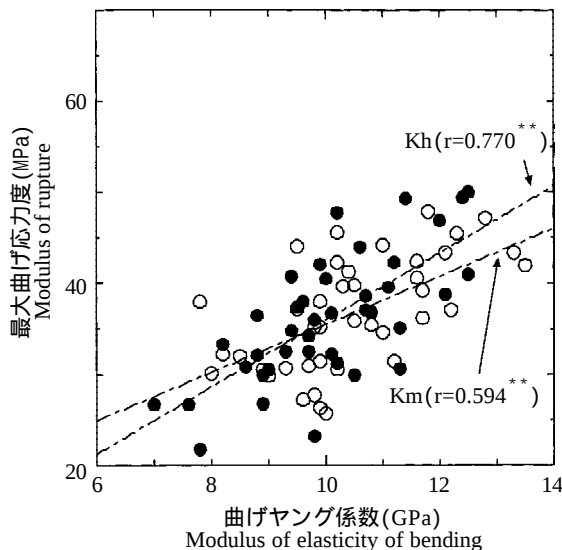
第2表 曲げ試験結果

Table 2. Results of bending tests.

樹種 Species	乾燥条件 Drying conditions	σ_p	σ_b	E_b	E_f	W	r	M.C.
カラマツ Karamatsu	中高温 Medium-high-temp.	23.9	36.7	10.5	10.4	487	0.51	15.6
	C.V.	28.1	16.9	13.2	12.4	42.9	5.3	6.2
	高温 High-temp.	22.7	36.1	10.0	10.1	516	0.51	17.4
	C.V.	23.3	19.5	13.4	13.3	45.5	8.1	7.0
トドマツ Todomatsu	中温 Medium-temp.	29.2	43.3	10.1	10.3	693	0.41	14.6
	C.V.	19.9	15.4	9.4	8.6	44.4	7.3	9.2
	高温 High-temp.	30.2	39.5	10.4	10.6	587	0.41	14.3
	C.V.	22.8	21.8	9.7	10.1	54.5	6.6	8.4

凡例： σ_p ：比例限曲げ応力度 (MPa)， σ_b ：最大曲げ応力度 (MPa)， E_b ：曲げヤング係数 (GPa)， E_f ：動的ヤング係数 (GPa)，W：曲げ破壊仕事量 (J)，r：比重，M.C.：含水率 (%)，C.V.：変動係数 (%)

Legend： σ_p ：Proportional bending stress； σ_b ：Modulus of rupture； E_b ：Static modulus of elasticity of bending； E_f ：Dynamic modulus of elasticity of longitudinal vibration；W：Bending rupture energy；r：Specific gravity；M.C.：Moisture content；C.V.：Coefficient of variance

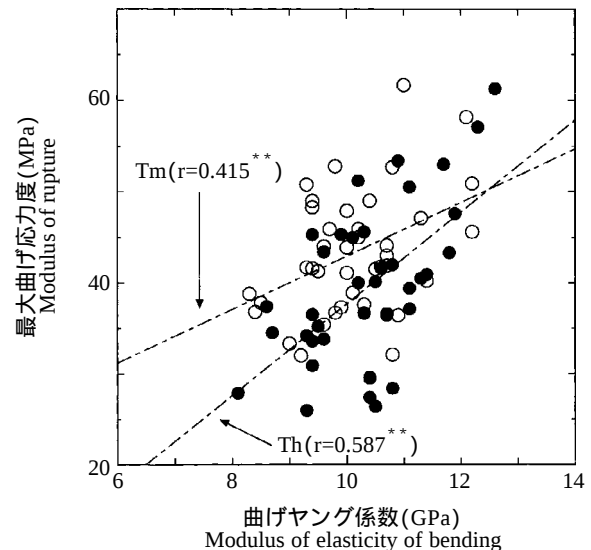


第4図 曲げヤング係数と最大曲げ応力度との関係 (カラマツ)

凡例：○：カラマツ中高温 (Km)，●：カラマツ高温 (Kh)

Fig. 4. Relation between modulus of elasticity and modulus of rupture (Karamatsu).

Legend：○：Karamatsu dried in medium-high temp.；
●：Karamatsu dried in high temp.



第5図 曲げヤング係数と最大曲げ応力度との関係 (トドマツ)

凡例：○：トドマツ中温 (Tm)，●：トドマツ高温 (Th)

Fig. 5. Relation between modulus of elasticity and modulus of rupture (Todomatsu).

Legend：○：Todomatsu dried in medium temp.；
●：Todomatsu dried in high temp.

なお、一般に比重と接合性能には高い相関関係がある⁷⁾とされているが、今回の試験結果では、比重と P_y との間にやや相関があったものの、比重と K との間には相関関係は認められなかった。

4.4 強度性能変化の異方性

通常乾燥材に対する高温乾燥材の強度比を第6図、第7図に示す。

曲げヤング係数および最大曲げ応力度の比は両樹種とも1程度と大きな変化はみられないが、横圧縮のヤング係数および比例限応力度の比はカラマツで0.9程度、トドマツでは0.8を下回っている。

接合部の基準剛性 K についても、側材を鋼板とした場合には、トドマツでは繊維平行方向での比が0.8なのに対して直角方向で0.7、カラマツの場合も繊維

第3表 横圧縮試験結果
Table 3. Results of lateral compression tests.

樹種 Species	乾燥条件 Drying conditions	全面圧縮 Total compression			部分圧縮 Partial compression			
		E	W	σ_p	E'	W'	σ'_p	k
カラマツ Karamatsu	中高温 Medium-high-temp.	0.32	0.58	1.58	0.65	1.23	3.96	2.45
	C.V.	16.1	11.2	12.5	11.0	13.7	14.1	6.8
	高温 High-temp.	0.30	0.54	1.47	0.61	1.10	3.77	2.62
	C.V.	15.0	13.9	13.5	17.9	17.4	16.1	16.3
トドマツ Todomatsu	中温 Medium-temp.	0.29	0.58	1.55	0.60	1.13	3.61	2.48
	C.V.	25.3	16.3	17.8	28.6	18.0	16.2	6.2
	高温 High-temp.	0.22	0.44	1.14	0.45	0.89	3.06	2.43
	C.V.	23.4	19.3	24.4	14.9	12.8	11.3	11.5

凡例： E ：全面横圧縮ヤング係数 (GPa)， E' ：部分横圧縮ヤング係数 (GPa)， σ_p, σ'_p ：比例限度力 (MPa)， W, W' ：変形がせいゝの3%に至るまでの単位加圧面積あたりの圧縮変形エネルギー (J/cm²)， k ：変位計測点A,Bにおける変形の比

Legend： E ：Modulus of elasticity of total lateral compression； E' ：Modulus of elasticity of partial lateral compression； σ_p, σ'_p ：Compressive energy for 3% deformation of height per unit area； W, W' ：Proportional stress； k ：Ratio of deformation at point A to point B

第4表 釘接合部せん断試験結果
Table 4. Results of shearing tests of nailed timber joints.

樹種 Species	乾燥条件 Drying conditions	側材：合板 Side member：Plywood				側材：鋼板 Side member：Steel plate			
		平行 Parallel to the grain		直角 Perpendicular to the grain		平行 Parallel to the grain		直角 Perpendicular to the grain	
		P_y	K	P_y	K	P_y	K	P_y	K
カラマツ Karamatsu	中高温 Medium-high temp.	0.81	0.39	0.84	0.36	1.32	0.60	1.22	0.75
	C.V.	11.5	16.8	14.1	27.0	13.1	15.3	12.3	14.7
	高温 High temp.	0.87	0.44	0.84	0.36	1.25	0.59	1.26	0.59
	C.V.	8.8	20.0	8.0	18.6	5.5	19.4	12.7	25.5
トドマツ Todomatsu	中温 Medium temp.	0.75	0.36	0.75	0.36	1.06	0.63	1.14	0.54
	C.V.	8.7	19.1	8.7	18.7	11.3	22.0	8.1	16.9
	高温 High temp.	0.67	0.36	0.72	0.37	1.13	0.51	1.09	0.38
	C.V.	12.9	23.1	15.8	3.9	7.3	14.1	8.3	4.1

凡例： P_y ：基準許容耐力 (kN) (枠組壁工法建築物構造計算指針 (1998) より)， K ：接合部の基準剛性 (kN/mm) (同上)

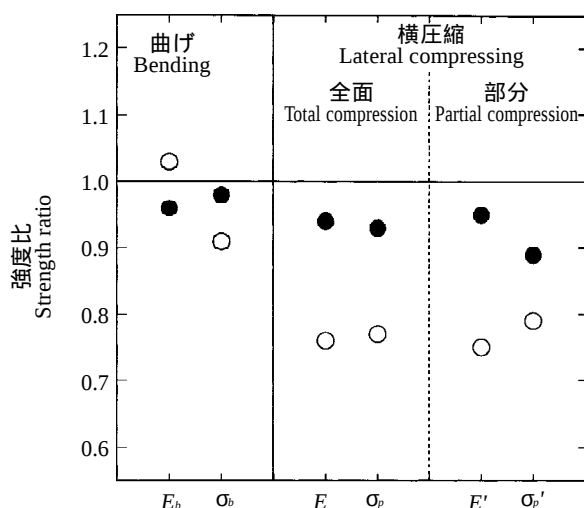
Legend： P_y ：Standard allowable strength (kN) (from the Guideline of Structural Calculation for Wood Frame Construction (1998))； K ：Standard stiffness of joint (same as above)

平行方向では1.0なのに対して直角方向で0.8と低下している。

したがって、高温乾燥による強度低下は、繊維平行方向よりも繊維直角方向において大きくなると考えられる。

4.5 樹種による強度性能変化の相違

これまで行った試験の結果、カラマツよりもトドマツの方が強度低下の程度が大きいことが認められた。しかし両樹種の乾燥温度条件に着目してみると、高温条件は両樹種とも80～140と共通であるのに対して、通常条件はトドマツで中温(55～70)、カ



第6図 通常乾燥材に対する高温乾燥材の強度比 (曲げ, 横圧縮)

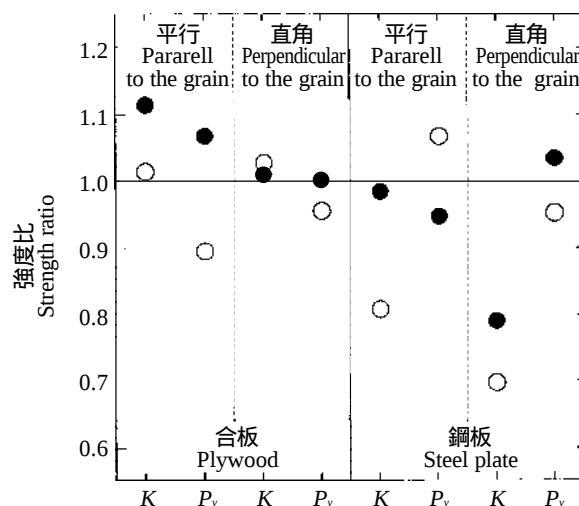
凡例: ●: カラマツ, ○: トドマツ, E_b : 曲げヤング係数, σ_b : 最大曲げ応力度, E : 全面横圧縮ヤング係数, σ_p : 全面横圧縮比例限度力, E' : 部分横圧縮ヤング係数, σ_p' : 部分横圧縮比例限度力

Fig. 6. Ratio of strength of softwoods dried in high-temperature conditions to dried in conventional conditions (bending, lateral compression).

Legend: ●: Karamatsu; ○: Todomatsu; E_b : Modulus of elasticity of bending; σ_b : Modulus of rupture of bending; E : Modulus of elasticity of total lateral compression; σ_p : Proportional limit stress of total lateral compression; E' : Modulus of elasticity of partial lateral compression; σ_p' : Proportional limit stress of partial lateral compression

カラマツで中高温 (80 ~ 95 °) と設定されている。第8図に、今回の試験結果と、これまでに行われたトドマツの曲げ試験の結果³⁾とを合わせて示す。トドマツの曲げ強度については、中高温条件 (83 ~ 96 °) による乾燥材は中温条件のものに比べて6%程度の強度低下が認められている。したがって、比較する乾燥条件を整合させた場合、トドマツもカラマツと同様の強度低下の程度となることが予想され、強度性能評価の観点から、樹種による高温乾燥への適性については言及できない。

また、曲げヤング係数と最大曲げ応力度との回帰直線に注目してみると、カラマツでは乾燥条件による差は小さいが、トドマツでは高温条件のほうが大きな傾きとなっている。これは、曲げヤング係数が小さいほど、高温乾燥による強度低下の程度が大きいことを示している。横圧縮についても、試料数は少ないが、ほぼ同様の傾向が認められる。

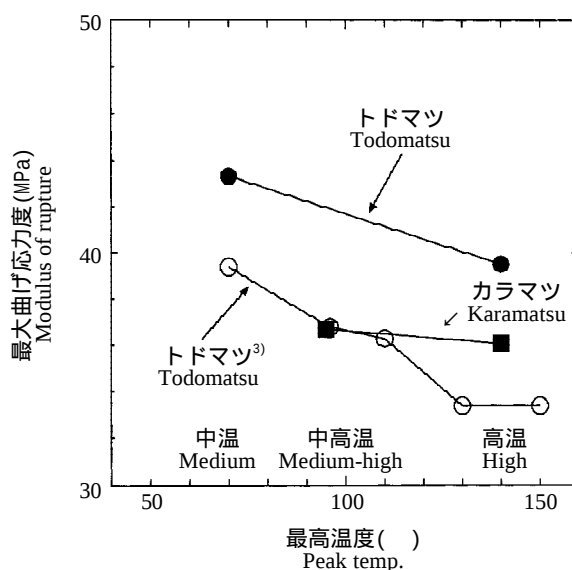


第7図 通常乾燥材に対する高温乾燥材の強度比 (釘接合部)

凡例: ●: カラマツ, ○: トドマツ, K : 接合部の基準剛性, P_y : 基準許容耐力

Fig. 7. Ratio of strength of softwood dried in high-temperature conditions to dried in conventional conditions (shearing of nailed timber joints).

Legend: ●: Karamatsu; ○: Todomatsu; K : Standard stiffness of joint; P_y : Standard allowable strength



第8図 乾燥温度条件と最大曲げ応力度との関係
Fig. 8. Relation between drying temperature conditions and modulus of rupture.

5. まとめ

高温条件および通常条件で乾燥されたトドマツおよびカラマツの強度試験を行い、以下の結論を得た。

(1) 曲げ試験の結果、カラマツの場合は乾燥条件による最大曲げ応力度の差がほとんど認められなかったが、トドマツでは高温乾燥材の最大曲げ応力度が中温乾燥材に比べて10%程度低下した。曲げヤング係数は、カラマツ、トドマツともに、乾燥条件によ

る有意差は認められなかった。

(2) 横圧縮試験の結果、カラマツ、トドマツともに高温乾燥材の強度性能は通常乾燥材に比べて低くなることが認められ、カラマツよりもトドマツにおいて顕著であった。

(3) 釘接合部せん断試験の結果、加力方向が繊維に平行方向の場合よりも直角方向の場合に強度低下の程度が大きく、側材を鋼板にした場合に顕著であった。側材が合板の場合には差は認められなかった。

(4) 高温乾燥による強度低下には異方性が認められ、繊維直角方向に大きく発現した。

文 献

- 1) 中 厚，瀧澤忠昭，山崎亨史：第46回日本木材学会大会研究発表要旨集，158(1996)。
- 2) 成澤直人 ほか3名：日本木材学会北海道支部講

演集 第28号，17-19(1996)。

- 3) 中 厚，山崎亨史：林産試験だより，1月号，2-6 (1997)。
- 4) 吉田孝久，馬渡栄達，橋爪丈夫：第48回日本木材学会大会研究発表要旨集，137 (1998)。
- 5) 川元紀雄，金谷紀行：木材学会誌，37，16-23(1991)。
- 6) 日本ツーバイフォー建築協会：“1998年度枠組壁工法建築物構造計算指針”，枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編，1998，p. 215-218。
- 7) 日本建築学会：“木質構造設計基準・同解説”，日本建築学会編，1995，p. 232。

- 性能部 構造性能科 -
(原稿受理：01.6.4)