

## 圧密スギの強度特性\*<sup>1</sup>

—木質構造への利用をめざして—

田中 圭\*<sup>2</sup> ・ 山口 潤\*<sup>2</sup> ・ 佐伯浩平\*<sup>2</sup> ・ 出元裕子\*<sup>2</sup> ・ 大内成司\*<sup>3</sup> ・ 井上正文\*<sup>2</sup>

田中 圭・山口 潤・佐伯浩平・出元裕子・大内成司・井上正文：圧密スギの強度特性—木質構造への利用をめざして— 九州森林研究 62：45—50, 2009 近年、建築廃材のリサイクル率の向上が急務となっている。なかでも木材と金物の分別が問題とされている。そこで本研究では、圧密加工を施し強化したスギ材を接合具として利用し、金物を使用しない木質構造接合部の実現を目的としている。本報では、圧密率が異なるスギ材について、せん断、曲げ、部分圧縮の各強度及び圧密方向と加力方向の関係が強度に与える影響を把握するための実験を行った。その結果、①せん断力が作用する部材には、高い圧密率で、せん断面がまき目面（LR面）となるように、②曲げモーメントが作用する部材には、圧密率が高い圧密材を使用し、変形能力が必要な場合には放射方向（R方向）に加力されるように、③部分圧縮力が作用する部材には、圧密率の高い圧密材を使用し、初期剛性が必要な時は圧縮面を接線方向（T方向）、降伏耐力が必要な時は圧縮面を放射方向（R方向）になるように使用すると高い性能を発揮することが示唆された。

キーワード：木質構造用接合部、スギ圧密材、せん断、曲げ、部分圧縮

### I. はじめに

近年深刻化してきた地球環境問題の中で、二酸化炭素の増加による地球温暖化は最重要項目の一つとして挙げられている。この対策として、省エネルギーを進めて化石燃料の使用を抑えること、さらに炭素固定化機能を持つ森林等の保全・増大を図ることが考えられており、木質材料が注目されている。

また、「ゴミ問題」も重大な問題になっており、様々な分野で廃棄物処理が社会問題化している。建設業界においても廃棄物処理対策が求められ、リサイクル推進を目的とする〔建設リサイクル法（建設工事に関わる資材の再資源化等に関する法律）〕が施行された。この法律の施行に伴い、建築廃材のリサイクル率の向上が急務となっている。このなかで、木質系廃棄物のリサイクルを妨げる大きな要因となっているのが、接合に使用される金物等の分別が困難ということである。金物を使用しない高性能の木質構造接合部が実現すれば、解体が容易になり、分別が不要となることで建築廃材のリサイクル率の向上につながると考えられる。

一方現在、木質構造で使用されている木製の込栓等は強度などの問題から広葉樹等の堅木が利用されている。しかし、広葉樹は成長が遅く、資源量が少ないという問題点が挙げられる。そこで本研究では膨大な資源量を誇るスギ材の圧密加工技術に着目した。圧密加工は、木材加工学の分野で研究開発が積極的に行われてきた技術である（1）。例えば、スギ材は軟質のため表面に傷がつきやすく、家具やフローリングなどの材料としてはあまり利用されていないが、材を圧密化すると、硬さが改善され表面に傷つきにくくなるため、これらの用途への利用が可能になると考えられている。

本研究では、スギ材に圧密加工を施すことで広葉樹に劣らぬ強

度性能をもつ木質材料を製造し接合部材として用い、金物を使用しない木質構造接合部の実現を目的としている。既往の研究（2）で、圧密加工を施したスギ材（以下、圧密材）を木質構造の接合部材として利用することを想定し、圧密材の基礎的な物性についてはいくつか報告されているが、圧密材の圧密方向と加力方向の関係が強度等に与える影響を把握する研究は少ない。

そこで本報では、圧密率が異なるスギ材について、せん断、曲げ、部分圧縮の各強度及び圧密方向と加力方向の関係が強度に与える影響を把握するための実験を行ったので報告する。

### II. せん断実験

#### (1) 概要

圧密率（密度）及び圧密方向とせん断面の関係の違いがせん断強度に与える影響を把握するために椅子型せん断実験（JIS-Z2101（3））を行い、強度性能の検討を行った。なお、これから述べる圧密率については、式（1）で定義される値を用いるものとする。

$$\text{圧密率} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

A：圧密加工前の厚さ方向の寸法

B：圧密加工後の厚さ方向の寸法

#### (2) 試験体及び実験方法

表-1に試験体リストを示す。写真-1に試験体、図-1に試験体形状及び寸法、図-2に加力装置を示す。

供試材として、平均密度が $0.39 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、平均年輪幅が5.0mm、平均含水率が14.4%のスギ材の辺材を使用し、節などの欠点を除去して圧密加工を施すこととした。圧密加工前に前処

\*<sup>1</sup> Tanaka, K., Yamaguchi, J., Saeki, K., Demoto, Y., Ouchi, J. and Inoue, M.: Strength Property of Densified Sugi -Use for Timber Structure-

\*<sup>2</sup> 大分大学工学部 Fac. Eng., Oita Univ., Oita 870-1192

\*<sup>3</sup> 大分県産業科学技術センター Oita Industrial Res. Institute, Oita 870-1117

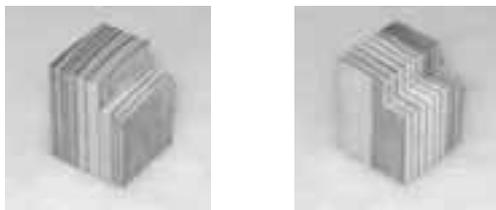
理として電子レンジによる高周波加熱を2分間行った。その後、温度130℃に設定したホットプレスを使用して、放射方向（R方向）に約3時間の圧密加工を行った。

試験体については、圧密率の違いが強度に与える影響を把握するために、異なる圧密率の圧密材から試験体を製作した。試験体には、圧密率0%、30%、50%及び70%の圧密材を使用し、密度は圧密率0%が $0.34\sim 0.43\times 10^3\text{kg/m}^3$ 、圧密率30%が $0.45\sim 0.61\times 10^3\text{kg/m}^3$ 、圧密率50%が $0.67\sim 0.78\times 10^3\text{kg/m}^3$ 、圧密率70%が $1.03\sim 1.23\times 10^3\text{kg/m}^3$ となった。試験体の形状については、JIS-Z2101に定められているせん断試験方法に準拠して図-1に示す形状に加工した。また、圧密方向とせん断面の関係が強度に与える影響を把握するため、せん断面を板目面（LTシリーズ）及びまき目面（LRシリーズ）とし、それぞれ実験を行った。

実験方法については、JIS-Z2101に定められているせん断試験方法に準拠して実験を行った。载荷は床置型精密万能試験機（エー・アンド・デイ：RTF-2350）による単調载荷で行い、加力速度は0.7mm/minとした。このとき、図-2に示す椅子型せん断試験用治具を使用して実験を行った。また、スライディングブロックの移動量を変位として測定した。

表-1. 試験体リスト

試験体名	せん断面	厚さ寸法 (mm)		圧密率 (%)	密度 ( $\times 10^3\text{kg/m}^3$ )	平均含水率 (%)	試験体数
		圧密前	圧密後				
ST-0-LT	LT	—		0	0.34~0.43	19.5	各6体
ST-30-LT		45.7	32	30	0.46~0.59	10.7	
ST-50-LT		64.0		50	0.67~0.75	11.6	
ST-70-LT		106.7		70	1.03~1.23	15.5	
ST-0-LR	LR	—		0	0.34~0.43	19.5	
ST-30-LR		45.7	32	30	0.45~0.61	10.7	
ST-50-LR		64.0		50	0.69~0.78	11.6	
ST-70-LR		106.7		70	1.06~1.23	15.8	



(a) LTシリーズ (b) LRシリーズ

写真-1. 試験体

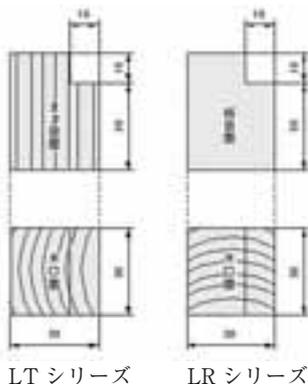


図-1. 試験体形状及び寸法 (単位: mm)

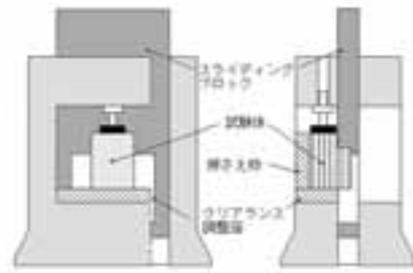


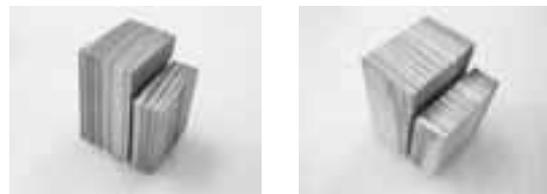
図-2. 加力装置

(3) 実験結果

写真-2に代表的な破壊性状、図-3、図-4に代表的な荷重-変位曲線、図-5にせん断強度と密度の関係を示す。

LTシリーズについては変位が1.0~1.2mm、LRシリーズについては変位が1.3~1.5mmに達した後、急激に荷重が低下し、破断した。

せん断強度については、LT・LRシリーズともに、試験体の密度が高くなるに従い上昇する傾向がみられ、高い相関を示している (LTシリーズ: 相関係数  $R=0.82$ , LRシリーズ: 相関係数  $R=0.99$ )。両シリーズを比較すると、LRシリーズに比べてLTシリーズは低い値となり、この傾向は密度が高くなるに従って顕著に現れた。この理由として、LRシリーズの試験体では、圧密すると晩材の間隔が狭くなり、せん断面に占める晩材の割合が大きくなるので、圧密率が高くなるのに従いせん断強度は高くなる。それに対してLTシリーズの試験体では、圧密してもせん断面は早材部であることにかわりはないため、せん断強度はわずかな上昇しかみられないということが挙げられる。このことからせん断力の生じる部材には、高い圧密率で、せん断面がまき目面 (LR面) となるように圧密材を使用することが望ましいと考えられる。



(a) LTシリーズ (b) LRシリーズ

写真-2. 破壊性状

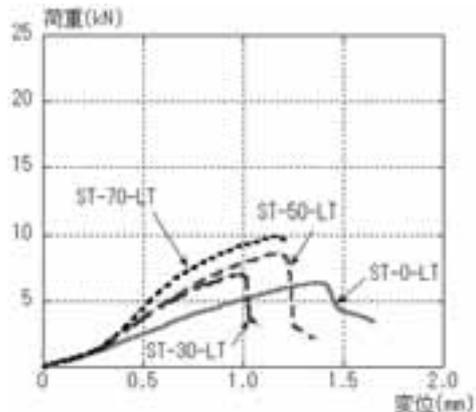


図-3. 代表的な荷重変位曲線 (LTシリーズ)

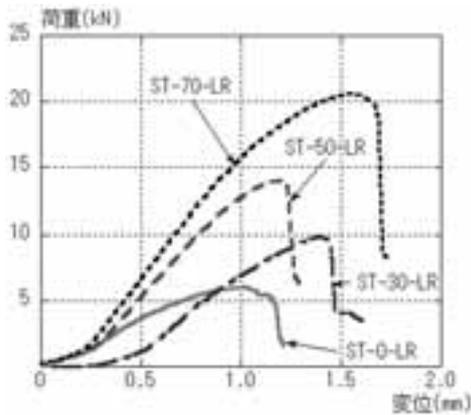


図-4. 代表的な荷重変位曲線 (LR シリーズ)

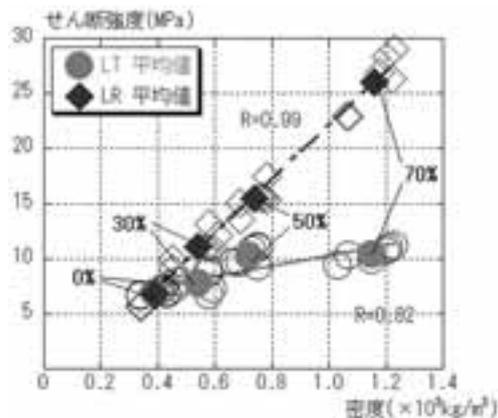


図-5. せん断強度と密度の関係

### Ⅲ. 曲げ実験

#### (1) 概要

圧密率(密度)及び圧密方向と加力方向の関係が曲げ強度に与える影響を把握するために曲げ実験を行い、強度性能の検討を行った。

#### (2) 試験体及び実験方法

表-2に試験体リストを示す。図-6に試験体形状及び寸法、図-7に加力方法を示す。

供試材として、平均密度が $0.36 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、平均年輪幅が3.8 mm、平均含水率が11.7%のスギ材の辺材を使用し、前章と同様の方法で圧密材を製作した。

試験体については、圧密率の違いによる強度への影響を把握するために、異なる圧密率の圧密材から試験体を製作した。試験体には、圧密率0%、30%、50%及び70%の圧密材を使用し、密度は圧密率0%が $0.35 \sim 0.42 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、圧密率30%が $0.37 \sim 0.57 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、圧密率50%が $0.62 \sim 0.80 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、圧密率70%が $1.11 \sim 1.30 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ となった。形状については、JIS-Z2101(3)に定められている曲げ試験方法に準拠して図-6に示す形状に加工した。また、圧密方向と加力方向の関係が強度に与える影響を把握するため、加力方向を放射方向(R方向)及び接線方向(T方向)とし、それぞれ実験を行った。

荷重は卓上精密万能試験機(鳥津製作所:AGS-J)による単調荷重で行い、加力速度は1.0mm/minとした。このとき、スパン長さは140mmとし、加力板の移動量を変位として測定した。

表-2. 試験体リスト

試験体名	加力方向	厚さ寸法 (mm)		圧密率 (%)	密度 ( $\times 10^3 \text{kg/m}^3$ )	平均含水率 (%)	試験体数
		圧密前	圧密後				
BT-0-R	R	—		0	0.36~0.42	12.0	各6体
BT-30-R		45.7	32.0	30	0.37~0.57	5.63	
BT-50-R		67.0		50	0.62~0.80	7.18	
BT-70-R		106.7		70	1.11~1.27	8.48	
BT-0-R	T	—		0	0.35~0.39	11.4	
BT-30-R		45.7	32.0	30	0.37~0.55	6.22	
BT-50-R		67.0		50	0.67~0.78	6.68	
BT-70-R		106.7		70	1.13~1.30	8.82	

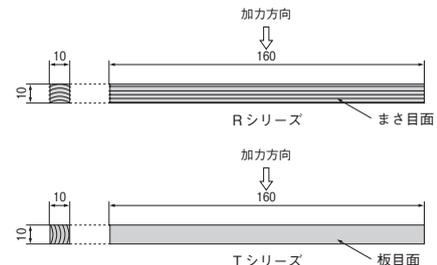


図-6. 試験体形状及び寸法 (単位: mm)

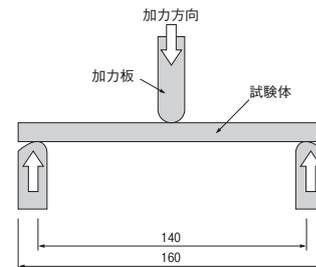


図-7. 加力方法 (単位: mm)

#### (3) 実験結果

写真-3に代表的な破壊性状を示す。図-8、図-9に代表的な荷重-変位曲線、図-10に曲げヤング係数、図-11に曲げ強度、図-12に塑性率のグラフを示す。このとき、曲げヤング係数については、0.02kN時の荷重と変位及び0.05kN時の荷重と変位の関係より算出した。また、塑性率は変形性能の指標として、実験により求めたデータを完全弾塑性モデル(4)に置換し、終局変位を降伏変位で除した値として算出した。

Rシリーズは降伏後に変位のみが進行するものがみられた。その後、引張側の繊維が徐々に破断し、荷重が低下して終局に至った。また、Tシリーズは、荷重が上昇した後、急激に荷重が低下しスパン中央部にひび割れが発生し終局に至った。

曲げヤング係数については、Rシリーズに比べてTシリーズの方がわずかに高い値を示した。また、曲げヤング係数と密度との関係は両シリーズともに密度が高くなるに従い曲げヤング係数が上昇する結果となり、両シリーズともに密度との高い相関を示している(Rシリーズ:相関係数 $R=0.91$ 、Tシリーズ:相関係数 $R=0.92$ )。

曲げ強度については、R・Tシリーズを比較すると各圧密率の平均値は近い値を示した。また、両シリーズの試験体とも密度が高くなるに従い曲げ強度が上昇するという結果となり、両シリーズともに密度との高い相関を示している(Rシリーズ:相関係数



(a) LT シリーズ (b) LR シリーズ  
写真-3. 破壊性状

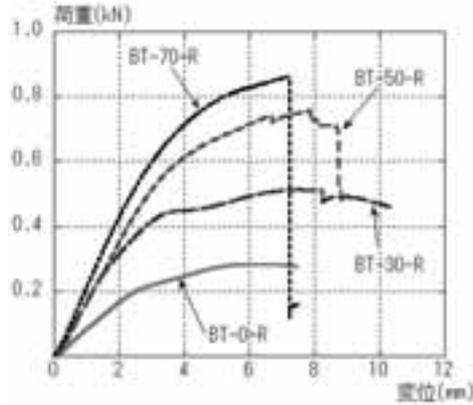


図-8. 荷重-変位曲線 (R シリーズ)

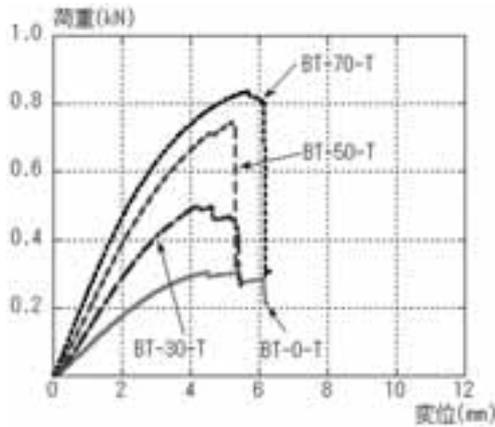


図-9. 荷重-変位曲線 (T シリーズ)

R=0.93, T シリーズ：相関係数 R = 0.94)。

塑性率については、R・T シリーズともに密度との相関は低い結果になった (R シリーズ：相関係数 R=0.05, T シリーズ：相関係数 R=0.24)。下限値では両シリーズとも同程度の値を示したものの、平均値では T シリーズに比べて、R シリーズの方が高い値を示し、圧密材の曲げ変形性能は圧密率に関係なく R シリーズのほうが高いということが示された。

このことから、曲げが生じる部材には、圧密率が高い圧密材を使用し、放射方向に加力すると変形能力が向上することが示唆された。

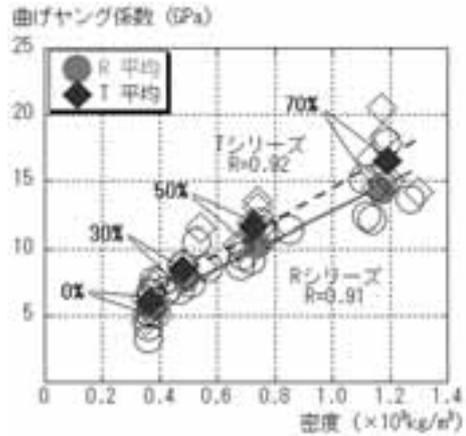


図-10. 曲げヤング係数と密度の関係

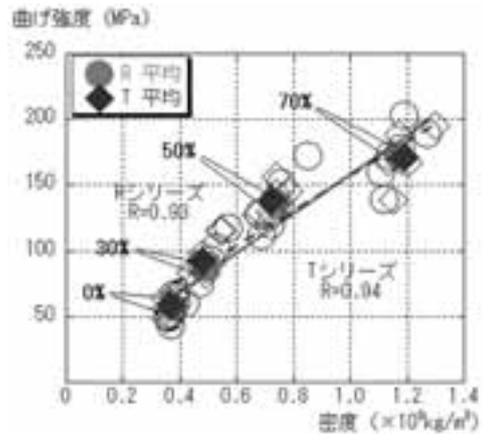


図-11. 曲げ強度と密度の関係

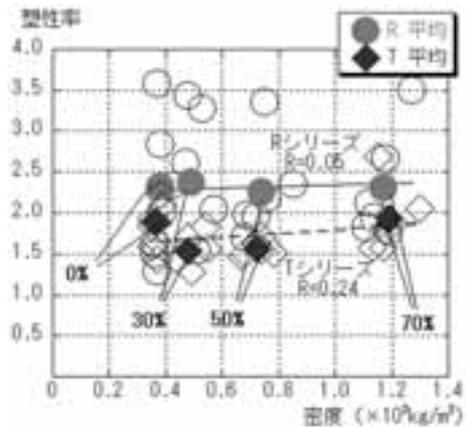


図-12. 塑性率と密度の関係

#### IV. 部分圧縮実験

##### (1) 概要

圧密率及び加力面の違いが部分圧縮強度に与える影響を把握するため、圧密材の部分圧縮実験を行った。

##### (2) 試験体及び実験方法

表-3に試験体リストを示す。図-13に試験体形状及び寸法、図-14に加力方法を示す。

表-3. 試験体リスト

試験体名	加力方向	厚さ寸法 (mm)		圧密率 (%)	密度 ( $\times 10^3 \text{kg/m}^3$ )	平均含水率 (%)	試験体数
		圧密前	圧密後				
R-D 0% SUGI	R	—		0	0.34~0.44	12.3	各 6 体
R-D33% SUGI		60.0	40.0	33	0.37~0.54	11.3	
R-D50% SUGI		79.9		50	0.51~0.78	11.4	
R-D67% SUGI		119.3		67	0.85~1.12	12.0	
T-D 0% SUGI	T	—		0	0.34~0.44	12.3	
T-D33% SUGI		60.0	40.0	33	0.37~0.54	11.3	
T-D50% SUGI		79.9		50	0.51~0.78	11.4	
T-D67% SUGI		119.3		67	0.85~1.12	12.0	

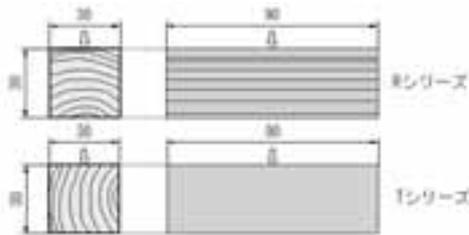


図-13. 試験体形状及び寸法 (単位: mm)

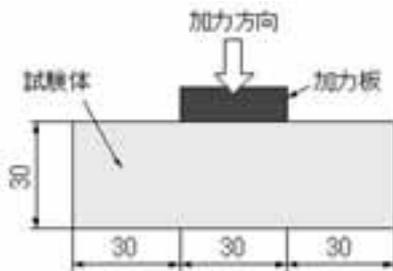


図-14. 加力方法 (単位: mm)

供試材として、平均年輪幅が5.1mm、平均密度が $0.38 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、平均含水率が11.7%のスギ材の辺材を使用し、前章と同様の方法で圧密材を製作した。

試験体については、前章と同様、圧密率の違いによる強度への影響を把握するために、異なる圧密率の試験体を製作した。試験体には、圧密率0%、33%、50%及び67%の圧密材を使用し、密度は0%が $0.34 \sim 0.44 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、33%が $0.37 \sim 0.54 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、50%が $0.51 \sim 0.78 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、67%が $0.85 \sim 1.12 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ となった。形状は、JIS-Z2101 (3) に定められている部分圧縮試験方法を準拠して加工をした。また、圧密方向と加力方向の関係が部分圧縮強度に与える影響を把握するため、加力方向を放射方向 (R方向) 及び接線方向 (T方向) とし、それぞれ実験を行った。

実験方法についてはJIS-Z2101に定められている部分圧縮試験方法に準拠して実験を行った。載荷は1000kN 万能試験機による

単調載荷で行い、加力速度は $0.3 \text{kN/min}$ で行った。また、めり込み量はストレインゲージ式変位計 (東京測器研究所: SDP-50C) により計測した。

### (3) 実験結果

図-15、図-16に代表的な荷重-変位曲線、図-17に初期剛性、図-18に辺長の5%変位 (1.5mm) まで圧縮された時の荷重、図-19に降伏変位、図-20に降伏耐力を示す。また、部分圧縮試験では試験体の破壊による荷重低下が起らず最大値の測定が困難であるため、JIS-Z2101に準拠した辺長の5%変位 (ここでは1.5mm) まで圧縮された時の荷重と、構造上重要であると考えられる降伏時の強度及び変位の比較を行うこととした。

荷重-変位曲線は加力方向で比較すると、圧密率0%の試験体ではR・Tシリーズともほぼ同等の挙動となったが、Rシリーズは圧密率33%、50%及び67%の試験体で荷重は載加と同時に直線的に上昇し、特に圧密率67%の試験体では急激に荷重が上昇した。Tシリーズでも載加直後から急激に荷重が上昇し、その後荷重が緩やかに上昇する結果となった。この理由として、Rシリーズにおいて圧密率67%の試験体は、圧縮されることで更に圧密が進行し早材部の細胞内腔が完全に消失されたため荷重は大きく上昇したが、それ以外の圧密率の試験体では、早材部の圧縮が先行したため緩やかな上昇となった。Tシリーズでは、載加直後から晩材部と早材部が同時に圧縮されたため荷重が急激に上昇し、その後めり込み破壊が進行し荷重は緩やかに上昇する結果になったと思われる。

ここに述べる初期剛性は、実験データを完全弾塑性モデル変換法 (4) により算出した初期剛性とした。Rシリーズに比べてTシリーズが高い値を示した。平均値で比較すると圧密率0%の試験体では、Rシリーズに比べTシリーズは約2倍の値であったが、圧密率50%の試験体ではRシリーズに比べTシリーズは約3倍となり圧密率の上昇によりTシリーズの性能が大きく向上する結果となった。

辺長の5%変位まで圧縮された時の荷重では、R・Tシリーズともに密度が高くなるに従って荷重が上昇する結果となった。また、密度の上昇による荷重の上昇率はTシリーズの方が高い結果となった。

降伏変位及び降伏耐力は、実験データを完全弾塑性モデルに置換し求めた。Rシリーズの降伏変位は、密度の上昇に伴い降伏変位も大きくなる結果となった。しかし、Tシリーズでは密度に関係なくほぼ同等の値となった。

降伏耐力については圧密率0%、33%及び50%ではR・Tシリーズに関係なくほぼ同等の値を示した。しかし、圧密率67%の試験体ではTシリーズと比較するとRシリーズの値が大きく上昇する結果となった。圧密率67%の試験体において降伏耐力と辺長の5%変位時の荷重を比較するとR・Tシリーズの関係が逆転する結果となった。これは、Tシリーズでは、辺長の5%変位に達する前に降伏挙動を示したのに対し、Rシリーズでは辺長の5%変位に達した後に降伏したためだと考えられる。

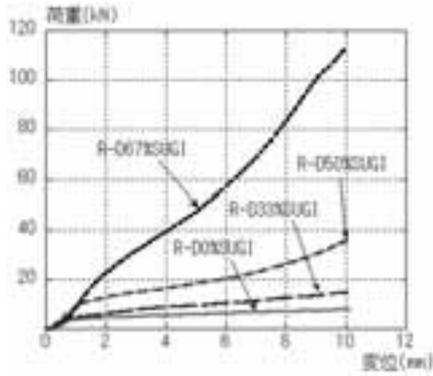


図-15. 荷重-変位曲線 (R シリーズ)

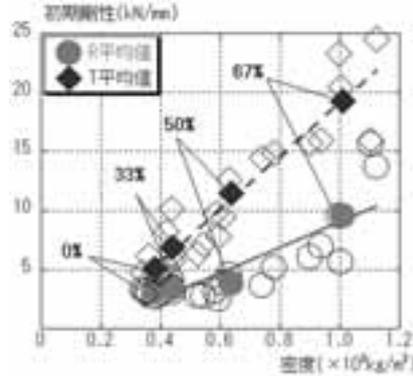


図-17. 初期剛性

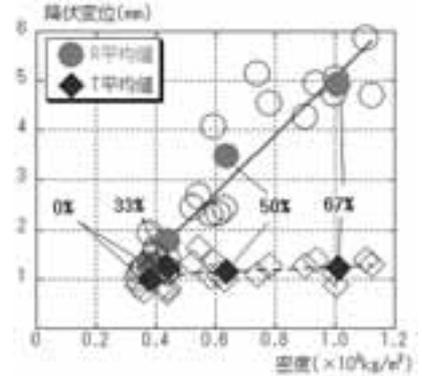


図-19. 降伏変位

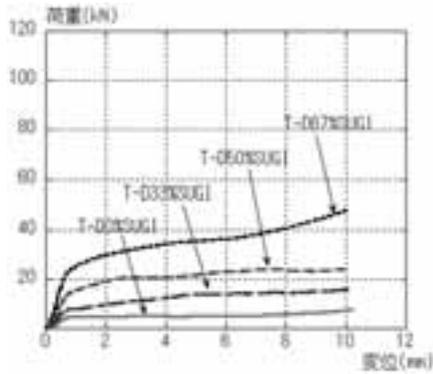


図-16. 荷重-変位曲線 (T シリーズ)

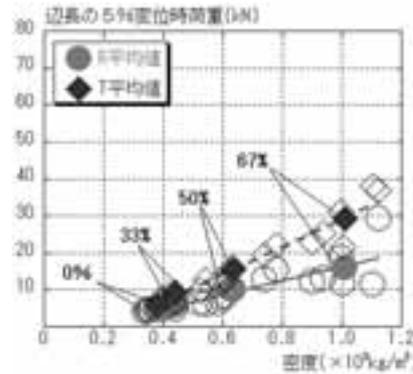


図-18. 辺長の5%変位時の荷重

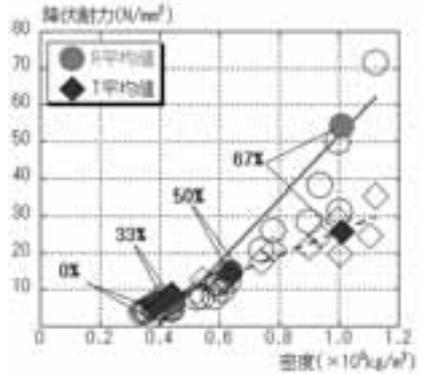


図-20. 降伏耐力

## V. まとめ

本報では、圧密率が異なる圧密スギを用いてせん断、曲げ、部分圧縮の各強度及び圧密方向と加力方向の関係が強度に与える影響を把握するため、それぞれの実験を行った。その結果以下のような知見が得られた。

せん断強度は、せん断面がLT・LR シリーズともに密度と高い相関を示すことが分かった。また、LT シリーズはLR シリーズに比べ低い値をとる結果となった。このことから、せん断力を受ける構造部材に圧密材を使用する場合は、圧密率が高く、せん断面をまき目面 (LR 面) とすることが重要であると考えられる。

曲げヤング係数及び曲げ強度は密度と高い相関を示したが、R・T シリーズともに同等の値を示し加力方向に影響しない結果となった。また、変形能力の指標である塑性率の平均値はR シリーズが高い値を示した。このことから、曲げが生じる部材には、圧密率が高い圧密材を使用することで強度が向上し、放射方向に加力されるように使用すると高い変形性能を期待できることが示唆された。

部分圧縮実験では、圧密することで性能の向上が確認され、67%まで圧密することにより性能の上昇率が高くなる結果となった。また、圧密率の上昇に伴い、加力方向による強度への影響が大きくなる結果となった。このことから、構造部材が部分圧縮力を受けるような使用の場合は、できるだけ高い密度の圧密材を用

い、必要な変形性能に応じて使用する方向を考慮する必要がある。

今後は、圧密材におけるこれらの特性を利用して、木質構造のドリフトピン接合における木製ドリフトピンやジベル接合における木質シアプレートの開発を行い、金物を使用しない木質構造接合部の実現を目指す予定である。

## 参考文献

- (1) 井上雅文ほか (1998) 日本木材学会大会研究発表要旨集：96
- (2) 北川美穂ほか (2005) 日本木材学会大会研究発表要旨集：93
- (3) (財) 日本規格協会 (1994) “木材の試験方法 JIS-Z2101”：10-16
- (4) (財) 日本住宅・木材技術センター (2001) 木造軸組み工法住宅の許容応力度設計：146

## 謝辞

本研究を行うにあたり、試験体の製作に多大な御協力を頂きました大分県産業科学技術センター日田産業工芸試験所の山本幸雄氏に深く感謝の意を表します。

(2008年12月6日受付；2009年1月13日受理)