

# スギ材の耐久性向上技術に関する研究

1998年度～2002年度（国補）

豊嶋 勲 近藤和幸 大林育志

## 要 旨

軟質で強度が低いスギ材を構造材に活用するために、強度区分、防腐処理、圧密化、集成化技術を組み合わせ、土台等の耐久性・表面強度が要求される箇所に使用する部材の開発を行った。その結果、めりこみ強度（部分圧縮強度）は気乾比重との相関が最も高く、製材、ラミナともに気乾比重による強度区分の可能性が示唆された。また、低毒性薬剤であるホウ酸を使用した防腐処理技術については、フェノール等の樹脂との混合により、溶脱操作によるホウ酸残存量を約2割確保することができたが、ホウ酸塩が樹脂の圧縮固定の性能を低下させるため、圧密化との併用は困難であると考えられた。圧密化についてはスギ材のヤング率、めりこみ強度をそれぞれ向上することができ、圧縮率が60%でヤング率は3割増、めりこみ強度は約2倍となった。集成化については、最外層に60%圧縮のスギ強化ラミナを使用した場合、土台105mm角のJAS同一等級構成集成材の曲げヤング率を1ランク向上させることができ、めりこみ強度についても比重0.40以下のグループでもすべて基準値6 N/mm<sup>2</sup>を満たした。

## I 目的

スギ材は県内に資源として豊富にあるが、利用は伸び悩み、需要拡大が進んでいないのが現状である。この原因として、スギ材から強度等が要求される構造材を製造する場合には、外材と比較して比重が低く軟質であるために、ヤング係数や表面強度など強度性能に関する問題点を多く抱えていることが挙げられる。このため強度性能等を改良して、需要拡大が大きく期待できる構造材として利用開発することを目的とし、これまでほとんど利用されていない土台材開発を目指し、スギ材の土台としての適正および表面強度の改良・集成化、環境にやさしい保存処理などの手法を組み合わせ、土台材に要求される強度や耐久性の向上技術について検討を行った。

## II 試料と方法

### 1. 製材の土台として適正評価

林業センター試験林から伐採したスギ・ヒノキから105mm正角材を製材し、スギ104本、ヒノキ20本を試験に供した。調査項目は年輪幅、比重、ヤング係数、めりこみ強度である。ヤング係数の測定はFFTアナライザーによる打撃法または実大強度試験機による曲げ強度試験により行い、めりこみ強度試験はオートグラフにより行った。試験方法は曲げ強度試験は3等分点4点荷重、めりこみ強度試験は「構造用木材の強度試験法（（財）日本住宅・木材技術センター）」テキストを参考に材せい10%の変形が生じるまで実施した。試験体は製材1本あたり2～3個の試験体を採用し、加圧面に節等の強度に影響を与える欠点のない部

分で測定を行った。

## 2. スギ材による防腐集成土台の開発

### (1) エレメントの特殊処理技術

スギ辺材の小試験体(2×2×1cm)を用いて減圧注入により防腐剤を注入した。防腐薬剤としてホウ酸、フェノール樹脂(PX-341、アイカ工業製)、PEGMA樹脂(PE-200及びPDE-400、日本油脂製)を組み合わせて使用した。組み合わせおよび濃度はホウ酸・ホウ砂をBAE(Boric Acid Equivalent:ホウ酸等量)8%、フェノール樹脂およびPEGMA樹脂は10%、20%として、ホウ酸・ホウ砂に対して樹脂を所定濃度に混合した。注入処理した試験体は所定の硬化処理を行った後、60℃で48h乾燥して、溶脱操作を10サイクル繰り返した。溶脱操作は試験体の10倍量の蒸留水中で、8h攪拌した後、16h60℃乾燥器中での気散処理を1サイクルとした。ホウ酸を含む試験体については溶脱操作1回ごとに溶脱液を採取し、溶脱されたホウ酸濃度をICP-AES誘導結合プラズマ発光分光分析装置により測定し、10回の溶脱操作で試験体から流出したホウ酸量を定量した。

溶脱操作の終了した試験体をJIS A 9301に基づいて腐朽試験を行った。試験体を腐朽ビンに接地してから12週間後に試験体の重量減少率を測定し、防腐性能を評価した。

### (2) 集成化による構造材の開発

#### ア スギ強化ラミナの製造

スギ板目材(11×63cm、厚さ20~30mm)に上記のフェノール樹脂、PEGMA樹脂を真空加圧缶により注入した。注入方法は薬液導入後真空で30分、5気圧で60分の加圧処理とした。PEGMA樹脂は日陰で天然乾燥約1ヶ月、フェノール樹脂は1~2週間日陰で天然乾燥した後、60℃熱風高温乾燥器内で乾燥させ、含水率が20%程度になったところで、熱プレスを用いて所定の厚さに圧縮した後、数日放置した。試験体を3等分に分割し、蒸留水を減圧注

入後、ウォーターバス中で1h煮沸し、全乾後に厚さを測定し、圧縮ラミナの回復度を測定した。

回復度は次式により計算した。回復度=(回復後の厚さ-圧縮処理後の厚さ)/(圧縮処理前の厚さ-圧縮処理後の厚さ)×100(%)とした。

#### イ スギ強化ラミナの強度的性質

スギ板目材を気乾比重を0.01単位で区分し、各比重ごとに、圧縮率0%、15%、25%、35%、50%の圧密化を行い、7プライ105mm角の試験用集成材(長さ63cm)を58体作成した。接着剤は水性高分子イソシアネート(アイカ工業製 AUH-100、以下接着剤はすべてAUH-100を使用)を用いた。集成材のめりこみ強度試験をオートグラフにより行った。試験方法は図-1のように縦使いで行った。強度が試験機の上限荷重である10tfを越えると予想されるものについては、試験体の圧縮面積を調整して実施した。

ヤング率の調査については、長さ4mのラミナのヤング率をタッピング法により測定した後、長さ670mmの6枚の板材に切断した。各板材を熱プレスで圧密化し、その後フィンガージョイントで再構成した。同様な方法でヤング率を測定した。

#### ウ スギ強化ラミナを用いた集成材の開発

図-2に集成材の製造工程を示した。予めヤング率を測定したスギの420cm長のラミナ(断面寸法110×28mmおよび110×35mm)を長さ670mmの板材6枚に切断し、フェノール樹脂注入を行った。含水率20%前後になるまで調整した後、熱プレスで圧縮率25%および40%で圧縮固定し、材厚が21mmのスギ強化ラミナを製造した。これらを寸法調整した後、フィンガージョイントで縦継ぎし再構成することで、4m長の最外層用のスギ強化ラミナを製造した。中間層・内層にはスギ心材を用いて5プライの105mm角集成材を作成した。接着剤は高分子イソシアネートを用いた。ラミナの構成はJASの同一等級構成方法を参考にL50、L60、L70

(ヤング率がそれぞれE50、E60、E70のみのラミナで構成)でかつ比重0.400未満、0.400以上の2クラスの比重により分類したラミナからなる集成材とした。またJAS対称異等級構成による集成材を同様に1級～4級まで製造した。

実大強度試験機で曲げ試験を実施しヤング係数および曲げ強度を測定した後、健全部から2～3体の630mm長の試験体を採取し、めりこみ強度試験に供した。荷重面は図-1のとおり積層面に垂直で行った。

エ スギ・ヒノキ複合集成材の開発

最外層に心材のヒノキラミナ、中間・内層に心材のスギラミナを配置したスギ・ヒノキの複合集成材を以下の条件で製造した。ヒノキラミナは比重0.500未満と0.500以上の2クラス、スギは比重0.400未満と0.400以上の2クラスに分類し、各比重ごとの組み合わせで4条件の試験体を製造した。試験体のタイプはA(スギ0.400以上、ヒノキ0.500以上)、B(スギ0.400以上、ヒノキ0.500未満)、C(スギ0.400未満、ヒノキ0.500以上)、D(スギ0.400未満、ヒノキ0.500未満)とした。それぞれの条件で2～3本ずつ曲げ試験を行った後、スギ強化集成材と同様に健全部から試験体を2～3体採取し、図-1のように積層面に垂直にめりこみ試験を実施した。

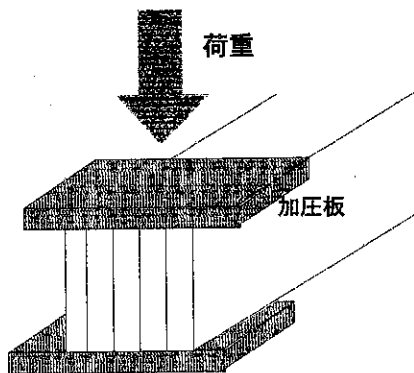


図-1 集成材のめりこみ強度試験方法

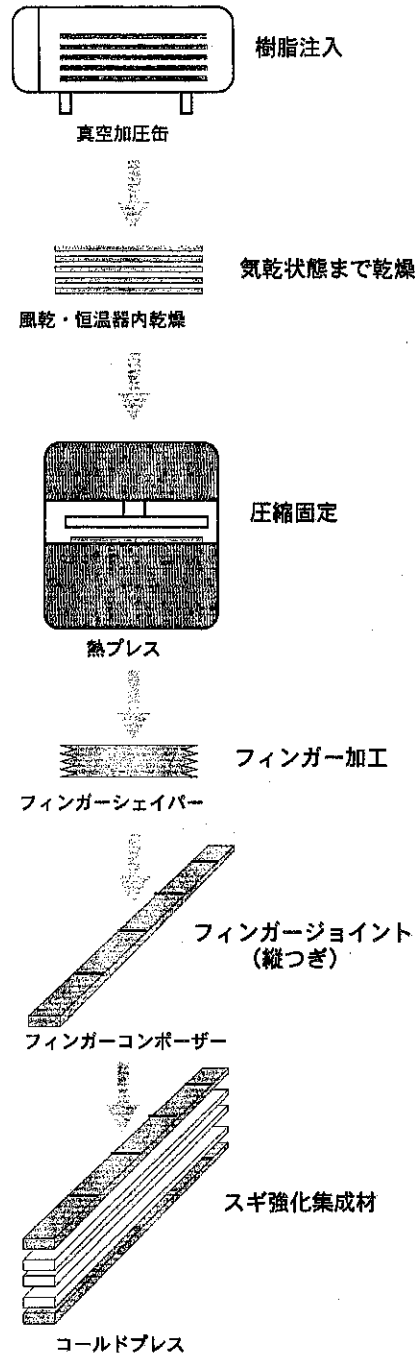


図-2 スギ強化集成材の製造工程

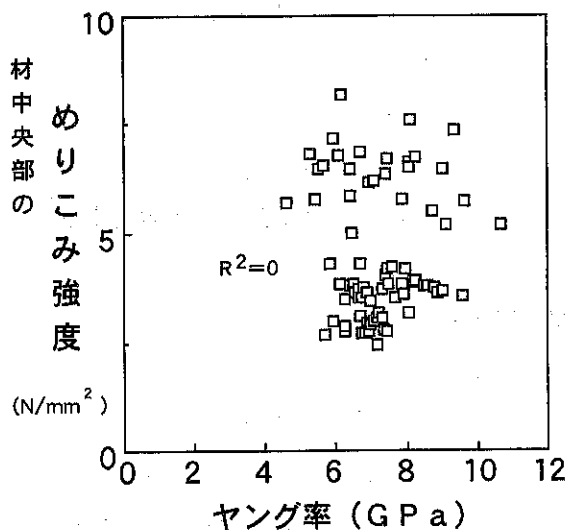
Ⅲ 結果と考察

1. 製材の土台として適正評価

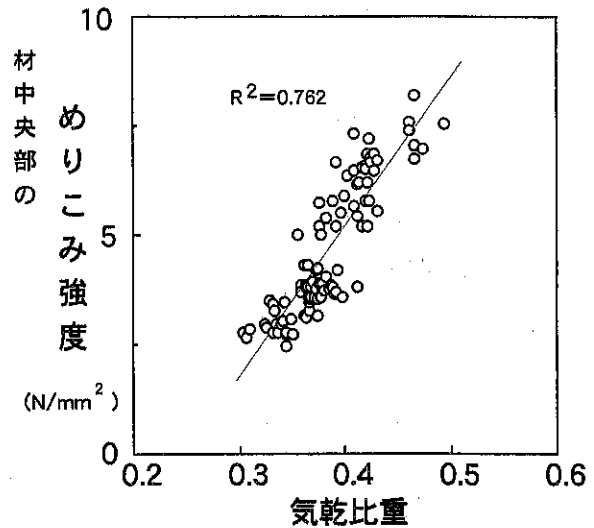
105mm正角スギ製材品のめりこみ強度は、材端部で2.16～7.33N/mm<sup>2</sup>、材中央部で2.45～7.59N/mm<sup>2</sup>となった。図-3に材中央部のめりこみ強度とヤング率の関係、図-4に材中央部のめりこみ強度と気乾比重の関係を示した。ヤング率とめりこみ強

度の相関は $R^2=0$ 、平均年輪幅との相関 $R^2=0.051$ と低かったのに対して気乾比重の場合は $R^2=0.762$ と高い値が得られた。このことからめりこみ強度は気乾比重に最も大きく影響され、ヤング係数が高い製材品でも比重が低いものはめりこみに対する抵抗が小さいことが示唆された。建築基準法によるスギのめりこみ強度基準は $6\text{N/mm}^2$ であることから95%信頼下限値を考慮して回帰式 $y=34.039x-8.641$ にから計算すると、基準値を満たすには製材の気乾比重が0.430以上必要であると推定できた。この比重を満たす心持ちの製材品は今回の試験体では樹齢の若いスギが中心であったこともあり、全体の1割程度であった。一方ヒノキ材については、材端部で $7.35\sim 11.11\text{N/mm}^2$ 、材中央部で $8.96\sim 13.23\text{N/mm}^2$ であり、材中央部ではヒノキの基準値 $7.8\text{N/mm}^2$ を下回る試験体は存在しなかった。また比重でめりこみ強度を除いた比めりこみ強度はスギ材よりヒノキ材が高い値を示した。

これらのことからスギ材で基準値を上回るめりこみ性能を有する製材品は少なく、また比めりこみ強度においてヒノキ材より劣ることからスギ製材を土台として使用するにはやや難があるように思われる。



図一三 スギ製材品のめりこみ強度とヤング率の関係



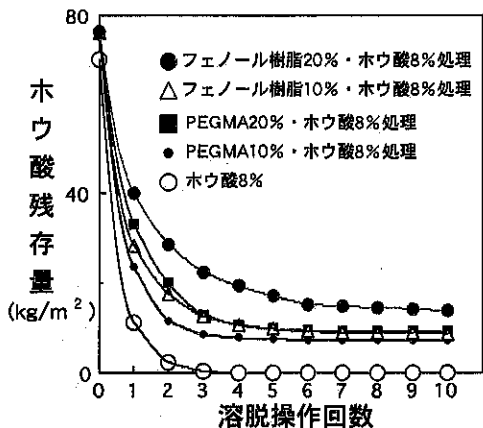
図一四 スギ製材品のめりこみ強度と気乾比重の関係

## 2. スギ材による防腐集成土台の開発

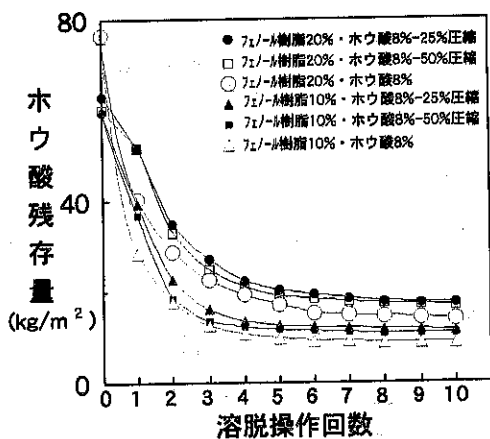
### (1) エレメントの特殊処理技術

各処理条件での溶脱操作によるホウ酸の溶脱経過を図一5に示した。PEGMA樹脂(PE-200)とホウ酸混合系では樹脂濃度20%、10%で、ホウ酸残存量はそれぞれ $7.3\text{kg/m}^3$ 、 $9.2\text{kg/m}^3$ であった。一方、フェノール樹脂・ホウ酸混合系では樹脂濃度20%、10%で、ホウ酸残存量はそれぞれ $8.7\text{kg/m}^3$ 、 $13.8\text{kg/m}^3$ でありPEGMAより残存量は高かった。また同様な処理をした後圧密化した試験体のホウ酸溶脱経過を図一6に示した。圧密化によるホウ酸溶脱の抑制効果は、圧縮しないものより残存量が24~26%改善した。圧縮率による差は認められなかったが、原因として圧密化した後の溶脱過程では寸法安定性が高くなく、溶脱操作中に試験体が膨潤したことによると考えられる。

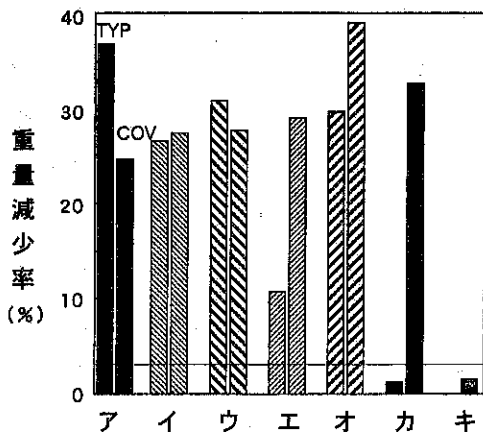
腐朽試験では、重量減少率が防腐効果があるとされる基準値3%以下であったのはフェノール樹脂20%・ホウ酸8%混合系であった(図一7参照)。さらに追試をしたところフェノール樹脂のみでも濃度が20%あれば重量減少率を3%以内に抑制することができた。



図一五 各樹脂・ホウ酸処理した試験体からのホウ酸の溶脱過程



図一六 フェノール樹脂圧縮固定した試験体のホウ酸の溶脱過程



ア: 無処理 イ: PEGMA (PE-200) 10%+ホウ酸8% ウ: PEGMA (PE-200) 20%+ホウ酸8% エ: PEGMA (PDE-400) 10%+ホウ酸8% オ: PEGMA (PDE-400) 20%+ホウ酸8% カ: フェノール樹脂10%+ホウ酸8% キ: フェノール樹脂20%+ホウ酸8%

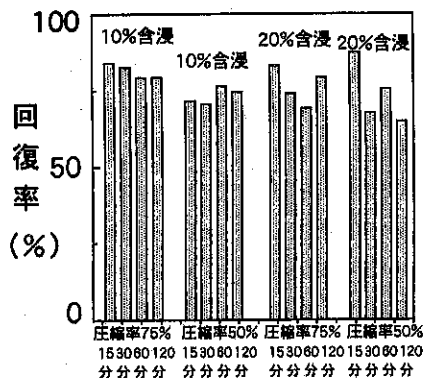
図一七 樹脂・ホウ酸処理の防腐試験結果

(2) 集成化による構造材の開発

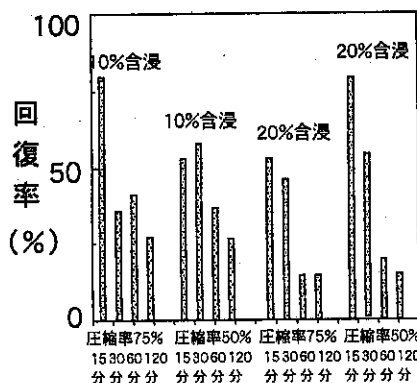
ア スギ強化ラミナの製造

熱プレスによる圧密固定後の水減圧注入・煮沸・乾燥による回復率を図一8、9、10に示した。PEGMA樹脂ではPE-200、PDE-400ともに120min.のプレス時間でも0%に抑えることはできなかった。一方、フェノール樹脂は10%の樹脂濃度でも圧縮率50%ならばほぼ0%、20%の樹脂濃度なら、25%、50%どちらの圧縮率でもほぼ0%であった。これらのことからPEGMA樹脂は圧密固定、ホウ酸溶脱抑制ともにフェノール樹脂より劣った。コストでもフェノール樹脂の方が安価であることから集成材の強化ラミナの製造にはフェノール樹脂を用いた。

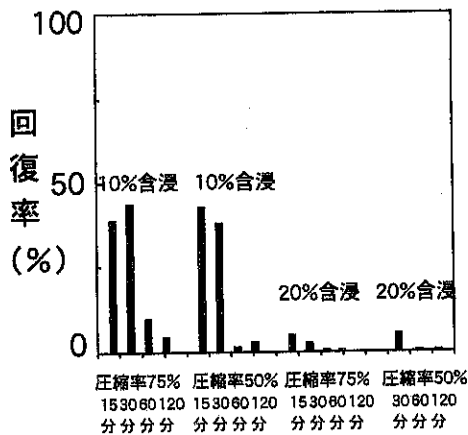
また注意点として薬剤・樹脂等の注入材は乾燥過程で反り等の変形を生ずるので、圧密処理をしない場合は切削等の二次加工が必要である。



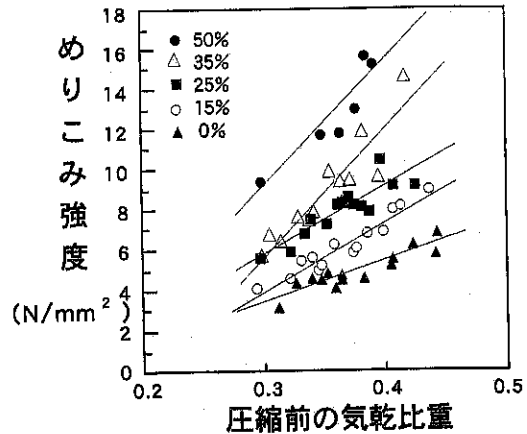
図一八 PEGMA樹脂 (PE-200) 処理試験体の煮沸・乾燥試験による回復率



図一九 PEGMA樹脂 (PDE-400) 処理試験体の煮沸・乾燥試験による回復率



図一10 フェノール樹脂処理試験体の煮沸・乾燥試験による回復率



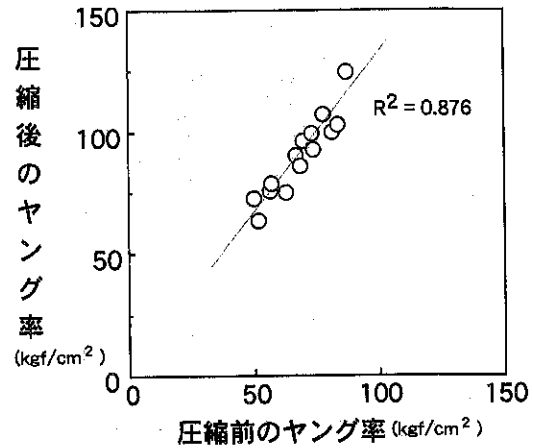
図一11 圧密化によるめりこみ強度の向上

イ スギ強化ラミナの強度的性質

図一11に各圧縮率条件ごとに気乾比重とめりこみ強度の関係を示した。一例として、圧縮前比重0.360のラミナを組み合わせた場合は、圧縮率85%で1.2倍、75%で1.7倍、65%で1.8倍、50%は2.7倍にめりこみ強度が向上した。また、そのめりこみ強度向上への効果は、回帰直線の傾きが最も大きくなることから、圧縮率35%以上で圧密化による効果が高くなることが認められた。

これらのことから、圧密化によってめりこみ強度は確実に向上し、圧縮率も大きいほど有利で、35%以上の圧縮率で最も効果があると認められた。しかし、スギ材では圧縮率が大きくなると割れの発生も多くなるため、圧縮による強度向上効果を期待すると、圧縮率50%は厳しすぎ、65%程度なら適当であると思われる。

またヤング率については75%圧縮で1割程度向上であったのに対し、60%の圧縮で約3割の向上が認められた。図一12に圧密化する前のヤング率と圧縮率60%で圧密化した場合のヤング率との関係を示した。回帰式は  $y = 1.29x + 1.80$  であった。この回帰式に各グレードのラミナのヤング率を当てはめるとJAS等級で1~2ランク向上させられることが示された。



図一12 圧密化によるヤング率の向上

ウ スギ強化ラミナを用いた集成材の開発

図一13にスギ強化ラミナを使用したJAS同一等級構成集成材(4m、105mm角、5プライ)の曲げ強度と曲げヤング率との関係を示した。最外層に強化ラミナを配置することにより、曲げヤング率が各等級で1つ上の等級に向上した。しかしフィンガージョイントで縦接ぎしてあるために曲げ強度の向上は見られなかった。図一14に材中央で測定しためりこみ強度と試験体の気乾比重との関係を示した。めりこみ強度は、ヤング係数よりも比重因子によって性能が支配されており、同一等級構成集成材でも比重の違いにより、強度性能に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。また強化ラミナの最外層への配置により、めりこみ強

度は12~13%の向上が図られた。また圧密処理をしないラミナで95%信頼下限値による回帰直線から計算した結果、集成材の比重が0.395以上あれば、基準値6N/mm<sup>2</sup>を満たした。つまり、ラミナ気乾比重で0.395以上の高比重グループのラミナを使用すれば、基準値をクリアすることは可能であることが示された。

対称異等級構成集成材でもJASによるヤング率のみのグレーディングでは、気乾比重のパラツキが大きいため、安定した強度の向上は望めず、比重によるグレーディングとの併用の必要性が示唆された。

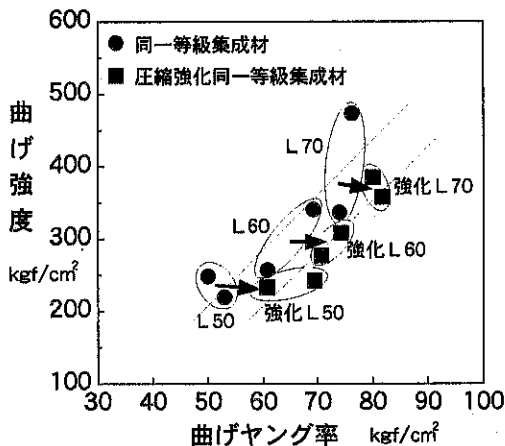


図-13 同一等級集成材の曲げヤング率と曲げ強度との関係

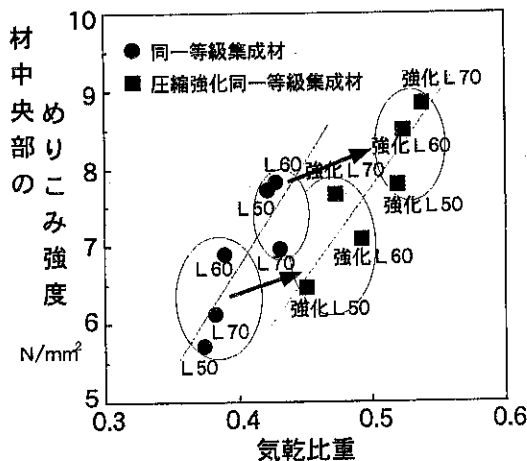


図-14 同一等級集成材のめりこみ強度と気乾比重の関係

エ スギ・ヒノキ複合集成材の開発

図-15にヒノキ・スギ複合集成材のめりこみ強度試験の結果を示した。スギ集成材と同様に複合集成材でも気乾比重の増加に従ってめりこみ強度は増加し、相関係数 $R^2=0.888$ と高かった。また複合集成材は気乾比重がスギ強化集成材に比べ比較的低いにもかかわらず、めりこみ強度は高い性能が得られた。これはヒノキのめりこみ性能の高さが影響しているものと考えられる。

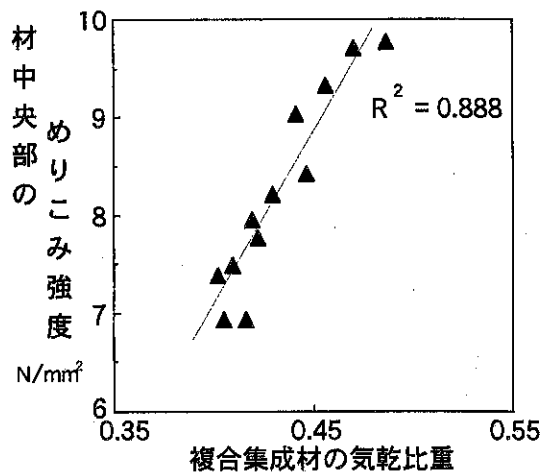


図-15 スギ・ヒノキ複合集成材のめりこみ強度と気乾比重の関係

以上集成材について総括すると、めりこみ強度はヤング率による等級区分ではなく、比重によるラミナ選別が有効であると考えられる。土台は耐力壁などの柱との接合部でバラツキの少ない信頼性の高いめりこみ性能が要求されるので、土台に適用する部材はヤング率による区分に加えて、比重による区分を含めて考えていく必要がある。

またスギ集成材を土台に利用していく場合、土台に要求されるスギの集成材のめりこみ強度基準値6N/mm<sup>2</sup>を満たすには比重0.395以上のラミナを使用するかまたはスギ強化ラミナやヒノキなど、めりこみ強度が高く耐久性の高いラミナを最外層に導入する必要がある。

#### IV まとめ

スギ材を用いた土台材の開発について、製材および集成材について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) スギ製材品を土台として活用する場合、心持ち105mm正角材では、JAS基準をクリアするには気乾比重0.430以上必要である。

(2) ヒノキのめりこみ強度はスギの2倍以上で、比めりこみ強度（比重で強度を除いた値）もスギより高い値を示した。

(3) ホウ酸の溶脱抑制はフェノール等の樹脂との混合により向上するが、圧密処理材の寸法安定性の低さのため、併用は困難である。

(4) 圧縮固定には、フェノール樹脂（PX-341）、PEGMA樹脂（PDE-400）ともに、1～2時間での熱プレスで回復率をほぼ0%に抑制できた。

(5) 圧密化によるヤング率の向上は、圧縮率60%で約3割の向上が図られ、JAS等級を1～2ランク向上することができる。

(6) 圧密化によるめりこみ強度の向上は、圧縮率が高くなるほど向上効果も上がり、圧縮率65%で約1.8倍の向上が図られた。

(7) 集成化によりめりこみ強度は向上し、比重が0.395以上のスギの中では比較的高い比重のラミナを使用すれば、基準値 $6\text{N}/\text{mm}^2$ を満たすことが示された。

(8) 圧縮率60%のスギ強化ラミナを最外層に配置した105mm角集成材の強度性能はヤング率、めりこみ強度ともに向上し、JASの同一等級構成集成材では、ヤング率で1ランク上、めりこみ強度で12～13%の向上し、スギのめりこみ強度基準 $6\text{N}/\text{mm}^2$ を下回る試験体はなかった。

(9) スギ・ヒノキの複合集成材では、めりこみ強度は向上し、比重はスギとヒノキの中間程度でヒノキの心持ち正角材と同程度のめりこみ強度を示した。

#### V 参考文献

(1) 満名ら（2000）奈良県木材加工資料, No.29 : 34-40

(2) 和田ら（2000）奈良県木材加工資料, No.29 : 41-48