

異樹種複合集成材の弾性係数と強度 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ELASTIC MODULUS AND STRENGTH OF TWO-SPECIES LAMINATED TIMBER BEAMS

長谷部 薫*, 薄木 征三**, 飯島 泰男***, 藤原 直之****
Kaoru HASEBE, Seizo USUKI, Yasuo IJIMA, and Naoyuki FUJIWARA

* 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木環境工学科 (〒010 秋田市手形学園町1-1)

** 工博 秋田大学教授 鉱山学部土木環境工学科 (〒010 秋田市手形学園町1-1)

*** 農博 秋田県 林務部木材産業課 (〒010 秋田市山王4-1-2)

**** 秋田大学大学院 鉱山学部土木環境工学科 (〒010 秋田市手形学園町1-1)

This paper presents an experimental study on the elastic modulus and the strength of glued laminated timber beam composed of two wood species. In this beam, the concept of developing beam stiffness using lower stiffness species for the inner timber laminations and higher stiffness species for the outer timber laminations are used. The bending and compression tests of the glued laminated timber made of Douglas Fir outer two laminas and Japanese Cedar inner ten laminas were performed. A total of six beams with rectangular cross section were tested. From the test results, Young's modulus and shearing modulus for inner and outer laminations of the glued laminated timbers modeled to three-layer beam are determined. The bending and shear strength of the two-species laminated timber beams are also investigated by the tests.

Key Words : glued laminated timber, elastic modulus, strength

1. まえがき

集成材はりの曲げ耐力と剛性は、集成材を構成している各ラミナ（ひき板）の強度性状が完全に一致する状態においては、ラミナのそれらと同じと考えることができる。しかし、一般に集成材はりは、はりの曲げ性状を考慮し低品質強度のラミナを断面の中央部に、同一樹種で高品質高強度のラミナを外層部に配置して製造される。品質および強度の差異は、同一樹種間においても存在するが、異樹種間におけるほうが顕著であり、低品質ラミナと異樹種材を複合化することによって、集成材の力学的性質を改良することができる。JAS¹⁾（日本農林規格）では、異樹種ラミナの接着は禁止されていないが、異樹種複合集成材に関する規定はない。間伐材等の低品質材の活用という観点からは、外層に米松等の高強度ラミナを数枚配置し、内層に低品質材を用いた異樹種複合集成材の規格化が望まれる。

異樹種複合集成材の強度性状に関する研究は、国内外で古くから行われており、曲げ剛性と曲げ耐力およびせん断耐力について多くの研究成果が報告されている。中川ら²⁾は、なら（広葉樹）とえぞまつ（針葉樹）を用いた複合集成材について実験的研究を行い、引張側と圧縮

側の外層部にヤング係数の大きい材を配置することにより、集成材はりの曲げ剛性を高めることができることを示し、等価曲げ剛性の計算式の妥当性を実証している。森ら³⁾は、異樹種複合集成材が曲げを受ける場合の、弾性状態と終局状態を対象として設計計算式を提案し、ならと杉（針葉樹）およびぶな（広葉樹）と杉を用いた2種類の複合集成材の実験を行うことにより、設計式が実験結果と適合することを示している。これらの報告は、国産材を用いた小断面の複合集成材に関するものであるが、外材の米松（針葉樹）を外層部に、国産材の杉を内層部に用いた複合集成材の曲げ強度性能についても最近報告されている⁴⁾。

しかしながら、これまでの研究報告では、異樹種複合集成材の曲げ剛性に関する報告は多数行われているが、各層の弾性係数については言及していない。異樹種複合集成材を構造部材として用いる場合は、適切な試験方法および評価方法によって、構造用として必要な性能を有することを明らかにする必要がある。ここでは、米松と杉を用いて試作した異樹種複合大断面集成材について、複合集成材を三層はりにモデル化し、曲げ試験と圧縮試験より各層のヤング係数とせん断弾性係数を評価する方

法を示す。さらに破壊実験を行うことにより、曲げ強さとせん断強さおよびめり込み強さについて考察する。

2. 集成材ラミナのヤング係数

実験で用いた試験体は長さ6m、22×45cmの長方形断面で、3cm厚の米松のラミナを上下の外層に2枚ずつ、3.3cm厚の秋田杉のラミナを内層に10枚配置し、レゾルシノール樹脂接着剤を用いて接着積層した異樹種複集成材である。試験体ラミナの製造は、一般的に行われている方法で行った。初めに、長さ365～400cmの杉ラミナと米松ラミナを人工乾燥により、含水率12%まで乾燥させた。次に、乾燥ラミナ全数に対し、支間を3.5mとして曲げ試験を行いヤング係数を測定した。ラミナをヤング係数ごとに仕分けし、数値の近い材ごとにフィンガージョイントで縦接合を行い、長さ6mのラミナを製造した。

長さ6mのラミナを単純支持し、支間を5.5mとして支間中央に集中荷重を作用させ、各ラミナのヤング係数 E_L を測定した。ここで、支間5.5mとプレーナー仕上げを行う前のラミナ厚3.8cmの比は145>25(JAS規格¹⁾)で、たわみに及ぼすせん断変形の影響は無視できる。弾性係数を決定するための試験体は6体製作し、図-1は、一例としてケース1(試験体番号1)と5のラミナのヤング係数を示している。図より、上下の外層に用いた米松のヤング係数は必ずしも同一とはならないが、以下で示すように三層はりにモデル化して解析を行うために、外層のヤング係数は、図中の破線で示したように4枚のラミナの平均値とする。また、内層に用いた杉の等価ヤング係数は、はり理論の応力のつり合い式⁵⁾より求めた。表-1にケース1から6までの各試験体のヤング係数を示す。表中で、 E_1' は外層に用いた4枚の米松ラミナの平均値で、 E_2' は次式より得られる内層に用いた10枚の杉の等価ヤング係数である。

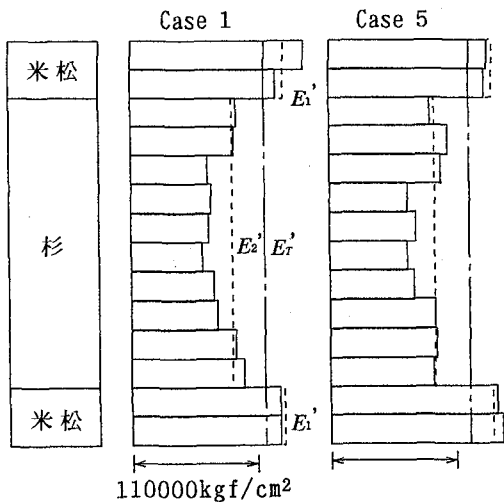


図-1 ラミナのヤング係数

表-1 ラミナのヤング係数 (kgf/cm²)

Case	E_1'	E_2'	E_T'
1	134600	89200	116700
2	135000	88100	116500
3	138100	90600	119400
4	137200	92400	119500
5	142800	92000	122700
6	138500	90600	119600

$$E_2' = \frac{12}{(10h_L)^3} \left[\frac{h_L^3}{3} \{ 61(E_{L1} + E_{L10}) + 37(E_{L2} + E_{L9}) + 19(E_{L3} + E_{L8}) + 7(E_{L4} + E_{L7}) + E_{L5} + E_{L6} \} - \frac{h_L^3}{4} \{ 9(E_{L10} - E_{L1}) + 7(E_{L9} - E_{L2}) + 5(E_{L8} - E_{L3}) + 3(E_{L7} - E_{L4}) - E_{L5} + E_{L6} \}^2 / \sum E_{Li} \right] \quad (1)$$

ここで、 h_L は杉ラミナの厚さで、 $E_{Li} = E_{L1} \sim E_{L10}$ は積層順の杉ラミナのヤング係数である。また、表-1と図-1の E_T' は E_1' と E_2' より得られる集成材としての等価ヤング係数である(式(3)参照)。

表-1より、実験で用いた各試験体の等価ヤング係数 E_T' は、木構造計算規準⁶⁾による1級の米松集成材の規準値110,000kgf/cm²をやや上回る値となっている。

3. 曲げ試験と圧縮試験による弾性係数の決定

3.1 ヤング係数とせん断弾性係数の決定

図-2に示すように、6mの試験体を単純支持し、支間 L を2.6m、3.2m、4m、5.6mと変化させ、支間中央に集中荷重を作用させて載荷点のたわみを測定し、次式のせん断変形の影響を含むたわみ式よりせん断弾性係数 G を求めた。

$$v = \frac{PL^3}{48E_T I} + \frac{\kappa PL}{4GA} \quad (2)$$

ここで I は断面二次モーメント、 A は断面積、 κ はせん断補正係数で長方形断面の場合1.2である。

図-2は、一例としてケース5の試験体の荷重と支間中央のたわみの関係を示している。図-2の結果を基に式(2)で右辺第2項のせん断の影響を無視して得られる見かけのヤング係数 E' と、集成材断面の高さ $2h$ と支間 L の比 $(2h/L)^2$ を用いて弾性係数を決定する。図-3にケース5の試験体の結果を示す。図中の黒丸の実験データを最小二乗法で処理させた直線の傾きよりせん断弾性係数 G が得られ、この直線と縦軸との交点より真のヤング係数 E_T が求まる⁷⁾。

ケース1から6までの E_T と G を表-2に示している

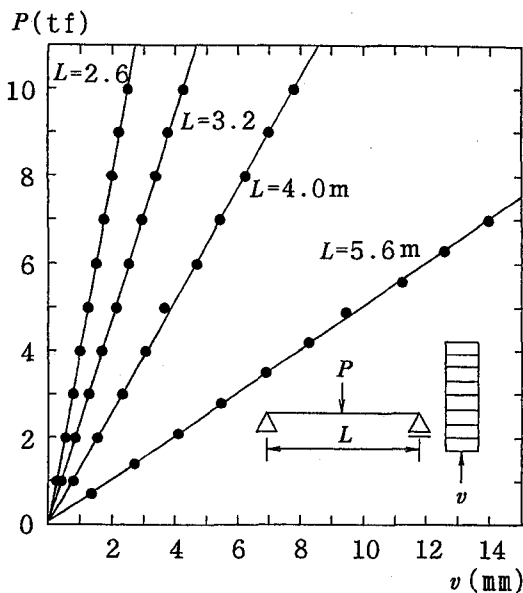


図-2 荷重-変位関係 (ケース5)

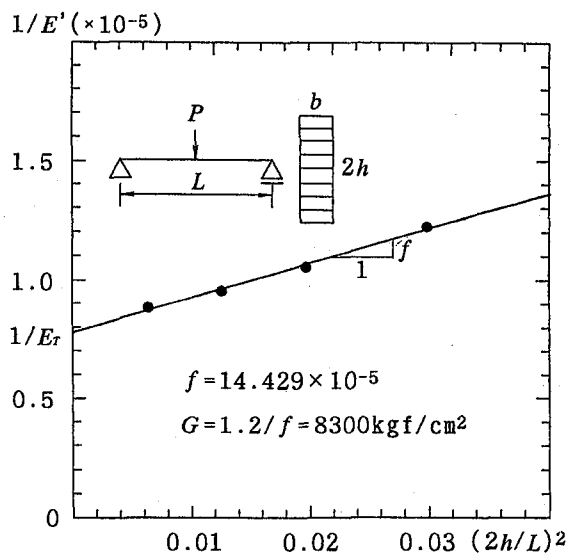


図-3 弾性係数の決定 (ケース5)

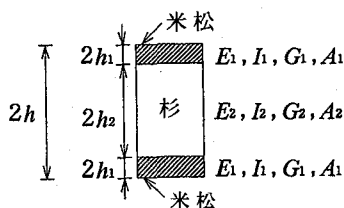


図-4 三層はり断面

が、表-1で示したラミナから得られたヤング係数 E_r' との差異は最大5%と良い対応を示している。また、集成材としての弾性係数の比 E_r/G は、最小値10.0から最大値15.4、平均値11.9で、ケース5を除くと米松集成材に対する計算規準値⁶⁾(2級:15~特級:16.4)より小さく、1級の集成材に対する規準値15.7より30%程大きな G の値となっている。

実験で用いた集成材は14層構造であるが、図-1のとおり上下の外層2層と内層10層はそれぞれ同一樹種で構成されており、ここでは図-4に示すように対称断面三層はりにモデル化して各層の弾性係数を決定する。

3.2 三層はりのヤング係数 E_1 と E_2 の決定

三層はりの等価曲げ剛性 $E_r I$ は、外層と内層のヤング係数 E_1 と E_2 を用いて次式で表される。

$$E_r I = 2 E_1 I_1 + E_2 I_2 + 2 E_1 A_1 (h_1 + h_2)^2 \quad (3)$$

次に、ケース1から6までの試験体より、図-5に示すように75cm長の圧縮試験体を切断し、外層と内層に4枚のひずみゲージを接着して全面圧縮試験を行った。荷重 P と柱軸方向の垂直ひずみ ε および各層のヤング係数

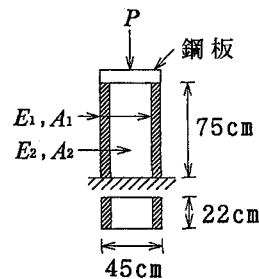


図-5 圧縮試験

表-2 弾性係数 (kgf/cm²)

Case	E_r 集成材	G 集成材	E_r/G	E_a 式(4)	E_1 米松	E_2 杉	G_1 米松	G_2 杉	E_1/G_1	E_2/G_2	G' 式(7)
1	113100	9800	11.5	98500	130200	87100	13700	8400	9.5	10.4	9800
2	112800	10600	10.6	96700	131600	84100	17200	8200	7.7	10.3	10600
3	114800	11500	10.0	98300	134100	85300	17100	9400	7.8	9.1	11500
4	120000	9800	12.2	105000	137600	93200	13000	8700	10.6	10.7	9800
5	127900	8300	15.4	107500	151700	91500	14100	6200	10.8	14.8	8300
6	125200	10900	11.5	101800	152700	83400	16400	8900	9.3	9.4	10900

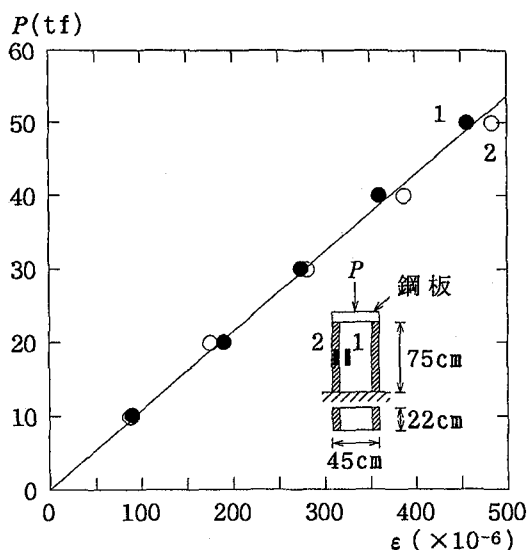


図-6 荷重-ひずみ関係

E_1 と E_2 との関係は

$$\varepsilon = \frac{P}{2 E_1 A_1 + E_2 A_2} = \frac{P}{E_a A} \quad (4)$$

ここで、 A_1 と A_2 は外層と内層の断面積であり、 $E_a A$ は等価伸び剛性である。図-6は、ケース5の試験体の荷重とひずみの関係を示している。図-6の結果を用いて式(4)より E_a が得られる。表-2に他のケースとともに E_a を示しているが、いずれのケースも $E_T > E_a$ となり、 E_T は E_a の14~23%増となっている。式(3)と(4)より、 E_1 と E_2 は

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E_T I A_2 - E_a A I_2}{A_2 \{ 2 I_1 + 2 A_1 (h_1 + h_2)^2 \} - 2 A_1 I_2} \\ E_2 &= \frac{E_a A \{ I_1 + A_1 (h_1 + h_2)^2 \} - E_T I A_1}{A_2 \{ I_1 + A_1 (h_1 + h_2)^2 \} - A_1 I_2} \end{aligned} \quad (5)$$

表-2で示した E_T と E_a を用い、式(5)より得られる外層と内層のヤング係数 E_1 と E_2 を表-2に示す。表より、表-1で示したラミナから得られたヤング係数 E_1' および E_2' との差異は1~10%と良い対応を示している。

3.3 三層はりのせん断弾性係数 G_1 と G_2 の決定

単純はりの支間中央に集中荷重が作用する場合、図-4に示した対称断面三層はりの支間中央におけるたわみは⁸⁾

$$\begin{aligned} v &= \frac{PL^3}{48E_T I} + \frac{\kappa PL}{4(G_2 A_2 + 2G_1 A_1)} \\ &+ \frac{\kappa PL (mG_2 A_2 - nG_1 A_1)^2}{2(E_T I)^2 G_1 A_1 G_2 A_2 (G_2 A_2 + 2G_1 A_1)} \times \\ &\times \left(1 - \frac{2 \tanh \mu L/2}{\mu L} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} m &= E_1 I_1 + E_1 A_1 h_1 (h_1 + h_2), \\ n &= E_2 I_2 + 2 E_1 A_1 h_2 (h_1 + h_2), \end{aligned}$$

$$\mu^2 = \frac{E_T I}{2 E_1 I_1 E_2 I_2 (2 + 3 E_1 A_1 / E_2 A_2)} \times \frac{\kappa (G_2 A_2 + 2 G_1 A_1)}{G_1 A_1 G_2 A_2}$$

式(6)はたわみに及ぼす各層のせん断変形の影響を考慮した式で、右辺の第2項と3項は外層と内層のヤング係数 E_1 、 E_2 とせん断弾性係数 G_1 、 G_2 の関数となる。図-2で示した曲げ試験の、支間が異なる2種類の実験データを用い、式(6)の v/P と L を変えて連立方程式とし、表-2で示した E_T と E_1 および E_2 を用いることにより G_1 と G_2 が得られる。

ケース1から6までの試験体の各層の G_1 と G_2 の値を表-2に示す。表より、各試験体の各層の弾性係数の比 E_1/G_1 と E_2/G_2 は、必ずしも同一とはならずばらつきが見られる。表中の G' は、次式の近似式⁹⁾より得られた値であり、曲げ試験から得られた G とほぼ等しい値となる。

$$G' = \frac{2 G_1 A_1 + G_2 A_2}{A} \quad (7)$$

4. 曲げ破壊試験

異樹種複合集成材の曲げ強さを調べるために、2.で示した材と同じ米松と杉の複合集成材4本(ケース7~10)の曲げ破壊試験を行った。図-7に示すように、6mの試験体を単純支持し、支間を5.6mとして支間中央に集中荷重を作用させ、終局荷重までの载荷点のたわみと支点部のめり込みを測定し、比例限度力度と最大曲げ応力度を求めた。

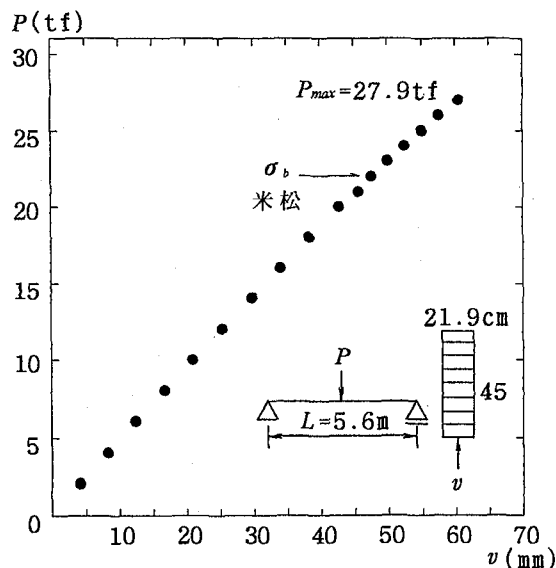
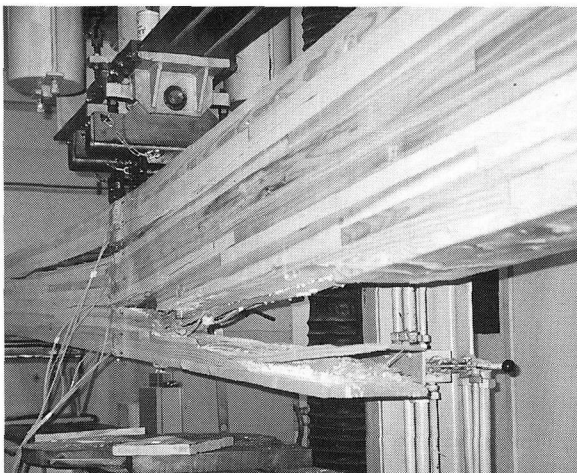


図-7 荷重-変位関係(ケース7)

表－3 曲げ破壊試験

Case	断面係数 w (cm^3)	最大荷重 P (tf)	比例限度力度 σ_P (kgf/cm^2)	最大応力度 σ_{max} (kgf/cm^2)	適合値 σ_b (米松) (kgf/cm^2)	σ_{max} / σ_b
7	7391	27.9	417	528	417	1.27
8	7425	24.7	377	466	417	1.18
9	7425	28.3	415	534	417	1.28
10	7559	30.7	370	569	417	1.36
平均			395	524		1.27

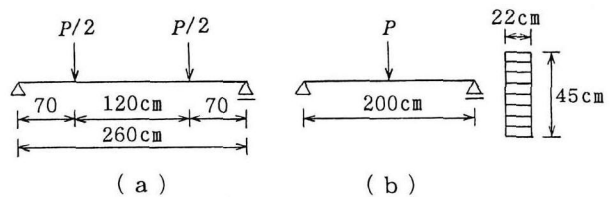


写真－1 曲げ破壊（ケース7）

図－7は、ケース7の荷重と支間中央のたわみの関係を示している。この結果を基に、弾性限内の断面係数を用い、比例限度力度と最大応力度を求め他のケースとともに表－3に示す。写真1は、ケース7の破壊後の状態を示しており、載荷点付近の引張側から曲げ破壊を生じている。表－3より、最大応力度 σ_{max} はケース8が $466 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ で最小値、ケース10が $569 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ で最大値を示しており、外層に用いた米松の2級から特級までの等級の内、1級の米松集成材に対する寸法係数0.96を考慮したJASの適合値¹⁾ $\sigma_b = 435 \times 0.96 = 417 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ をいずれも満足している。したがって、ここで用いた異樹種複合集成材の曲げ強度は、JASにおける米松集成材の1級と同等と見なすことは十分可能であると考えられる。

5. セン断破壊試験

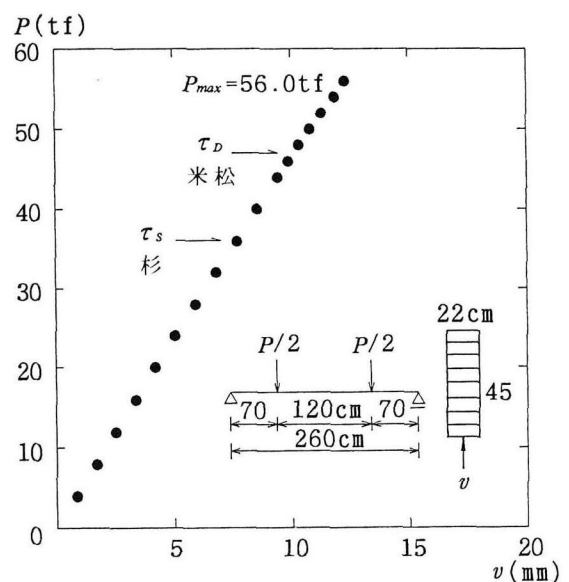
曲げとセン断を受ける異樹種複合集成材の、水平セン断強さを調べるために、米松と杉の複合集成材4本（ケース11～14）のセン断破壊試験を行った。JASにおけるセン断試験方法は、集成材の接合強さを調べるための



図－8 集成材のセン断破壊試験

ブロックセン断試験があるが、ここでは図－8に示すように、試験体を単純支持し、支間を2.6mとして2点集中荷重を作用させる方法と、支間を2mとして支間中央に集中荷重を作用させる方法でセン断試験を行った。

図－9は、ケース13の荷重と支間中央のたわみの関係を示しているが、終局荷重まで荷重とたわみは直線関係となっており、圧縮側が塑性化する前にセン断破壊したのと考えられる。写真2は、ケース14の破壊後の状態を示しており、断面の中央付近（杉）において木部の水平セン断による破壊を生じている。三層はりの最大セン



図－9 荷重－変位関係（ケース13）

表-4 せん断破壊試験

Case	支間 (cm)	载荷方法	最大応力度 τ_{max} (kgf/cm ²)	材料強度 τ_D (米松) (kgf/cm ²)	材料強度 τ_S (杉) (kgf/cm ²)	τ_{max} / τ_S
11	200	1点集中	40.9	36	27	1.51
12	260	2点集中	42.5	36	27	1.57
13	260	2点集中	42.5	36	27	1.57
14	200	1点集中	43.2	36	27	1.60
平均			42.3			1.56



写真-2 せん断破壊 (ケース14)

断応力度は、外層と内層のヤング係数 E_1 と E_2 を考慮すると、 $E_1 > E_2$ のときヤング係数を一定とした場合より小さくなるがその差は数%程度であり、ここでは後者に対する破壊時の最大せん断応力度 τ_{max} の弾性解を表-4に示す。表-4より、 τ_{max} はケース11が40.9kgf/cm²で最小値、ケース14が43.2kgf/cm²で最大値を示した。木構造計算規準におけるせん断許容応力度の3倍を材料

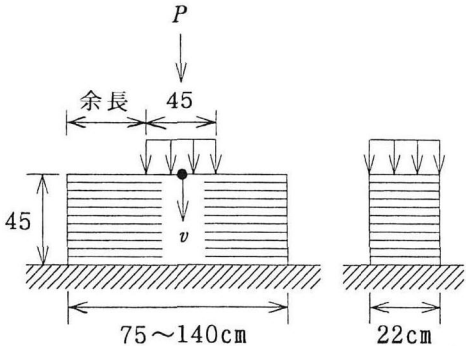


図-10 めり込み試験

強度とみなすと、米松集成材に対して $\tau_D = 36\text{kgf/cm}^2$ 、杉集成材に対して $\tau_S = 27\text{kgf/cm}^2$ であり、実験結果はいずれも杉と米松のそれを満足している。

6. めり込み試験

異樹種複合集成材の繊維に直角方向のめり込み強さを調べるために、米松と杉の複合集成材4本 (ケース15~18) の材端におけるめり込み試験を行った。JASにおいてめり込み試験方法は記載されていない。そのため、ここでは図-10に示す方法によって、長さ75cm~140cmの試験体に、支圧面積22×45cmで繊維に直角方向に加圧し、荷重と载荷部の変位を測定した。

図-11は、ケース17の荷重と载荷部における変位の関係を示している。図の結果を基に、荷重と支圧面積を用いて求めた支圧部の比例限応力度と最大応力度を他のケースとともに表-5に示す。

木構造計算規準では、繊維に直角方向の許容応力度を材中間における部分圧縮と材端 (材せい>余長) にお

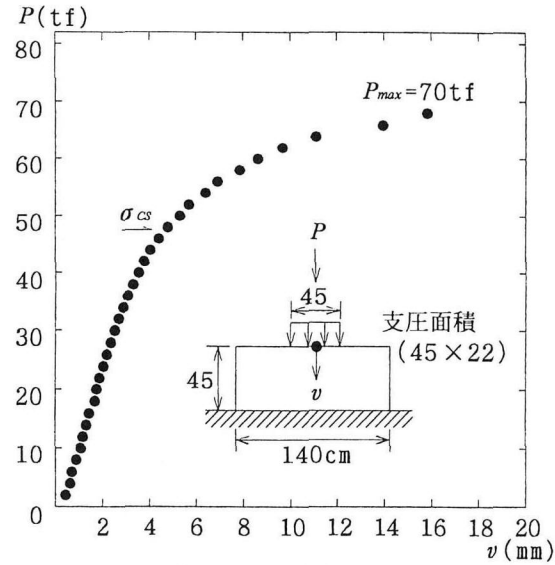


図-11 荷重-変位関係 (ケース17)

表-5 めり込み試験

Case	長さ (cm)	余長 (cm)	最大荷重 P (tf)	比例限度力度 σ_P (kgf/cm ²)	最大応力度 σ_{max} (kgf/cm ²)	許容応力度×3 (kgf/cm ²)		$\sigma_{max} / \sigma_{CS}$
						米松 σ_{CD}	杉 σ_{CS}	
15	75	15	44	21.2	44.4	72	48	0.93
16	105	30	60	32.3	60.6	72	48	1.26
17	140	48	70	31.3	70.7	72	48	1.47
18	135	45	68	41.4	68.7	72	48	1.43

る部分圧縮および全面圧縮の3種の荷重条件に区分している。本試験の荷重条件からみると、ケース16~18が概ね材端における部分圧縮と見なされ、ケース15が全面圧縮に近い条件といえる。そこでケース16~18の比例限度力度と、計算標準の材端部分圧縮許容応力度と比較すると、標準は米松24kgf/cm²、杉16kgf/cm²であり、実験結果はいずれも杉に対する標準値の2倍とほぼ一致している。また、最大応力度と許容応力度の3倍と比較すると、実験値は米松と杉に対する標準値のほぼ中間の値となっており、めり込みに関しては杉の許容応力度を適用するのが適当と考えられる。

7. あとがき

米松と杉を外層と内層に用いて接着積層した異樹種複集成材について、曲げ試験と圧縮試験から弾性係数を評価する方法を示した。また、破壊実験を行うことにより、異樹種複集成材の曲げ強さとせん断強さおよびめり込み強さについて考察を行った。得られた結果をまとめると以下ようになる。

1) 試験体を三層はりにモデル化した場合、各層のヤング係数とせん断弾性係数は、弾性域における曲げ試験と圧縮試験の結果を基に求めることができる。得られた各層のヤング係数は、ラミナの値から得られる各層の等価ヤング係数と良い対応を示しており、また、曲げ試験から得られた集成材のヤング係数 E_T と、ラミナから得られた等価ヤング係数 E_T' との差異は最大5%と良い対応を示している。各層のヤング係数とせん断弾性係数の比は同一とならずばらつきが見られるが、集成材としての弾性係数の比 E_T/G は、6本の試験体の平均値で11.2となり、1級の集成材に対する標準値より30%程大きな G の値が得られている。実験結果より、各層のせん断弾性係数から G を求める近似式の有効性が確認できた。

2) 複集成材の曲げ強度は、いずれも米松の1級集成材に相当する強度値が得られた。したがって、実験で用いた異樹種複集成材の曲げ性能は、JASにおける針葉樹のA-1(米松)類1級と同等と見なすことは十

分可能といえる。また破壊形態は、4試験体ともに荷重点付近の引張側での曲げ破壊であった。

3) せん断試験方法はJASとは異なった方法を行っているが、この結果をもとに建築学会木構造計算標準におけるせん断許容応力度の3倍を材料強度とみなし、これと比較してみると、いずれも米松のそれを満足している。しかし、最大せん断応力は材の内層部(杉の部分)で発生するため、安全側として杉の許容応力度を適用するのが適当であると思われる。また破壊形態は、4試験体ともに荷重点と支点間の断面中央付近における水平せん断破壊であった。

4) めり込み試験方法はJASにおいては規定されていないが、試験体の高さに比べて余長が短いと全面圧縮に近い荷重状態となり、めり込み強度は低下する。余長を試験体の高さ程度とした場合、本試験の比例限度力度の測定結果と、計算標準の材端における部分圧縮に対する許容応力度の2倍と比較すると、いずれも杉のそれとほぼ一致している。また、最大応力度と許容応力度の3倍と比較すると、実験値は米松と杉に対する標準値のほぼ中間の値となっており、めり込みに関しては杉の許容応力度を適用するのが適当と考えられる。

参考文献

- 1) 日本合板検査会：構造用大断面集成材の日本農林規格，1987。
- 2) 中川宏，高見勇，小川教秀：集成材の構成についての一考察，北海道林業指導書研究報告，第22号，1952。
- 3) 森徹，浅野猪久夫：異強度材の組合わせによる接着合成ばりの研究，建築学会関東支部第23回研究発表会，1958。
- 4) 小田久人：異樹種複集成材の曲げ強度性能，木材学会大会発表要旨集，pp.200，1994。
- 5) 堀江保，薄木征三，倉西茂：曲げを受ける集成木材の力学的特性，構造工学論文集，Vol.38A，pp.931-940，1992。

- 6) 日本建築学会：木構造計算規準・同解説，1988.
- 7) American Society for Testing and Materials :
Standard Methods of Static Tests of Timbers in
Structural Sizes, D198, 1984.
- 8) 鈴木和広，薄木征三，堀江保：三層はりのせん断弾
性係数決定法について，土木学会第47回年次学術講
演概要集，pp.992-993, 1992.
- 9) United States Department of Agriculture : Wood
Handbook : Wood as an Engineering Material,
pp.11-9, 1987.

(1994年9月14日受付)