

プレストレス集成材の曲げ挙動に関する実験的研究

Experimental study on bending behavior of prestressed laminated timber beam

長谷部 薫*, 薄木 征三**, 佐々木貴信***

Kaoru Hasebe, Seizo Usuki and Takanobu Sasaki

* 工博, 秋田大学助教授, 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

** 工博, 秋田大学教授, 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

*** 工博, 秋田県立大学講師, 木材高度加工研究所 (〒016-0876 能代市字海詠坂11-1)

This paper presents an experimental study on bending behavior of prestressed laminated timber beam made of Japanese Cedar. The concept of prestressed laminated timber for bridge applications was developed in Canada in the late 1970's. This bridge deck consist of lumber or glued laminated timber transversely posttensioned by high-strength steel bars anchored against steel bearing plates. In this paper, glued laminated timber longitudinally posttensioned by high-strength steel bars are proposed, and the concept of developing beam stiffness using steel bars are used. Two prestressing patterns are tested in two point loading and are compared with the numerical solutions.

Key Words : prestress, glued laminated timber beam, flexural rigidity

1. まえがき

構造用集成材は、厚さ5 cm以下の同樹種で等厚のひき板を互いに繊維の方向が部材長さ方向へほぼ平行にして積層接着した材で、主に構造物の耐力部材として用いられている。ひき板の品質基準は1等から3等まで区分され、ひき板の組み合わせにより対称異等級構成集成材、非対称異等級構成集成材、同一等級構成集成材があり、ヤング係数と曲げ強度で格付けされている。異等級構成集成材は、最外層用ひき板、外層用ひき板、中間層ひき板および内層用ひき板で構成され、終局強度を支配する引張縁部での曲げ強度を高めるように配置して製造されている¹⁾。

一般に集成材は節等の欠点が無ければ圧縮強度と引張強度および曲げ強度は同程度²⁾であり、コンクリートのように補強材を用いることなく単体で構造部材として使用されており、近年小規模な橋梁の主構造材料として集成材が使用され³⁾、多くの研究成果が報告されている。

集成材の曲げ剛性と曲げ強度を高めるため、米松を外層部に、杉を内層部に用いた異樹種複合集成材に関する報告^{4) 5)}や、矩形断面の集成材の上下面のスリットに鋼板を垂直に挿入したサンドウィッチ梁⁶⁾が考案され実橋の桁部に用いられている⁷⁾。製材ラミナや集成材ラミナを幅員方向に接着剤を用いずに積層し、幅員方向にプ

レストレスを与えたプレストレス木床版は、我が国でも最近単径間の木床版橋⁸⁾や4径間連続木床版橋⁹⁾として架設されており、また集成材アーチ橋の床版に利用されている³⁾が、木材の繊維直角方向にプレストレスを与えたプレストレス木床版の場合、木材のクリープや鋼棒のリラクゼーションの影響によりプレストレス力の損失が大きく、初期のプレストレス力が60%減少するとして設計している¹⁰⁾。一方、木材の繊維方向にプレストレスを与えて集成材桁を製作することも考えられる。文献11と12は、2体のからまつ集成材の繊維方向（はりの軸方向）にプレストレスを与えて部材接合に用いた場合の成果を報告しているが、集成材は許容応力の範囲内で弾性体の挙動を示し、またプレストレス力の急激な減少は見られず損失量は実用範囲内に留まることが示されている。

本論文では、スギ集成材の繊維方向にプレストレスを与えたプレストレス集成材を対象として、プレストレス導入時の曲げ挙動および曲げ載荷試験を行い、プレストレス鋼棒と木部の合成効果および曲げ挙動に及ぼす木部に作用するプレストレスの影響について考察する。プレストレスの導入により集成材に作用させる初期の圧縮応力は許容応力の範囲内とし、図心に鋼棒を配置して軸圧縮応力を作用させた集成材と、図心から偏心して鋼棒を配置して軸圧縮応力と曲げ応力を作用させた集成材を用いて実験を行った。

2. プレストレスの導入

2. 1 試験体

図-1に集成材試験体の断面を示す。試験体の長さは6mで、ケース1の試験体はプレストレス鋼棒を2本用い上下縁から25mm部に1本ずつ挿入しており、ケース2は図心に鋼棒を1本用いた試験体で、各ケース3体の試験を行った。集成材のラミナは25mm厚のスギラミナ8枚で、JAS¹⁾に従い対称異等級構成集成材を製作した。試験体の機械的性質¹⁾を表-1に示す。プレストレス鋼棒を挿入するため、ラミナにスリットを設け24mm角孔を有する集成材にφ17mmの鋼棒を配置している。表-2に鋼棒の機械的性質(日本工業規格, G3112)を示す。図-1のケース1で上鋼棒を用いずに下鋼棒だけで緊張するシステムも考えられるが、この場合、支圧板の大きさを木部全断面の大きさにしないと集成材の木口部が部分圧縮状態となり、緊張時や曲げ試験時に木部の水平方向への割裂が予想されるため、上下の鋼棒で緊張する方法を採用した。図-2に締着部を示す。

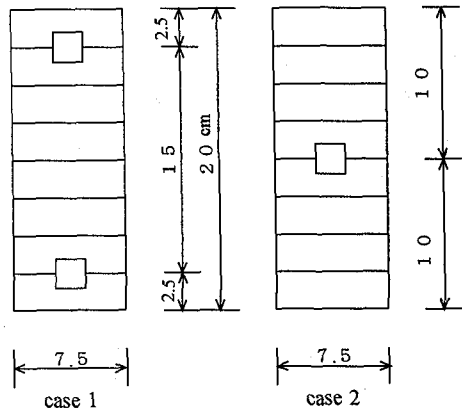


図-1 試験体の断面

表-1 集成材の機械的性質

構成等級	強度等級	曲げヤング係数 (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)
対称異等級 構成集成材	E75-F240	7350 (平均値) 6370 (下限値)	24

表-2 鋼棒の機械的性質

種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
丸棒B種1号	930以上	1080以上	5以上

2. 2 導入プレストレス量

引張側鋼棒を緊張することにより木部に生ずる断面力を図-3に示しているが、上縁部応力は

$$\sigma_{u1} = -\frac{T}{A} + \frac{T \cdot e}{W_{u1}} \tag{1}$$

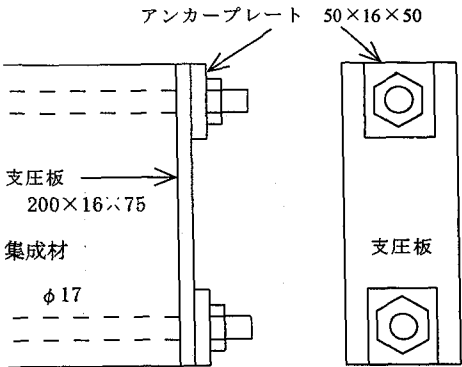


図-2 締着部 (ケース1)

下縁部応力は

$$\sigma_{l1} = -\frac{T}{A} - \frac{T \cdot e}{W_{l1}} \tag{2}$$

同様に、図-4に示すように圧縮側鋼棒を緊張することにより木部に生ずる上縁部応力は

$$\sigma_{u2} = -\frac{C}{A} - \frac{C \cdot f}{W_{u2}} \tag{3}$$

下縁部応力は

$$\sigma_{l2} = -\frac{C}{A} + \frac{C \cdot f}{W_{l2}} \tag{4}$$

プレストレス力 T と C の決定は、図-3の下鋼棒を

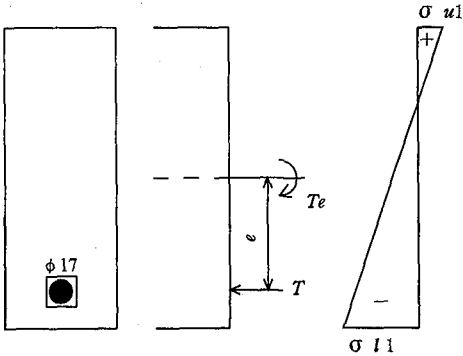


図-3 引張側鋼棒による断面力と応力

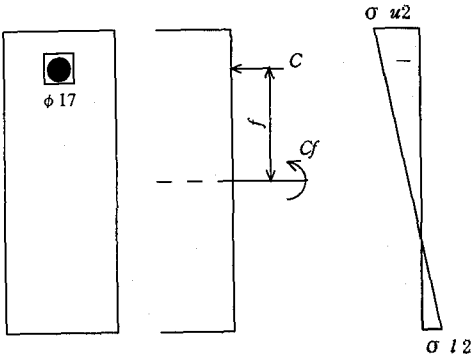


図-4 圧縮側鋼棒による断面力と応力

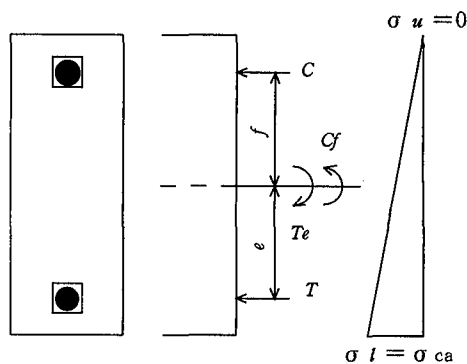


図-5 上下鋼棒による断面力と応力

緊張するときに生じる過大な製作そりを減少させるために、図-5に示すように式(1)と(3)より得られる木部上縁部の応力がゼロで、式(2)と(4)より得られる下縁部応力がスギ集成材の許容圧縮応力度 8 N/mm^2 となるように T と C を決定する。

2.3 ヤング係数の測定

集成材のヤング係数を求めるため、鋼棒を挿入する前に集成材だけを用いて図-6に示す曲げ試験を行った。ここで、支間と断面の高さの比が28.5で、たわみに及ぼすせん断の影響は無視できるものとしている。

表-3に示す実測値による断面2次モーメントを用いて得られた各ケース3体のヤング係数を表-4に示す。

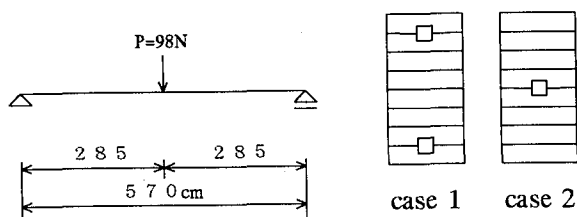


図-6 ヤング係数測定試験

表-3 断面定数

	断面積 A (cm^2)	断面二次モーメント I (cm^4)
ケース1	137~138	4203~4277
ケース2	143	4923

表-4 ヤング係数

	ヤング係数 E (N/mm^2)
ケース1-1	8330
1-2	7620
1-3	7240
ケース2-1	7240
2-2	6730
2-3	8540

2.4 プレストレス量の決定

2.2で示したプレストレス量を決定するため、木部にプレストレスを与え、試験体を曲げ変形させることにより鋼棒と木部の合成断面の評価を行った。

集成材を後述の曲げ試験の支間と同じ570cmで単純支持し、集成材に挿入した引張側の下鋼棒を緊張すると軸力と曲げを受ける部材となり、図-7に示す両端に等曲げモーメント荷重を受けるはりとなる。このときの支間中央のたわみと緊張力の関係を図-8と9に示す。導入緊張力は鋼棒に添付した4ゲージ法のひずみゲージと油圧ジャッキの油圧計により確認し、両者は良く一致していた。図中で黒丸は実験値、実線は表-4のヤング係数

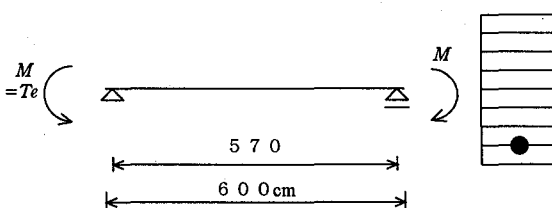


図-7 プレストレス導入による曲げ(下鋼棒)

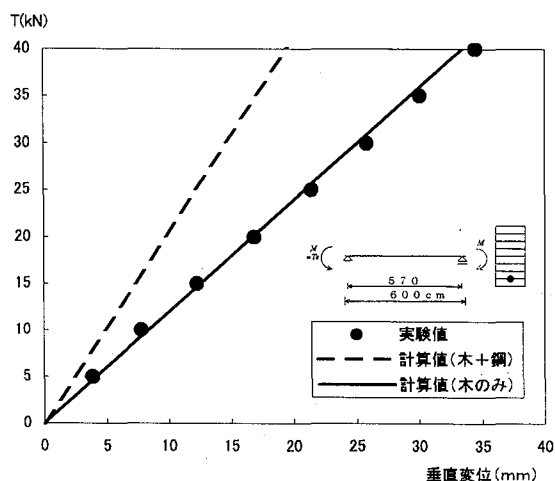


図-8 緊張力-たわみ関係(ケース1-1)

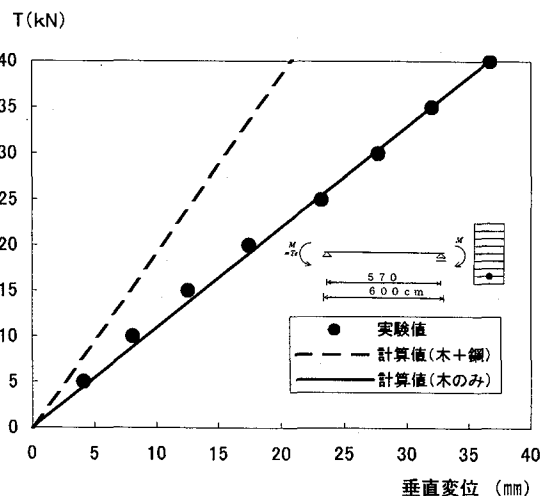


図-9 緊張力-たわみ関係(ケース1-2)

と木部だけの断面2次モーメントを用いて得られた計算値で、破線は下鋼棒と木部を完全合成断面とみなした場合の計算値である。図より実験値は実線の計算値とよく一致しており、緊張時において下鋼棒は木部との合成に寄与しないことが確認できた。緊張力 $T = 20\text{kN}$ と 40kN 時の木部のひずみ分布を図-10と11に示しているが、黒丸と白丸の実験値は、下鋼棒を無視し木部だけの断面係数を用いた図中の実線と破線の計算値と定性的によく一致している。

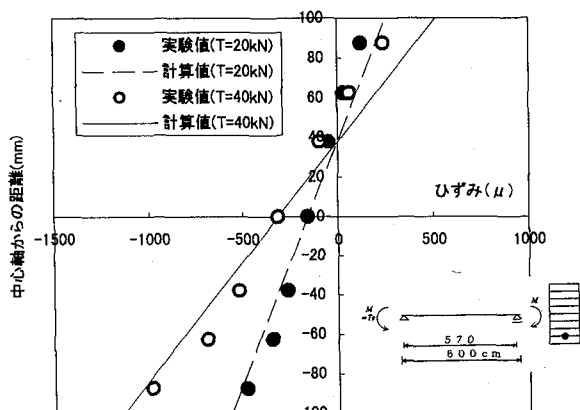


図-10 下鋼棒緊張時のひずみ分布 (ケース1-1)

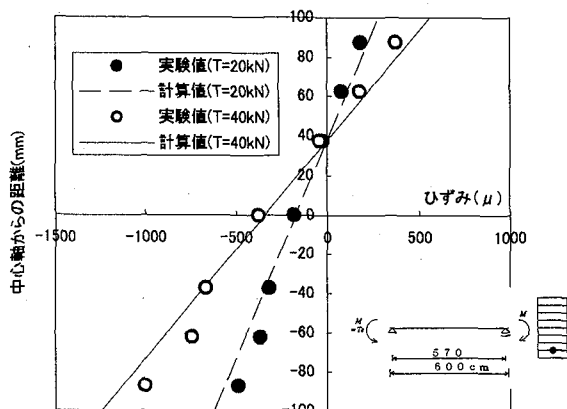


図-11 下鋼棒緊張時のひずみ分布 (ケース1-2)

次に、下鋼棒に緊張力 $T = 40\text{kN}$ を与えた状態で圧縮側の鋼棒を緊張した場合の試験体の載荷状態を図-12に示す。

図-12に示す試験体の支間中央のたわみと緊張力の関係を図-13と14に示す。図中で黒丸は実験値、実線は木部だけの曲げ剛性を用いた計算値で破線は木部と下鋼棒

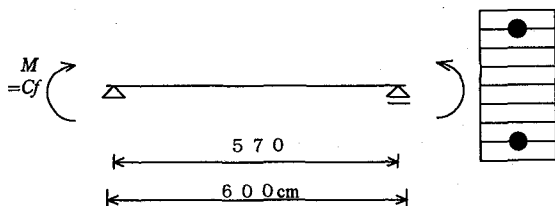


図-12 プレストレス導入による曲げ (上鋼棒)

を完全合成断面とみなした場合の計算値である。図より実験値は破線と同程度の値となっており、上鋼棒を緊張してプレストレスを与えている間は、上鋼棒を無視し木部と下鋼棒を合成断面とみなして良さそうである。

上鋼棒緊張時の木部のひずみ分布を図-15と16に示す。図中で黒丸と破線は図-10と11で示した $T = 40\text{kN}$ に対するものと同一で、白丸と実線は $C = 17\text{kN}$ 時の実験値と上鋼棒を無視し下鋼棒と木部を合成断面とみなした場合

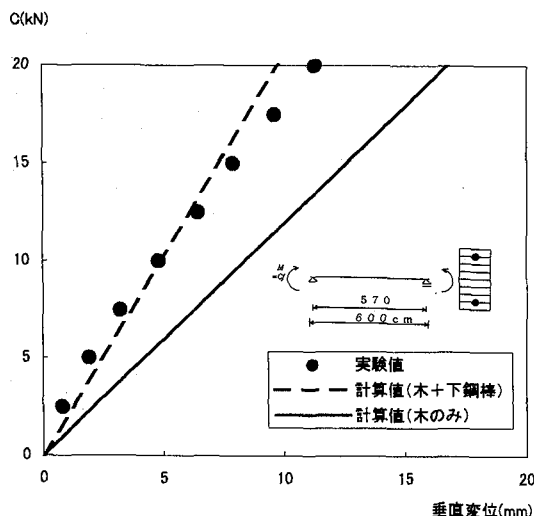


図-13 荷重-たわみ関係 (ケース1-1)

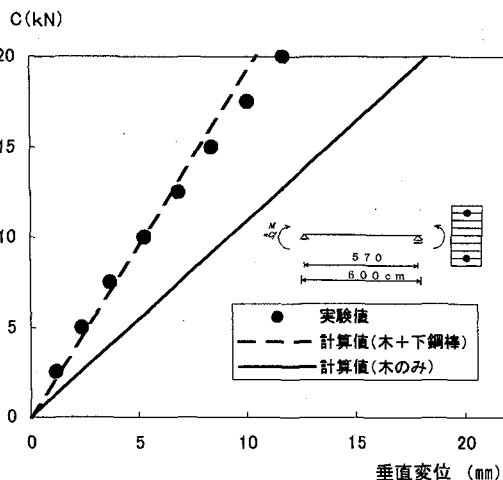


図-14 荷重-たわみ関係 (ケース1-2)

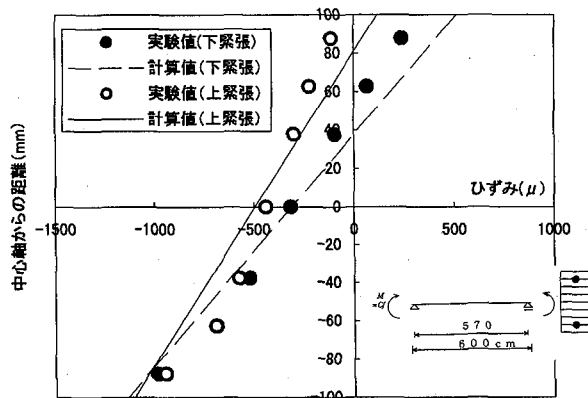


図-15 上鋼棒緊張時のひずみ分布 (ケース1-1)

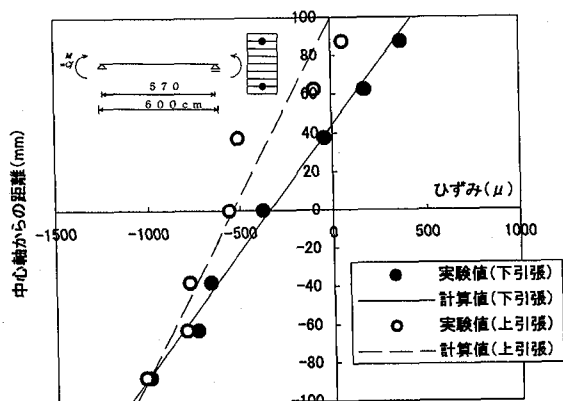


図-16 上鋼棒緊張時のひずみ分布 (ケース1-2)

合の計算値である。なお、ケース1-3の試験体の実験結果も図-8~16と同様な結果が得られている。

以上の実験結果より、下鋼棒緊張時は下鋼棒を無視して木部だけを考慮し、上鋼棒緊張時は上鋼棒を無視して下鋼棒と木部を合成断面とみなした場合の断面係数と緊張力 T と C を表-5に示す。ここで、鋼棒と集成材のヤング係数比は表-1の集成材のヤング係数の平均値を用いた場合28となり、これに対する値を示している。表中の T と C に対する下鋼棒と上鋼棒の応力はそれぞれ 159N/mm^2 と 69N/mm^2 となり、表-2に示した鋼棒の降伏応力の17%と7%で、後述の曲げ荷重に対して十分な耐力を有している。

表-5 断面係数と緊張力

	W_u (cm^3)	W_l (cm^3)	T (N)	C (N)
下鋼棒緊張時 (図-3)	435	435	36.0	—
上鋼棒緊張時 (図-5)	610	940	(36.0)	15.5

3. 曲げ試験

図-17にケース1とケース2のプレストレス集成材の曲げ試験条件を示す。ケース1の締着部を図-2に示しているが、図心に鋼棒1本を配置するケース2の締着部には $75 \times 16 \times 75\text{mm}$ の支圧板と $50 \times 16 \times 50\text{mm}$ のアンカープレートを用いている。各試験体の材長は6mで、支間5.7mの3等分点荷重で曲げ試験を行った。ここで支点と荷重点には鋼板を用いておりめり込みを防止している。表-5で示した導入緊張力は前述のようにひずみゲージと油圧計により確認した。ケース2の試験体の場合、図心に鋼棒を配置するため鋼棒に緊張力を与えることにより木部に等圧縮応力が作用し、 8N/mm^2 の圧縮応力を作用させると緊張力は 118kN で、このときの鋼棒の応力は

518N/mm^2 となり表-2に示した鋼棒の降伏応力の56%となっている。

試験体に作用させる荷重は、鋼棒を挿入する前の集成材だけの試験体が曲げ破壊しないように、集成材の引張縁部の応力が表-1に示した集成材の曲げ強さの80%程度 (20N/mm^2 程度) になるように設定した。これは同一材料を使用し、曲げ挙動に及ぼす鋼棒の影響を調べるためである。図-18に試験結果の一例として、ケース1-3の荷重と支間中央におけるたわみの関係を示す。図

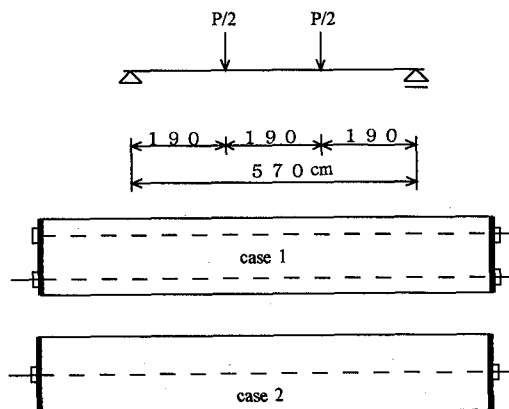


図-17 曲げ試験

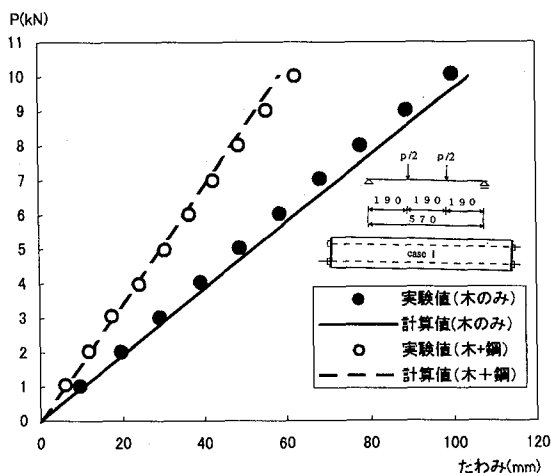


図-18 荷重-たわみ関係 (ケース1-3)

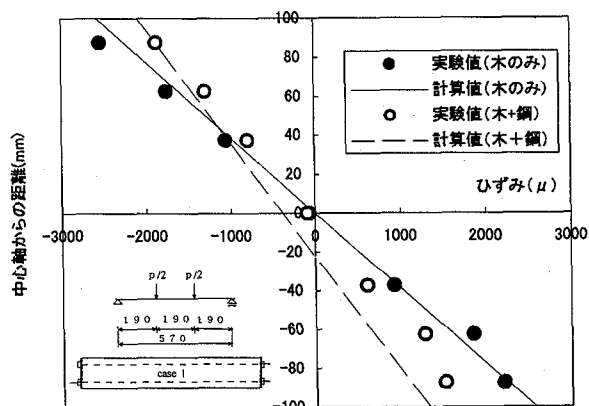


図-19 断面内ひずみ分布 (ケース1-3)

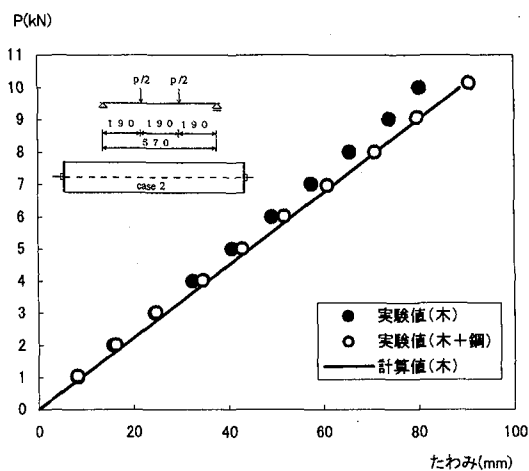


図-20 荷重-たわみ関係 (ケース 2-1)

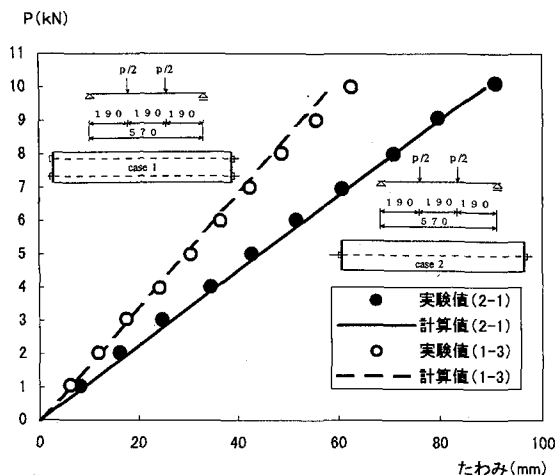


図-22 荷重-たわみ関係

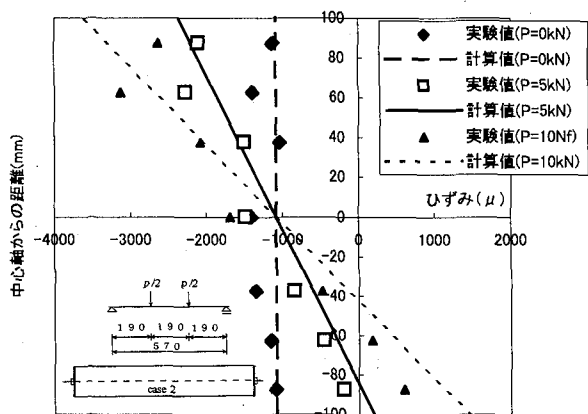


図-21 断面内ひずみ分布 (ケース 2-1)

中で、鋼棒を挿入する前の集成材だけの実験値と計算値を黒丸と実線で示し、上下鋼棒で緊張したプレストレス集成材に対する実験値が白丸で、上鋼棒を無視し木部と下鋼棒を合成断面とみなした計算値を破線で示している。白丸の実験値は8kN付近からやや非線形性が見られるが、予想値とよく一致した結果となっている。

図-19は、荷重 $P=10\text{kN}$ 時の木部の断面内ひずみ分布を示しているが、黒丸と実線が集成材だけに対する実験値と計算値で、白丸と破線がプレストレス集成材に対する結果である。白丸の実験値は予想値より引張側でやや大となっているが、ひずみゲージによる測定値は木質材の場合必ずしも真のひずみを示しているわけではなく、定性的に曲げ挙動を説明できると考えられる。なお、ケース 1-1 と 1-2 試験体の曲げ試験結果は図-18、19と同様な結果が得られている。

図-20はケース 2-1 の荷重と支間中央におけるたわみの関係を示しているが、黒丸は鋼棒を挿入する前の集成材の実験値、白丸がプレストレスを与えた試験体の実験値で両者に対する計算値を実線で示す。白丸と黒丸の実験値は荷重荷重が小さい範囲ではよく一致しているが、白丸のプレストレス集成材は、プレストレスによる初期の圧縮応力に曲げによる圧縮応力が加わり、圧縮側が一

部塑性化することにより黒丸よりたわみが増加すると思われる。表-1 で示した集成材の曲げ強度 24N/mm^2 の80%程度の応力を降伏応力と考えた場合、圧縮縁部の応力が 19N/mm^2 に達するときの荷重 P は 6.6kN であり、このときの降伏ひずみは 2400μ 程度と予想される。

緊張後の $P=0\text{N}$ と曲げ荷重試験時の $P=5\text{kN}$ と 10kN に対する支間中央における木部の断面内ひずみ分布を図-21に示す。上述のように、予想値と一致していない測定値もあるが、定性的にはひずみ分布の推移をよく示していると思われる。なお、ケース 2 の他の試験体も図-20、21と同様な結果となっている。

図-22は、比較のため表-4に示すようにヤング係数が同じ値のケース 1-3 とケース 2-1 のプレストレス集成材の荷重とたわみの関係を示したもので、図-18と20で示した白丸の実験値および計算値と同じものである。図より、ケース 1 の白丸の実験値は黒丸の実験値の70%程度で、下鋼棒と木部の合成効果が認められる。なお、荷重試験中における初期プレストレス力の損失量は10%以内で僅少であった。

4. あとがき

スギ集成材の繊維方向にプレストレスを与えたプレストレス集成材を対象として、プレストレス導入時の鋼棒と木部の合成効果と曲げ挙動に及ぼす鋼棒の影響について、模型試験体を用いた室内実験を行った。得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) プレストレス鋼棒を上下に2本用いたケース 1 の試験体の場合、木部に圧縮応力と曲げ応力が作用し、図心からの鋼棒の偏心量を適宜設定することにより合理的なプレストレスを導入することができる。また、圧縮側の鋼棒の緊張時は、引張側の下鋼棒と木部が合成断面として挙動し、合成断面に対する断面定数を用いて応力を評価できると考えられる。

(2) プレストレス導入後の曲げ試験において、断面中

中央に鋼棒を配置したケース2の場合、曲げ応力の増加とともに中立軸が引張側に移動するが、圧縮側に位置する鋼棒は木部との合成に寄与せずに曲げ剛性の増加は見られずたわみに及ぼす鋼棒の効果は期待できない。また、初期プレストレスにより木部に一様に作用する圧縮応力は引張側の曲げ応力を減少させることができ、終局強度の増加が予想されるが、圧縮側の応力が増加することにより圧縮側の塑性化が進行し、たわみが増大すると考えられる。

(3) ケース1の曲げ試験の場合、実験の範囲内において木部と引張側の下鋼棒は合成断面と見なすことができ、たわみの減少と終局強度の増加が期待できると考えられる。

以上、鋼棒の孔にグラウトを行わないプレストレス集成材の緊張時と曲げ載荷試験時の曲げ挙動を考察したが、木材のクリープ等による長期に亘るプレストレス力の損失と、鋼棒の孔をグラウトした場合の接着の影響および接手部を有するプレストレス集成材については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) (社)日本農林規格協会：構造用集成材の日本農林規格，1996。
- 2) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，1995。
- 3) (財)日本住宅・木材技術センター編著：木橋づくり新時代，ぎょうせい，1994。
- 4) 長谷部薫，薄木征三，飯島泰男，藤原直之：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，構造工学論文集，Vol. 41A，pp. 907-914，1995。
- 5) 長谷部薫，薄木征三：異樹種複合集成材の弾塑性解析と実験，構造工学論文集，Vol. 42A，pp. 1013-1020，1996。
- 6) 薄木征三，村井正光，長谷部薫，佐々木貴信，長谷川享：垂直型サンドウィッチ梁の応力解析，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 69-76，1999。
- 7) 薄木征三，佐々木貴信，熱海明彦，Mohan P. Sharma：集成材・鋼床版ハイブリッド桁リブ鋼板のせん断応力度，構造工学論文集，Vol. 47A，pp. 1221-1227，2001。
- 8) 薄木征三，清水功雄，長谷部薫：プレストレス木床版橋の力学的物理的諸性状の経時変動，構造工学論文集，Vol. 42A，pp. 1021-1030，1996。
- 9) S.Usuki, T.Sasaki, Y.Iijima and H.Honda：Field Dynamic Performance of Stress-Laminated Continuous Timber Deck Bridge, Structural Engineering world wide 1998, T134-2, USA, 1998。
- 10) Ritter, M.A.：Timber Bridges - Design, Construction, Inspection and Maintenance, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990。
- 11) 久保田努，渡辺浩志，三井康司：プレストレスによる木桁の接合法，構造工学論文集，Vol. 43A，pp. 1103-1110，1997。
- 12) 深山清六，渡辺浩志，久保田努，三井康司：プレストレス導入による集成材の新接合方法に関する研究，土木学会論文集，No. 616/VI-42，pp. 91-102，1999。

(2001年9月14日受付)