

プレストレスを作用させた集成材の曲げ試験と解析

Bending test and analysis of glulam timber beams by prestressing

長谷部薫* 薄木征三** ○佐藤亜希子***

Kaoru Hasebe Seizo Usuki Akiko Sato

*工博 秋田大学助教授 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

**工博 秋田大学教授 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

***工修 JR 東日本 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

ABSTRACT This paper presents an experimental and analytical studies 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. 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. Two model beams with butt joint and without butt joint are tested in two point loading and are compared with the numerical solutions.

Keywords : 集成材、プレストレス、バットジョイント、せん断応力
glued laminated timber beam, prestress, butt joint, shear stress

1. はじめに

構造用集成材は、厚さ 5cm 以下の同樹種で等厚のラミナ(ひき板)を互いに繊維の方向が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。一般に集成材は節等の欠点がなければ圧縮強度と引張強度および曲げ強度は同程度であり、単一材で使用されている。近年は小規模な橋梁の主構造材料として集成材が注目され、多くの研究結果が報告されている。本論文では、集成材はりにおける連結用の継手にプレストレスを使用しうる可能性に関して、継手無しの集成材とプレストレスで接合した継手を有する集成材はりの曲げ載荷試験を行い、継手部が曲げ挙動に及ぼす影響を考察した。上下縁から 25mm 部に鋼棒を 1 本ずつ挿入した集成材と、図心に鋼棒を 1 本挿入した継手部のない集成材の曲げ試験に関しては既に報告している¹⁾。また、から松集成材を用い、繊維方向に許容応力度レベルのプレストレスを与えた場合の継手としての有効性について報告されている^{2) 3)}。ここでは、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約 2 倍で (圧縮降伏応力と仮定)、図心から偏心して鋼棒を配置し、軸圧縮応力と曲げ応力を作用させたすぎ集成材を対象とした。また、実験データを基に解析モデルを作成し、支圧板が木部に与える影響、継手部が曲げ挙動に及ぼす影響、プレストレス鋼棒と木部の変形挙動と合成効果、および木部に作用するプレストレスの影響について有限要素法解析を行い考察した。

2. 試験体

図-1 に 2 種類の集成材試験体を、図-2 に集成材試験体の断面及び締着部を示す。図-1 で、モデル A は長さが 3.9m の試験体であり、モデル B はモデル A 試験体の中間部を切断した試験体である。モデル A、モデル B は、図-2 に示したように図心から 33mm(高さ/6)下方にプレストレス鋼棒(φ17)を 1 本挿入している。締着部については、支圧板(133×16×75)とアンカープレート(75×16×75)を介して均等なプレストレスの導入を行っている。集成材のラミナは 33mm 厚のスギラミナ 6 枚で、JAS⁴⁾ に従い対称異等級構成集成材(強度等級 E75-F240、ヤング係数 75tf/cm²、曲げ強さ 240kgf/cm²)を製作した。プレストレス鋼棒を挿入するため、ラミナ 2 枚にスリットを設け 25mm 角孔を有する集成材に φ17mm の鋼棒(降伏点 9500kgf/cm² 以上)を配置している。

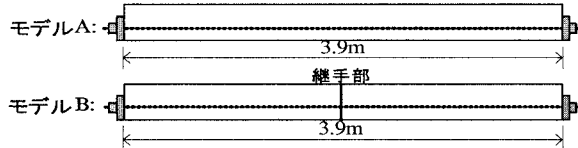


図-1 試験体

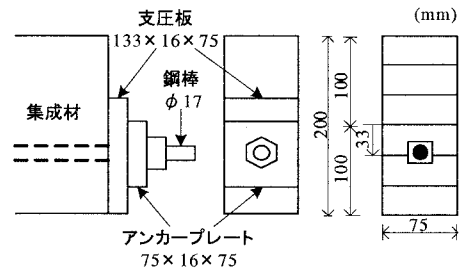


図-2 試験体の締着部及び断面

3. ヤング係数の測定

実験で使用する集成材試験体のヤング係数を求めるため、鋼棒を挿入する前の集成材のみを用いて図-3 に示す 1 点載荷で曲げ試験を行った。実験では支間を 3.6m、4.5m、5.7m とした 3 ケースの試験体を用いている。ここで、支間と高さの比は 18.0 以上でたわみに及ぼせん断の影響は無視できるものとしている。表-1 に示す 3 ケースの集成材試験体の実測値による断面二次モーメントを用いて、曲げ試験から得られた 3 ケースのヤング係数を表-2 に示す。以下では、支間 3.6m であるケース 1 の試験体を対象とする。

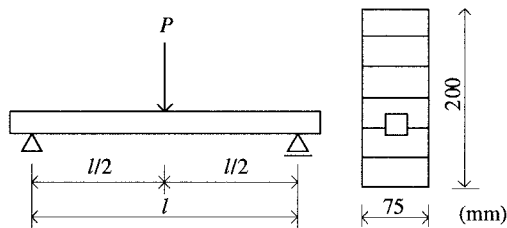


図-3 ヤング係数測定試験

表-1 断面定数

試験体	断面積 $A(\text{mm}^2)$	断面二次モーメント $I(\text{mm}^4)$
ケース 1	$A_1=14600$	$I_1=5.0 \times 10^7$
ケース 2	$A_2=14500$	$I_2=5.0 \times 10^7$
ケース 3	$A_3=14500$	$I_3=5.0 \times 10^7$

表-2 ヤング係数

試験体	支間(mm)	ヤング係数(N/mm ²)
ケース 1	3600	8140
ケース 2	4500	8430
ケース 3	5700	8630

表-3 材料特性⁵⁾

材料	木材	鋼
ヤング係数 (N/mm ²)	$E_x=8140$ $E_y=E_z=E_x/25=326$	$E_y=E_z=E_x=200000$
ポアソン比	$\nu_x=0.4$ $\nu_y=\nu_z=0.016$	$\nu_x=\nu_y=\nu_z=0.3$
せん断弾性係数 (N/mm ²)	$G=E_x/15=543$	$G=79400$

4. 解析方法

数値解析において汎用有限要素解析プログラム MSC/MARC.Mentat を使用し、平面応力要素を用いた 2 次元解析と、3 次元ソリッド要素を用いた解析を行った。解析に用いた材料特性を表-3 に示す。木材で、はり軸方向の繊維に平行なヤング係数 E_x は実験から得られた実測値であり、

表-2 で示したように 8140N/mm^2 である。せん断弾性係数は $G=Ex/15^5$ としており、鋼のヤング係数は 200kN/mm^2 を用いている。図-4、図-5 に示すように解析モデルの支点は、ヒンジとローラーの単純支持条件で、実験に使用したケース 1 のモデル A、B 試験体と同様に全長 3900mm、支間 3600mm、高さ 200mm、断面の幅 75mm とした。継手部の影響を調べるために用いた平面応力要素では、鋼棒を無視し、木部のみを対象としており、図-4 に示す解析モデルと実験で使用したモデル B 試験体と同様に支間中央部に継手部となる接合面を設けたモデルを作成した。継手部を持たない解析モデル(図-4)の節点数は 1171 で要素数は 1120、継手部を有する解析モデルの節点数は 1180 で要素数は 1120 である。また、鋼棒の変形挙動を調べるために用いた 3次元ソリッド要素では、実験で使用した試験体と同様に、木部に角孔を設け、木部と鋼部が合成していない解析モデル(図-5)と角孔を設けない合成断面の解析モデルを作成した。図-5 に示した解析モデルの節点数は 17265、要素数は 13296、合成断面の解析モデルは節点数 15655、要素数は 12878 である。

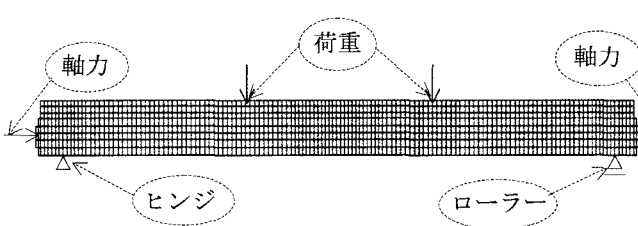


図-4 平面応力要素を用いた解析モデル

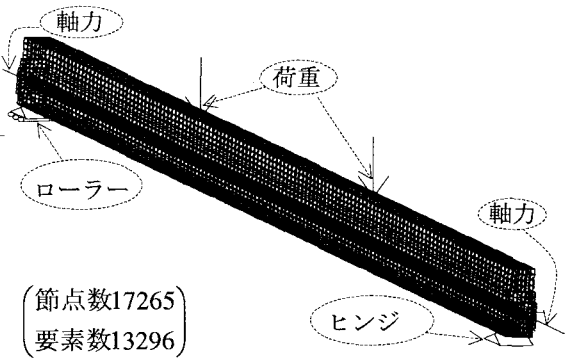


図-5 3次元ソリッド要素を用いた解析モデル

5. プレストレスの導入

集成材試験体に挿入したプレストレス鋼棒を油圧ジャッキを用いて緊張することにより、集成材の繊維方向にアンカープレートと支圧板を介して圧縮力を作用させた。この圧縮力により木部には断面力が生じ、図心から偏心して鋼棒を配置しているため、木部は軸力と曲げを受ける部材となり、図-6 に示すような両端に等曲げモーメント荷重を受けるはりとなる。

軸力と曲げにより木部の上縁部に生じる応力は、

$$\sigma_u = -\frac{N}{A_1} + \frac{N \cdot e \cdot h_u}{I_1} \quad (1)$$

下縁部応力は

$$\sigma_l = -\frac{N}{A_1} - \frac{N \cdot e \cdot h_l}{I_1} \quad (2)$$

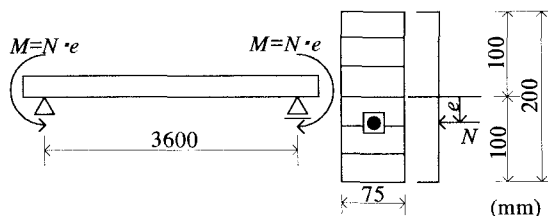


図-6 プレストレス導入による曲げ

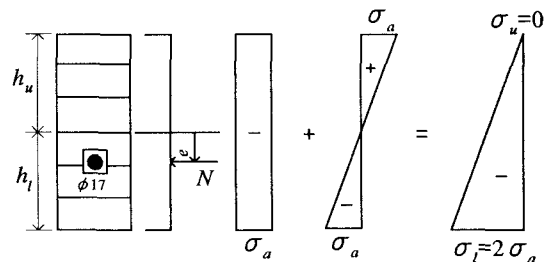


図-7 応力分布

スギ集成材の許容圧縮応力度 σ_a を $800\text{N}/\text{cm}^2$ と仮定すると、軸力 N は、式(1)より得られる木部の上縁部応力が 0 で、式(2)より得られる下縁部応力を σ_a の 2 倍である $1600\text{N}/\text{cm}^2$ になるようにすると $N=120\text{kN}$ となる。図-7 に $N=120\text{kN}$ 時の木部に作用する断面内応力分布を示す。同様に、 $N=60\text{kN}$ で $\sigma_u=0$ で $\sigma_l=\sigma_u$ 、 $N=90\text{kN}$ で $\sigma_u=0$ で $\sigma_l=1.5\sigma_u$ となる。

図-8 は、 $N=120\text{kN}$ を作用させた緊張時の試験体における緊張力(木部に作用する圧縮力)と支間中央での垂直変位の関係を示している。図中で●はモデル A の実験値、○はモデル B の実験値であり、実線は鋼棒を無視し木部のみを考慮した場合の平面応力要素を用いたモデル A、B の解析値である。図中で、実験値が解析値より大きい挙動を示すのは集成材に設けられた 25mm の角孔内で、緊張時に鋼棒が角孔の中央部ではなく若干下方に移動したことにより M が大きくなったためと考えられる。図中に鋼棒の位置が 4mm 移動した場合の $e=37\text{mm}$ に対する予想値を点線で示す。継手部を有するモデル B の実験値はモデル A よりやや大きい、ほぼ同じ挙動を示しており、実験の N 値の範囲内では切断した継手部の影響は見られない。

図-9 は、 $N=60\text{kN}$ と $N=120\text{kN}$ を作用させた緊張時の試験体における支点上($x=0$)でのひずみ分布図である。図中で●と▲はモデル A の実験値、○と△はモデル B の実験値であり、実線と点線は $N=60\text{kN}$ と $N=120\text{kN}$ に対するモデル A、B の解析値であり同じ値となっている。図より、支点上では支圧板による部分圧縮の影響が見られる。また、前述したように、鋼棒緊張時に鋼棒が下方に移動した影響により M が大きくなり上縁部で引張ひずみが見られる。図中の ϵ_y は降伏ひずみである。

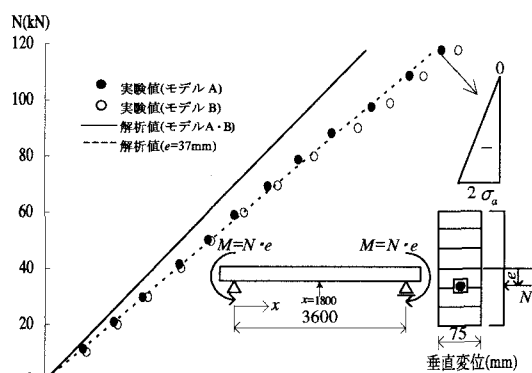


図-8 緊張力-垂直変位関係

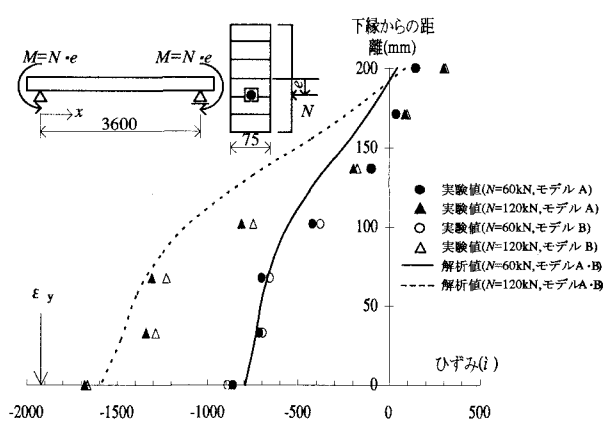


図-9 断面内ひずみ分布図 (支点上)

図-10 は、図-9 と同様に $N=60\text{kN}$ と $N=120\text{kN}$ を作用させた緊張時の試験体における支間中央から 150mm($x=1650$) 支点寄りの断面におけるひずみ分布図である。図-9 では支圧板による部分圧縮の影響が見られたが、支点から離れている図-10 ではこの影響は見られない。 $x=300\text{mm}$ 以上支点から離れた断面のひずみ分布は、図中の計算値とほぼ同じ値になる。

図-11 は、 $N=60\text{kN}$ と $N=120\text{kN}$ を作用させた緊張時の試験体における支点上($x=0$)と支間中央から 150mm($x=1650$) 支点寄りの断面でのせん断応力分布図である。図中で実線は $N=60\text{kN}$ 、点線は $N=120\text{kN}$ を作用させた時の支点上($x=0$)でのモデル A、B の解析値、破線と一点鎖線は支間中央から 150mm ($x=1650$) でのモデル A、B の解析値でともに縦軸上に重なっており 0 である。支点付近では図-9 に示したように支圧板の部分圧縮によりせん断応力が発生することがわかる。最大せん断応力は支圧板の上縁部付近に生じており、許容せん断応力⁵⁾ $0.9\text{N}/\text{mm}^2$ の 1/3 程度の値となっている。なお、 $x=300\text{mm}$ 以上支点から離れた断面ではせん断応力は 0 である。

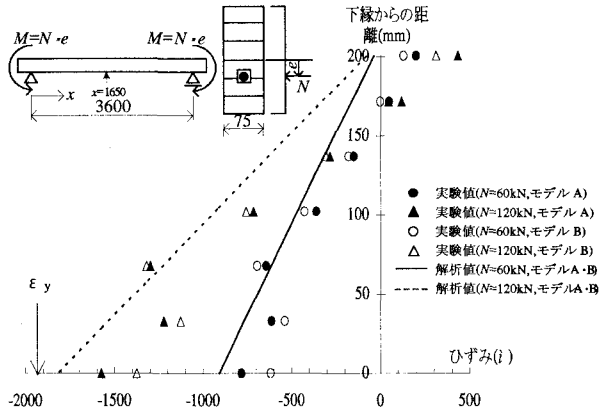


図-10 断面内ひずみ分布 (支間中央付近)

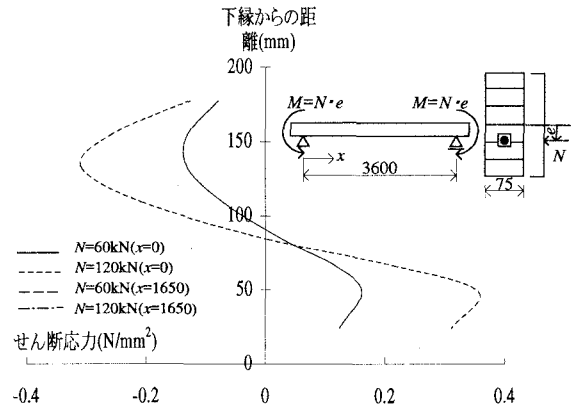


図-11 断面内せん断応力分布

6. 曲げ試験

図-12 に曲げ試験条件を示す。締着部は 2. の図-2 に示している。試験体の材長は 3.9m で、支間 3.6m の 3 等分点 2 点載荷で曲げ試験を行った。曲げ試験により載荷点間の木部の上縁部に生じる応力は

$$\sigma_u = -\frac{600P}{I_1} h_u \quad (3)$$

下縁部応力は

$$\sigma_l = \frac{600P}{I_1} h_l \quad (4)$$

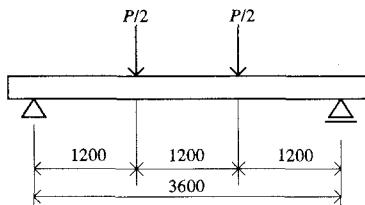


図-12 曲げ試験

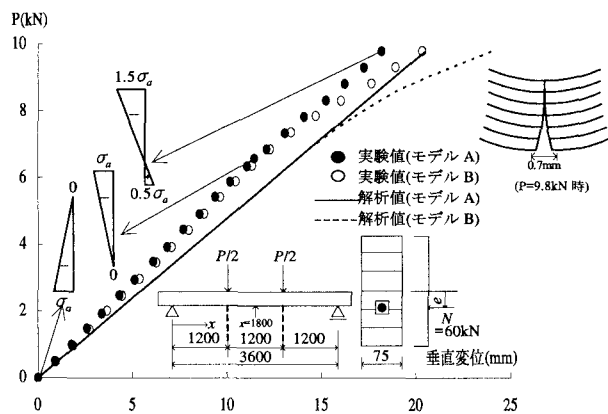


図-13 荷重-垂直変位関係

図-13 は、 $N=60\text{kN}$ を作用させた試験体の、曲げ試験による荷重と支間中央における垂直変位の関係を示している。図中で●はモデル A の実験値、○はモデル B の実験値であり、実線はモデル A の解析値、点線はモデル B の解析値である。 $N=60\text{kN}$ の場合、図中に示すように $P=0\text{kN}$ 時で下縁部応力が許容圧縮応力 σ_a と同じ値になる。下縁部の応力が 0 になる $P=6.37\text{kN}$ までは切断したモデル B 試験体とモデル A 試験体での差異は見られないが、荷重を大きくすると図で示したように下縁部に引張応力が発生し、モデル B の変位が非線形性を示す。図中に支間中央における切断部の変形状態を示しているが、接触解析による下縁部の開き量は $P=9.8\text{kN}$ で 0.7mm である。

図-14 は、 $N=90\text{kN}$ を作用させた試験体の、曲げ試験による荷重と支間中央における垂直変位の関係を示している。図中で●はモデル A の実験値、○はモデル B の実験値であり、実線はモデル A の解析値、点線はモデル B の解析値である。 $N=90\text{kN}$ の場合、図中に示すように $P=0\text{kN}$ 時で下縁部応力が許容圧縮応力 σ_a の 1.5 倍の値になる。下縁部の応力が 0 になる $P=9.8\text{kN}$ までは切断したモデル B 試験体とモデル A 試験体での差異は見られないが、図-13 の $N=60\text{kN}$ 時と同様に荷重を大きくすると下縁部に引張応力が発生し、モデル B の変位が非線形性を示す。図中に切断部の変形状態を示しているが、下縁部の開き量は $P=12.74\text{kN}$ で 0.4mm と $N=60\text{kN}$ の場合よ

り小さい。

図-15 は $N=120\text{kN}$ を作用させた試験体の曲げ試験による荷重と支間中央における垂直変位の関係を示している。図中で●はモデル A の実験値、○はモデル B の実験値であり、実線はモデル A の解析値、点線はモデル B の解析値である。●と○はよく一致しており、上縁部の応力が許容値の 2 倍になる $P=12.74\text{kN}$ までは切断したモデル B 試験体とモデル A 試験体との差異は見られない。図-13、14、15 において、実験値が解析値よりも小さくなるのは鋼棒と木部との合成効果によるものと考えられるために以下の計算を行った。

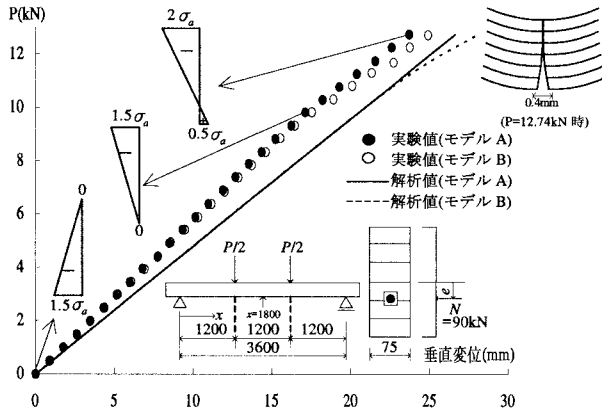


図-14 荷重-垂直変位関係

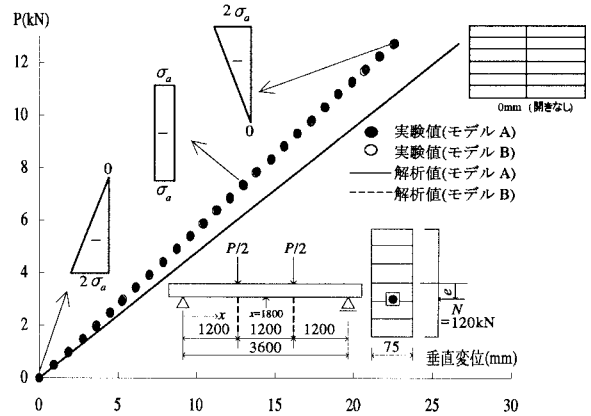


図-15 荷重-垂直変位関係

図-16 は、 $N=120\text{kN}$ を作用させた試験体の曲げ試験で、モデル A 試験体の荷重と支間中央における垂直変位関係を示している。図中の●は支間中央部の木部下縁で測定した実験値、実線は図中の断面(a)の鋼棒の垂直変位、破線は断面(a)の木部における垂直変位、点線は断面(b)の合成断面とした場合の垂直変位の解析値であり、鋼棒の変形挙動を調べるために図-5 に示したように 3次元ソリッド要素を用いて 3次元解析を行った。図より、実線の鋼棒の変位は破線の木部の変位の 60%程度で、完全合成とはいえないが、垂直変位の実験値は合成断面とした場合の点線の予想値よりやや小さく、合成効果が見られる。この試験において、図-17 に鋼棒を挿入する角孔内での鋼棒の変形挙動を示しているが、図より $P=6.9\text{kN}$ で鋼棒が木部に接触することがわかる。また、 $P=4.9\text{kN}$ 時の木部と鋼棒の鉛直変位を図-18 に示している。図中で、実線は木部の解析値、点線は鋼棒の解析値を示している。図より、鋼棒と木部は異なる挙動を示していることがわかる。図-19 は、支間中央から $150\text{mm}(x=1650)$ 支点寄りの断面における荷重とひずみの関係図である。図

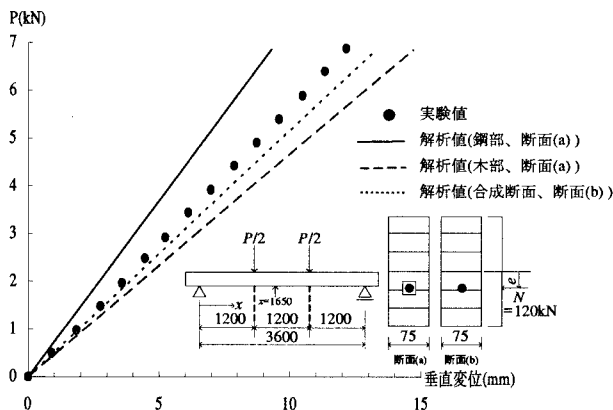


図-16 荷重-垂直変位関係

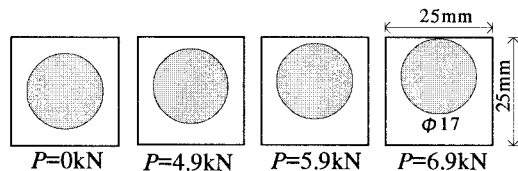


図-17 角孔内での鋼棒の変形挙動 (断面図)

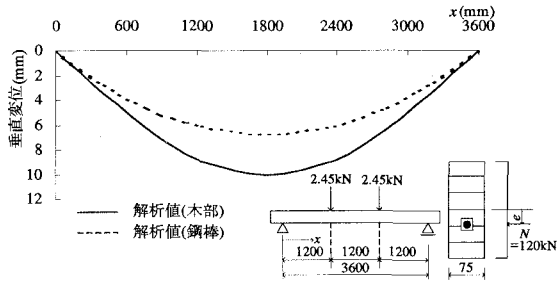


図-18 木部と鋼棒の鉛直変位

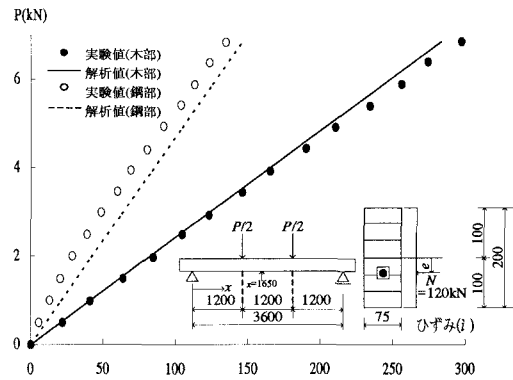


図-19 荷重-ひずみ関係

中で●は下縁部から 67mm の木部側面の実験値、○は鋼棒の実験値であり、実線と点線は 3 次元ソリッド要素を用いた木部と鋼棒に対する FEM 解析値である。図より鋼棒のひずみは木部のひずみの 40%程度と図-18 と同様に小さく異なった挙動を示している。

図-20 は $N=120\text{kN}$ を作用させた試験体の曲げ試験において、支点上($x=0$)と支間中央から 150mm($x=1650$)支点寄りの断面における $P=12.74\text{kN}$ 時のひずみ分布図である。●と○は $x=0$ の断面におけるモデル A と B の実験値、▲と△は $x=1650$ の断面における実験値であり、実線と点線はモデル A、B の $x=1650$ の断面における解析値である。図より、支点上では曲げ荷重に対するひずみはほとんど見られない。また、支間中央付近でモデル A と B の差異はほとんど見られず、図-15 に示したように継手下縁に引張応力が生じない場合、継手の影響はないものと考えられる。実験値は解析値よりも引張側でやや小さいが、定性的にはよく一致している。

図-21 は、図-14 に示した $N=90\text{kN}$ 時を作用させた時の、モデル B の下縁部のひずみと荷重の関係を示す。●は支間中央から 25cm($x=1550\text{mm}$) 離れた位置での実験値、○は 20cm ($x=1600\text{mm}$)、▲は 15cm($x=1650\text{mm}$)、△は 5cm($x=1750\text{mm}$) での実験値である。支間中央に近い値(△▲)では、荷重を大きくしても、下縁部の開きにより荷重増分に対してひずみは増加しない。図の●と○で示したように支間中央から 20cm 以上離れた断面では、継手なしのモデル A と同様に荷重が増加するとともにひずみも増加し、継手部の影響は切断部から左右 20cm 程度であることがわかる。

図-22 は、 $N=120\text{kN}$ を作用させた試験体の曲げ試験において、 $P=12.74\text{kN}$ を作用させた時の支点上の断面におけるモデル A と B のせん断応力分布である。図より、最大せん断応力 0.64N/mm^2 は許容せん断応力 0.9N/mm^2 の 71%となっている。図-23 は図-11 で示した $N=120\text{kN}$ を作用させた緊張時における支点付近のせん断応力と、図-22 で示した最大曲げ荷重を受けた集成材のせん断応力とを加算した支点付近でのせん断応力分布図である。図より最大せん断応力は支圧板の

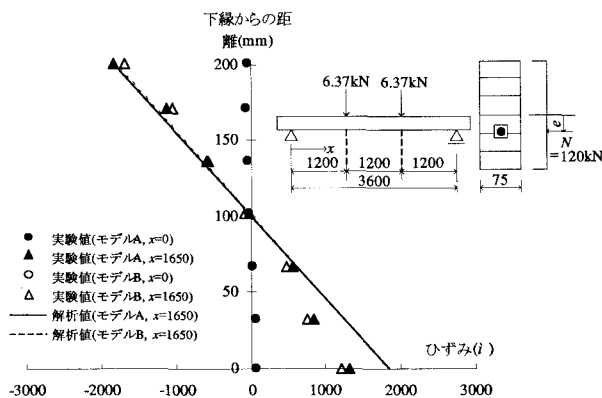


図-20 断面内ひずみ分布

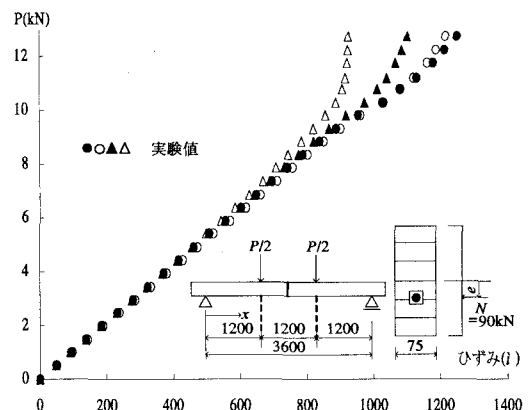


図-21 荷重-ひずみ関係

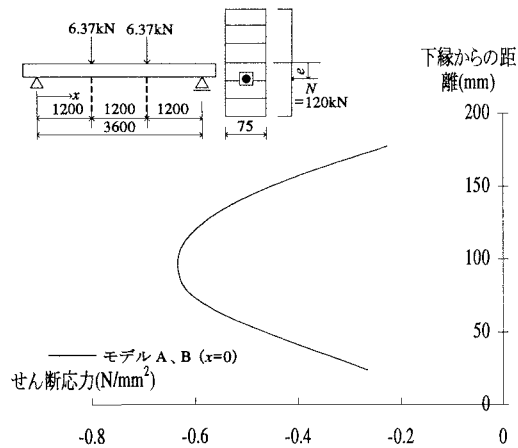


図-22 断面内せん断応力分布

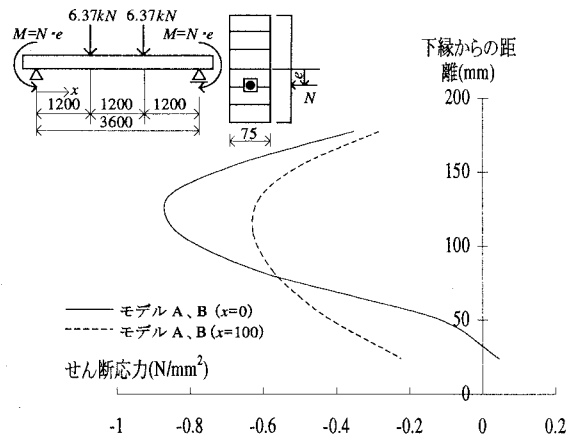


図-23 断面内せん断応力分布

上縁部よりやや下方に生じているが、すぎ集成材に対するせん断応力の許容値 0.9N/mm^2 よりやや小さい値となっている。

7. まとめ

継手を有するプレストレス集成材において、軸力を 120kN 作用させた試験体では変形と応力に及ぼす継手部の影響は見られなかった。作用させた 120kN は、プレストレスにより木部の下縁部が降伏点に達する限界と考えられる値であり、曲げ荷重によって上縁部の応力が降伏点応力以下で、下縁部で引張応力が生じない状態は、継手部のない集成材はりの設計荷重の2倍に相当する。軸力が 120kN 未満の場合、曲げ試験において継手部の上縁部が降伏点に達する前に下縁部に引張応力が作用することにより継手部で開きが生じたわみが増大する。ここで用いた試験体は、木部と鋼棒は接着剤でグラウトされておらず、鋼棒と木部の合成効果は期待できないが、曲げ試験の測定値は合成断面に対する解析値よりも小さな挙動を示しており、鋼棒がはりの曲げ剛性に寄与しているものと考えられる。また、実験と解析より木部と鋼棒の曲げ挙動を明らかにした。試験体で用いた締着部の支圧板の形状より、プレストレスを作用させる時に部分圧縮状態となり、支点部周辺で緊張時にせん断応力が発生するが、実験の最大の曲げ荷重時でも許容せん断応力以下であった。設計時には支圧板の形状等に留意すべきと考えられる。木材のクリープ等による緊張力の損失⁶⁾について測定中であるが、長期にわたる緊張力の損失と、鋼棒を挿入する孔をグラウトした場合の接着の影響については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 長谷部薫・薄木征三・佐々木貴信：プレストレス集成材の曲げ挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1147-1153，2002.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) (社)日本農林規格協会：構造用集成材の日本農林規格，1996.
- 5) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説，1995.
- 6) Ritter, M.A. : Timber Bridge – Design, Construction, Inspection and Maintenance, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990.