

# プレストレスを作用させて接合した集成材の弾塑性挙動

Elasto-plastic behavior of glulam timber beams with joints by prestressing

長谷部薫\*, 鎌田充洋\*\*, 薄木征三\*\*\*

Kaoru Hasebe, Mitsuhiro Kamada, Seizo Usuki

\*工博 秋田大学助教授 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

\*\*工修 (株)東北機械製作所 (〒010-0065 秋田市茨島 1-2-3)

\*\*\*工博 秋田大学教授 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

Timber joints are one of the most important considerations in timber bridge design because they provide continuity to the members as well as strength and stability to the system. The connections may consist entirely of wood members but frequently involve the connection of wood to steel or other materials. 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. The simplified bi-linear stress-strain relationships are assumed for Japanese cedar, and the effect of joints on elasto-plastic deformation of prestressed laminated timber beam are investigated.

**Key Words** : *glued laminated timber beam, prestress, butt joint, elasto-plastic, contact analysis*

キーワード : 集成材はり, プレストレス, バットジョイント, 弾塑性, 接触解析

## 1. まえがき

近年、木材がもつ天然材料としての良さを十分に活かした各種構造物が建造されている。その中で集成材は、製作・加工技術、防腐技術の進歩により、建築はもとより小規模な橋梁の主構造材料として注目され使用されてきている。しかしながら、大断面集成材の製作が可能になり、長スパン部材の架設が可能になった反面、現場への搬入および施工性から部材を分割し、現場継手を行う必要が生じてきた。集成材の接合具には、ドリフトピンとラグスクリューおよび従来から用いられているボルトがある。

ドリフトピンは、鋼板を接合材内部に挿入して接合する継手に一般に用いられ<sup>1),2)</sup>、ボルトは鋼板を側材に用いた場合と鋼板を接合材内部に挿入して接合する継手に用いられている。また、ラグスクリューは側材に鋼板を用いた場合に使用されており、ボルトのように長い先孔を木材中に貫通させる必要がない。側材の鋼板の代わりにアラミド繊維補強プラスチックとラグスクリューを用いた継手に関する試みも報告されている<sup>3)</sup>。

本論文では、集成材はりの継手として従来から用いられている手法と異なる継手に関して、はり軸方向の木材の繊維方向にプレストレスを作用させて接合した部材を対象

とし、集成材はりの曲げ載荷試験および有限要素法による弾塑性解析を行い、終局荷重に至るまでの曲げ挙動に及ぼす継手部の影響を考察した。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<sup>4)</sup>および図心から偏心して鋼棒を配置した継手部を有する集成材の曲げ試験<sup>5)</sup>に関しては既に報告している。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<sup>6),7)</sup>。プレストレス木床版の場合、木材の繊維に直角となる幅員方向にプレストレスを与えるが、初期の緊張だけの場合で 1 ヶ月後に 70% 程度損失し、最終的に 80% 以上が損失する。これより 2 回の再プレストレスを行い、60% の損失量を考慮して設計を行うが<sup>8)</sup>、木材の繊維に平行にプレストレスを与える場合、クリープによるプレストレス鋼棒の緊張力の損失はプレストレス木床版と比べて小さい<sup>5)</sup>。

ここでは、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スギ集成材を対象として、支間中央に継手を設けた試験体と 3 等分点の 2 箇所に継手を設けた試験体の曲げ挙動に関して、完全弾塑性モデルを用いて弾塑性解析を行い、終局荷重に及ぼすプレストレスと継手の影響を考察する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析対象試験体

解析の対象となるモデルは、曲げ試験<sup>5)</sup>を行った試験体と同様のモデルであり、長さ 3.9m のスギを用いた集成材はりである。図 - 1 に試験体の側面図、図 - 2 に試験体の断面及び鋼棒の端部をネジ加工してナットで定着した締着部を示す。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( 17) を 1 本挿入している。締着部において、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導入を行っている。集成材のラミナ( のこ挽き板) は 33mm 厚のスギラミナ 6 枚で、JAS<sup>9)</sup> に従い異等級対称構成集成材(強度等級 E75-F240、ヤング係数 7500N/mm<sup>2</sup>、曲げ強さ 24N/mm<sup>2</sup>) を製作した。切断して継手部を設ける前に試験体 1 の曲げ試験を行い、繊維方向の弾性係数を測定したところ、 $E_{x1}=8300\text{N/mm}^2$  という値が得られた。この結果より試験体 1 の材料特性を表 - 1 のように仮定<sup>10)</sup>する。試験体 2 に対しても同様で、材料特性を表 - 2 に示す。

### 2.2 FEM 解析

図 - 3 に示すように実験で使用した試験体と同様の全長 3900mm、支間 3600mm、高さ 200mm、断面の幅 75mm の集成材はりモデルと、支間中央に継手部となる切断面を設けたモデルを用いて解析を行う。図中の P は三等分点 2 点載荷の曲げ荷重で、N は鋼棒を緊張することにより木部に与える圧縮の軸力である。試験体に作用させた圧縮力と

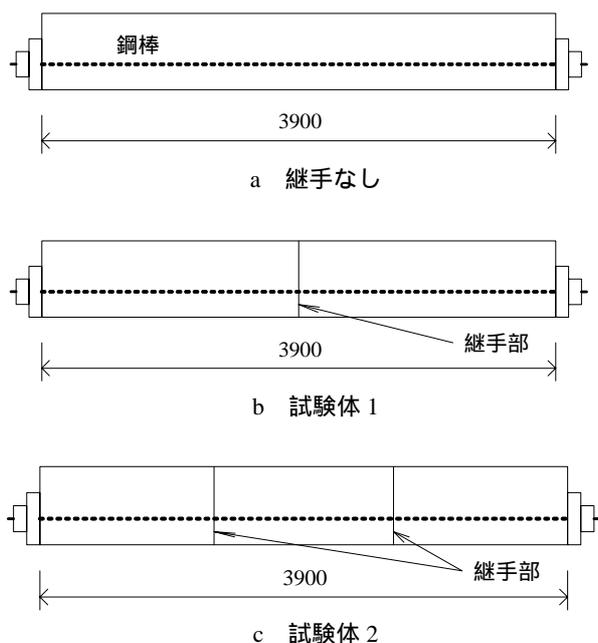


図 - 1 試験体の側面図

同じ  $N=60\text{kN}$  と  $N=120\text{kN}$  を与え、図 - 4 と図 - 5 に示すような断面内応力分布を初期の応力として作用させた。ここで  $N$  は支圧板の大きさと同じ分布荷重とし、表 - 1 と 2 に示す集成材としての材料定数を用いている。継手部を持たない解析モデルの節点数は 1501 で要素数は 1404、継手部を有する解析モデルの節点数は 1516 で要素数は 1404 である。

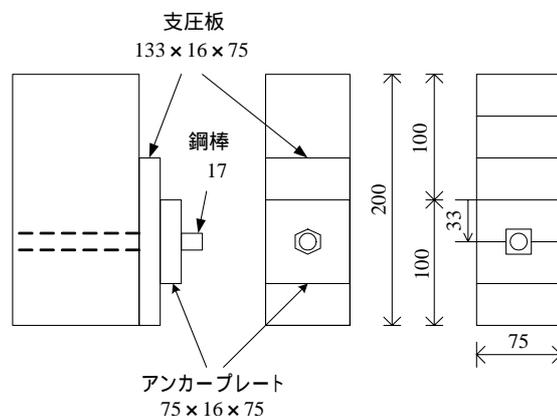


図 - 2 試験体の断面及び締着部

表 - 1 材料特性 (試験体 1)

ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	$E_{x1}=8300$ $E_{y1}=E_{z1}=E_{x1}/25=332$
ポアソン比	$\nu_{x1}=0.4$ $\nu_{y1}=\nu_{z1}=0.016$
せん断弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	$G_1=E_{x1}/15=553$

表 - 2 材料特性 (試験体 2)

ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	$E_{x2}=9080$ $E_{y2}=E_{z2}=E_{x2}/25=363$
ポアソン比	$\nu_{x2}=0.4$ $\nu_{y2}=\nu_{z2}=0.016$
せん断弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	$G_2=E_{x2}/15=605$

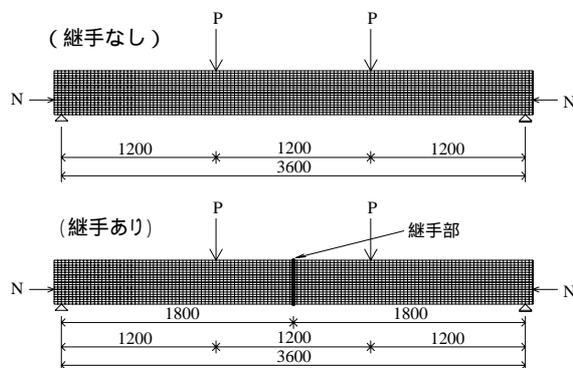


図 - 3 解析モデル 1

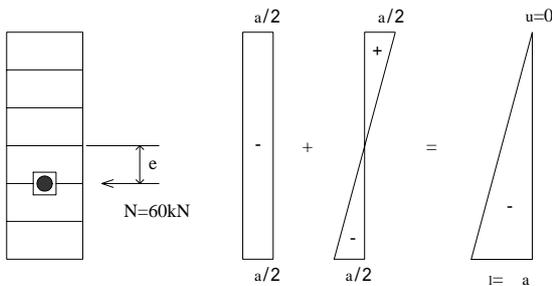


図 - 4 断面内応力分布 (N=60kN)

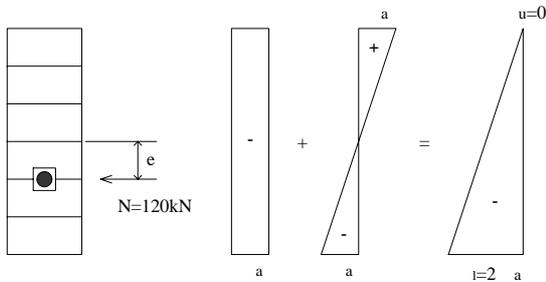


図 - 5 断面内応力分布 (N=120kN)

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 次元解析を行った。試験体は、木部と鋼棒を接着剤でグラウトしていないことにより鋼材を無視し、木部のみを対象としている。解析で使用した木材の応力 - ひずみ関係を図 - 6 に示す。スギ材の許容応力は  $\sigma_a = 8\text{N/mm}^2$  とし、木材は圧縮側のみ降伏し、図中の  $\sigma_y$  で示される降伏応力は  $\sigma_y = 2\sigma_a^{10)}$  である。引張側は降伏せず、木材の安全率を 3<sup>10)</sup> とすると  $3\sigma_a = 24\text{N/mm}^2$  で曲げ破壊すると仮定する。圧縮側では降伏後、ひずみが降伏ひずみの 10 倍に達した時に終局に至ると仮定し、終局ひずみを  $\epsilon_u = -20000 \times 10^{-6}$  とする。継手部の接合面は圧縮上縁側のラミナ 1 枚のみ節点を共有して、残りのラミナ 5 枚は節点を共有させずに独立とし、接合面の接触点で貫通が生じない接触問題として解析を行う。また、降伏基準はミーゼスの降伏条件を用いている。

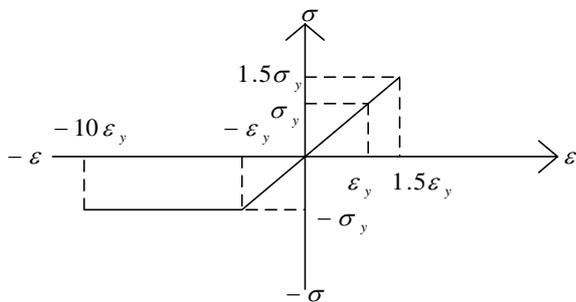


図 - 6 応力 - ひずみ関係

### 3. 解析結果

#### 3.1 解析モデル 1

##### (1) N=60kN の場合

以下に試験体 1 の  $E_{x1} = 8300\text{N/mm}^2$  の場合の結果を示す。図 - 7 に  $N=60\text{kN}$  を作用させたときの荷重と支間中央のたわみの関係を示す。図中の黒丸は図 - 1b で示した試験体 1 の実験値であり破壊まで載荷させていないデータである。弾性域における解析値は実験値より 10% 程度大きくなっているが、ヤング係数を求めるための曲げ試験時から試験体 1 の実験を行っている間に集成材の含水率が減少することにより、ヤング係数がやや増加したものと考えられる。

継手部の下縁に引張応力が生じて継手部が開くときの継手部開き開始荷重  $P=3.4\text{kN}$  までは、すべての場合で同じ挙動を示し、その後、継手部の開きの影響を受け、継手部ありの弾塑性解析値と弾性解析値のたわみ増加量は大きくなり非線形を示す。 $P=5.1\text{kN}$  で継手部ありのはりが継手部上縁で降伏し、その後、継手部の開きと塑性の影響を受け  $P=5.5\text{kN}$  で終局状態となる。継手部なしのはりは、塑性開始荷重の  $P=6.8\text{kN}$  まで直線を示し、その後、塑性の影響を受け、たわみ増加量が大きくなり非線形を示し、 $P=10.6\text{kN}$  で引張縁が  $1.5\sigma_y$  に達する。 $P=10.6\text{kN}$  時のたわみの弾性解析値と弾塑性解析値を比較すると、弾塑性解析値は弾性解析値の 33% 増と大きな差が生じている。継手部なしのはりは、断面の塑性化によりたわみが大きくなるが、継手部ありの場合は、継手部が開いた後と塑性後の 2 段階でたわみが大きく増大している。 $P=5.5\text{kN}$  時の継手部ありのたわみの弾塑性解析値は、継手部の開きが増大することにより継手部付近の曲げ剛性が低下し、傾きがほぼ 0 となっている。弾塑性解析において、継手部ありの終局荷重は、継手部なしの終局荷重の 52% と継手部の影響が大である。

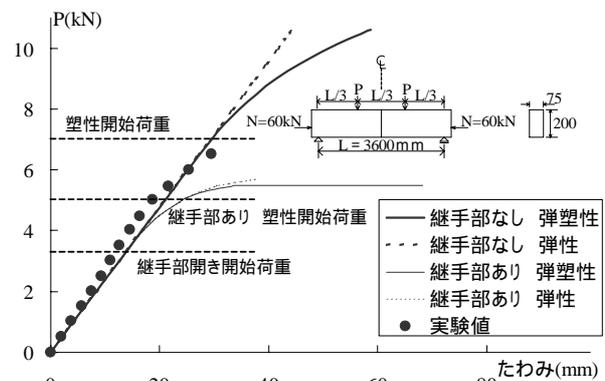


図 - 7 荷重 - たわみ関係 (支間中央, N=60kN)

継手部なしのはりに対する最大荷重時の断面内応力分布を図 - 8 に示す。弾性領域である図中の A、B 断面では応力分布は直線になるが、C、D 断面では圧縮側が塑性状態 (図中の黒塗りの部分) にあるので、弾性領域に比べると引張側の応力が大きくなり終局状態に達している。

継手部を有する解析モデル 1 はりの荷重と継手部上縁の最大圧縮ひずみの関係を図 - 9 に示す。継手部ありの弾塑性解析値は、継手上縁の降伏後、圧縮ひずみが大きく増大して仮定した終局ひずみに達している。これは継手部が

開いた時点から継手上縁に局部的な圧縮の応力集中が生じたため降伏が早くなり終局に達したと考えられる。

図 - 8 と図 - 9 の図中にも示しているが、継手部あり、なしの終局荷重時の塑性域を比較するために再度図 - 10 に示す。継手部なしのはりは、荷重増加による塑性域の広がりによって引張応力で曲げ破壊に至る。これに対し、継手ありのはりは、継手上縁の圧縮ひずみが継手部が開いた後から徐々に増加し、塑性後大きく増加して終局ひずみに達するが、塑性域は継手部なしのはりと比べて小さい。

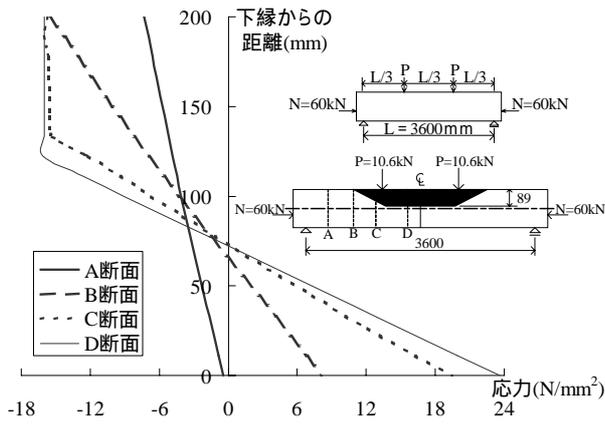


図 - 8 断面内応力分布 (終局荷重時、N=60kN)

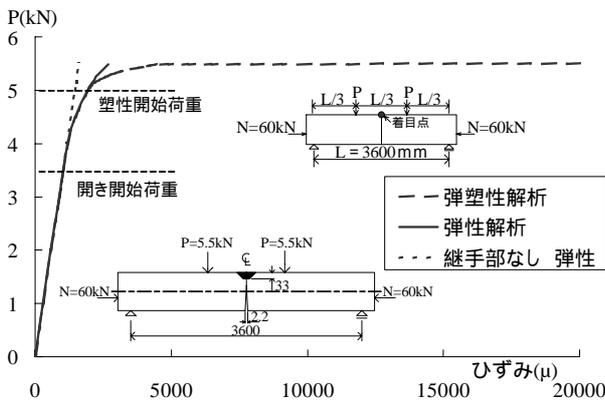


図 - 9 荷重 - ひずみ関係 (継手上縁)

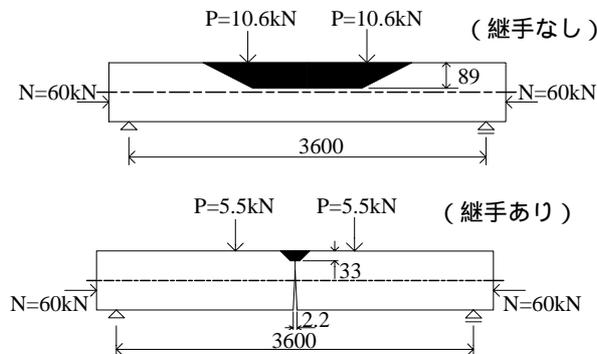


図 - 10 塑性域 (終局荷重時、N=60kN)

## (2) N=120kN の場合

N=120kN を作用させたときの荷重と支間中央におけるたわみの関係を図 - 11 に示す。図 - 7 で示した N=60kN のときと比較すると、継手部の引張縁が開くと同時に塑性が開始する荷重の P=6.8kN までは線形で、その後、継手部ありは、開きと塑性の影響を受け P=9.2kN で継手部の圧縮縁で終局ひずみに達する。また、継手部なしは、塑性の影響を受け P=10.6kN で引張縁の応力が  $1.5 \sigma_y$  になり終局状態となる。継手部ありの終局荷重は継手部なしの終局荷重の 83% で、N=60kN の場合より終局荷重の差が小さくなっている。継手部なしの弾塑性解析値は、図 - 7 に示したように終局荷重が N=60kN のときとほぼ同じという結果が得られた。継手部なしの P=10.6kN 時におけるたわみの弾性解析値と弾塑性解析値を比較すると、弾塑性解析値は弾性解析値の 84% 増と N=60kN 時よりもさらに大きな差が生じた。継手部ありの P=9.2kN 時のたわみの弾塑性解析値は傾きがほぼ 0 となっている。前述のように、弾性域における解析値と実験値の相違は、集成材のヤング係数の変動によるものと考えられる。

図 - 12 に継手部なしのはりに対する終局荷重時の断面内応力分布を示す。図 - 8 に示した N=60kN の場合と比較すると、弾性領域の A、B 断面では、大きなプレストレスを作用させているため、図 - 8 と異なり引張応力は見られず、塑性領域を含む C、D 断面では、断面の高さ方向は塑

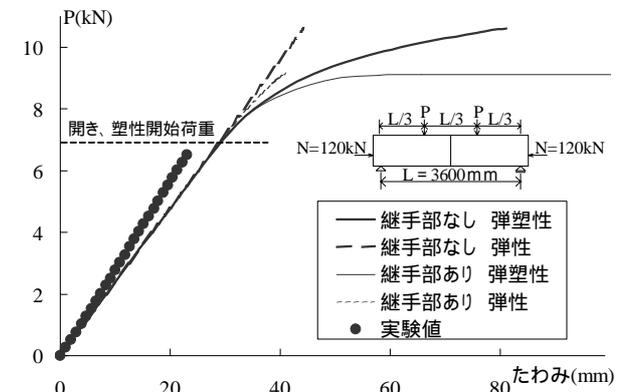


図 - 11 荷重 - たわみ関係 (支間中央、N=120kN)

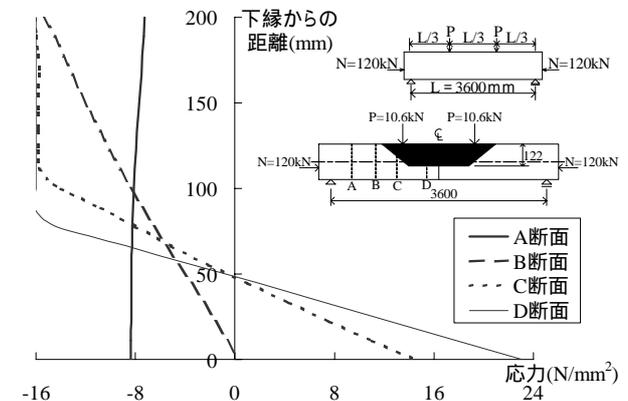


図 - 12 断面内応力分布 (終局荷重時、N=120kN)

性領域がさらに広がり、下縁の引張応力が增大する。その結果、プレストレスを大きくしても終局荷重の向上は見られなかった。N=60kNの場合と同様に終局時は引張応力で支配される。

図 - 13 に荷重と支間中央における上縁部の最大ひずみとの関係を示す。N=60kNの場合と同様に、継手部上縁の降伏により、圧縮ひずみが終局ひずみに達している。図 - 14 に継手部なしのはりの終局荷重時の塑性域、図 - 15 に継手部ありの塑性開始から終局時までの塑性域を示す。継

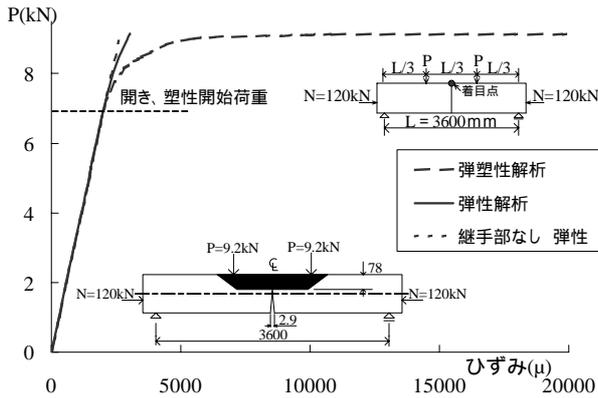


図 - 13 荷重 - ひずみ関係 (継手部上縁、N=120kN)

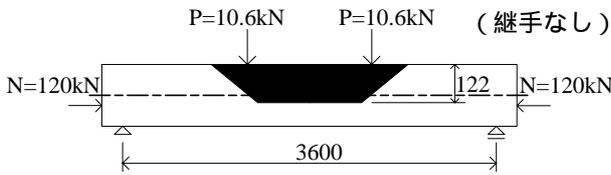


図 - 14 塑性域 (終局荷重時、N=120kN)

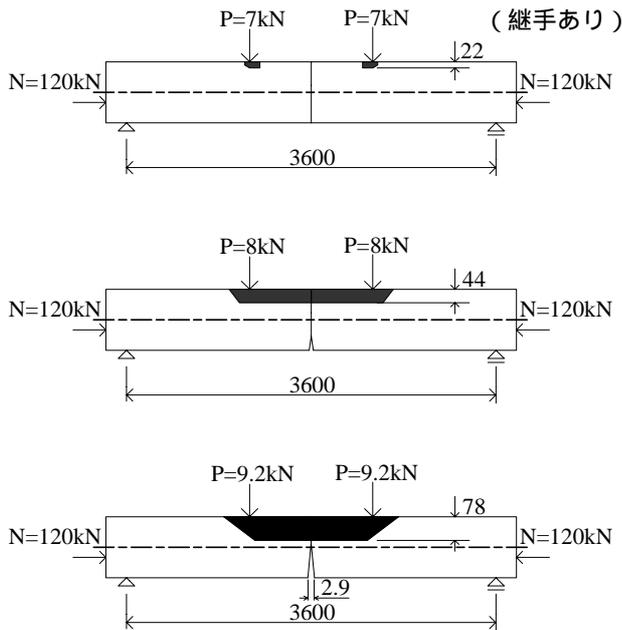


図 - 15 荷重増加による塑性域の広がり (N=120kN)

手部ありとなしのいずれのはりも N=60kN のときより終局荷重時の塑性域は広がっている。継手部なしのはりは、塑性域の広がりにより引張応力が大きくなり、耐荷力の向上は見られないが、継手部ありのはりは、プレストレスを大きくすることにより継手部の開きを遅らせ、終局荷重が増加する。

### 3.2 解析モデル 2

図 - 1c に示した試験体 2 の継手を 2 箇所有する解析モデル 2 を図 - 16 に示す。荷重方法は 2 種類で、図中の P は、1 点荷重は支間中央に作用させ、2 点荷重は継手部から支点方向に 50mm の位置に作用する曲げ荷重である。また、N は解析モデル 1 と同様に圧縮の軸力である。材料特性は表 - 2 に示しているが、解析モデル 1 と異なるため、それぞれ継手を持たない解析モデルも作成した。応力 - ひずみ関係は解析モデル 1 のときと同様に図 - 6 に示した関係を仮定した。継手を有するモデルの節点数は 1533 で要素数は 1404 である。

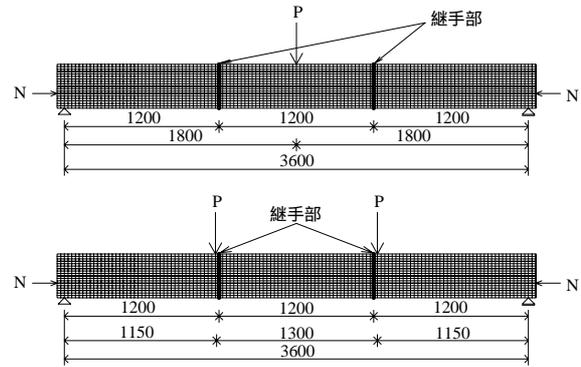


図 - 16 解析モデル 2

#### (1) N=60kN の場合

支間中央に 1 点荷重したはりの荷重 - たわみ関係を図 - 17 に示す。図中の実験値は、試験体 1 と同様に破壊まで荷重させていないデータである。また終局荷重時における塑性域を図 - 18 に示す。

図 - 17 より、継手部の開き開始荷重 P=6.8kN と支間中央の上縁部が塑性を開始する荷重 P=7.2kN の差が非常に小さくなっている。継手部ありのはりに対する弾塑性解析値は、P=10.9kN で継手部の開きと塑性の影響でたわみが增大する。継手部なしは、P=14.8kN で支間中央の引張縁で引張強度に達し、このときのたわみの弾塑性解析値は弾性解析値の 16% 増である。このモデルの場合は、図 - 18 に示すように支間中央で塑性が開始するため、継手部ありのはりとなしのはりに対する塑性開始荷重は同じになっており、応力が小さい部分に継手を設けているため、開きによる支間中央のたわみ増加に対する影響は小さい。また、継手部ありの終局荷重は継手部なしの終局荷重の 73% である。継手部なしの場合、荷重点付近の降伏後、塑性域の広がりにより支間中央下縁の引張応力が大きくなり、終

局状態に達する。継手部ありの場合、 $P=10\text{kN}$  で継手部上縁が塑性化し、その後、継手部上縁の圧縮ひずみが終局ひずみに達する。

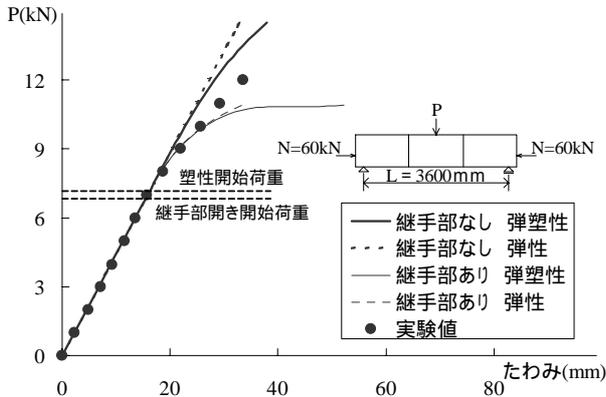


図 - 17 荷重 - たわみ関係(支間中央、1点载荷、 $N=60\text{kN}$ )

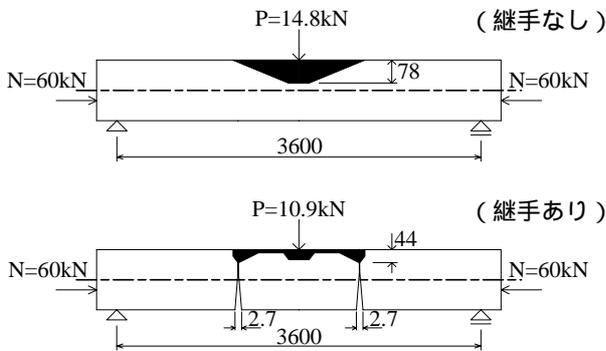


図 - 18 塑性域 (終局荷重時、1点载荷、 $N=60\text{kN}$ )

図 - 19 は継手部から 50mm 離れた点に 2 点载荷させて、荷重点間で一定応力状態としたはりに対する荷重 - たわみ関係であるが、継手部ありは  $P=3.6\text{kN}$  で継手部が開き、 $P=5\text{kN}$  で継手部上縁が降伏し、 $P=5.7\text{kN}$  で継手部の開きと塑性の影響で終局ひずみに達する。継手部なしは、 $P=7.1\text{kN}$  で塑性が開始し、 $P=11.1\text{kN}$  で終局応力に達する。継手部なしの終局荷重  $P=11.1\text{kN}$  時のたわみの弾塑性解析値は弾性解析値の 34% 増である。継手部なしの場合は、荷重点間の上縁で塑性が開始し、下縁部で終局引張応力に達する。継手部ありは、継手部が開き、塑性開始後に継手部上縁が終局圧縮ひずみに達する。継手部ありの終局荷重は継手部なしの終局荷重の 52% と小さく、1 点集中荷重の場合より終局荷重に及ばず継手部の影響が大である。

図 - 20 に終局時の塑性域を示す。継手部なしの場合は、図 - 18 に示した 1 点载荷と同様に応力が大きい圧縮部分が塑性化し、引張縁で引張応力に達する。図 - 18 に示した 1 点载荷の継手部ありの場合は、支間中央で塑性が開始した後に継手部が塑性化し終局に至るが、2 点载荷の場合は、継手部周辺だけが塑性化し終局に至る。2 点载荷の場合、荷重点間に継手部が設けられていることにより継手部の開きが早く、継手部上縁に局所的な圧縮の応力集中が生

じて塑性開始が早くなる。

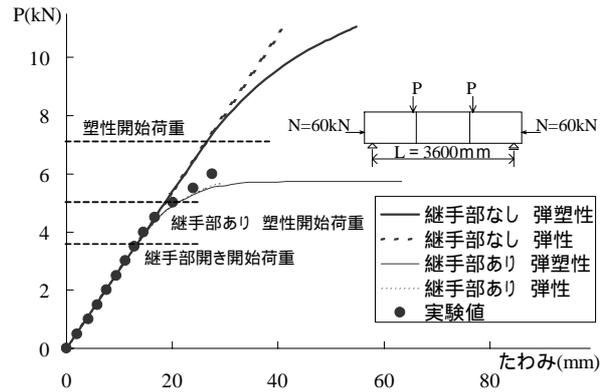


図 - 19 荷重 - たわみ関係  
(支間中央、2点载荷、 $N=60\text{kN}$ )

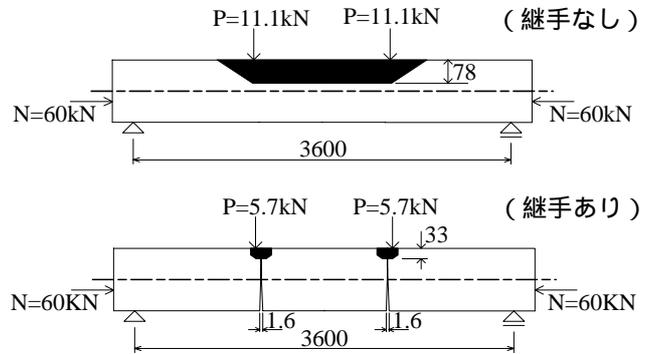


図 - 20 塑性域 (終局荷重時、2点载荷、 $N=60\text{kN}$ )

## (2) $N=120\text{kN}$ の場合

軸力  $N=120\text{kN}$  を作用させたときの荷重とたわみの関係を図 - 21 と図 - 22 に示す。

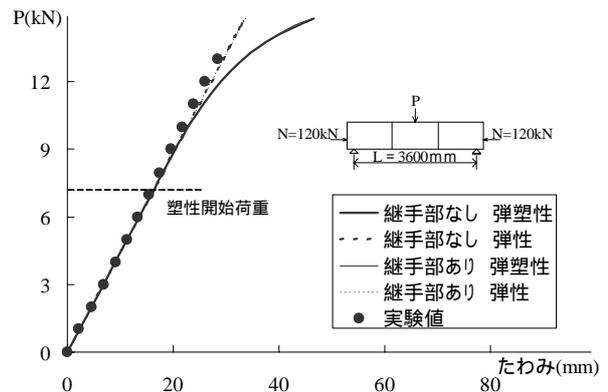


図 - 21 荷重 - たわみ関係  
(支間中央、1点载荷、 $N=120\text{kN}$ )

図 - 21 は 1 点载荷に対する結果で、グラフ全体より継手部ありの弾性と弾塑性解析値および継手部なしの弾塑性解析値が完全に一致している。このモデルに関しては、

継手部の下縁側が開くことなく支間中央の下縁部が終局応力に達したため、継手部の影響が全く生じないという結果になっている。図 - 4 と図 - 5 に示した応力分布より、図 - 17 の  $N=60\text{kN}$  の場合と同様に、 $P=7.2\text{kN}$  で支間中央

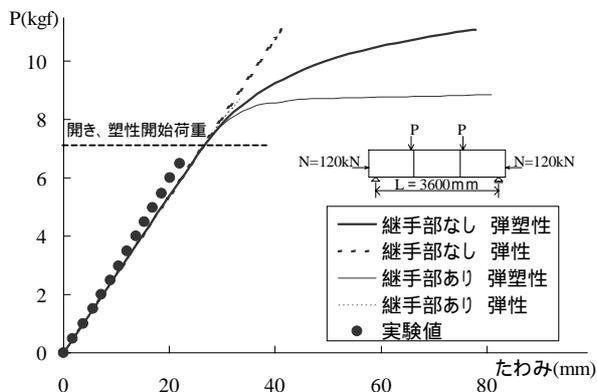


図 - 22 荷重 - たわみ関係  
(支間中央、2点载荷、 $N=120\text{kN}$ )

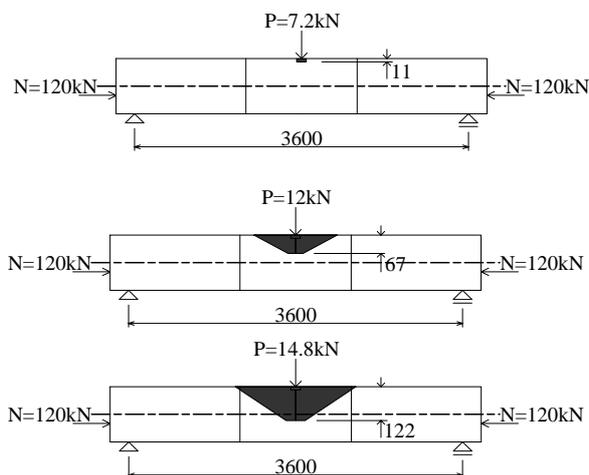


図 - 23 荷重増加による塑性域の広がり  
( $N=120\text{kN}$ 、1点载荷)

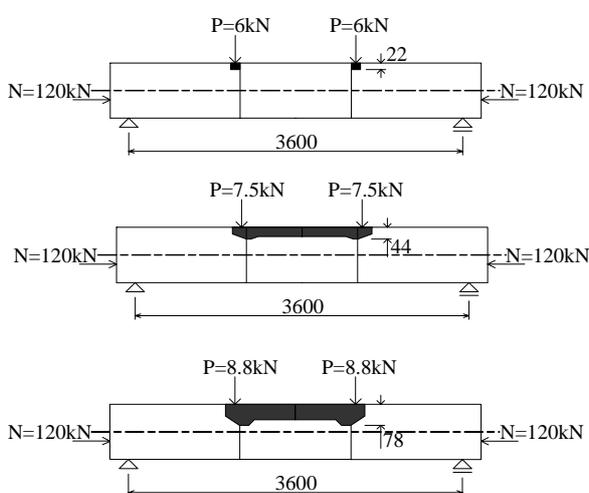


図 - 24 荷重増加による塑性域の広がり  
( $N=120\text{kN}$ 、2点载荷)

上縁側が降伏する。

図 - 22 は 2 点载荷の場合で、継手部が開くときの荷重と継手部の上縁部が塑性化するときの荷重が一致しており、継手部ありの終局荷重は継手部なしのはりの 80% となっている。

$N=120\text{kN}$  を作用させた時の、1 点载荷と 2 点载荷に対する荷重増加による終局荷重までの塑性域の広がりを図 - 23 と図 - 24 に示す。いずれの場合も荷重点付近で塑性が開始し、さらに荷重を増加することにより、1 点载荷では支間中央で、2 点载荷では荷重点間で塑性域の広がりが見られる。

### 3.3 プレストレスと終局荷重

解析モデル 1 と解析モデル 2 に対して軸力  $N$  を変化させたときの  $N$  と終局荷重との関係を図 - 25 ~ 図 - 27 に示す。着目した軸力は  $N=60\text{kN}$ 、 $90\text{kN}$ 、 $120\text{kN}$  の 3 パターンで、 $N=90\text{kN}$  に関しては本文中で説明していないが、図中に終局荷重と終局状態の結果のみを示す。図より、継手部を設けていないはりの場合、軸力の増加による終局荷重の増加は得られない。これに対し、継手部を設けたはりの場合、軸力の増加による終局荷重の増加がみられる。特に 1 点载荷の場合では  $N=90\text{kN}$  で継手部なしのはりとほぼ同じ結果となり、 $N=120\text{kN}$  では継手部なしのはりと全く同じ結

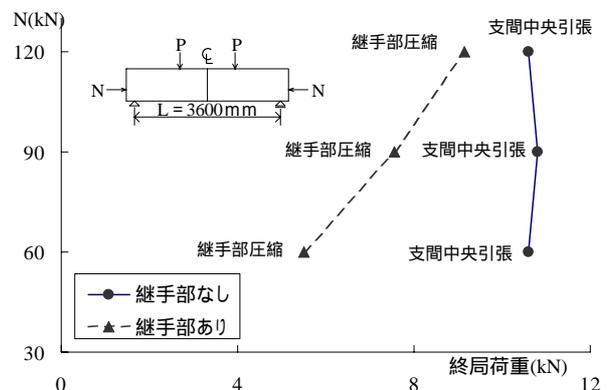


図 - 25 軸力  $N$  - 終局荷重関係 (解析モデル 1)

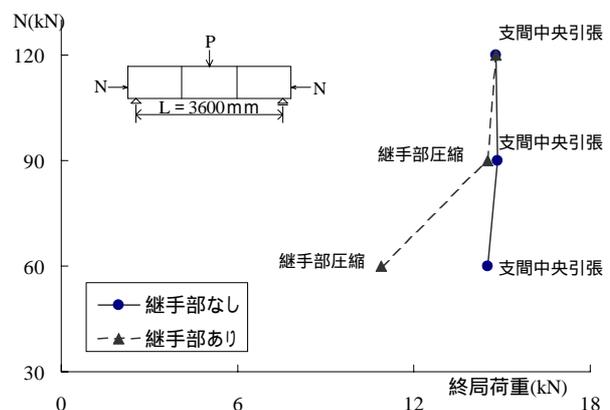


図 - 26 軸力  $N$  - 終局荷重関係 (解析モデル 2、1 点载荷)

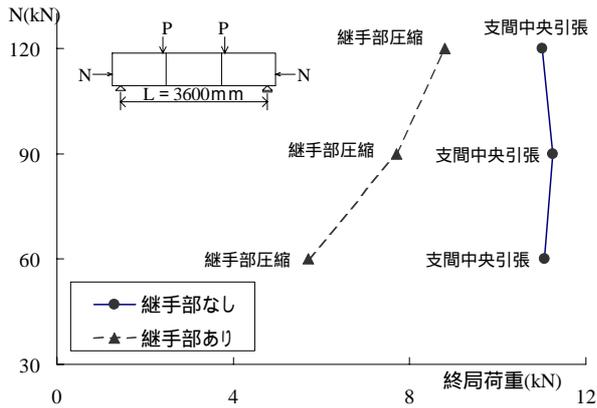


図 - 27 軸力 N - 終局荷重関係 (解析モデル 2、2 点載荷)

果となっている。2 点載荷の場合、モデル 1 とモデル 2 とともに  $N=120\text{kN}$  を作用させると継手なしのはりに対する終局荷重の 80% 以上を確保できる。

#### 4. あとがき

継手を有するプレストレス集成材を対象として、支間中央に継手を設けた試験体 1 と 3 等分点に設けた試験体 2 の曲げ試験およびこれらの弾塑性解析を行った。ここで、試験体の鋼棒と木部は接着剤で一体化していないことにより鋼棒を無視し、完全弾塑性モデルとスギ材の降伏応力を仮定して解析を行った。得られた結果をまとめると以下のようなになる。

(1) 継手部を設けない集成材はりにおいて、木部に作用させる圧縮軸力を増加させても終局荷重の増加は得られなかった。これは、プレストレスが増加することにより、降伏後に圧縮側の塑性域の広がりが大きくなり、中立軸が引張側に移動することによってはりの下縁の引張応力が増大するためと考えられる。

(2) 支間中央に継手部を設けた集成材はりに 3 等分点 2 点載荷した場合、許容応力以上のプレストレスを作用させると、プレストレスの大きさに応じて終局荷重を大きくすることができる。引張側の応力が許容応力となる  $N=60\text{kN}$  を作用させた継手を有するはりは、継手なしのはりの 50% 程度の荷重で終局状態となるが、 $N=90\text{kN}$  で 70%、 $N=120\text{kN}$  を作用させると 86% と耐荷力が向上する。

(3) 3 等分点に継手を 2 箇所設けたはりにおいて、2 点載荷の場合は上記の(2)とほぼ同じ結果となるが、支間中央に 1 点載荷の場合、 $N=90\text{kN}$  以上でほぼ継手のないはりの耐荷力と一致する。

以上、本論文で対象としたプレストレスを作用させて接合した集成材は実橋で試用され実用化されているが、本論文はこの集成材桁に対して限界状態設計法を適用するときの基礎資料を与えるものである。解析で仮定した集成材の材料定数および降伏応力等を変化させることにより異なった解析結果が得られるが、実験による弾塑性挙動および鋼棒を考慮した解析を含めて今後の課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 薄木征三, 小松幸平, 鍵和田功, 佐々木貴信: 集成材アーチリブの形挿入鋼板を用いたドリフトピン接合, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 915-922, 1995.
- 2) 薄木征三, 佐々木貴信, 長谷部薫, 大原真也: 鋼板、樹脂およびピンによる集成材主桁の接合, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1241-1250, 1998.
- 3) 長谷部薫, 薄木征三: アラミド繊維補強プラスチックとラグスクリューを使用した集成材はりの接合, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 1307-1314, 1999.
- 4) 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.
- 5) 長谷部薫, 薄木征三・佐藤亜希子: プレストレスを作用させた継手を有する集成材の曲げ試験と解析, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 1179-1186, 2005.
- 6) 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.
- 7) 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法に関する研究, 土木学会論文集, No. 616/ - 42, pp. 91-102, 1999.
- 8) Ritter, M.A.: Timber Bridge - Design, Construction, Inspection and Maintenance, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990.
- 9) (社) 日本農林規格協会: 構造用集成材の日本農林規格, 2003.
- 10) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2003.

(2006 年 9 月 11 日受付)