

バットジョイントを有する集成材はりの弾塑性挙動

Elasto-plastic behavior of glued laminated timber beam with butt joints

長谷部 薫* 太田 篤** ○上野 智之***

HASEBE Kaoru, OTA Atsushi and UENO Tomoyuki

*工博 秋田大学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)

**工修 JA 全農あきた (〒010-0976 秋田市八橋南 2-10-16)

*** 秋田大学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)

ABSTRACT In most cases, the size of glued laminated members exceeds the size of available lumber, and laminations must be spliced with end joints. End joints are used to splice laminations longitudinally before assembly into a glued laminated member. The common types of end joints are scarf joints and finger joints. The present paper is concerned with the behavior of glued laminated timber beam with butt joints. The presence of butt joints reduces the bending strength of the beam. Four butt joint patterns are tested in two point loading. The usual FEM is used to investigate this problem. In the elasto-plastic analysis, the simplified bi-linear stress-strain relationships are used.

Key Words : バットジョイント、集成材、弾塑性、応力集中

butt joint, glued laminated timber beam, elasto-plastic, stress concentration

1. まえがき

構造用集成材は、厚さ 5cm 以下の同樹種で原則として等厚のひき板（ラミナ）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。ラミナは、幅方向に接着した板および長さ方向に接着剤を用いたスカーフジョイント接合かフィンガージョイント接合した板も使用されている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、強度差はあるが同程度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。

ラミナの長さ方向（木材の繊維方向）への縦継ぎには図-1に示す通り、フィンガージョイント、スカーフジョイント、バットジョイント接合がある。フィンガージョイントは、フィンガー尖端部の木口面が空隙を形成し、このジョイントスペース部に応力が集中することによりスカーフジョイントのように高い強度性能は得られないが、作業効率や歩留りの生産性が優れているため、構造用集成材のラミナの接合に一般的に用いられている。スカーフジョイントは、スカーフ比を十分に確保すると母材強度と同程度の強度を発揮することが可能であり、強度性能的に最も優れた接合法であるが、材料の歩留まりが悪く、加工と接着管理が難しいことから最近ほとんど用いられていない。バットジョイントは、直角に切断した材面を突きつける最も簡単な接合で、構造用集成材ラミナの幅方向の横はぎ、単板積層材⁴⁾⁵⁾ (LVL) の単板の縦継ぎ、プレストレス木床版⁶⁾⁸⁾のラミナの縦継ぎ等に用いられており、特殊な加工機械を必要としないので経済的であるが、他の接合に比べて十分な強度性能が得られないため、構造用集成材ラミナの縦継ぎには用いられていない。一般に集成材はりは、低品質強度のラミナを断面の中央部に、高品質高強度のラミナ

を外層部に配置して製造されるが、縦継ぎしたラミナを集成材の引張側最外層ラミナとして使用した場合、引張側に節を有する集成材はりの破壊性状と同様に継手部の曲げ破壊により一般に終局強度は低下する⁹⁾¹⁰⁾。本論文では、バットジョイント接合部を有するラミナを用いて試作したスギ集成材を対象として曲げ载荷試験を行い、集成材はりの強度性能および曲げ特性に及ぼすバットジョイントの影響を明らかにし、構造用集成材ラミナへのバットジョイント接合の適用性を考察する。また、2次元のFEM解析を行い、破壊に至るまでの曲げ試験体の弾塑性挙動を明らかにする。

2. 曲げ試験体および試験方法

試験体の集成材を製作する前に、 $372 \times 18.1 \times 3.7\text{cm}$ の杉ラミナ80枚のヤング係数を小荷重の曲げ試験および縦振動法により求め、得られた各ラミナのヤング係数を基に、8枚のラミナからなる $350 \times 24 \times 8\text{cm}$ の対称異等級構成集成材を10本製作した。曲げ試験により得られた試験体の繊維方向のヤング係数とバットジョイント(BJ)の位置を表-1に示す。BJ部には接着剤を塗布せず、ラミナを積層しながら隙間がないように突きつけている。試験体の杉集成材は、強度等級¹⁾E75-F240の対称異等級構成集成材である。ケース1-0はBJが無い試験体であり、またケース1-1からケース1-4は支間中央の引張側にBJ部を1つ有する試験体である。

試験体を単純支持とし、3等分点2点荷重法として载荷した。また支間中央の変位を測定し、支間中央の各層および継手部付近に貼り付けたゲージ長30mmのひずみゲージによりひずみを測定した。破壊試験では、予想破壊荷重 P_{max} の1/3まで载荷および除荷した後に $2/3P_{max}$ まで载荷および除荷し、最終的に破壊するまで载荷した。

3. 解析モデル

解析の対象となるモデルを図-2に示す。曲げ試験を行った試験体と同様のモデル

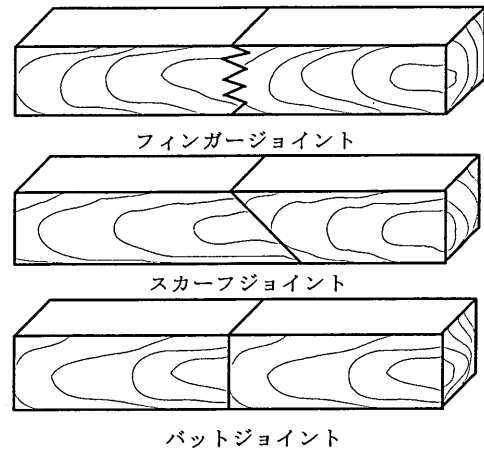


図-1 ラミナの継手

表-1 試験体のヤング係数とバットジョイント

試験体 ケース	ヤング係数 E_x (N/mm ²)	バットジョ イント数	バットジョイ ント位置
1-0	9030	無	
1-1	8310	1	下縁1層目
1-2	9250	1	下縁より2層目
1-3	8850	1	下縁より3層目
1-4	9050	1	下縁より4層目

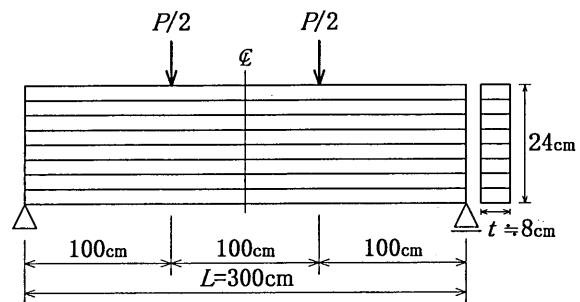


図-2 解析モデル

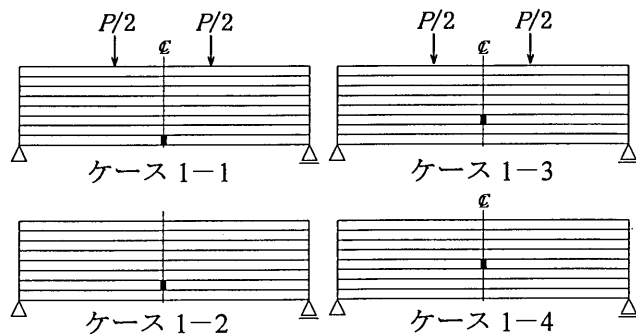


図-3 各ケースのモデル

で、支間 300cm の杉集成材はりである。ラミナ 1 枚の厚さは 3cm であり、これを 8 枚積層接着している。この部材を曲げ試験体と同様に、単純支持している。はり幅は、試験体によって多少の違いがあるが、おおよそ 8cm である。曲げ破壊試験と同様の載荷方法で、3 等分点 2 点荷重法を用いて FEM 解析を行う。

4 ケースの解析モデルを図-3 に示す。ケース 1-1 は、支間中央部の引張下縁側 1 層目にバットジョイントを設けたモデルで、同様にケース 1-2 は下縁側 2 層目に、ケース 1-3 は下縁側 3 層目に、ケース 1-4 は下縁側 4 層目にそれぞれバットジョイントを 1 つ設けたモデルである。ケース 1-1 におけるバットジョイントを含む下縁層のラミナは、集成材を構成する外層用ラミナに相当する。同様にケース 1-2 のバットジョイントを含むラミナは中間層用ラミナに、ケース 1-3 とケース 1-4 のバットジョイントを含むラミナは内層用ラミナに相当する。

要素分割数は図-4 に示すように、支間方向を 240 分割、高さ方向を 64 分割して要素数は 15360 になる。これは各ケースで共通である。また節点数は、バットジョイントを配置すると多くなるが、バットジョイントを設けないケース 1-0 や各ケースにおけるバットジョイントを含まないモデルは節点数が 15665 になる。

バットジョイント部における要素分割と節点を図-5 に示す。8 枚のラミナを高さ方向に 64 分割しているので、BJ 部は 8 分割されている。ケース 1-1 のように最下層にバットジョイントを設けた場合、ラミナの境界部分は共有させ、その下を独立させている。ケース 1-2 のように内層部にバットジョイントを設ける場合は、上下の境界部分を共有し、その間の部分を独立させている。また、接触点で貫通が生じない接触問題として解析を行う。

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 次元解析を行った。表-2 に解析で用いた集成材の弾性係数とポアソン比を示すが、繊維方向のヤング係数 E_x は表-1 の値を用い、繊維に直角方向の E_y と E_z は E_x の $1/25$ ²⁾ と仮定し、せん断弾性係数は E_x の $1/15$ ²⁾ とした。表中の ν_y は $\nu_x \cdot E_y / E_x$ から得られる値である。

図-6 に応力とひずみの関係を示す。直応力とひずみは引張側で線形、圧縮側で完全弾塑性モデル¹¹⁾¹²⁾を採用し、せん断応力とせん断ひずみは圧縮側および引張側で完全弾塑性モデルと仮定して解析を行った。また、圧縮側の一部が塑性化した後の

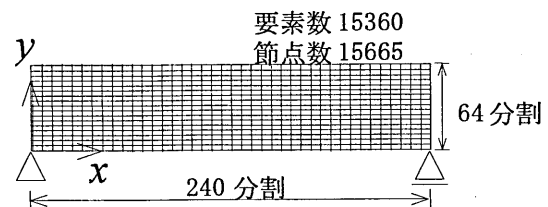


図-4 メッシュ分割

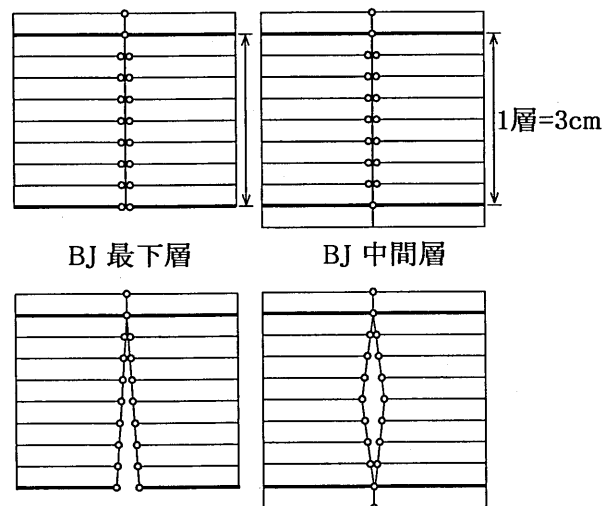


図-5 BJ部における節点

表-2 材料特性

ヤング係数 (N/mm ²)	$E_x = 9000$
	$E_y = E_z = E_x / 25$
ポアソン比	$\nu_x = 0.4$
	$\nu_y = \nu_z = 0.016$
せん断弾性係数 (N/mm ²)	$G = E_x / 15$

連立非線形方程式の解法にはニュートン・ラプソン法を用いている。初期降伏と見なした応力は、各試験体で異なるが直応力では圧縮側で 29N/mm^2 前後の値に、せん断応力はせん断基準強度の公称値²⁾である 0.9N/mm^2 の2倍である 1.8N/mm^2 に設定した。

5. 実験結果および解析結果

5.1 ケース 1-1

各試験体の曲げ破壊試験結果を表-3に示す。支間中央部の引張下縁側1層目にバットジョイントを設けたケース 1-1 の荷重-たわみ曲線を図-7に示す。また、ヤング係数が8%程度大で、バットジョイントの無いモデルであるケース 1-0 における荷重-たわみ曲線も参考のために図-8に示す。図中の P_y は実験結果から推定した初期降伏時における荷重であり、 σ_y は P_y から求めた圧縮縁の弾性解の曲げ応力である。 P_u は終局時における荷重であり、 σ_u はFEM解析から得られる引張縁の終局応力である。この応力 σ_u はケース 1-0 の初期降伏応力 σ_y の57%にあたるため、初期降伏応力に達する前に破壊したと考えられる。

試験体の破壊状況は、バットジョイント部と隣接している下縁から1層目と2層目の接着層から水平クラックを生じて破壊に至っており、最大荷重はケース 1-0 の44%と小さい。これは、以下で説明するせん断応力図においても、解析結果がせん断破壊の可能性を示唆している。また図-7の実線はバットジョイント部を考慮した解析値で、破線はケース 1-0 と同様にバットジョイントが無い場合の解析値である。図-7の黒丸の実験値は $P=20\text{kN}$ 付近から非線形性が見られるが、これは下縁から1層目と2層目の接着層の水平クラックの影響によるものと思われる。実線と破線の計算値より、たわみに及ぼすバットジョイントの影響は8%となっている。

図-9にケース 1-1 の支間中央における断面内ひずみ分布を示す。縦軸は8層ある断面高の各層を示して、ラミナ1層

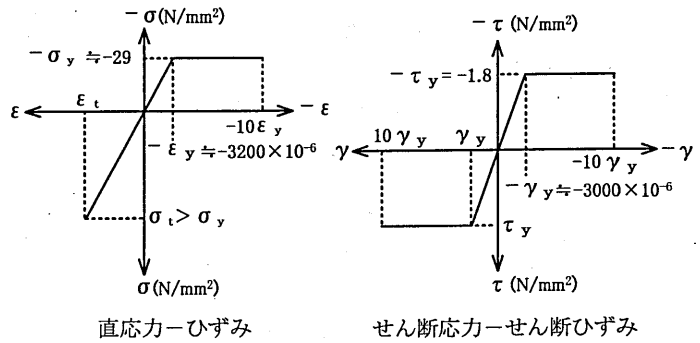


図-6 応力-ひずみ関係

表-3 曲げ破壊試験結果

試験体 ケース	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm^2)	最大荷重比 (1-0 との比較)
1-0	57.1	40.9	1.00
1-1	25.0	17.1	0.44
1-2	47.0	33.6	0.82
1-3	54.1	37.9	0.95
1-4	53.4	37.9	0.94

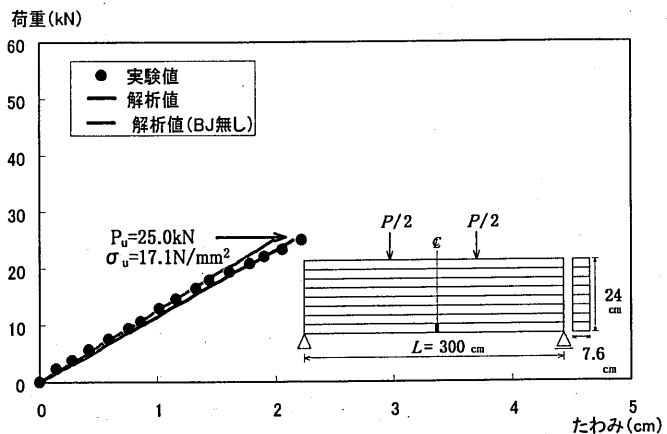


図-7 荷重-たわみ曲線 (ケース 1-1)

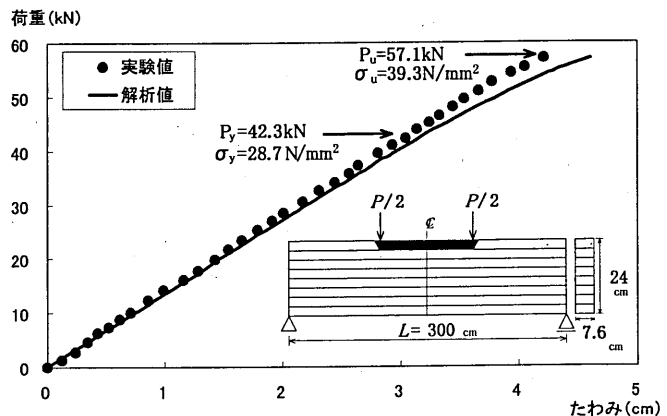


図-8 荷重-たわみ曲線 (ケース 1-0)

は 30mm である。また実験値は、各ラミナの接着層から 5mm 上の位置に設置したひずみゲージの結果をプロットしている。下縁側 1 層目における支間中央のバットジョイント部で、ラミナが切断されていることより下縁層のひずみは零になっており、ひずみの最大値は、水平クラックが生じた下縁から 1 層目と 2 層目の接着層に生じている。最大荷重時である 25kN の場合、局所的であるが 7000×10^{-6} 近くになっており、曲げ破壊が想定されるレベルの大きな応力集中が生じている。圧縮側においては、バットジョイントを考慮した実線の計算値と、バットジョイントが無い場合の破線の計算値および実験値は近似しており、BJ の影響は小さいと言える。

図-10 に、ケース 1-1 の FEM 解析結果による、各断面のせん断応力分布を示す。終局荷重 $P_{max} = 25\text{kN}$ 時の 3 つの断面を取りあげた。なお、センターラインを境にして左右対称の応力状態になっている。図中の③のセンターラインから 700mm の位置の断面について、この位置から右側のローラー支点部までは破線のより理論値とほぼ一致する応力分布である。一方で、バットジョイントを設けることにより、荷重点間にもせん断応力が発生している。特に、①のバットジョイント部近傍の断面では応力集中が顕著で、値としては③が 1N/mm^2 程度であるのに対して、負のせん断応力がおよそ理論値の 4 倍にも及ぶ値になっている。一般的なせん断基準強度の公称値である 0.9N/mm^2 に対して安全率は 3 であるが、3 倍の値である 2.7N/mm^2 を上回っている結果から、下縁側 1 層目と 2 層目の接着層でせん断破壊を起こしている可能性が高いと言える。また、②のセンターラインから 350mm 位置の断面では最大値でも 0.2N/mm^2 程度であり、センターラインから荷重荷点方向に進むにつれて、せん断応力の値が零にほぼ収束するような数値計算結果となっている。

5.2 ケース 1-2

支間中央部の引張下縁側 2 層目にバットジョイントを設けたケース 1-2 の荷重-たわみ曲線を図-11 に示す。 $P=42.1\text{kN}$ 付近から黒丸の実験値は非線形挙動を示し、試験体の終局時は支間中央付近の下縁部で曲げ破壊した。図中の実線で示した解析値は、圧縮側の初期降伏応力を 28.9N/mm^2 とした場合の弾塑性解析値で、実験値とほぼ同じ値を示している。また、バットジョイントの無い集成材の弾塑性解析値を破線で示しているが、実線と破線の計算値はほぼ一致しており、たわみに及ぼすバットジョイントの影響はほとんど見られない。ケース 1-0 と 1-1 のヤング係数が異なる

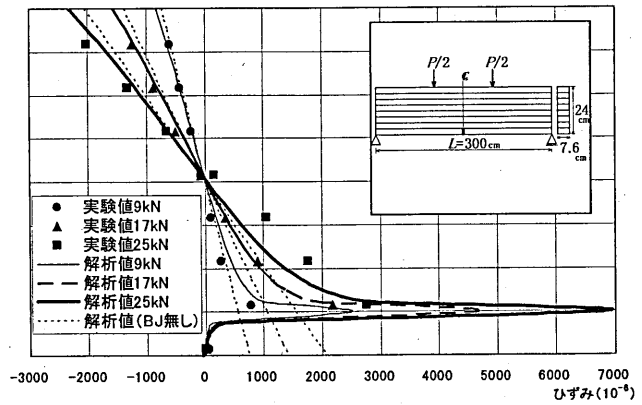


図-9 断面内ひずみ分布 (ケース 1-1)

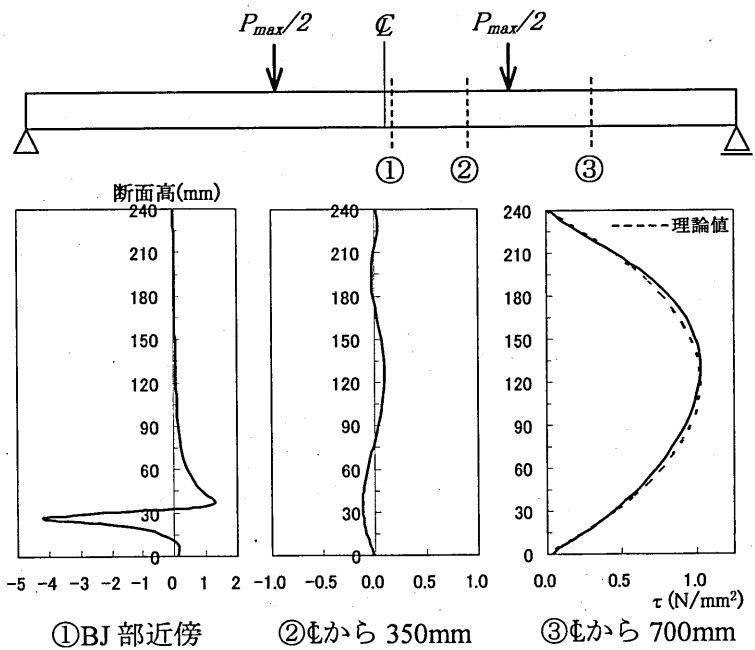


図-10 各断面のせん断応力分布 (ケース 1-1)

るために単純に比較はできないが、最大荷重はケース 1-0 の 82% であり、終局強度はやや低い。またこの時の塑性領域は、図で示している黒く塗りつぶされた部分であり、圧縮側上縁部において 1 枚目のラミナの 1/3 の深さまで達している。

ケース 1-2 の支間中央における断面内ひずみ分布を図-12 に示す。図-8 と同様に縦軸は 8 層ある断面高の各層を示している、バットジョイントは下から 2 層目である。バットジョイント部のひずみはほぼ零で、ひずみの最大値は BJ がある 1 層目と 2 層目の接着層に生じており、実線の値は破線で示したバットジョイント無しの値の 2 倍程度となっている。最下層のラミナと下から 3 層目のラミナにもバットジョイントの影響が出ているが、圧縮側においては実線と破線で示した計算値は、 $P_{max}=47.0\text{kN}$ 時の弾塑性状態でもほぼ等しい値となっていて、線形を示しているため影響は少ないと言える。

図-13 に、ケース 1-2 の FEM 解析結果による、各断面のせん断応力分布を示す。終局荷重 $P_{max}=47.0\text{ kN}$ 時の 3 つの断面を取りあげた。なお、センターラインを境にして左右対称の応力状態になっている。図中の③のセンターラインから 700mm の位置の断面について、ケース 1-1 と同様にこの位置から右側のローラー支点部までは、破線のほうは理論値とほぼ一致する応力分布である。一方、バットジョイントを設けることによりケース 1-2 も荷重点間にせん断応力が発生している。①のバットジョイント部近傍の断面では、③の最大値がおおよそ 2 N/mm^2 であるのに対して、はり理論値の 2 倍近くである 4 N/mm^2 前後の正と負のせん断応力が発生し、一般的なせん断基準強度の公称値である 0.9 N/mm^2 の 3 倍の値である 2.7 N/mm^2 を上回っている。この結果より、終局状態ではケース 1-2 も接着層でせん断破壊を起こす可能性もあるが、試験体の破壊状況では支間中央付近の下縁部で曲げ破壊しているため、ケース 1-1 と異なり接着層は十分に耐久していたと考えられる。②のセンターラインから 250mm 位置の断面では、最大値でも 0.3 N/mm^2 程度であるが、ケース 1-2 においてもセンターラインか

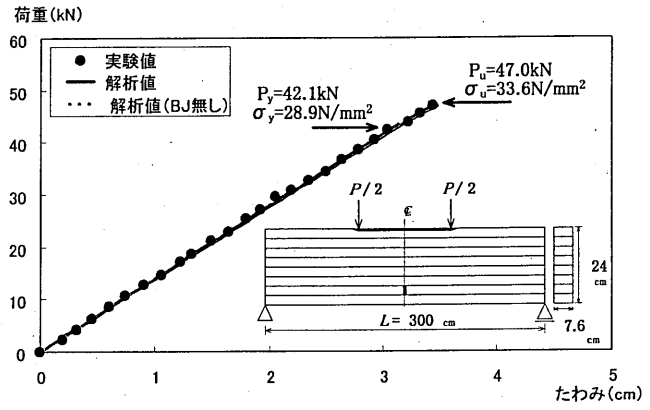


図-11 荷重-たわみ曲線 (ケース 1-2)

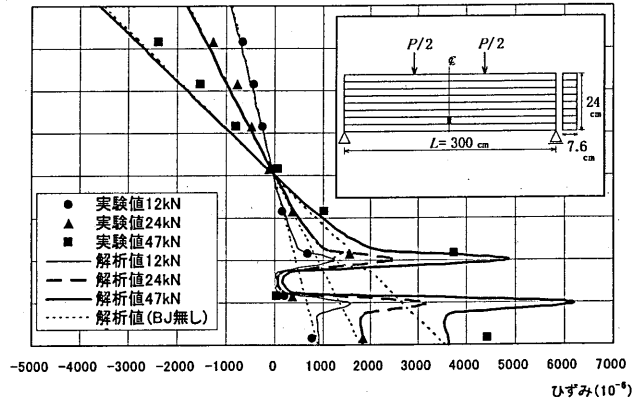


図-12 断面内ひずみ分布 (ケース 1-2)

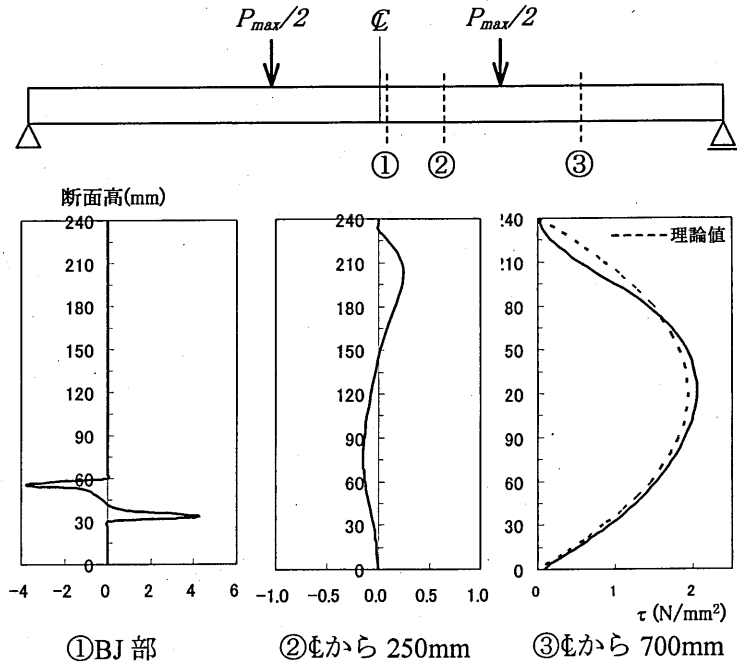


図-13 各断面のせん断応力分布 (ケース 1-2)

ら荷重載荷点方向に進むにつれて、せん断応力の値が零にほぼ収束するような数値計算結果となっている。

5.3 ケース 1-3

図-14 に、支間中央部の引張下縁側 3 層目にバットジョイントを設けたケース 1-3 の荷重-たわみ曲線を示す。図-11 に示したケース 1-2 と同様に実線と破線の計算値はほぼ一致しており、たわみに及ぼすバットジョイントの影響は弾性状態および弾塑性状態でも見られない。曲げ試験の最大荷重は、ケース 1-0 の 95%であるが、ケース 1-3 と 1-0 のヤング係数比は 0.98 である。これより、内層用ラミナにバットジョイントを設けても、変形と強度に及ぼす影響は無視できる程度と考えられる。またこの時の塑性領域は、図で示している黒く塗りつぶされた部分であり、圧縮側上縁部において 1 枚目のラミナの全域に達している。

ケース 1-3 の支間中央における断面内ひずみ分布を図-15 に示す。縦軸は 8 層ある断面高の各層を示していて、バットジョイントは下から 3 層目である。図-12 に示したケース 1-2 と同様に、バットジョイント部のひずみはほぼ零である。最大値は下から 2 層目と 3 層目の間の接着層に生じており、実線の値は 4600×10^{-6} になっているが、図-12 に示したケース 1-2 の最大値の 74% 程度に留まっている。下から 2 層目のラミナと 4 層目のラミナにもバットジョイントの影響が出ているが、それ以外のラミナにおいては実線と破線で示した計算値は、 $P_{max} = 54.0\text{kN}$ 時の弾塑性状態でもほぼ等しい値となっておりバットジョイントの影響は見られない。ケース 1-3 と同様に、内層用ラミナに BJ を設けたケース 1-4 の荷重-たわみ曲線を図-16 に示しているが、図-14 で示したケース 1-3 と終局荷重はほぼ同じで、たわみに及ぼす BJ の影響は見られない。

6. あとがき

支間中央にバットジョイントを 1 箇所設けたケース 1 の場合、引張下縁の外層用ラミナにバットジョイントを設けると、弾性状態の応力レベルから接合部周辺のラミナ間の接着層に水平クラ

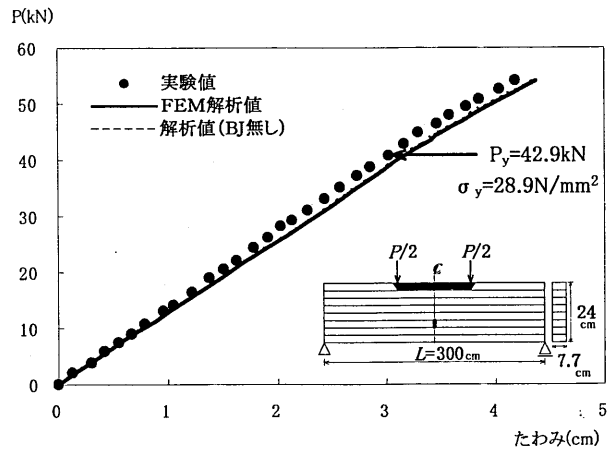


図-14 荷重-たわみ曲線 (ケース 1-3)

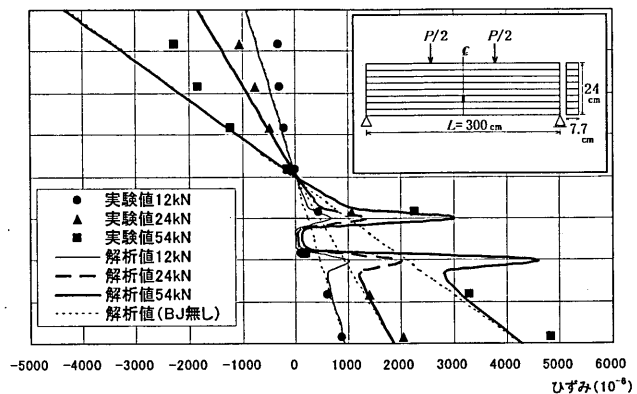


図-15 断面内ひずみ分布 (ケース 1-3)

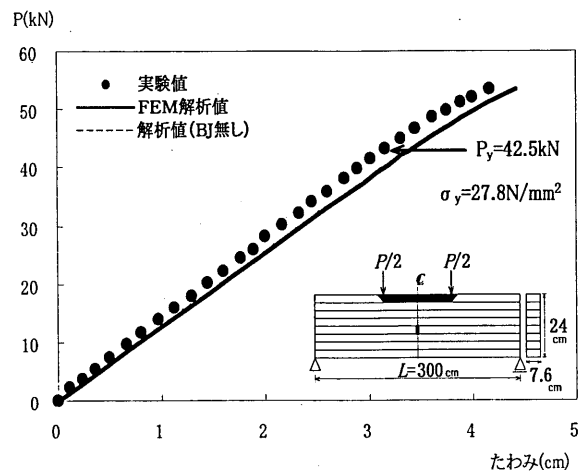


図-16 荷重-たわみ曲線 (ケース 1-4)

ックが生じ、たわみは非線形性を示す。また、バットジョイントが無い集成材との最大荷重比は0.44と強度の減少が著しい。中間層用ラミナと内層用ラミナにバットジョイントを設けた場合、破壊に至るまでたわみに及ぼすバットジョイントの影響は僅少で、最大荷重比は0.82および0.94と強度はやや減少するが、内層用ラミナにバットジョイントを使用しても曲げに対しては実用上問題無いと考えられる。

ラミナ間の接合部を接着接合していないのでラミナは切断された状態で、バットジョイント部のひずみはほぼ零となる。接合部からわずかに離れた部分のひずみは、バットジョイント部の接着層で最大値を示す。またラミナにバットジョイント部を設けることにより、バットジョイント部周辺にせん断応力が発生し、特に接着層でせん断基準強度の3倍を超える解析値が得られ、外層用と中間層用ラミナにBJを設けた場合、接着層周辺の木部で水平せん断破壊に対して留意すべきと考えられる。

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，2003.
- 2) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，2003.
- 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) 薄木征三，古村崇，佐々木貴信，長谷部薫：プレストレスLVL床版橋の弾性およびクリープ挙動に関するモデル実験，構造工学論文集，Vol.43A，pp.1111-1120，1997.
- 5) 長谷部薫，薄木征三：プレストレスLVL床版の構造特性：構造工学論文集，Vol.44A，pp.1125-1131，1998.
- 6) Ritter, M. ed. : Timber Bridges-Design, Construction, Inspection and Maintenance, Engineering Management Series, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990.
- 7) 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.
- 8) 長谷部薫，薄木征三，佐々木貴信：プレストレス木床版の曲げ挙動に及ぼすバットジョイントの影響，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1185-1192，2001.
- 9) Malhotra, S. K. and Bazan, I. M. M. : Ultimate Bending Strength Theory for Timber Beams, Wood Sci. Vol.13, No.1, pp.50-63, 1980.
- 10) 長谷部薫，薄木征三，飯島泰男，藤原直之：異樹種複集合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.
- 11) Zakic, B.D. : Shearing Stress in Plastic Bending of Wood Beams, Jour. of the Struct. Engrg., ASCE, Vol.109, No.4, pp.1042-1060, 1983.
- 12) Buchanan, A.H. : Combined Bending and Axial Loading in Lumber, Jour. of the Struct. Engrg., ASCE, Vol.112, No.12, pp.2592-2609, 1986.