

## 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

Effect of but joint on bending behavior of prestressed laminated timber deck

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

The concept of prestressed laminated timber for bridge applications developed in Canada in the late 1970's was introduced to the United States at the middle of 1980. This bridge decks consist of lumber or glulam laminae transversely posttensioned by high-strength steel bars anchored against steel bearing plates. Lumber or glulam components with end-to-end butt joints are often used to span the length of the bridge. The presence of butt joints reduces the bending stiffness of the deck. Bending stiffness adjustment factors for this decks have been proposed by Ritter and Jaeger. This paper presents a experimental study on the bending stiffness of prestressed laminated decks with butt joints. Two but joint patterns are tested in two point loading.

*Key Words : prestress, timber deck, butt joint*

## 1. まえがき

プレストレス木床版は、製材ラミナを用いた釘打ち積層床版を補強するために1970年代にカナダで開発されたもので<sup>1)</sup>、設計法や施工法はオンタリオ州の道路橋示方書 (OHBCD)<sup>2)</sup>に取り入れられている。さらに、1980年代にアメリカでも試験的に短支間の床版橋として架設されるようになりAASHTO<sup>3)</sup>で標準化されており、最近ではヨーロッパ共通基準のEurocode 5<sup>4)</sup>でも取り扱われている。その後、製材ラミナでは断面と長さおよび橋長に制約があることから集成材ラミナを用いた床版橋がアメリカで研究されている<sup>5)</sup>。我が国でも最近単径間の木床版橋<sup>6)</sup>や4径間連続木床版橋<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>。

この木床版は、ラミナ (製材ラミナあるいは集成材ラミナ) を橋軸方向に敷き並べ、床版厚さの中心の幅員方向に貫通する孔にプレストレス鋼棒 (PS鋼棒<sup>9)</sup>) を挿入し、これに横締めプレストレスを与えることにより一体とした構造であり、幅員方向のラミナ間には一般に接着材を使用しない。橋長が20m以上のプレストレス木床版橋では、部材の製作上の制限や輸送上の制限からラミナの橋軸方向への縦継ぎにバットジョイント (木口面の突きつけ継手) を用いるのが一般的<sup>9)</sup>であり、バットジョイント部には接着剤を使用しない。プレストレス木

床版の簡易設計法<sup>9)</sup>で用いられているバットジョイントに対する規定は、隣接するラミナのバットジョイント間の橋軸方向の距離は120cm (4 ft)以上で、幅員方向の同一線上に配置されるバットジョイントは4本以上のラミナに1カ所と制限されており、我が国でもこの規定を準用している。バットジョイントを設けない木床版の場合、橋軸方向 (繊維方向) のヤング係数はプレストレス力に無関係で、木床版を構成する全ラミナの平均値が用いられるが、バットジョイントを有する場合バットジョイントが木床版の曲げ剛性を減少させる。Jaegerら<sup>10)</sup>はバットジョイントを断面欠損として仮定し、バットジョイント数と曲げ剛性の関係を理論的に導いてバットジョイント係数を提案しており、OHBCDやAASHTOで採用されている。Davalosら<sup>11)</sup>はバットジョイントの配置が異なる3種類のプレストレス木床版を用いた室内実験により、Jaegerらが提案したバットジョイント係数が妥当であることを示している。

著者らは、秋田県内の林道に架設された杉集成材を主材料としたプレストレス木床版橋<sup>9)</sup>の1/2モデルを用い、ラミナに作用する圧縮応力を変化させたときのたわみに及ぼすプレストレス力損失の影響および集成材ラミナ間に作用する必要圧縮応力を明らかにした。また、幅員方向の曲げに対するヤング係数とせん断弾性係数に及ぼすプレストレス力損失の影響<sup>12)</sup>およびプレストレス木床版

の簡易設計法で用いられている有効幅と、プレストレス力の設計値について報告している<sup>13)</sup>。

本論文では、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に関し、実橋の現場載荷試験とバットジョイントの配置が異なる2種類のモデル試験体を用いた室内模型実験を行い、プレストレスレベルを変化させてプレストレス木床版の曲げ剛性に及ぼす影響を考察する。

## 2. 7 径間連続プレストレス木床版の現場実験

平成11年3月に秋田県協和町荒川沢内水沢線に完成したスギ集成材タイドアーチ橋「百目石橋」は、同型式のアーチ橋としては国内最大の規模であり、橋床にスギ集成材を使用したプレストレス木床版が採用されている。

図-1に「百目石橋」の一般図を示す。橋長20.9m、幅員5mのA活荷重で設計された木道路橋である。アーチリブと床版部材にはスギ集成材を使用し、床桁とタイにはSMA400Aの耐侯性鋼材が用いられている。アーチの支間長20m、ライズ3.3mで自立式アーチとなっており、吊り材と床桁間隔は支点側3mで支間中央部2.8m

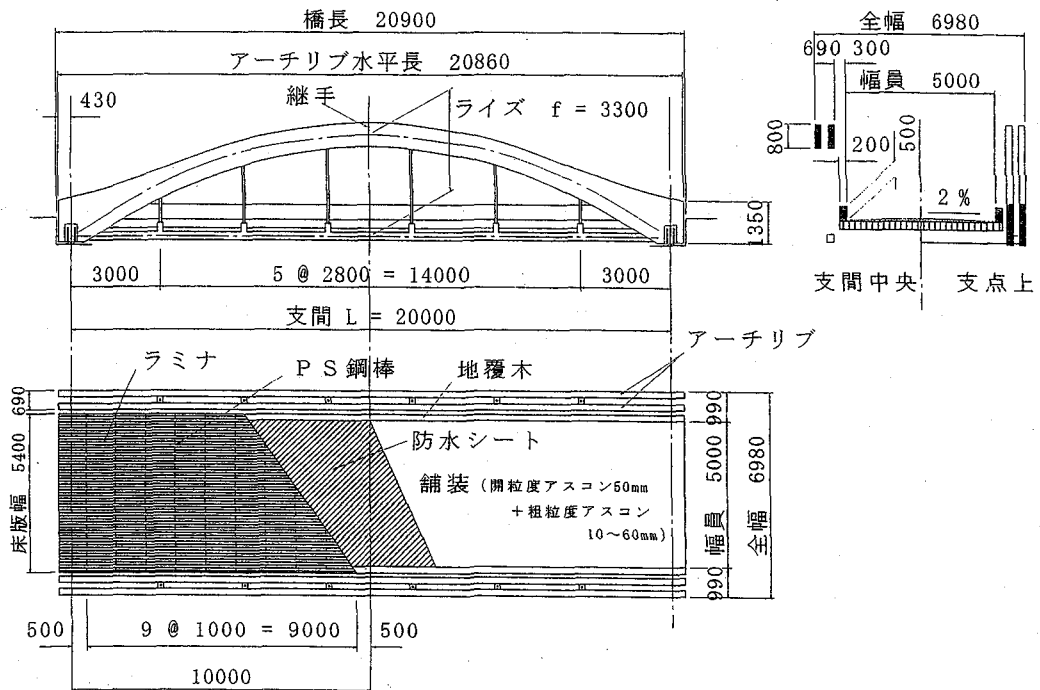


図-1 タイドアーチ橋一般図

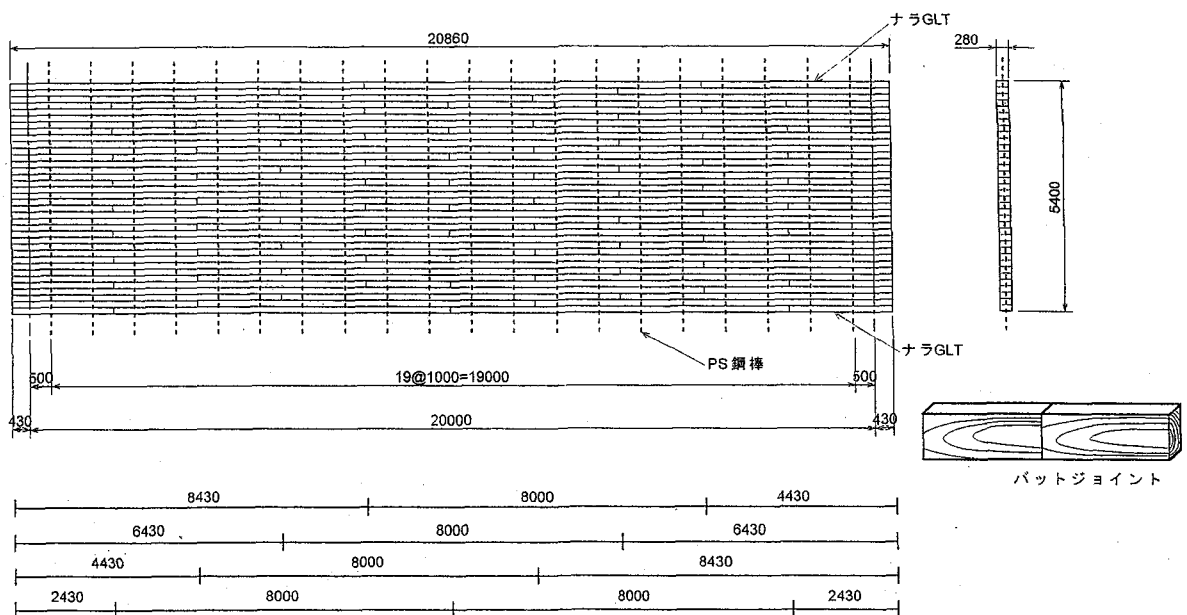


図-2 バットジョイント配置図

であり、支点部にはゴム支承が用いられている。

プレストレス木床版は、8本の床桁上で支持されており、床桁を支点とする7径間連続床版となっている。床版幅5.4m、床版厚28cm、PC鋼棒と同じB種2号でφ21mmのPS鋼棒の橋軸方向の間隔は1mで20本配置され、定着部にはφ151×32のアンカープレートと300×270×20の支圧板を用いている。図-2にバットジョイントの配置を示すが、集成材ラミナは、15×28cmの断面で長さ2.43m、4.43m、6.43m、8.0m、8.43mの5種類使用しており、支圧板と接する床版端部にはナラ集成材を各1枚使用して繊維直角方向のめり込みを防止している。

図-3に床版と床桁の支持部の詳細図を示しているが、床版上部から貫通させたボルトを支持金具を用いて床桁

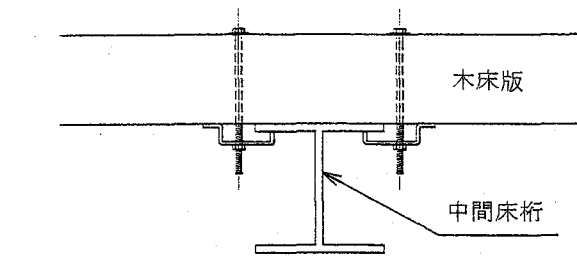


図-3 床版と床桁の支持

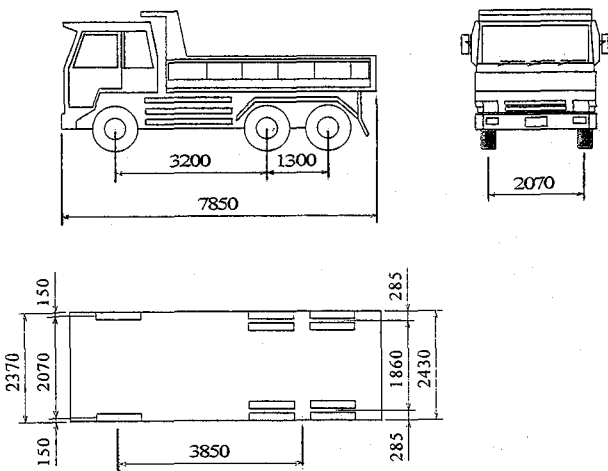


図-4 試験車両

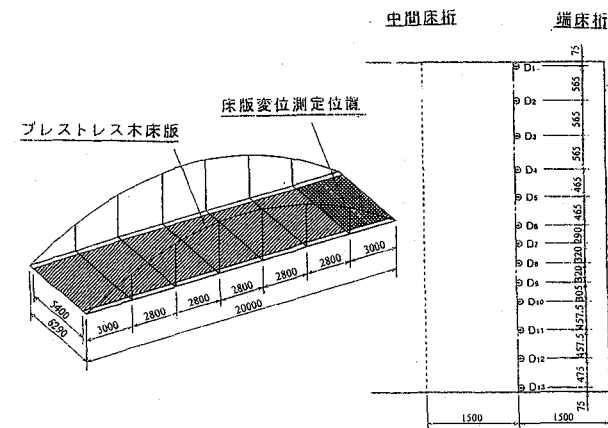


図-5 変位の測定位置

と連結させており、幅員方向に千鳥配置で22個の支持金具を用いている。

図-4に静的載荷試験に用いた試験車両を示す。積載後の後輪軸重16.3tf、前輪軸重5.3tfで総重量21.6tfのダンプトラック1台を用いて、各床桁間中央に後輪軸中心が位置するように静止させて載荷試験を行った。図-5に変位の測定位置を示しているが、床桁間隔が長い端径間部を対象として測定を行った。13本の単管を端床桁と中間床桁上で橋軸方向に単純支持し、ゴム支承部の支点沈下の影響も考慮できるように、単管上に変位計を設置して端床桁と中間床桁からの床版の相対変位を測定した。

図-6は、前輪が橋面上になく後輪荷重だけを端径間の中央に、かつ片側の後輪中心を車道部分の端部から35cmとして載荷させたときの端径間中央における床版の変位を示したものである。図中の白丸は実験値で実線と破線は計算値を示している。計算に用いた弾性係数を表-1に示す。表中のFullは架設時を示し、Lossはプレストレス力が60%損失<sup>9)</sup>した場合に相当する。また、橋軸方向のヤング係数 $E_x$ は縦振動法から得られた実測値で、

表-1 弾性係数

| Full <sup>14)</sup>                         | Loss <sup>9)</sup>                         |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $E_x = 85700 \text{ kgf/cm}^2$              | $E_x = 85700 \text{ kgf/cm}^2$             |
| $E_y = 0.04E_x = 3400 \text{ kgf/cm}^2$     | $E_y = 0.013E_x = 1100 \text{ kgf/cm}^2$   |
| $G_{xy} = 0.067E_x = 5700 \text{ kgf/cm}^2$ | $G_{xy} = 0.03E_x = 2600 \text{ kgf/cm}^2$ |
| $\mu_x = 0.4, \mu_y = 0.016$                | $\mu_x = 0.4, \mu_y = 0.005$               |

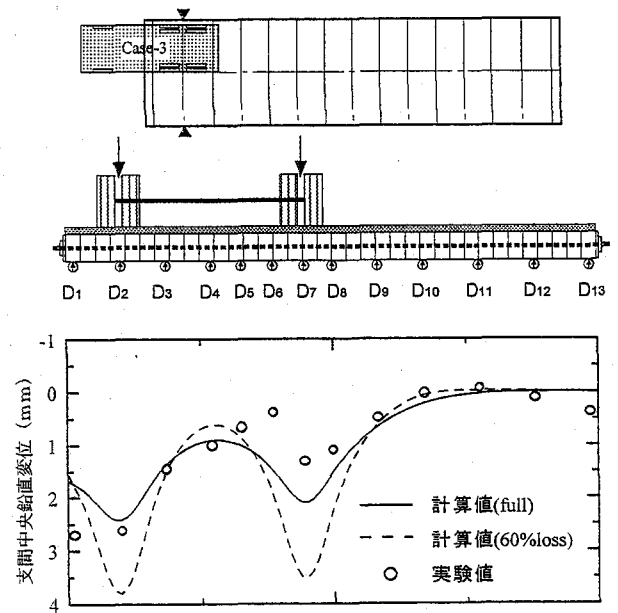


図-6 たわみ分布図

床版を構成する集成材ラミナの平均値である。橋軸直角方向のヤング係数  $E_y$  とせん断弾性係数  $G_{xy}$  は、集成材の設計計算で用いられている関係式<sup>14)</sup> (Full) とプレストレス木床版の設計で用いられている関係式<sup>9)</sup> (Loss) を採用し、プレストレス木床版を直交異方性板と見なして FEM 解析を行った。7 径間連続床版を対象として 1 端ヒンジ他端ローラーの支持条件で、シェル要素の板厚は床版厚とし汎用有限要素解析プログラム MSC/NASTRAN を使用して解析した。架設時のプレストレス力は 19tf で、架設時から 5 ヶ月後の実験時のプレストレス力は 9.5～11.4tf でありプレストレス損失は 40～50% となっているが、図-6 の実験値は架設時のバットジョイントを無視した実線の計算値に類似しており、プレストレス損失と

バットジョイントの影響は見られない。

図-7 は、前輪も橋面上に静止している場合のたわみ分布図を示したものである。幅員端部で実験値が予想値より大きな値を示しているが、これは測定点近傍に設けられているバットジョイントの影響による局所的な変形と考えられるが許容たわみ制限を  $L/500=0.6\text{cm}$  とすると最大たわみはこれを満足している。

図-8 は、後輪荷重だけを端径間の中央で幅員中央に載荷させたときのたわみ分布を示している。変位計 D6 の実測値は予想値より小さな値となっているが、実線で示したプレストレス損失のない架設時の計算値とほぼ同様な実測値が得られている。また、図-6 と同様にたわみに及ぼすプレストレス損失とバットジョイントの影響は

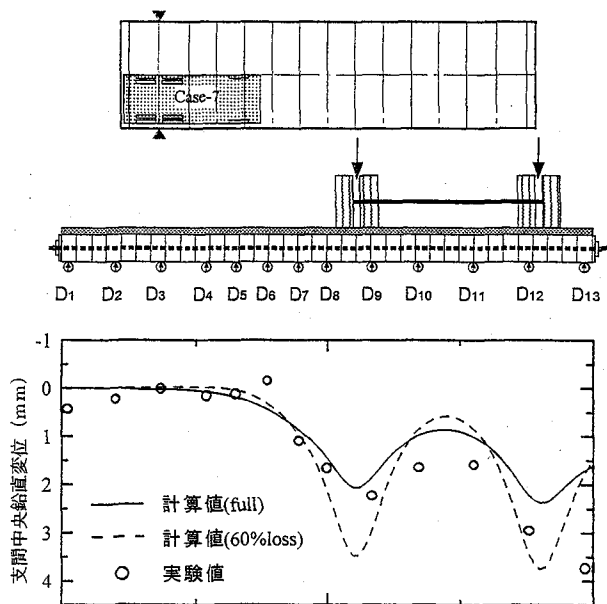


図-7 たわみ分布図

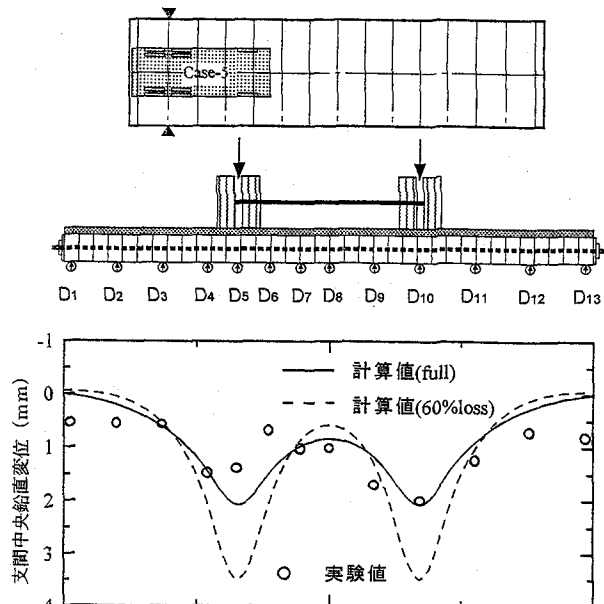


図-9 たわみ分布図

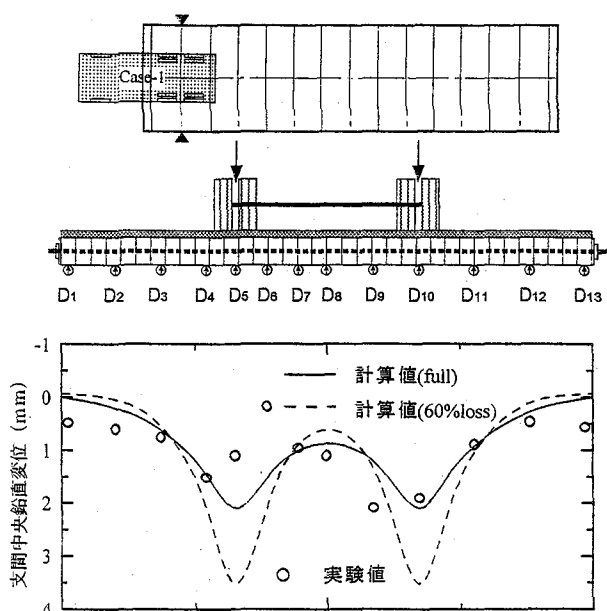


図-8 たわみ分布図

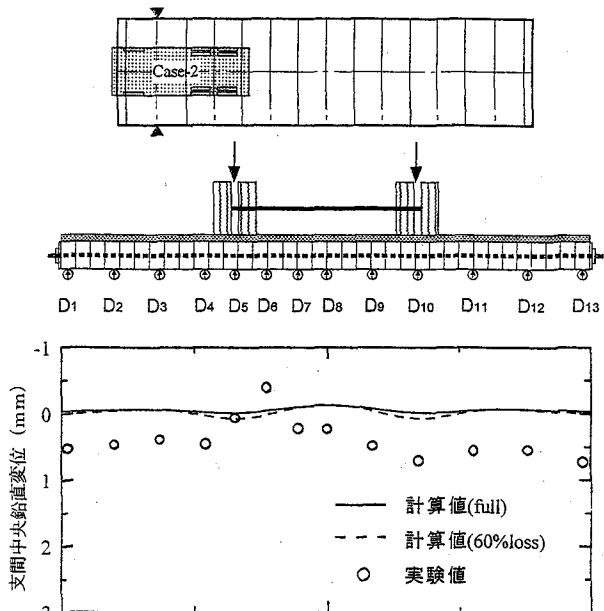


図-10 たわみ分布図

見られない。前輪も載荷させた場合の結果を図-9に示しているが、図-8の載荷状態に対する結果と最大たわみもほぼ等しい値となっている。

後輪荷重を端径間以外に載荷させた場合の一例として、第2径間の中央で幅員中央に載荷した場合の結果を図-10に示す。計算値は実線と破線ともにほとんどたわみが生じない値を示しており、実測値は計算値より大きく最大0.7mm程度のたわみが生じているが、図-8で示した最大たわみの21%と小さく、変位の測定法や中間支点の支持状態等によって生じる程度の値であり問題ないと考えられる。

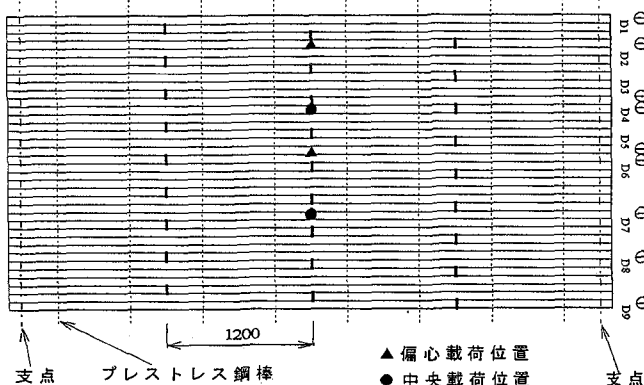


図-11 4BJ配置図

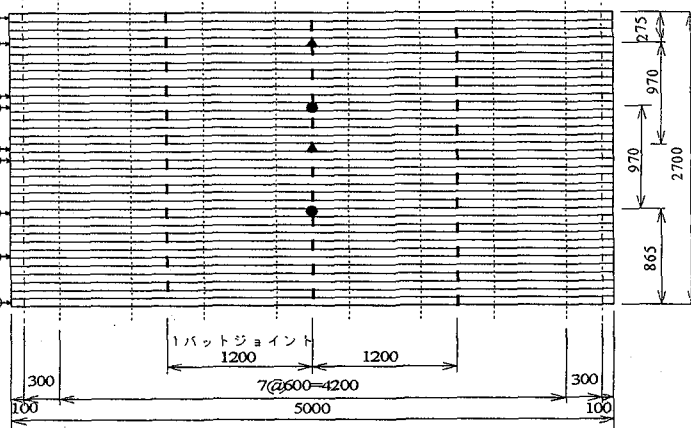
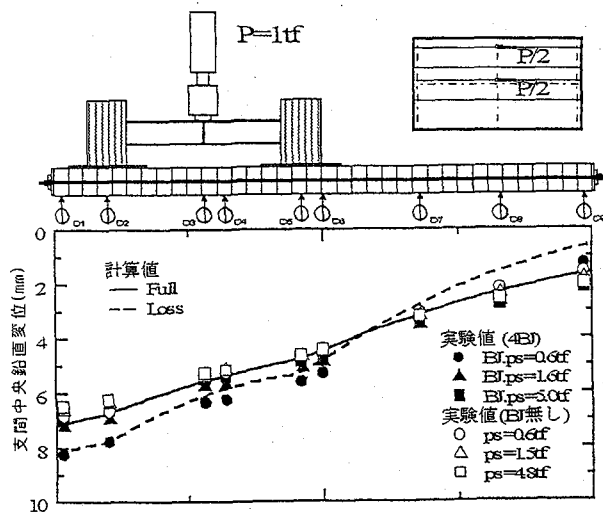
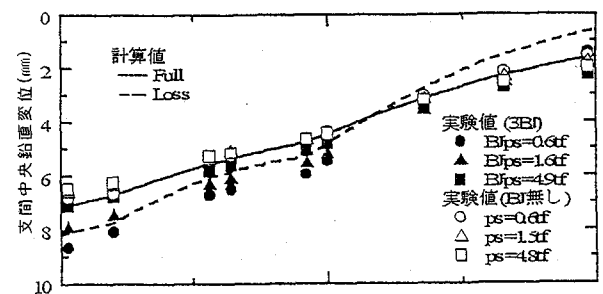


図-12 3BJ配置図



(a) 4 B J



(b) 3 B J

図-13 たわみ分布図 (偏心載荷)

### 3. 室内模型実験

#### 3.1 試験体および試験方法

2.で示した実橋の1/2モデル床版を用いて曲げ試験を行った。7.5×14×500cmのスギ集成材34枚を幅員方向に敷き並べ、床版厚中心に60cm 間隔で挿入した8本のφ13 P S鋼棒で集成材ラミナに圧縮力を作用させ、270×14×500cmの床版モデルを作成した。P S鋼棒の緊張作業は、2本のジャッキを用いて両端から支間中央部へ順に行うことで、アンカープレート(12.5×7.5×1.6cm)と支圧板(19×13.5×1.2cm)を介して均等なプレストレスの

導入を図っている。また、床版両端部にはナラ集成材1枚を使用し、プレストレスによる支圧板周辺のめり込みを防止している。使用した集成材ラミナのヤング係数の測定は縦振動法で行い、36枚の平均は84500kgf/cm<sup>2</sup>で用いた集成材の等級は、スギ集成材E75-F240<sup>15)</sup>(ヤング係数  $E_x = 75000\text{kgf/cm}^2$ 、曲げ強度  $240\text{kgf/cm}^2$ )に相当している。支間 4.8mの単純版を対象にして、支間中央部に後輪荷重を想定し、載荷点間97cmの2点載荷として実験を行った。幅員中央載荷で計 2 tf、幅員片側偏心載荷で計 1 tfとし、プレストレスをそれぞれ、0.6tf、1.6tf、4.9tf に変化させた。各載荷状態において支間中央部9箇所に変位計を設置し鉛直変位を測定した。実橋と同様に両端をゴム板で支持し、支点の沈下量を測定するために両支点上にも変位計を配置し、中央たわみの補正を行った。初めに、バットジョイントが無いラミナで構成した木床版の曲げ試験を行い、実験終了後プレストレスを解放し、構成ラミナである集成材を1.3m+3.7mおよび2.5m+2.5mに切断し、図-11に示すように1.2mのスパン内でラミナ4枚に1枚(4BJ)の頻度でバットジョイントが配置されるように再構成して実験を行った。次に図-12に示すように3枚に1枚(3BJ)の頻度で配置して再度実験を行った。

#### 3.2 結果および考察

表-2 弾性係数

| Full <sup>14)</sup>                         | Loss <sup>9)</sup>                         |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $E_x = 84500 \text{ kgf/cm}^2$              | $E_x = 84500 \text{ kgf/cm}^2$             |
| $E_y = 0.04E_x = 3400 \text{ kgf/cm}^2$     | $E_y = 0.013E_x = 1100 \text{ kgf/cm}^2$   |
| $G_{xy} = 0.067E_x = 5700 \text{ kgf/cm}^2$ | $G_{xy} = 0.03E_x = 2500 \text{ kgf/cm}^2$ |
| $\mu_x = 0.4, \mu_y = 0.016$                | $\mu_x = 0.4, \mu_y = 0.005$               |

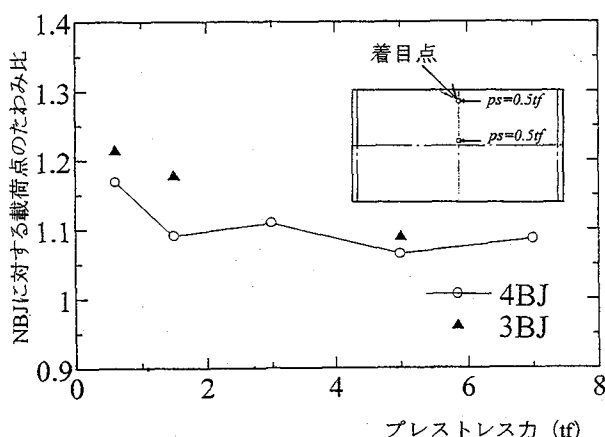
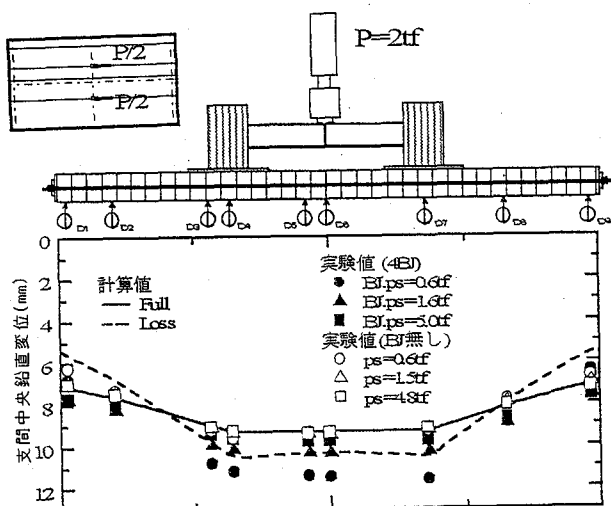
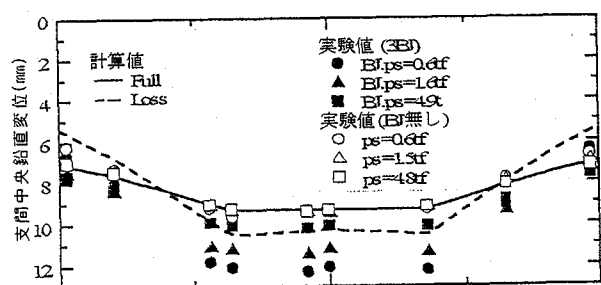


図-14 荷重点のたわみ比 (偏心荷重)



(a) 4BJ



(b) 3BJ

図-15 たわみ分布図 (中央荷重)

実験はそれぞれ3回ずつ弾性実験を行い3回目のデータを実験値として採用した。3BJ、4BJとバットジョイントの無い床版に対する実験結果を計算値とともに図-13と図-15に示す。図中の計算値はMSC/NASTRANによる平板解析値で、計算に用いた弾性係数を表-2に示す。表-1と同様に表中でFullは架設時で、Lossとはプレストレスが60%損失した場合を示す。単純版のFEM解析においてシェル要素の板厚は床版厚とし、要素数は952で計算した。モデルの設計荷重は、図-13の偏心荷重時のたわみ制限(支間/500)<sup>9)</sup>で支配され1.17tfである。これに対する設計プレストレス力は次式のラミナ側面に作用する必要圧縮応力 $N$ の大きい値から得られ、3.39tfとなっている。

$$N = \frac{6 M_y}{h^2} \quad (a) \quad N = \frac{1.5 V_y}{h \eta} \quad (b)$$

ここで、 $h$ は床版厚、 $\eta$ はラミナの摩擦係数であり、集成材ラミナのようにラミナ側面がプレーナ仕上げされている場合0.35である。(a)式は幅員方向の曲げモーメント $M_y$ によって床版下面に引張応力が生じないこと、(b)式はせん断力 $V_y$ によって隣接するラミナが滑らない条件から得られたものである。

図-13の偏心荷重荷重1tfは設計荷重1.17tfの85%とやや小であるがほぼ設計値に相当している。図中の実線は架設時、破線はプレストレス損失後に対する計算値を示しており、白のマークはバットジョイントが無い床版に対する実験値で、設計プレストレス力3.39tfに相当する図中のPS=4.8tf(設計値の40%大)から損失後のプレストレス力1.4tf(図中のPS=1.5tfが相当)、さらにPS=0.6tf(設計値の18%)と変化させてもたわみに及ぼすプレストレス力損失の影響は最大で5%程度である。図中の黒のマークはバットジョイントを有する木床版の実験値で、図-13(a)が4BJで(b)は3BJに対する結果を示している。図-13の実験結果より、バットジョイントを有さない床版の荷重点のたわみと4BJおよび3BJのたわみ比とプレストレス力の関係を図-14に示す。図より架設時からプレストレス力が60%損失するまでの実用範囲<sup>9)</sup>で、たわみに及ぼすバットジョイントの影響は4BJで10%前後、3BJで20%程度である。

図-15は幅員中央荷重に対する結果を示している。載荷荷重2tfは、たわみと曲げ応力に対して図-13の偏心荷重時の設計荷重にほぼ相当している。図中で、最大たわみを示す荷重点における実験値のたわみ比とプレストレス力の関係を図-16に示す。図よりバットジョイントの影響は、4BJの場合実用範囲では10%程度で図-14とほぼ同様であるが、3BJではプレストレス力損失後や大となっている。

文献9)のバットジョイントに対する規定は、図-17に

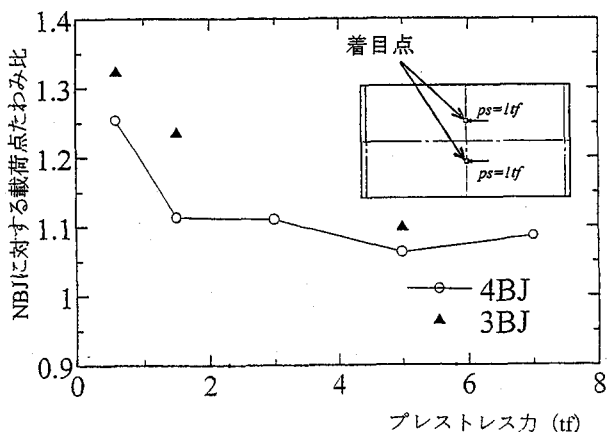


図-16 荷点のたわみ比（中央荷点）

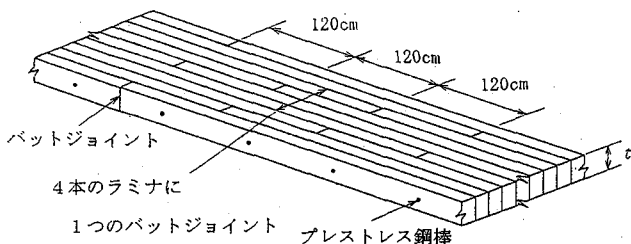


図-17 バットジョイントの配置

表-3 バットジョイント係数

| バットジョイント数/隣接ラミナ数 | 低減係数 |
|------------------|------|
| 1/4              | 0.80 |
| 1/5              | 0.85 |
| 1/6              | 0.88 |
| 1/7              | 0.90 |
| 1/8              | 0.93 |
| 1/9              | 0.93 |
| 1/10             | 0.94 |

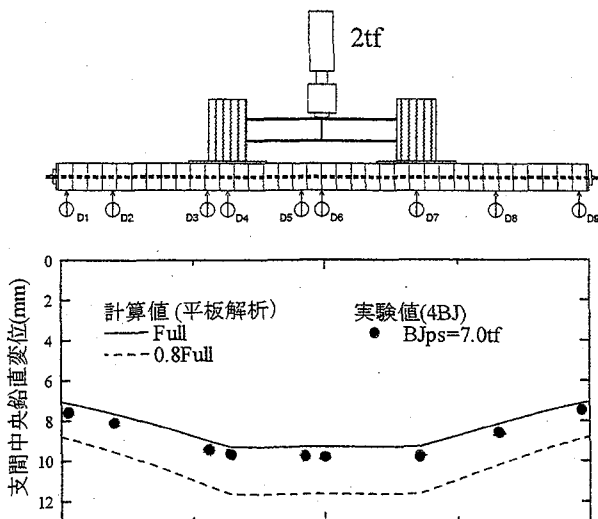


図-18 バットジョイント係数を用いたたわみ

示す橋軸方向（木材の繊維方向）の1.2m のスパン内で1つのバットジョイントが許容される隣接するラミナ数が4本以上である。表-3に隣接ラミナ数に対する低減係数を示しているが、4BJの場合、表-3の低減係数0.8を用いてヤング係数  $E_x$  を  $0.8E_x$  と補正し、直交異方性板をある有効幅を有する単純ばりとなし、たわみと応力照査を行う。図-18にバットジョイント係数を用いた平板解析値と実験値の関係を示す。図中の実線はバットジョイントが無い架設時の床版に対する計算値で、破線は  $0.8E_x$  とし、他の弾性係数を表-1と2の関係を用いて計算した架設時に対する値を示す。黒丸で示した4BJの実験値は実線の計算値より6%とやや大であるが、破線のバットジョイントを考慮した計算値の85%となっておりバットジョイントの影響は予想値より小さく、バットジョイント係数を用いて行う設計法は結果として安全側の設計を行うことになる。モデル試験で行った3BJは許容されていないが、図-15に示したように実験結果は低減係数を用いた4BJに対する計算値より小である。

#### 4. あとがき

プレストレス木床版のラミナの縦継ぎに用いられるバットジョイントが木床版の曲げ挙動に及ぼす影響について、実橋の現場荷重試験とモデル試験体を用いた室内模型実験を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) タイドアーチ橋の橋床として用いられた7径間プレストレス木床版の21.6tfトラックを用いて行った現場試験において、架設時の初期プレストレス力が40~50%損失した状態での最大たわみは、幅員中央荷点と偏心荷点ともにバットジョイントを考慮しない設計値と許容値を満足する値が得られ、たわみに及ぼすプレストレス力の損失とバットジョイントの影響は僅少であることが確認できた。

(2) 単径間プレストレス木床版の後輪荷重を想定して行ったモデル試験において、バットジョイントが無い木床版の曲げ挙動は、直交異方性版の解析値に近似した値が得られ、既往の報告と同様に、プレストレス力が60%程度損失してもたわみに及ぼす影響は実用上問題ないことが明らかになった。

(3) バットジョイントを有する単径間プレストレス木床版のモデル試験において、隣接するラミナ数のバットジョイント間距離を1.2mとして曲げ試験を行った結果、ラミナ4枚に1枚のバットジョイント（4BJ）を設けた場合、たわみに及ぼすバットジョイントの影響は、架設時の初期プレストレス力からプレストレス力が60%程度損失するまでの実用範囲で幅員中央荷点と偏心荷点ともに10%程度である。また、バットジョイントに対する低減

係数を用いた平板解析値は実験値より大きな値を示しており、一般的に行われている低減係数を用いた設計法は安全側の設計を行うことになる。

(4) ラミナ3枚に1枚のバットジョイントを設けたプレストレス木床版(3BJ)は許容されていないが、モデル試験の結果たわみに及ぼす影響は幅員中央載荷でプレストレス力損失後24%であり、低減係数を用いた4BJに対する計算値より小さな実験値が得られており、3BJのプレストレス木床版でも実用上問題ないと考えられる。

以上、単径間の木床版モデルを用いて曲げ挙動に及ぼすプレストレス力損失とバットジョイントの影響を考察したが、多径間連続木床版とバットジョイントを考慮したモデル解析については今後の課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 薄木征三, マイケル・リッター: プレストレス木床版橋の発展小史と現場試験, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp.1089-1100, 1993.
- 2) Ontario Highway Bridge Design Code, 1983 Edition, Ministry of Transportation of Ontario, Downsview, Ontario, Canada.
- 3) AASHTO: Guide Specifications for the Design of Stressed-Laminated Wood Decks, 1991.
- 4) Eurocode 5 -Design of Timber Structures- Part2 : Bridges, CEN/TC/250/SC 5, 1995
- 5) Wacker, J.P. and Ritter, M.A.: Field Performance of Timber Bridges, 1. Teal River Stress-Laminated Deck Bridge, Research Paper FPL-RP-515, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1993.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) (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.
- 9) Ritter, M.A. : Timber Bridges - Design, Construction, Inspection and Maintenance, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990.
- 10) Jaeger, L. G : Effect of butt joints on the flexural stiffness of laminated timber bridge, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.17, pp. 859-864, 1990.
- 11) Davalos, J.F., Kish, D.A., and Wolcott, M.P. : Bending Stiffness of Stress-Laminated Timber Decks with Butt Joints, Journal of Structural Engineering, Vol.119, No.5, 1993.
- 12) 長谷部薫, 薄木征三, 緑川哲夫: プレストレス木床版の構造特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp.1097-1102, 1997.
- 13) 長谷部薫, 薄木征三, 佐々木貴信: プレストレス木床版の有効幅とプレストレス, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp.1377-1383, 2000.
- 14) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 1995.
- 15) 日本合板検査会: 構造用集成材の日本農林規格, 1996.

(2000年9月14日受付)