

プレストレス木床版の変形挙動に及ぼすバットジョイントの影響

Effect of butt joints on deformation of prestressed laminated timber deck

長谷部薫* ○直井瑞明** 大口真司*** 薄木征三****
Hasebe Kaoru, Naoi Mizuaki, Oguchi Shinji and Usuki Seizo

*工博 秋田大学助教授 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

**工修 (株)栃木県用地補償コンサルタント (〒328-0012 栃木市平柳町 1-15-6)

***工修 (株)サクラダ (〒261-8511 千葉市美浜区中瀬 1-3MTG ビル)

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

ABSTRACT The present paper is concerned with the behavior of prestressed laminated timber deck with butt joints. 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 numerical study on the bending behavior of prestressed timber deck with butt joints.

Keywords : プレストレス、木床版、バットジョイント、接触解析
prestress, timber deck, butt joint, contact analysis

1. はじめに

プレストレス木床版は、1970年代に釘打ち積層床版の補強法としてカナダで考案され、現在までに単なる木床版橋としてばかりでなく、アーチ橋やトラス橋の床版等、広範囲に利用されている。製材ラミナまたは集成材ラミナを橋軸直角方向に敷き並べ、床版厚さの中心に設けた孔に、幅員方向に貫通するプレストレス鋼棒を挿入し、鋼棒を緊張することによりラミナに圧縮力を作用させて版構造としたものである¹⁾。ラミナとは本来は集成材を構成するひき板を意味するが、ここではプレストレス木床版を構成する最小単位の部材とする。支間が20m以上のプレストレス木床版では、部材の製作上の制限や輸送上の制限からラミナの支間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、BJ)を用いるのが一般的で²⁾、部材の長支間化、長尺化が可能であり、幅員方向のラミナ間および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²⁾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(4ft)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³⁾。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。Jaeger⁴⁾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、OHBC¹⁾やAASHTO⁵⁾で採用されている。Davalos⁶⁾らはバ

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、スギ集成材タイドアーチ橋「百目石橋」⁷⁾の橋床に用いられているスギ集成材を使用したプレストレス木床版を対象とし、現場載荷試験と2種類のモデル試験およびFEMによる接触解析を行い、曲げ挙動に及ぼすバットジョイントの影響について既に報告しているが^{7),8)}、本論文では、接触解析におけるラミナ間の摩擦係数とプレストレス力の関係、プレストレス木床版の曲げ応力と変位に及ぼすバットジョイントの影響、設計で用いられているバットジョイント係数について考察する。

2. プレストレス力と摩擦係数の関係

2.1 解析モデルと解析方法

プレストレス木床版の曲げ挙動に対しFEMの接触解析を行う場合、パラメータとなるラミナ間の摩擦係数とプレストレス力の関係を調べるために、7.5cm×14cm×500cmのバットジョイントのないスギラミナ5枚から成る図-1に示すモデル1を対象として解析を行った。鋼棒の間隔は、はり軸方向のラミナ厚中心部に60cm間隔で8本配置し、幅方向の集成材ラミナ間に圧縮力を作用させる。幅員方向のラミナ間の摩擦係数 μ を設計²⁾で用いられている0.35を基本とし、0.15, 0.35, 0.7と変化させ、プレストレス力も0から16kNまで変化させた場合の曲げ挙動を調べた。

支間4.8mで単純支持し、荷重条件は図-1に示すように500Nを支間中央部に2点、幅員中央のラミナのみ作用させた。解析に使用した材料特性を表-1に示す。はり軸方向の繊維に平行なヤング係数 E_x は実測値であり、845kN/cm²である。せん断弾性係数 G_x は $E_x/15$ ⁹⁾とし $G_x=G_y=G_z$ と仮定している。3次元ソリッド要素を用い、要素数と節点数はそれぞれ120、500で、ラミナ間の節点は図-2に示すように接触点で独立させ、接触問題としてFEM解析プログラムMSC/MARCを用いて解析を行った。

図-1に示す木床版ラミナの支間4.8m、幅員37.5cmをそれぞれ24分割、5分割し幅方向で中心となる3枚目のラミナの変形挙動に注目する。数値計算においてラミナ間の摩擦係数 μ を変化させ、鋼棒挿入部で支圧板によって木部に作用させる圧縮力Nの値を変化させたときの支間中央における幅員方向のたわみ分布図を以下に示す。

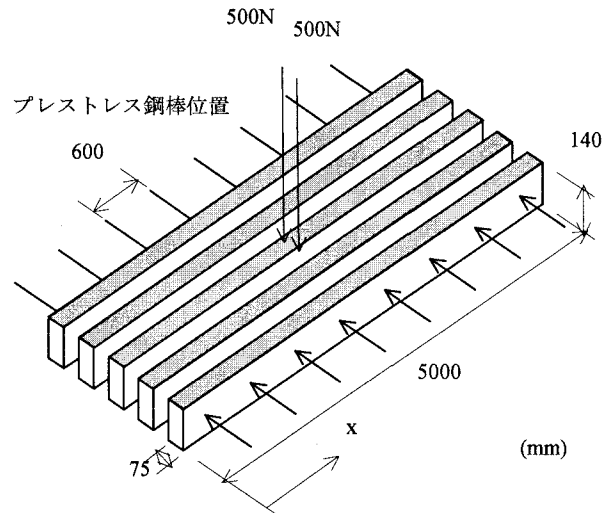


図-1 木床版ラミナ(モデル1)

表-1 材料特性

ヤング係数	$E_x=845\text{kN/cm}^2$ $E_y=E_z=0.04E_x=34\text{kN/cm}^2$
せん断弾性係数	$G_x=0.067E_x=56\text{kN/cm}^2$ $G_y=G_z=G_x=56\text{kN/cm}^2$
ポアソン比	$\nu_x=0.4$ $\nu_y=\nu_z=0.016$

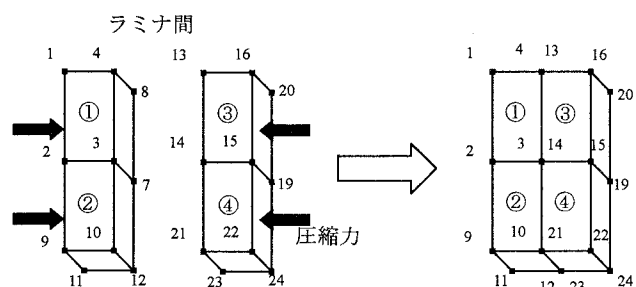


図-2 ラミナ間の節点の状態

2.2 解析結果および考察

図-3は、ラミナ側面をプレーナー加工した場合の摩擦係数 μ として一般に設計で用いられている $\mu=0.35$ の場合の解析結果で、図中の●印は5枚のラミナを1枚の板とした時の平板解析の値である。Nの値が0のときラミナ間にNに対する抗力は生じないので摩擦力は0となり、载荷している3枚目の中央ラミナだけが変形する。▲印のN=100Nは、ラミナ厚14cmと鋼棒間60cmで割ると木部に $0.1\text{N}/\text{cm}^2$ の平均圧縮応力が作用した状態で、ラミナ間の摩擦力により中央ラミナとともに左右のラミナもやや変形する。N=500Nと圧縮力を大きくすると●印の板の変位とほぼ同じ値となっており、板

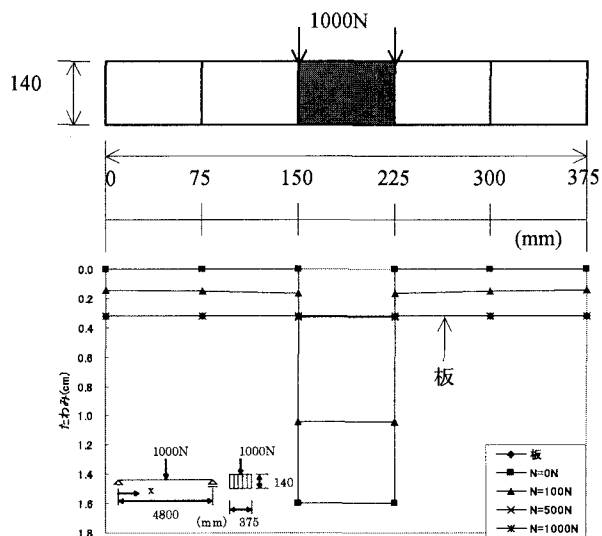


図-3 幅員方向たわみ図(支間中央、 $\mu=0.35$)

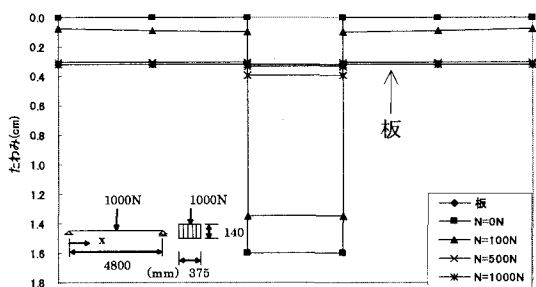


図-4 幅員方向たわみ図(支間中央、 $\mu=0.15$)

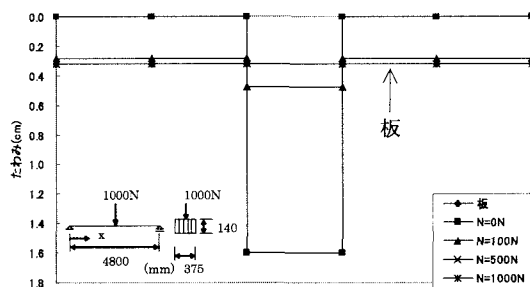


図-5 幅員方向たわみ図(支間中央、 $\mu=0.7$)

としての挙動を示すことがわかる。さらにN=1000Nと大きくしても変位は変わらず、このモデルの場合、木部に $1.0\text{N}/\text{cm}^2$ 程度の圧縮応力を用させると板としての挙動を示すと考えられる。また参考のため、図-4と5に $\mu=0.15$ と 0.7 に対する結果を示す。

図-3~5に対応する、幅員中央ラミナの下縁側応力の支間方向分布図と、支間中央における幅員方向の下縁側応力の分布を図-6~11に示す。また、板の最大たわみとの比を表-2に、板の最大応力との比を表-3に示す。表中で σ_{\perp} は木部に作用する繊維直角方向の圧縮応力を示す。

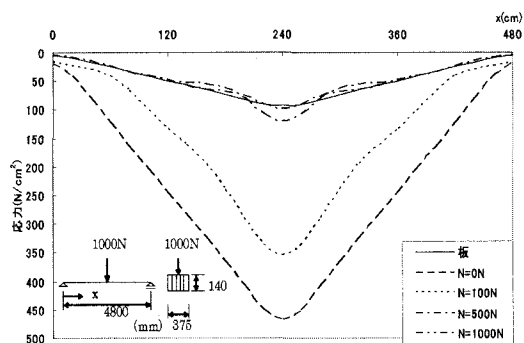


図-6 下縁側の応力(支間方向、幅員中央ラミナ、 $\mu=0.35$)

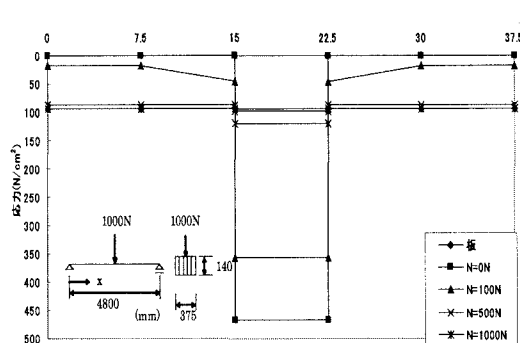


図-7 下縁側の応力(支間中央、幅員方向、 $\mu=0.35$)

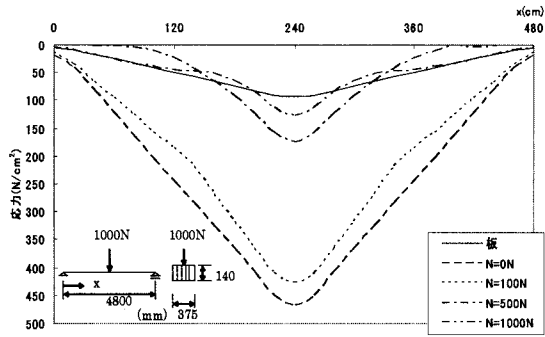


図-8 下縁側の応力(支間方向、幅員中央ラミナ、 $\mu=0.15$)

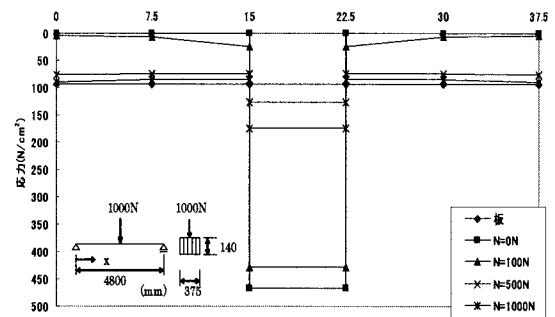


図-9 下縁側の応力(支間中央、幅員方向、 $\mu=0.15$)

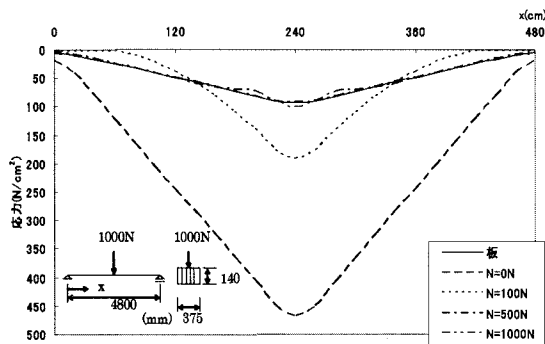


図-10 下縁側の応力(支間方向、幅員中央ラミナ、 $\mu=0.7$)

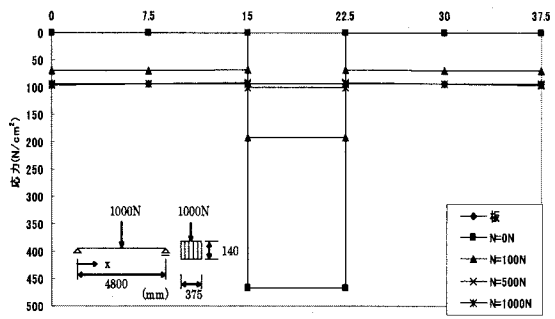


図-11 下縁側の応力(支間中央、幅員方向、 $\mu=0.7$)

表-2 板の最大たわみとの比

板	摩擦係数	最大たわみ(cm)	比
板		0.32	
N=0N ($\sigma_{\perp}=0\text{N/cm}^2$)	0.15	1.60	5.0
	0.35	1.60	5.0
	0.7	1.60	5.0
N=100N ($\sigma_{\perp}=0.1\text{N/cm}^2$)	0.15	1.37	4.3
	0.35	1.07	3.4
	0.7	0.47	1.5
N=500N ($\sigma_{\perp}=0.6\text{N/cm}^2$)	0.15	0.40	1.2
	0.35	0.33	1.0
	0.7	0.32	1.0
N=1000N ($\sigma_{\perp}=1.2\text{N/cm}^2$)	0.15	0.35	1.1
	0.35	0.32	1.0
	0.7	0.32	1.0

表-3 板の最大応力(下縁側)との比

板	摩擦係数	最大応力(N/cm^2)	比
板		94	
N=0N ($\sigma_{\perp}=0\text{N/cm}^2$)	0.15	467	5.0
	0.35	467	5.0
	0.7	467	5.0
N=100N ($\sigma_{\perp}=0.1\text{N/cm}^2$)	0.15	399	4.3
	0.35	332	3.5
	0.7	192	2.1
N=500N ($\sigma_{\perp}=0.6\text{N/cm}^2$)	0.15	174	1.9
	0.35	120	1.3
	0.7	101	1.1
N=1000N ($\sigma_{\perp}=1.2\text{N/cm}^2$)	0.15	138	1.5
	0.35	109	1.2
	0.7	94	1.0

3. パットジョイント係数

3.1 解析モデルと解析方法

プレストレス木床版を構成するラミナの場合、橋軸方向の縦継ぎにパットジョイント (BJ) が一般に用いられ長尺化が図られるが、ラミナの不連続のために強度面において欠陥部となり木床版の曲げ剛性を低下させる。しかし、BJを分散させることにより、母材長よりも長い版の形成が可能となり、任意の寸法版を造ることができる。

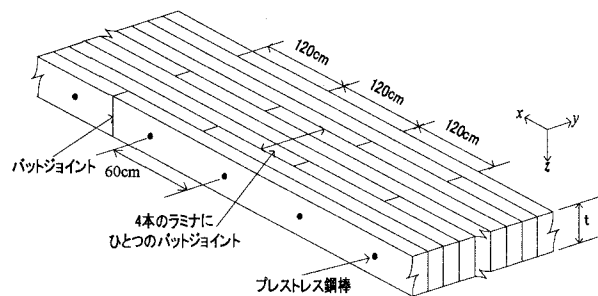


図-12 BJ基本図 (4BJ)

木床版において、幅員方向で n 枚のラミナに一つの BJ が配置されるように構成したものを n BJ と呼ぶと、BJ に対する規定²⁾では隣接するラミナ 4 本以上で木材の繊維方向 1.2m のスパン内に 1 つの BJ が許容されるとしている。例として 4BJ の木床版モデルを図-12 に示す。BJ がプレストレス木床版の変形と応力に及ぼす影響を考察するために、図-13 に示すように 4BJ から 9BJ までを対象とし、さらにそれぞれの BJ 数についてもいくつかパターンを設けて解析を行った。BJ を有する解析モデル 2 は、モデル 1 で用いたラミナと同じ $7.5\text{cm} \times 14\text{cm} \times 500\text{cm}$ のスギ集成材ラミナ 23 枚から成り、プレストレス鋼棒を図-1 に示すように橋軸方向に 60cm 間隔で 8 本配置し、一本の鋼棒部の支圧板に圧縮力 16kN を作用させて一体化した木床版を想定している。この解析モデルは、実橋⁷⁾のタイドアーチ橋の橋床に用いられた木床版の 1/2 モデル床版をはりて見なして設計するときの幅員に相当する。なお、500cm のラミナ 1 枚に設ける BJ は長さ方向に 1 箇所とし、木床版の支間中央部に BJ を配置した。

支間 4.8m で単純支持し、支間中央に 10kN を 23 枚のラミナに等分布 ($58\text{N}/\text{cm}$) させて載荷し、図-2 に示したようにラミナ間と BJ 部の接点を独立させて接触解析を行った。表-1 に示した弾性係数を用い、ラミナ間と BJ 部の摩擦係数は 0.35 を採用した。モデル 1 の解析と同様に MSC/MARC を使用し、FEM 解析の要素数は図-13 に示す 4BJ-①モデルの場合 2400 で接点数は 10280 である。

3.2 解析結果および考察

図-14 は、4BJ-①と②モデルの支間方向のたわみと応力の分布図で、図中の実線は $172.5 \times 14\text{cm}$ の長方形断面の BJ が無いはりに対する計算結果である。破線と点線は BJ を有する 4BJ-①と②モデルの接触解析値で、たわみおよび応力が最大値を示す幅員中央付近のラミナに対する結果を示している。たわみはほぼ対象分布を示しているが、BJ 部で応力は 0 で BJ 周辺で応力集中が生じることにより複雑な分布性状を示す¹⁰⁾。その他の例として、5BJ-①、②、③と 9BJ-①、②、③、④、⑤に対する結果を図-15 と 16 に示す。また、支間中央における幅員方向のたわみと応力分布の計算例を 4BJ モデルと 5BJ モデルに対して図-17 と 18 に示している。

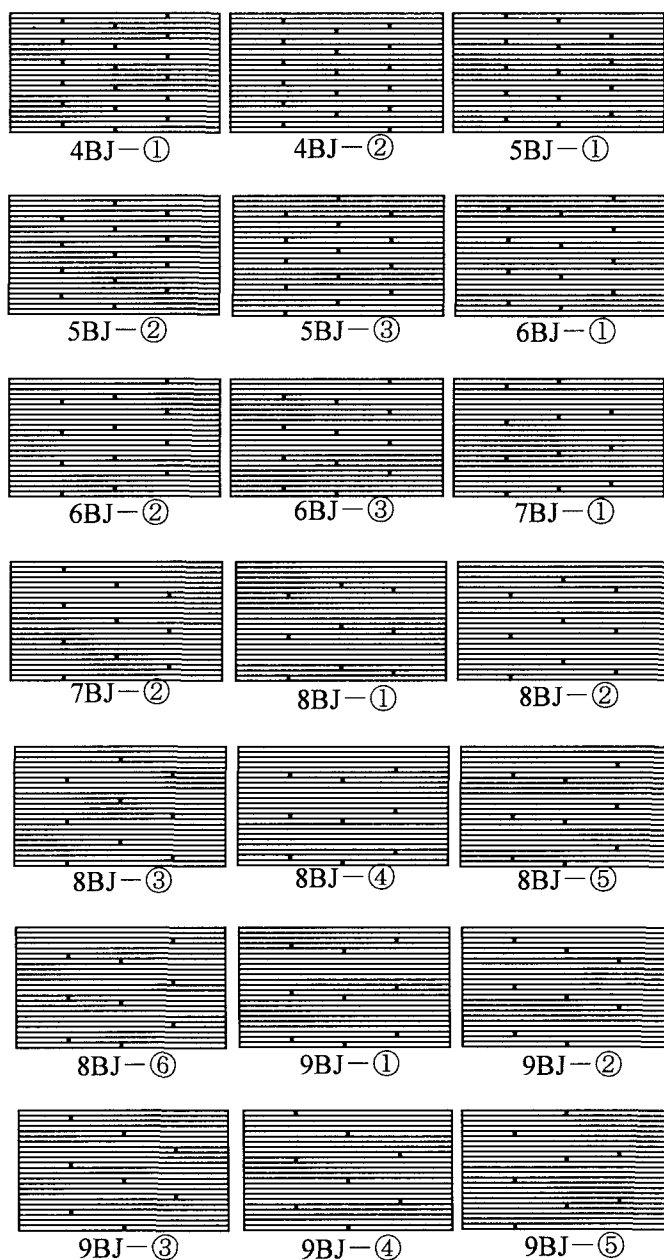
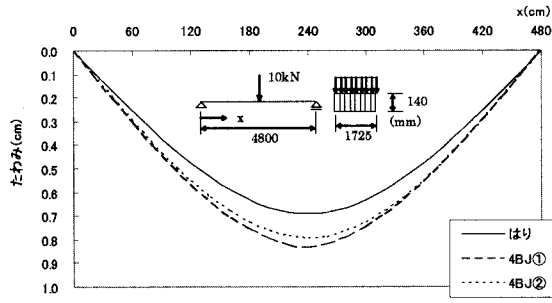
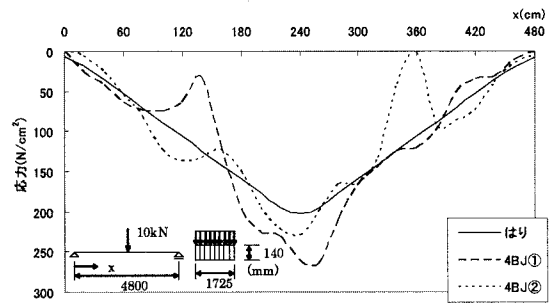


図-13 各 BJ 配置図 (モデル 2)

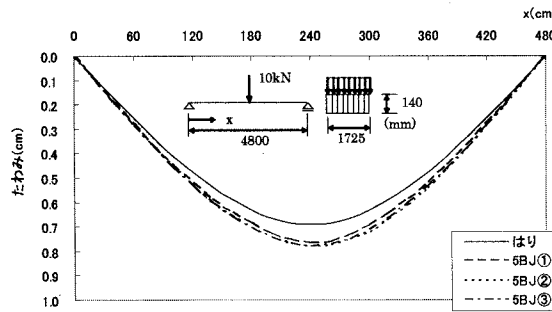


(a) たわみ分布

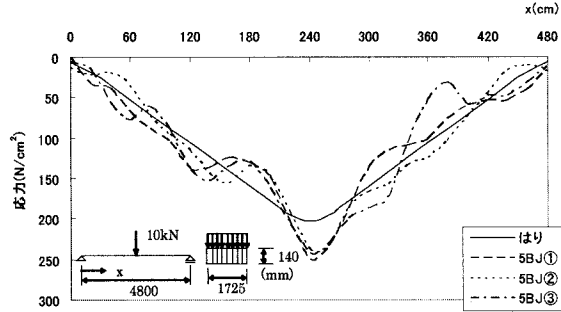


(b) 応力分布

図-14 4BJ モデルのたわみと応力 (支間方向)

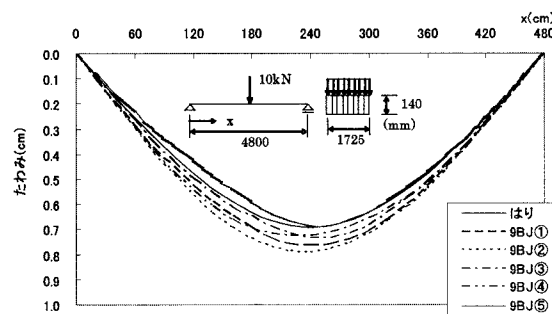


(a) たわみ分布

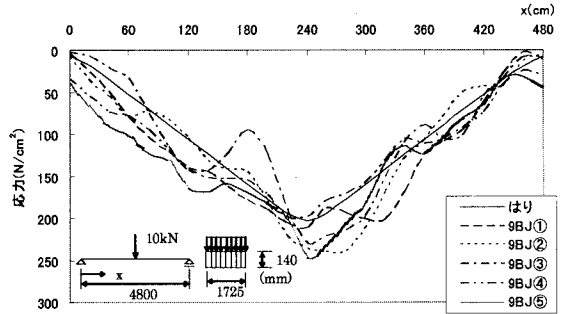


(b) 応力分布

図-15 5BJ モデルのたわみと応力 (支間方向)

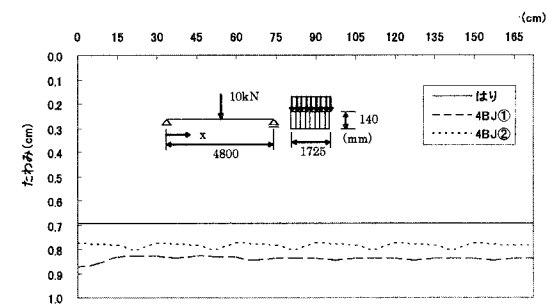


(a) たわみ分布

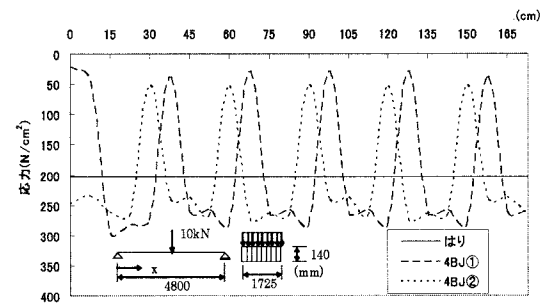


(b) 応力分布

図-16 9BJ モデルのたわみと応力 (支間方向)

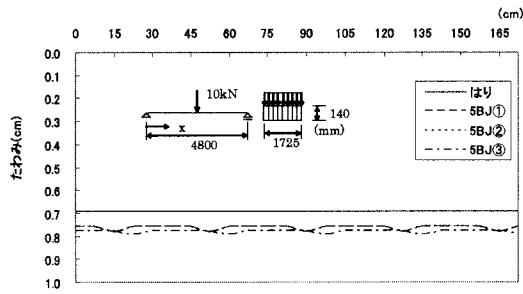


(a) たわみ分布

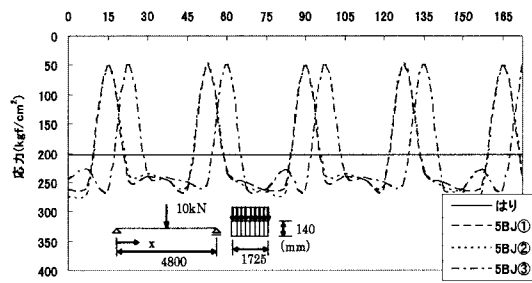


(b) 応力分布

図-17 4BJ モデルのたわみと応力 (支間中央、幅員方向)



(a) たわみ分布



(b) 応力分布

図-18 5BJ モデルのたわみと応力 (支間中央、幅員方向)

図-19 は、はりの最大たわみと接触解析から得られた最大たわみとの比と nBJ との関係を示している。図中で 4BJ に対する ■ と ▲ は 2 ケースの結果で、5BJ に対しては 3 ケースの上限値 ■ と下限値 ▲ を示しており、○ は表-4 に示す BJ 係数²⁾であり、BJ 係数との差は最大で 10% 程度である。図-20 は、はりの最大応力と接触解析から得られた最大応力との比と nBJ との関係を示している。図-19 に示したたわみ比と同様に、BJ 係数との差は 10% 程度である。図-21 は、図-19 と 20 で示したたわみ比の下限値と応力比の下限値と BJ 係数を比較したものである。図より、応力比の下限値がたわみ比の下限値より小で、4BJ と 5BJ はたわみ比の下限値が BJ 係数よりやや大となっているが、BJ 係数との差異は最大で 5% 程度である。

表-4 バットジョイント係数

BJ 頻度 (BJ 数/隣接ラミナ数)	BJ 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

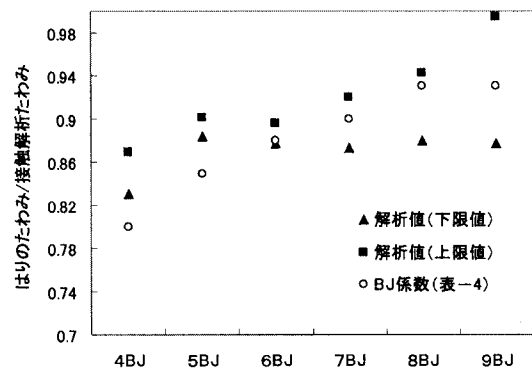


図-19 バットジョイント係数 (たわみ比)

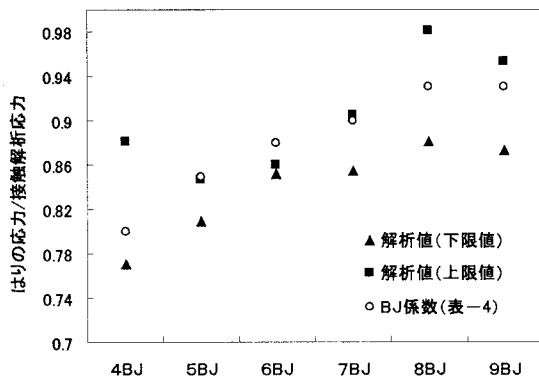


図-20 バットジョイント係数 (応力比)

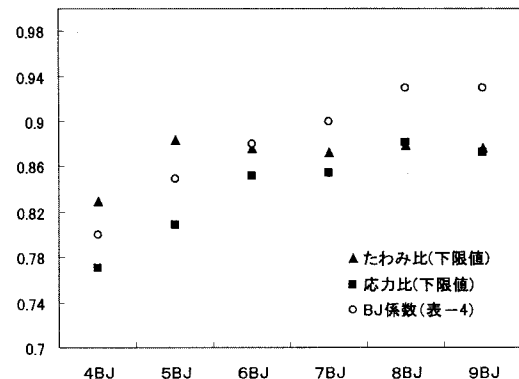


図-21 バットジョイント係数 (下限値)

4. まとめ

プレストレス木床版の曲げ挙動を解析する場合、幅員方向のプレストレスにより隣接するラミナ間を接触体として接触解析を行うが、この解析においてラミナ間の摩擦係数とプレストレス力の関係を考察した。また、ラミナ間の縦継ぎに用いられるBJが木床版の曲げ応力と変位に及ぼす影響を数値解析により明らかにし、一般に設計で用いられているBJ係数について考察した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) ラミナ5枚から成る解析モデル1に対し、設計で用いられている摩擦係数0.35を用いた場合、ラミナ間にプレストレスを与えないと載荷した中央ラミナだけが変形するが、木材の繊維直角方向に 0.1N/cm^2 の圧縮応力を作用させると5枚のラミナに変形が生じて板としての挙動を示すようになり、 1.0N/cm^2 程度の応力を作用させると板の曲げ挙動とほぼ等しくなることを数値解析で示し、簡易設計法で用いられているラミナ間の摩擦係数の妥当性を明らかにした。

(2) 木床版をはりとして設計するときの有効幅を用いたモデル2に対し、支間中央にBJを設け、BJの配置を規準内の4BJから9BJまでの21ケースとして数値計算を行い、BJ部を有するラミナのたわみは局部的に大きくなるが全体としてはほぼ対象分布を示し、BJ部で応力が0でBJ周辺で応力集中が生じて複雑な分布性状を示すことを明らかにした。

(3) 4BJから9BJまでの21ケースに対し、はりの最大たわみ、最大応力と接触解析による最大たわみ、最大応力との比からBJ係数を求め、設計値のBJ係数との差異は5%程度であることを示し、BJ係数の妥当性が確認できた。

参考文献

- 1) Ontario Highway Bridge design Code, 1983 Edition, Ministry of Transportation of Ontario, Downsview, Ontario, Canada.
- 2) Ritter, M. A. : Timber Bridges-Design, Construction, Inspection and Maintenance, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990.
- 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) Jaeger, L. G : Effect of butt joints on the flexural stiffness of laminated timber bridge, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.17,pp859-964,1990.
- 5) AASHTO : Guide Specifications for the Design of Stressed-Laminated Wood Decks, 1991.
- 6) Davalos, J. F., Kish, D. A., and Wolcott, M. P. : Bending Stiffness of laminated Timber Decks with Butt Joints, Journal of Structural Engineering, Vol.119,No.5,1993.
- 7) 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.
- 8) 長谷部薫・薄木征三・元沢清佳：バットジョイントを有するプレストレス木床版の曲げ試験と解析、構造工学論文集、Vol.50A, pp.847-854, 2004.
- 9) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説，2003.
- 10) 荒木昇吾・宮澤圭・久保田努：プレストレス木床版におけるバットジョイントの影響評価、木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.39-44, 2001.