

## バットジョイントを有するプレストレス木床版の弾塑性挙動

### Elasto-plastic behavior of prestressed laminated timber deck with butt joints

長谷部薫\* 石田訓丈\*\* ○鎌田充洋\*\*\* 薄木征三\*\*\*\*

HASEBE Kaoru, ISHIDA Noritake, KAMADA Mitsuhiro 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 秋田県大仙市 (〒014-8601 秋田県大仙市大曲花園町 1-1)

\*\*\*工修 ㈱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)

**ABSTRACT** This paper presents an elasto-plastic 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. In this paper, the simplified bi-linear stress-strain relationships are assumed, according to compression and tension tests for japanese cedar, and the effect of butt joints on elasto-plastic deformation of prestressed laminated timber deck are investigated.

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

### 1. はじめに

プレストレス木床版は、製材ラミナ（ラミナ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）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り<sup>1)</sup>、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。支間が20m程度以上のプレストレス木床版において、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<sup>2)</sup>、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<sup>2)</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<sup>3)</sup>。バットジョイントを設けない木床版の場合、橋軸方向(木材の繊維方向)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<sup>4)</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<sup>1)</sup> や AASHTO<sup>5)</sup> で採用されている。Davalos<sup>6)</sup> 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」<sup>7)</sup> 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報告しており<sup>7), 8)</sup>、さらに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、および簡易設計法で用いられているバットジョイント係数とプレストレス力との関係について既に報告している<sup>9)</sup>。本論文では、バットジョイントを有するプレストレス木床版を対象として、終局荷重に至るまでの弾塑性解析を行い、プレストレスの損失およびバットジョイントが終局荷重に及ぼす影響について考察する。

## 2. 木床版モデルの解析方法および解析結果

### 2.1 解析モデル

図-1 に示すように 7.5cm×14cm×480cm のラミナを 11 枚横締めした木床版モデルを解析の対象とした。この木床版モデルは、鋼棒(ラミナ高中心部に橋軸方向に 60cm 間隔で 8 本配置)を緊張することにより、幅員方向の木部にプレストレス力  $N$  の圧縮力を与え、11 枚の集成材ラミナを一体化させた。この木床版モデルの材料特性を表-1 に示す。この木床版モデルを図-2 に示す BJ 無しと、支点から 240cm の中央ラミナに BJ を配置した BJ1 モデル、支点から 120cm、240cm、360cm の中央ラミナに配置した BJ3-1、支点から 240cm の 2 枚目、中央、10 枚目ラミナに配置した BJ3-2、支点から 120cm、240cm、360cm のそれぞれ 2 枚目、中央、10 枚目にバットジョイントを配置した BJ9 を解析の対象とした。

鋼棒と木部の定着部を図-3 に示す。図-4 に示すように木床版モデルは、支間 480 cm と幅員 82.5 cm、高さ 14 cm をそれぞれ 24 分割と 11 分割、8 分割としている。解析の要素数は 2112 であり、

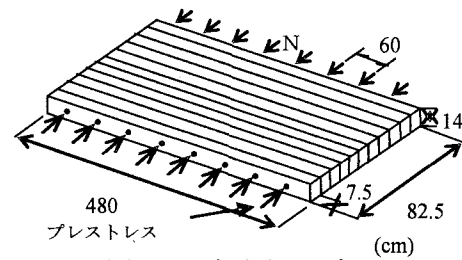


図-1 木床版モデル  
表-1 材料特性<sup>10)</sup>

ヤング係数	$E_x = 845 \text{ kN/cm}^2$
	$E_y = E_z = 0.04 E_x = 33.8 \text{ kN/cm}^2$
せん断弾性係数	$G = 0.067 E_x = 56.3 \text{ kN/cm}^2$
ポアソン比	$\nu_x = 0.4 \quad \nu_y = \nu_z = 0.016$

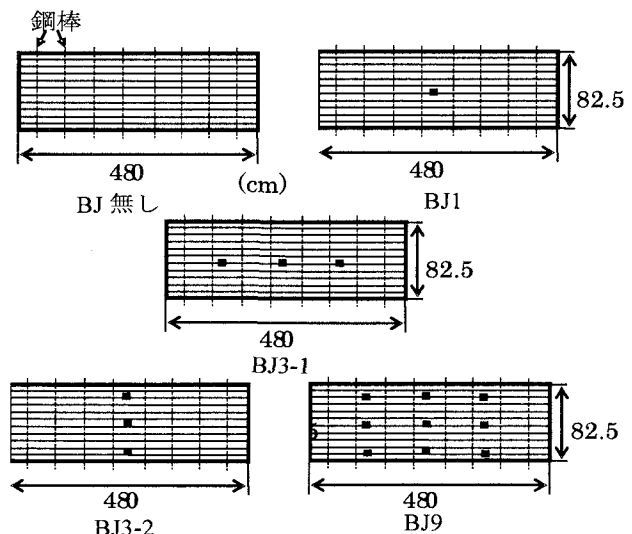


図-2 解析モデル

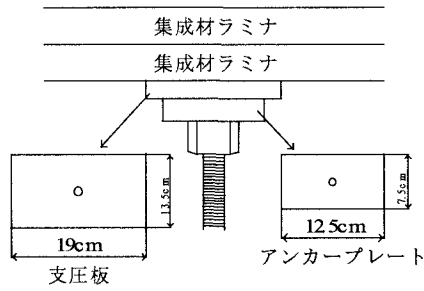


図-3 定着部

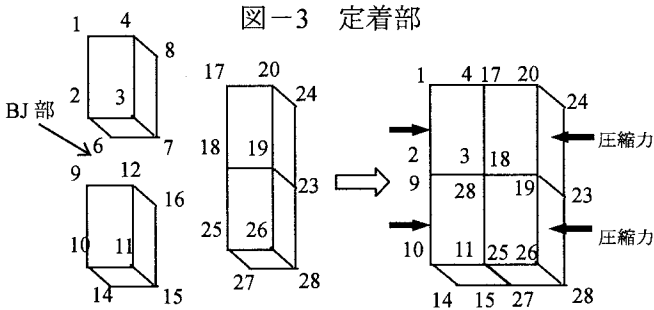


図-4 要素と節点の状態

節点数はBJ無し、BJ1、BJ3-1、BJ3-2、BJ9  
 に対してそれぞれ4700、4716、4748、4748、  
 4844である。ラミナ間の節点は、図-5に示  
 すように独立させ、接触点で節点同士が貫通  
 を生じさせない接触問題とし、隣接するラミ  
 ナ間とBJ間の摩擦係数は $0.35^{2),9)}$ と仮定した。

## 2.2 解析方法

図-6は、応力とひずみの関係を示し、ス  
 ギ材に対する圧縮降伏応力 $\sigma_y$ とひずみ $\epsilon_y$ を  
 $\sigma_y = -1.6\text{kN}/\text{cm}^2$ 、 $\epsilon_y = -0.00189$ と仮定し、  
 引張側の終局応力 $\sigma_u$ と圧縮側の終局ひずみを  
 $\sigma_u = 1.5\sigma_y = 2.4\text{kN}/\text{cm}^2$ 、 $\epsilon_u = -10\epsilon_y = -0.0189$   
 と設定した。図-1に示した幅員82.5cmは、  
 実橋の縮小床版モデルを簡易設計法により、  
 はりとして設計するときの有効幅に相当す  
 る。荷重は、支間中央部に1点集中の幅員方  
 向に分布荷重で載荷させた。プレストレス力  
 は、初期の $N=16\text{kN}$ (木部に作用する圧縮応力  
 $\sigma=19\text{N}/\text{cm}^2$ )と初期のプレストレス力から60%  
 損失させた $N=6.4\text{kN}$ ( $\sigma=8\text{N}/\text{cm}^2$ )の2パター  
 ンを作成した。隣接させたラミナ間及びBJ間を考  
 慮するために有限要素解析プログラムMSC.Marc  
 Mentatを用いて弾塑性状態における接触解析を行

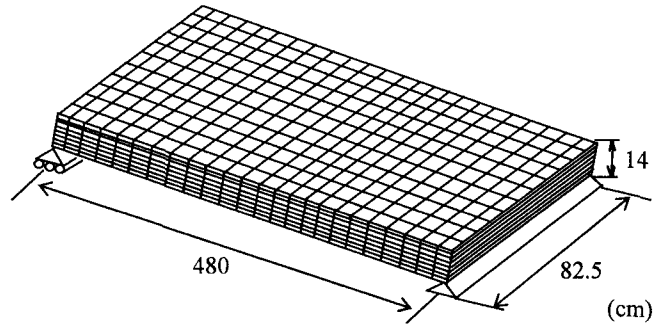


図-5 3次元ソリッド要素を用いた解析モデル

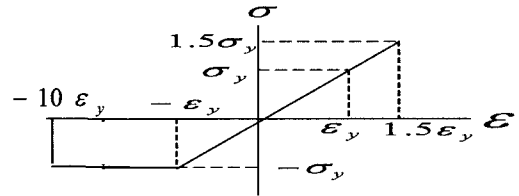


図-6 応力-ひずみの関係

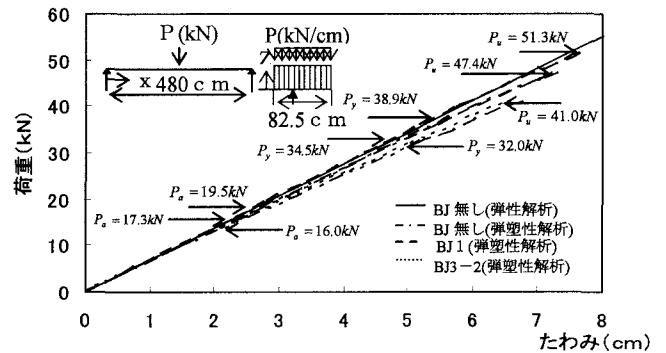


図-7 荷重とたわみの関係 (支間中央)

表-2 降伏荷重と終局荷重及び終局状態

各解析モデル		荷重(kN)	終局状態の判定方法
BJ 無し	初期降伏時	38.9	$\sigma_u = 2.40\text{kN}/\text{cm}^2$ (下縁部の引張応力)
	終局時	51.3	
BJ1	初期降伏時	34.5	$\sigma_u = 2.40\text{kN}/\text{cm}^2$ (下縁部の引張応力)
	終局時	47.4	
BJ 3-2	初期降伏時	32.0	$\sigma_u = 2.40\text{kN}/\text{cm}^2$ (下縁部の引張応力)
	終局時	41.0	

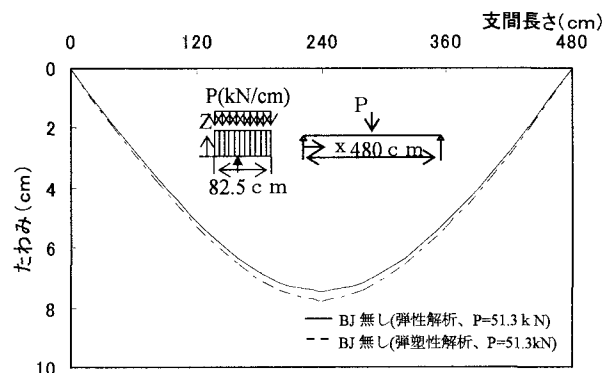


図-8 たわみ分布図 (幅員中央ラミナ)

った。今回5パターンの解析モデルを使用した  
が、ほぼ同様な結果が得られたモデルの結果を  
略し、BJ無しとBJ1、BJ3-2の3パターンにつ  
いて以下に示す。

### 2.3 解析結果

#### (1) 初期プレストレス力(N=16kN)時

図-7は、BJ無しの弾性と弾塑性解析値および  
BJ1、BJ3-2の荷重とたわみの関係を表したもので  
ある。図中で $P_a$ は設計時の許容応力に達する時の  
荷重、実線はBJ無しの弾性解析値、一点鎖線は  
BJ無しの弾塑性解析値、破線はBJ1の弾塑性解析  
値、点線はBJ3-2の弾塑性解析値であり、初期降  
伏荷重 $p_y$ と終局荷重 $p_u$ 及び終局状態を表-2に  
示す。

図-8は、BJ無しの弾性と弾塑性解析での終局  
荷重 $P=51.3\text{kN}$ 時のたわみ分布を示す。BJ無しの  
弾性解析と弾塑性解析を比較すると、弾塑性解析  
の終局荷重での最大たわみは、弾性解析のたわみ  
に比べて3%大となっており、圧縮側の塑性の影響  
は小さい。図-9は、BJ1の弾塑性解析における  
初期降伏荷重 $P=34.5\text{kN}$ と終局荷重 $P=47.4\text{kN}$ 時の  
たわみと、それらの荷重におけるBJ無しのたわみ  
を比較したものである。図より、BJ1が初期降伏  
応力に達するときの荷重( $P=34.5\text{kN}$ )でのたわみは、  
BJ無しのたわみと比べて3%大であり、終局応力  
時の荷重( $P=47.4\text{kN}$ )でのBJ1の最大たわみは、BJ  
無しのたわみと比べて4%大とやや大きくなって  
いるがBJの影響は小さい。図-10は、BJ無しと  
BJ3-2の弾塑性解析における初期降伏荷重  
 $P=32.0\text{kN}$ と終局荷重 $P=41.0\text{kN}$ 時のたわみ分布を  
示す。図より、BJ3-2が初期降伏応力に達する  
ときの荷重( $P=32.0\text{kN}$ )でのたわみは、BJ無しのたわみ  
と比べて8%大であり、終局応力時の荷重  
( $P=41\text{kN}$ )では9%大とやや大きくなっている。

図-11は、BJ無し(弾塑性解析)の終局荷重時  
での降伏応力の分布を示したものである。BJ無しの  
木床版に対し支間方向の降伏域の広がり120cm

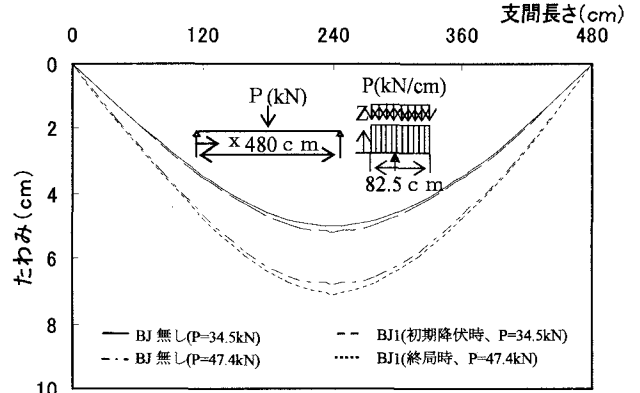


図-9 たわみ分布(幅員中央ラミナ)

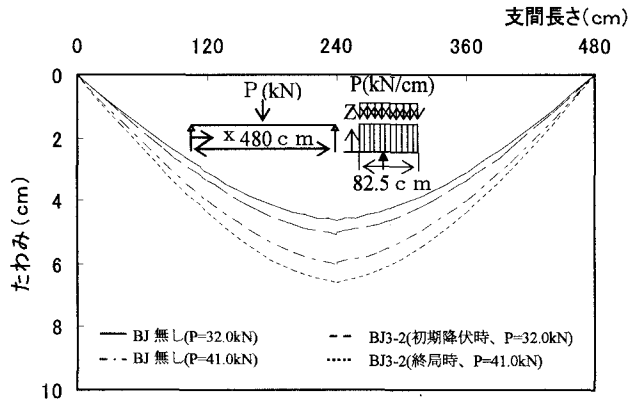


図-10 たわみ分布(幅員中央ラミナ)

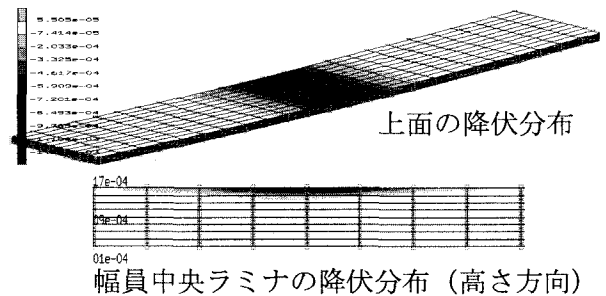


図-11 BJ無しの降伏分布( $P=51.3\text{kN}$ の終局時)

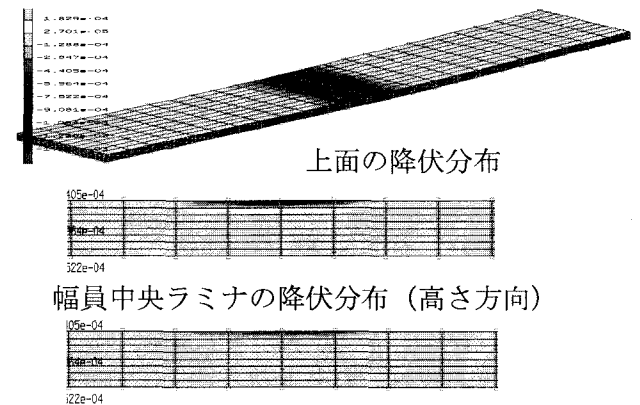


図-12 BJ1の降伏分布( $P=47.4\text{kN}$ の終局時)

であり、高さ方向の塑性域は上縁から 3.5 cm(床版厚の 25%)と桁の場合<sup>11)</sup>と比較して小さい。図-12 は、BJ1 の終局荷重時での降伏分布を示したものである。BJ1 の支間方向の降伏域の広がりには図-11 の BJ 無しと同様に 120 cm である。高さ方向の塑性域では幅員中央ラミナで図-11 と同様に 3.5 cm であり、応力集中が生じる隣接ラミナも 3.5 cm と小さい。図-13 は、BJ3-2 の終局荷重時の降伏分布を示したものであり、図-12 で示した BJ1 に対するものとほぼ同様な結果となっている。

図-14 は、BJ1 と BJ3-2 の弾塑性解析での支間中央部における幅員方向の下縁部の応力分布を表したものである。図より、BJ1 と BJ3-2 の応力は BJ 位置で 0 に近づき、BJ 位置付近のラミナで応力集中が生じている。図-14 の応力集中部の○が付いているラミナに着目した結果を以下に示す。

図-15 は、BJ 無しの弾性と弾塑性解析値および BJ1、BJ3-2 の弾塑性解析の荷重と下縁の最大応力の関係を示したものである。BJ1 が初期降伏荷重  $P=34.5\text{kN}$  に達するときの応力は、BJ 無しの応力と比べて 13% 大で、終局荷重  $P=47.4\text{kN}$  では 14% 大とやや大きくなっている。また、BJ3-2 が初期降伏荷重  $P=32.0\text{kN}$  に達するときの応力は、BJ 無しの応力と比べて 20% 大で、終局荷重  $P=41.0\text{kN}$  での BJ1 の最大応力は、BJ 無しの応力と比べて 29% 大と大きくなっている。

図-16 は、BJ 無しの弾性解析値と終局荷重時の弾塑性解析値の応力分布を示す。図より、BJ 無しの場合、終局荷重時の応力は、弾性解析の応力に比べて 7% 大となっている。

## (2) プレストレス力損失 ( $N=6.4\text{kN}$ ) 時

図-17 は、BJ 無しの弾性と弾塑性解析値および BJ1、BJ3-2 の荷重とたわみの関係を表したものである。図中で示した  $P_a$  は図-7 で示した

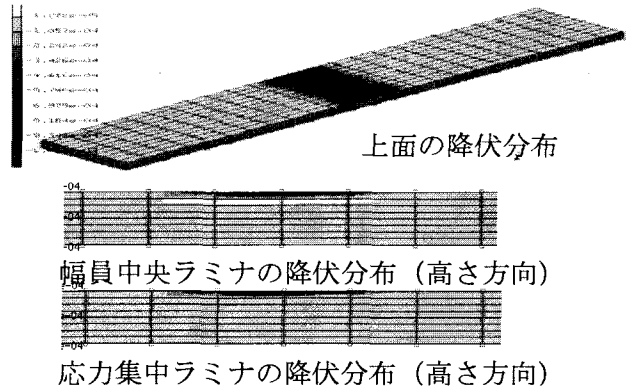


図-13 BJ3-2 の降伏分布 ( $P=41.0\text{kN}$  の終局時)

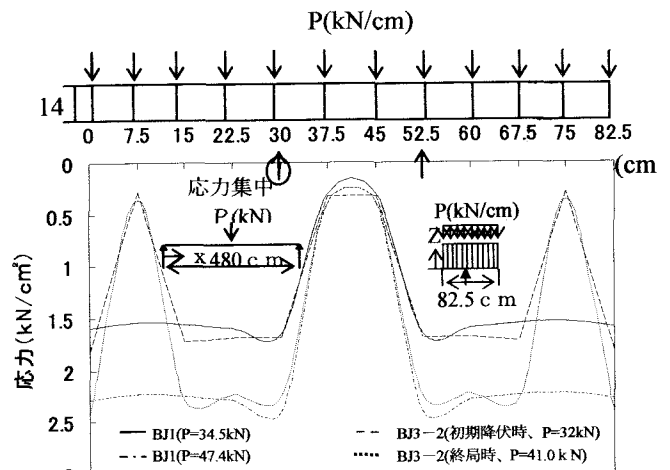


図-14 下縁部の応力分布(幅員方向、支間中央部)

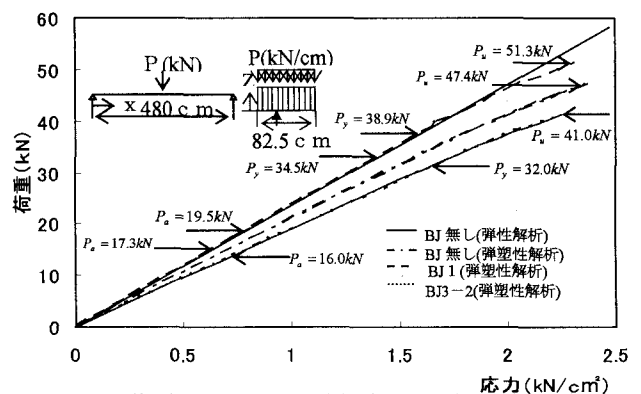


図-15 荷重と応力の関係(支間中央、応力集中部)

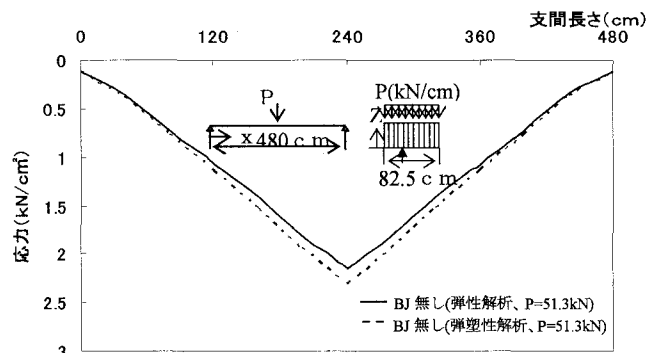


図-16 下縁部の応力分布(支間中央、応力集中部)

値と同じであり、降伏荷重  $p_y$  と終局荷重  $p_u$  及び終局状態を表-3 に示す。

図-18 は、BJ 無しと BJ1 の弾塑性解析での初期降伏荷重と終局荷重時のたわみ分布を示す。BJ1 が初期降伏応力に達するときの荷重  $P=34.5\text{kN}$  でのたわみは、BJ 無しのたわみと比べて4%大であり、終局応力時の荷重  $P=46.2\text{kN}$  では5%大とやや大きくなっている。

図-19 は、BJ 無しと BJ3-2 の弾塑性解析での初期降伏荷重と終局荷重時のたわみ分布を示す。BJ3-2 が初期降伏応力に達するときの荷重  $P=32.0\text{kN}$  でのたわみは、BJ 無しのたわみと比べて9%大であり、終局応力時の荷重  $P=40.9\text{kN}$  では10%大とやや大きくなっている。

図-20 は、BJ 無し(弾塑性解析)の終局荷重時での降伏分布を示したものである。BJ 無しの木床版に対し支間方向の降伏応力分布の広がりには120 cmで図-11と同様である。また、幅員中央ラミナの高さ方向の塑性域は上縁から3.5 cmと小さい。

図-21 は、BJ1 の終局荷重時での降伏分布を示したものである。BJ1 の支間方向の降伏域分布の広がりには、図-20 の BJ 無しと同様に120 cmである。高さ方向の降伏域は幅員中央ラミナで図-20と同様に3.5 cmであり、応力集中が生じる隣接ラミナでも3.5 cmと小さい。

図-22 は、BJ3-2 の終局時における降伏応力の分布を表したものである。BJ3-2 の支間方向の降伏域分布の広がりには図-20 の BJ 無しと同様に120 cmであり、高さ方向の降伏域も図-20と同様に3.5 cmで、応力集中が生じる隣接ラミナでも3.5 cmと小さい。

図-23 は、BJ1 と BJ3-2 の弾塑性解析での支間中央部における幅員方向の下縁部の応力分布を表したものである。図より、BJ1、BJ3-2 の応力は BJ 位置で0に近づき、BJ 位置付近のラミナで応力集中が生じている。

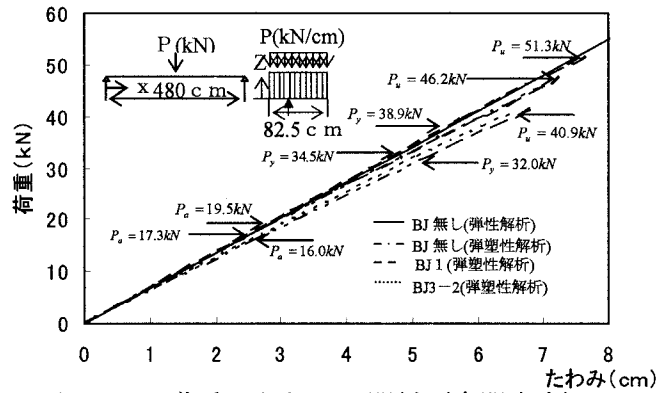


図-17 荷重とたわみの関係 (支間中央)

表-3 降伏荷重と終局荷重及び終局状態

各解析モデル		荷重(kN)	終局状態
BJ 無し	初期降伏時	38.9	$\sigma_u = 2.40\text{kN/cm}^2$ (下縁部の引張応力)
	終局時	51.3	
BJ1	初期降伏時	34.5	$\sigma_u = 2.40\text{kN/cm}^2$ (下縁部の引張応力)
	終局時	46.2	
BJ 3-2	初期降伏時	32.0	$\sigma_u = 2.40\text{kN/cm}^2$ (下縁部の引張応力)
	終局時	40.9	

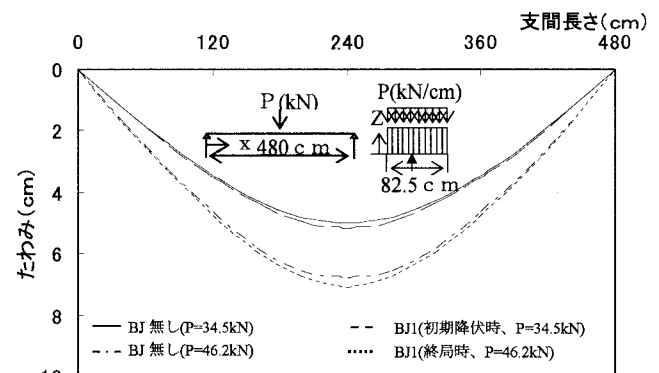


図-18 たわみ分布(幅員中央ラミナ)

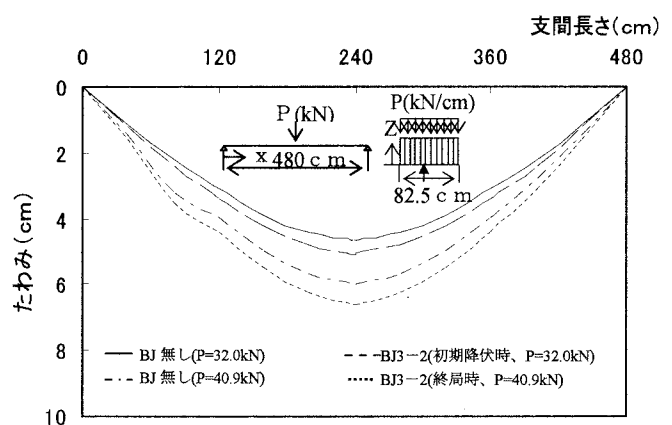


図-19 たわみ分布(幅員中央ラミナ)

図-24 は、BJ 無しの弾性と弾塑性解析値および BJ1、BJ3-2 の弾塑性解析の荷重と応力の関係を示したものである。BJ1 が初期降伏荷重  $P=34.5\text{kN}$  に達するときの応力は、BJ 無しの応力と比べて 16% 大となっており、終局荷重  $P=46.2\text{kN}$  での BJ1 の最大応力は、BJ 無しの応力と比べて 18% 大とやや大きくなっている。また、BJ3-2 が初期降伏荷重  $P=32.0\text{kN}$  に達するときの応力は、BJ 無しの応力と比べて 21% 大となっており、終局荷重  $P=40.9\text{kN}$  での BJ3-2 の最大応力は、BJ 無しの応力と比べて 30% 大と大きくなっている。

### (3) プレストレス力損失の影響

図-25 は、BJ 無しの初期プレストレス力  $N=16\text{kN}$  とプレストレス力が 60% 損失した  $N=6.4\text{kN}$  に対する荷重と応力の比較を示している。図より、最大荷重は変わらずプレストレス損失の影響は見られない。

図-26 は、BJ1 の初期プレストレス力  $N=16\text{kN}$  とプレストレス力が 60% 損失した  $N=6.4\text{kN}$  に対する荷重と応力の関係を示したものである。図より、引張縁の応力が終局応力  $\sigma_y (=2.4\text{kN}/\text{cm}^2)$  に達するときの最大荷重は、プレストレス損失の場合、3% 程度小さくなる。

### 3. あとがき

初期プレストレス  $N=16\text{kN}$  と 60% 損失  $N=6.4\text{kN}$  での弾性解析と弾塑性解析の比較では、どちらも初期降伏から終局状態で違いがみられたが、どちらもたわみの影響は 3~4% と少なく、応力の影響は 7% とたわみに比べ影響はやや大きかった。次に、初期プレストレス力の BJ 無しと BJ1 の比較では、たわみでは初期降伏時で 3%、終局時では 4% であり、BJ3-2 では、初期降伏時で 8%、終局時では 9% の影響が見られた。応力で比較すると、BJ 無しで

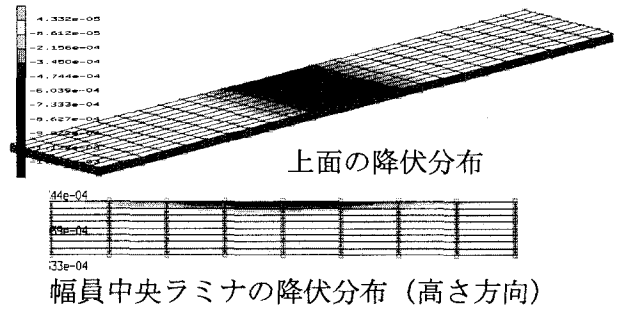


図-20 BJ 無しの降伏分布( $P=51.3\text{kN}$  の終局時)

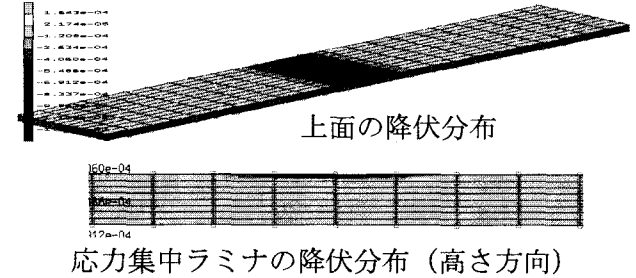


図-21 BJ1 の降伏応力分布( $P=46.2\text{kN}$  の終局時)

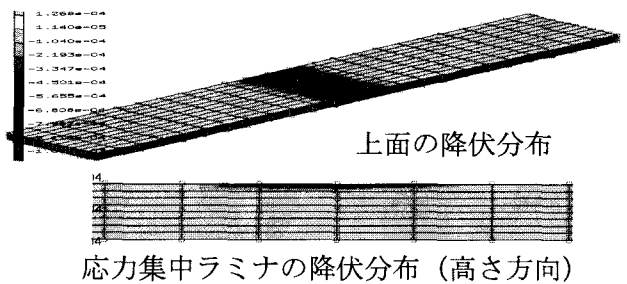


図-22 BJ3-2 の降伏分布( $P=40.9\text{kN}$  の終局時)

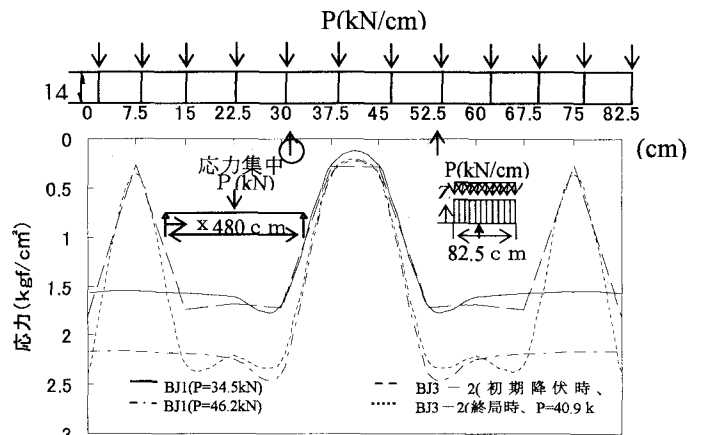


図-23 下縁部の応力分布(幅員方向、支間中央部)

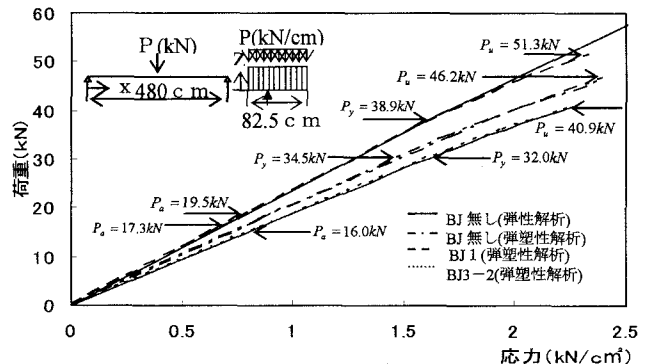


図-24 荷重と応力の関係(支間中央、応力集中部)

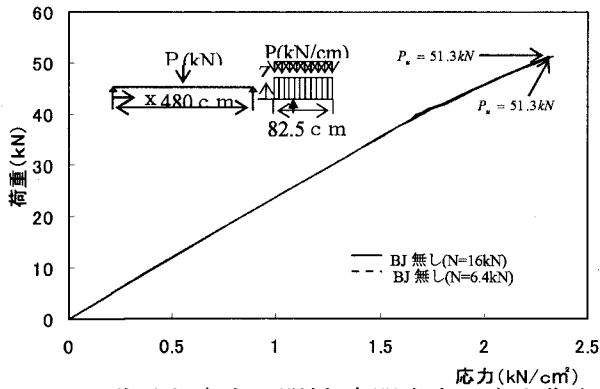


図-25 荷重と応力の関係(支間中央、応力集中部)

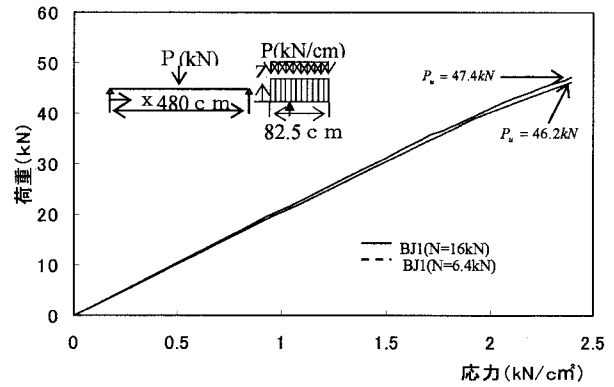


図-26 荷重と応力の関係(支間中央、応力集中部)

は初期降伏時で13%、終局時で14%であり、BJ3-2では、初期降伏時で19%、終局時で29%の影響が見られた。次に、初期プレストレス力の60%損失の場合、BJ無しとBJ1の比較では、たわみでは初期降伏時で4%、終局時で5%であり、BJ3-2では、初期降伏時で9%であり、終局では10%の影響が見られた。応力では、初期降伏時で16%、終局時で18%であり、BJ3-2では、初期降伏時で21%で、終局では30%の影響が見られた。各解析モデルの初期プレストレス力と60%損失したプレストレス力では、BJ無しで、終局荷重は損失による影響は見られず、BJ1では3%程度の影響がみられたが、プレストレス力損失による影響は小さいことが確認できた。

#### 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) 長谷部薫・直井瑞明・大口真司・薄木征三：バットジョイントを有するプレストレス木床版の弾性挙動とバットジョイント係数、構造工学論文集、Vol.52A, pp.837-844, 2006.
- 10) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説，2003.
- 11) 長谷部薫・薄木征三：曲げとせん断を受けるひずみ軟化はりの弾塑性変位解析、土木学会論文集、第410号/I-12, pp.351-358, 1989.