

プレストレス木床版の有効幅とプレストレス

Effective width and prestress 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)

*** 工修, 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 deck bridges are designed as a beam assuming that one wheel line of the design vehicle is distributed over a wheel load distribution width. The value of the effective width is based on orthotropic plate behavior. Design of the prestressing system is based on the Douglas-fir deck configuration and the magnitude of the transverse moment and shear. For both the deck configuration and the prestressing system, design procedures use graphs. This paper presents a numerical study on the effective width and uniform compressive prestress of prestressed laminated deck using glulam beams.

Key Words : *prestress, timber deck, effective width*

1. まえがき

プレストレス木床版は、製材（製材ラミナ）または集成材（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。この木床版は、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¹⁾、オンタリオ州の道路橋示方書 (OH BDC)²⁾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、AASHTO³⁾で規準化されている。

その後、製材ラミナでは断面と長さの制約があり、橋長に制限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⁴⁾。我が国でも最近単径間の木床版橋として架設されており⁵⁾、また集成材アーチ橋の床版に利用されている⁶⁾。

プレストレス木床版の簡易設計法⁷⁾は、米松ラミナや米松集成材ラミナを使用した木床版に対して使用されている。この設計法は、直交異方性板を幅員方向への輪荷重の分布幅（有効幅）を有するはりとしてAASHTO荷重に対して床版厚を決定するもので、この有効幅は弾性係数

と床版寸法およびラミナのバットジョイント数による係数からなる異方性パラメーターを用いて図式的に求められる。また、プレストレスによりラミナの側面に与える圧縮応力は、設計荷重によって床版断面内に生じる曲げモーメントとせん断力を基に算定するが、架設時に与えるプレストレス力は、供用期間中に木材のクリープ等により60%損失すると仮定し、これよりラミナに作用させる必要圧縮応力を決定する。床版断面内に生じる曲げモーメントとせん断力は、有効幅を求めるのと同様に異方性パラメーターを用いて図式的に求められるが、パラメーター中の弾性係数は、ラミナ側面の圧縮応力が初期値から60%減少した状態を想定している。

著者らは、秋田県内の林道に架設された国産材の杉集成材を主材料としたプレストレス木床版橋⁵⁾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、曲げ試験とプレートせん断試験より、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について報告している⁸⁾。本論文では、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、プレストレス力を決定するのに必要な断面力に関し、T荷重を用いてFEM解析を行い簡易設計法で

用いられているこれらの設計値について考察する。

2. 直交異方性板の弾性係数

文献7)の有効幅を用いるプレストレス木床版の簡易設計法は、図-1に示す支間長 L 、床版幅 B 、床版厚 t の直交異方性板を有効幅 Dw と床版厚 t からなる矩形断面はりとみなし、応力とたわみに対して必要な床版厚を決定するものである。図-1に示す y 軸回りのヤング係数 E_x 、 $y-z$ 面内の曲げに対する E_y 、せん断弾性係数 G_{xy} と床版幅 B 、床版支間 L およびラミナのバットジョイント数による係数からなる無次元パラメーターにより図式的に輪荷重 (AASHTO 荷重) の幅員方向への分布幅を求める。次にこの値をはりの有効幅 Dw とし、支間長 L の単純ばりとみなして必要な床版厚 t を決定している。ここで、図-1の x 軸は橋軸方向でかつ木材の繊維方向となっている。

本論文では、活荷重は図-2に示すT荷重を用いてFEMにより直交異方性板の解析を行い、解析結果に基づき曲げ応力度 (基本許容曲げ応力度に湿潤係数と寸法係数を考慮) とたわみ制限 ($L/500$) を満足する床版厚 t を決定する。また、簡易設計法で用いられている有効幅値と比較するために、この t を用いて木床版をはりとして設計するときの有効幅を求める。ここで、FEM解析で t を決定する板の応力値かたわみ値と同じ値となる厚さ t のはりの幅を有効幅とする。なお、T荷重は車道部分に橋軸方向には1組、また橋軸直角方向に組数に制限がないものとし、たわみか応力が最大になるように支間中央部で幅員中央載荷あるいは偏心載荷させ、シ

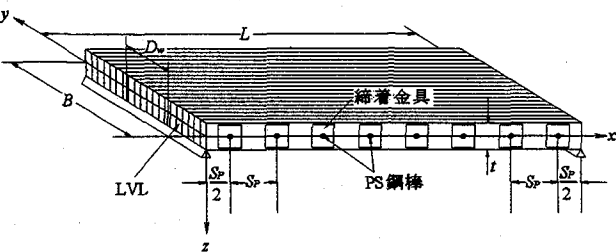


図-1 プレストレス直交異方性板

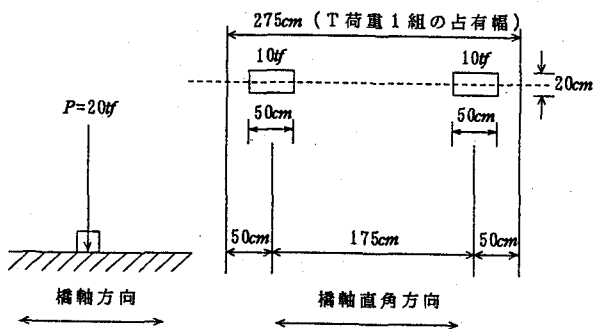
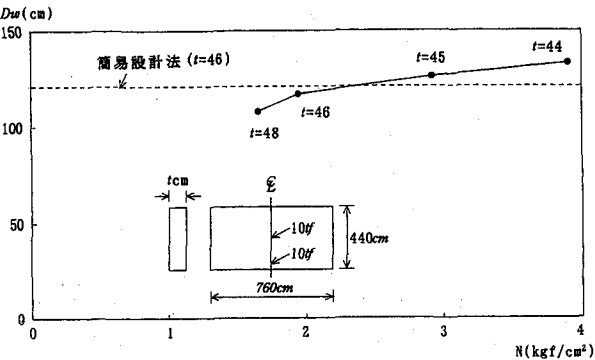
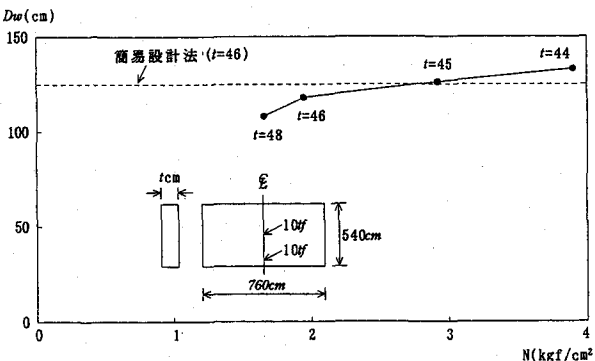


図-2 活荷重

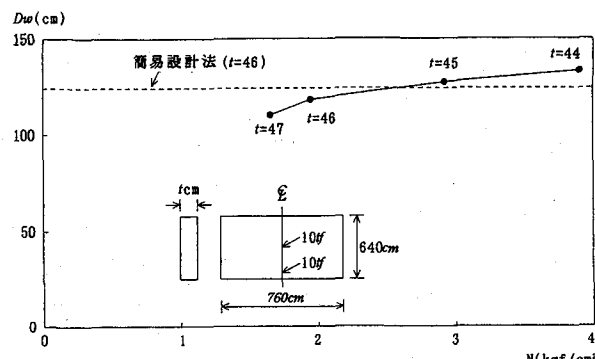
エル要素を用いた単純版のFEM解析の節点数は143、長方形要素数120で計算した。



(a) $B=4.4\text{m}$



(b) $B=5.4\text{m}$



(c) $B=6.4\text{m}$

図-3 木部に作用する圧縮応力 N と有効幅 (杉)

表-1 プレストレス力 F と弾性係数

F (tf)	N (kgf/cm ²)	G_{xy} (kgf/cm ²)	E_y (kgf/cm ²)	G_{xy}/E_x	E_y/E_x
4.0	3.8	3300	2800	0.052	0.044
3.0	2.9	2400	2500	0.038	0.039
2.0	1.9	1400	2200	0.022	0.034
1.0	1.6	400	1900	0.007	0.029

図-3は、実橋（ $L=7.6\text{m}$ 、 $B=4.4\text{m}$ ）⁵⁾を対象とし、床版を構成する集成材ラミナに作用する圧縮応力 N を変化させたときの、杉集成材を用いたプレストレス木床版の有効幅 Dw を示したものである。FEM解析で用いたヤング係数 Ex は、 N の大きさに無関係な定数であり、杉集成材に対する規準値⁹⁾ 80000kgf/cm^2 に湿潤係数 0.8 ⁹⁾を乗じた 64000kgf/cm^2 とし、 Ey と Gxy は N 値で異なるが表-1に示す値を使用した。表中の各 N 値に対する Gxy/Ex と Ey/Ex は、杉集成材を用いて得られた実験値⁹⁾（ $Ex=87300\text{kgf/cm}^2$ ）の弾性係数比であり、これらの比と $Ex=64000\text{kgf/cm}^2$ より表中の Ey と Gxy が得られる。図中の点線は、米松木床版の簡易設計法で使用されている関係式、 $Ey=0.013Ex$ 、 $Gxy=0.03Ex$ を用い、上記と同様な手法により得られた有効幅を示している。図より、架設時の圧縮応力 N を $4\sim 5\text{ kgf/cm}^2$ （実橋では $N=4\text{kgf/cm}^2$ で、この値は床版の一体化に必要な $N=1.6\text{kgf/cm}^2$ の2.5倍である）とすると、プレストレス力が60%損失後 $N=1.6\sim 2\text{ kgf/cm}^2$ となり、米松に対して用いられている上記の関係式を杉に適用しても有効幅に及ぼす Ey と Gxy の影響は床版幅に関わらず4~14%程度である。これより、米松に対して用いられている関係式を他の樹種に適用し以下の計算を行う。

3. 有効幅

図-4から図-6は、針葉樹B2類の杉集成材等を対象とし、幅員を1車線の 4.4m として支間長を変化させた場合の、単径間プレストレス木床版橋の設計値を示している。FEM解析により各支間の床版厚を決定するときの、活荷重によるたわみとたわみ制限値との比、および曲げ応力度と許容曲げ応力度との比を図-4に示す。ここで、上記のように $Ex=64000\text{kgf/cm}^2$ 、 $Ey=0.013Ex$ 、 $Gxy=0.03Ex$ 、ポアソン比は $\nu x=0.4$ で $\nu y=\nu x\cdot Ey/Ex$ を用いた。図より $L<17.6\text{m}$ の短支間で一般に使用されるところと思われるプレストレス木床版橋の場合、曲げ応力よりたわみ制限（ $L/500$ ）で設計が支配される。な

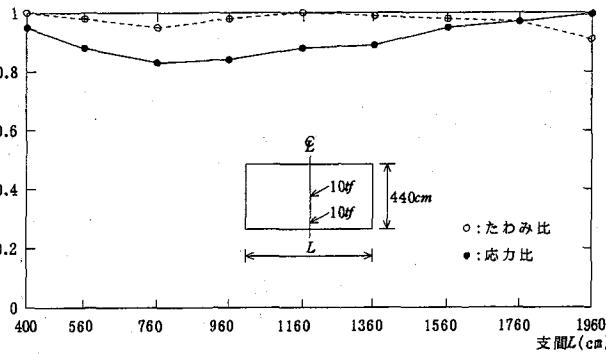


図-4 支間とたわみ比および応力比の関係（杉）

お、図には示していないが木部の水平せん断応力比は、せん断の影響が大となる短支間の $L=4\text{m}$ の場合 0.27 と小さく、一般に木床版橋の設計ではせん断応力は無視できる⁷⁾。図-5は、支間と活荷重応力および死荷重応力の関係を示しているが、短支間の木床版の場合、応力に及ぼす死荷重（木床版、アスファルト舗装、縁石、雪荷重）の影響は僅少である。図-6は支間と有効幅を示しているが、白丸で示した簡易設計法で用いられている有効幅値は、FEM解析を基にした本法で得られた黒丸の値より25~35%大きい値を示している。これは、実橋の載荷実験⁵⁾で偏心載荷した場合、簡易設計法の有効幅

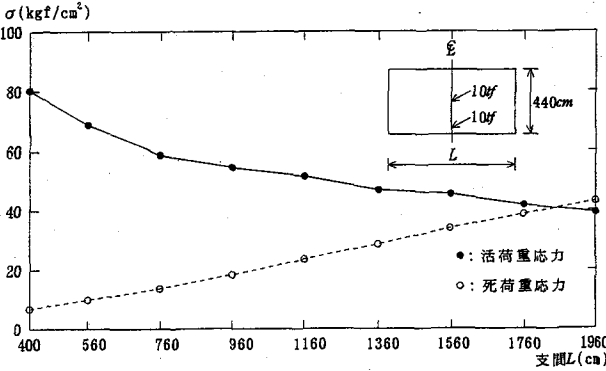


図-5 支間と活荷重および死荷重応力の関係（杉）

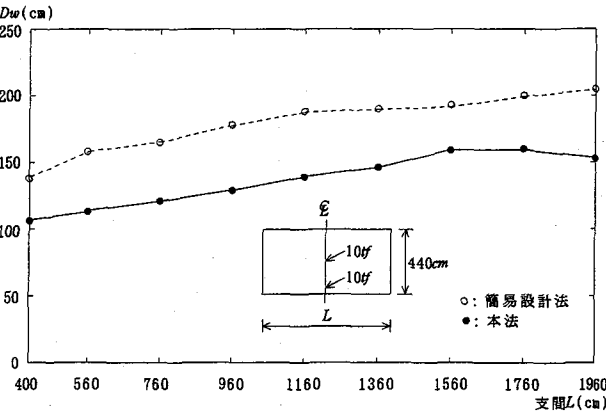


図-6 支間と有効幅の関係（杉）

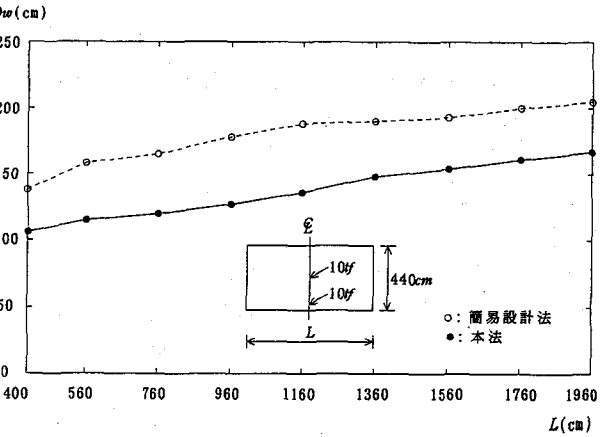


図-7 支間と有効幅の関係（米松）

効幅に及ぼす Ex の影響は見られない。

4. プレストレス

簡易設計法におけるプレストレス力の決定は以下のように行う⁷⁾。初めに有効幅を求める方法と同様に、無次元パラメーターを用い図-1の $y-z$ 面内の活荷重による曲げモーメント My とせん断力 Qy を図式的に決定する。次に My による引張応力と Qy によるせん断応力に抵抗できるように木部に作用させる必要圧縮応力 N を求め、これよりプレストレス力を決定するが、架設時の圧縮応力が60%失われることを考慮して架設時の必要圧縮応力を $2.5 N$ としている。

$L = 10\text{m}$ 、 $B = 4.4\text{m}$ の杉集成材を使用した木床版橋の場合、支間中央でかつ幅員中央にT荷重を作用させたとき My と Qy が最大となるが、このときの支間中央付近における幅員方向の My と Qy 分布図を図-11と12に示す。図中の●印は、前述のように簡易設計法で用いられている弾性係数を使用して得られたFEM解析値で、■の解析で用いた弾性係数は集成材の設計計算で一般に

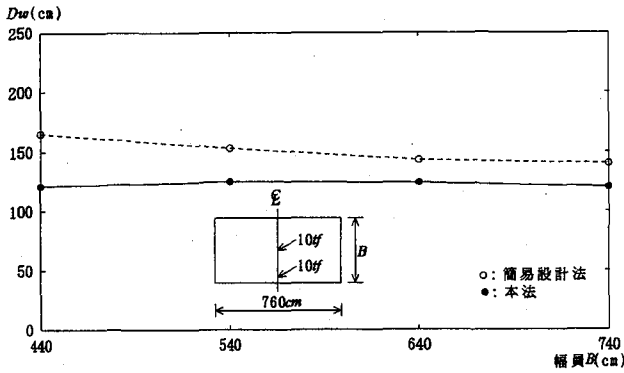


図-8 有効幅に及ぼす幅員の影響 (杉)

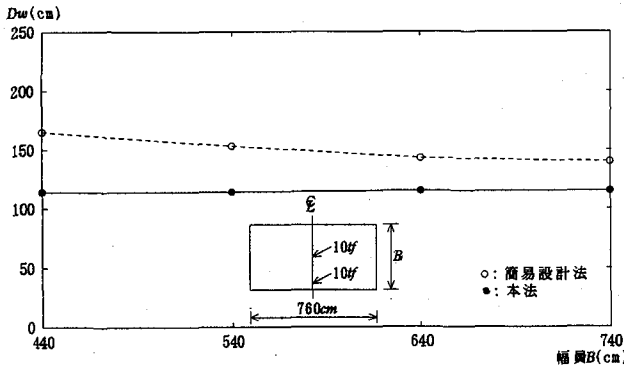


図-9 有効幅に及ぼす幅員の影響 (米松)

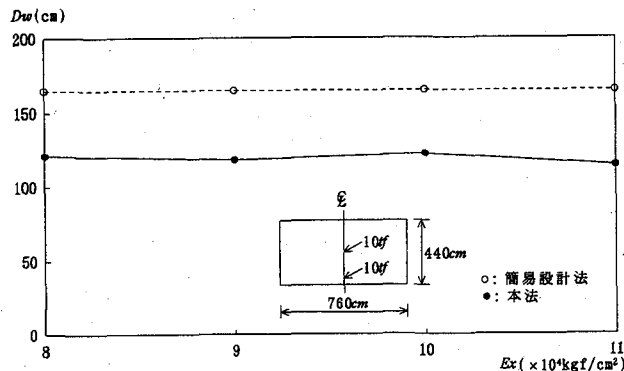


図-10 有効幅に及ぼすヤング係数 Ex の影響

から得られるたわみは実験値とFEM解析値より小さく、有効幅が過大評価されていることと同様である。図-7に針葉樹A1類の米松 ($Ex = 110000\text{kgf/cm}^2$) 等に対する結果を示すが、図-6と類似している。

図-8は支間を 7.6m とし、幅員を変化させたときの杉材に対する有効幅を示している。文献⁷⁾から得られる簡易設計法の有効幅は、幅員が大きくなるにつれ小さくなるが、FEM解析を基にした本法の値は幅員の影響は見られない。また、米松等に対する有効幅を図-9に示しているが、図-8と同様な結果となっている。

図-10は $L = 7.6\text{m}$ 、 $B = 4.4\text{m}$ で、 Ex を変化させたときの有効幅を示しているが、簡易設計法値と同様に有

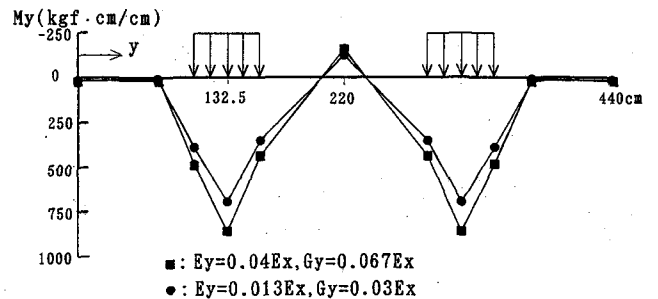


図-11 幅員方向の My 分布図

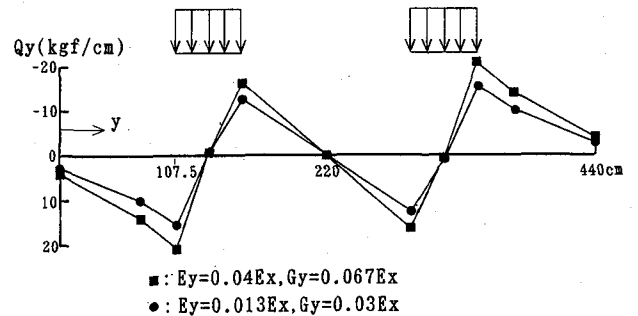


図-12 幅員方向の Qy 分布図

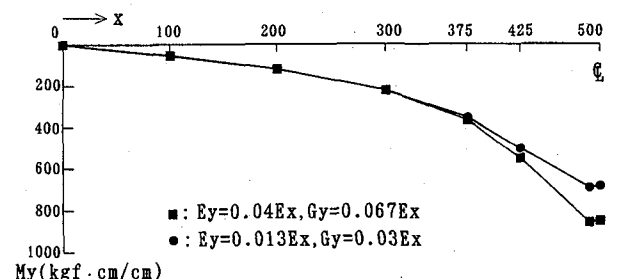


図-13 橋軸方向の My 分布図 ($y = 132.5\text{cm}$)

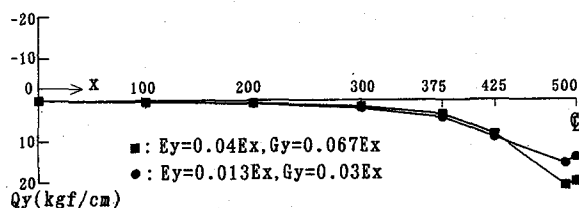


図-14 橋軸方向の Q_y 分布図 ($y = 107.5\text{cm}$)

用いられているものであり⁹⁾、これは表-1に示したようにプレストレス損失を考慮しない架設時の値に相当する。図より、プレストレス力の損失に伴い M_y と Q_y は20%程度減少する。また、図-11と12で最大断面力を生じる橋軸方向の M_y と Q_y の分布図を図-13と14に示しているが、断面力に及ぼす E_y の影響は載荷点付近以外は無視できる程度である。

図-15と16は、 E_y/Ex をプレストレス損失後の0.013から架設時の0.04まで変化させたときの M_y と Q_y の最大値に及ぼす影響を調べたものである。ここで、 E_y/Ex の増加に伴い G_{xy}/Ex も0.03から0.067まで比例的に変化させて計算した。プレストレス損失に伴い E_y/Ex は減少するが、断面力も図-11と12に示したと同様に減少していくのが見える。なお、図-17に y 軸回りの曲げモーメント M_x の最大値と E_y/Ex の関係を示しているが、

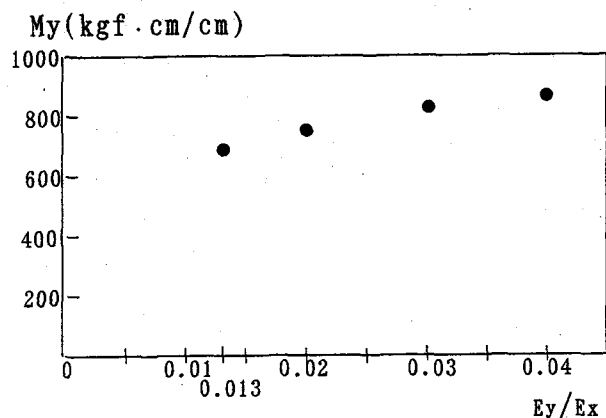


図-15 M_y に及ぼす E_y/Ex の影響

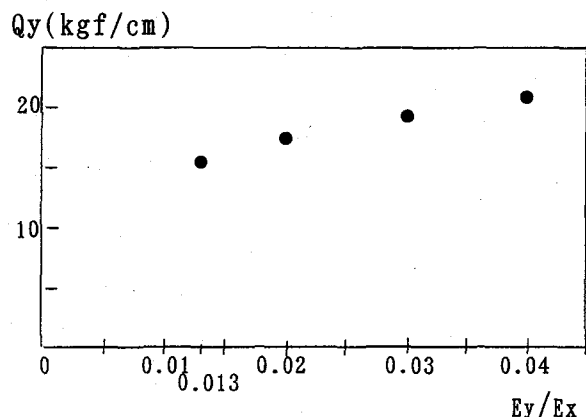


図-16 Q_y に及ぼす E_y/Ex の影響

プレストレス損失に伴い M_x 値はほぼ線形的に増加する。図-18は杉と米松に対する最大たわみと E_y/Ex の関係を示しているが、プレストレス損失が60%の場合でもたわみに及ぼす影響は実験結果⁵⁾と同様に4%程度である。

幅員 $B = 4.4\text{m}$ と 5.4m の1車線の杉集成材を使用し

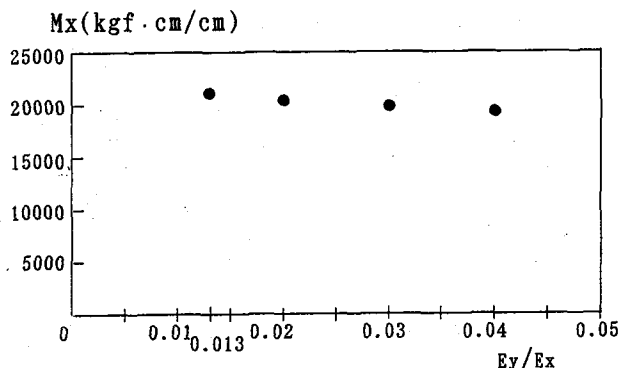


図-17 M_x に及ぼす E_y/Ex の影響

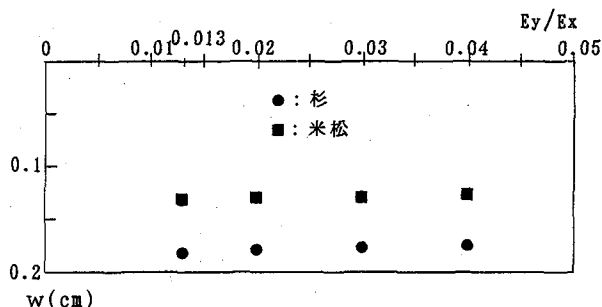
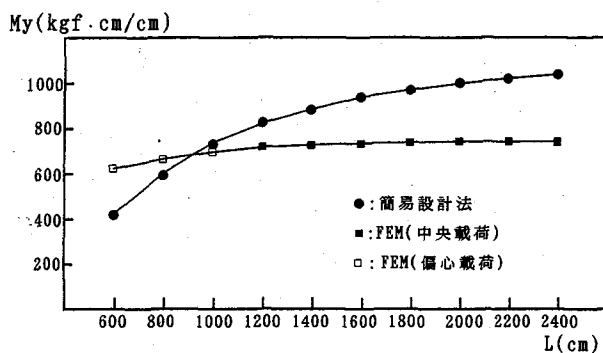
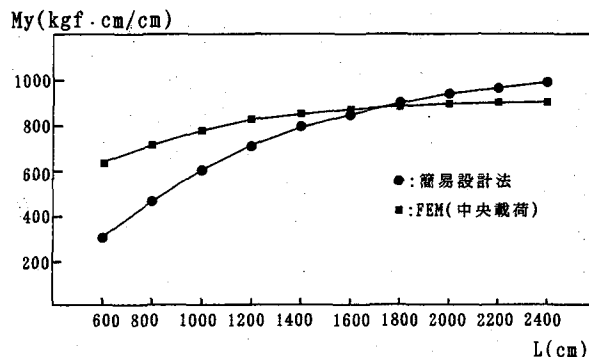


図-18 最大たわみに及ぼす E_y/Ex の影響

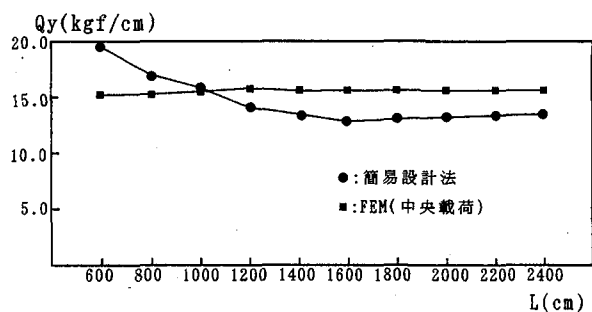


(a) $B = 4.4\text{m}$

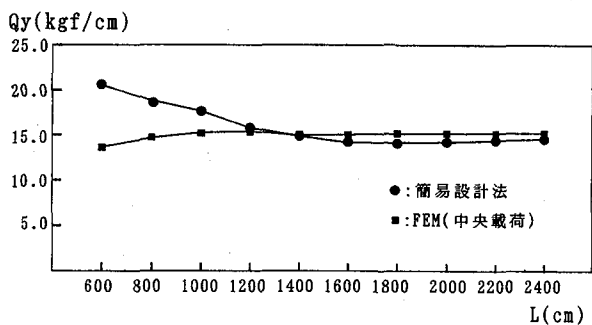


(b) $B = 5.4\text{m}$

図-19 支間長と M_y



(a) $B=4.4\text{m}$



(b) $B=5.4\text{m}$

図-20 支間長と Q_y

表-2 支間長と N

L (m)	N (kgf/cm ²) (本法)	N (kgf/cm ²) (簡易設計法)
6	2.6	2.2
8	2.0	1.8
10	1.6	1.6
12	1.3	1.3
14	1.1	1.1
16	1.0	1.0
18	1.0	1.0
20	1.0	1.0
22	1.0	1.0
24	1.0	1.0

たプレストレス木床版橋を対象とし、 $E_y = 0.013E_x$ 、 $G_{xy} = 0.03E_x$ とした場合の支間長と M_y および Q_y との関係を図-19と20に示す。図中の●は簡易設計法で用いられている値で、AASHTO荷重を衝撃係数を考慮したT荷重に換算して求めたものである。図-19(a)より、 $L > 9\text{m}$ で M_y のFEM解析値は●より小さくなるが、図-20(a)に示すように $L > 10\text{m}$ で Q_y は逆にやや大きくなっている。これらの M_y と Q_y を用いて得られる圧縮応力 N の一例として、 $B=4.4\text{m}$ に対する値を支間長毎に表-2に示す。 $L \leq 8\text{m}$ の短支間の場合FEM解析値が11~18%大で簡易設計法はやや危険側の設計となるが、 L

$> 8\text{m}$ に対しては両者の N は同じ値である。表中で $L \geq 16\text{m}$ の $N=1.0\text{kgf/cm}^2$ は、米松に対する N の最小値を杉に換算した場合の値である。

5. あとがき

プレストレス木床版の簡易設計法で用いられている直交異方性板をはりとして設計するための有効幅について、T荷重を用いFEM解析より有効幅を求め、有効幅に及ぼす樹種、弾性係数、床版寸法の影響を調べた。また、プレストレス力を決定するための床版断面内に作用する曲げモーメントとせん断力について、簡易設計法で用いられている値とFEM解析値を基に弾性係数と床版寸法が断面力に及ぼす影響について考察した。得られた結果をまとめると以下になる。

(1) 米松を使用したプレストレス木床版の簡易設計法で使用されている弾性係数比 $E_y/E_x=0.013$ と $G_{xy}/E_x=0.03$ は、架設時のプレストレス力が60%損失するものと想定して実験的に得られた式であるが、これらの関係式を杉を用いたプレストレス木床版に適用させた場合の有効幅は、杉集成材床版に対するプレストレス損失後の実験値 $E_y/E_x=0.029$ と $G_{xy}=0.007$ を用いて得られる有効幅と大きな差異はなく、有効幅に及ぼす弾性係数比の影響は僅少であることが明らかになった。

(2) 単径間プレストレス木床版の設計において、支間長が17m程度までの短支間の場合曲げ応力よりたわみ制限で設計が支配され、木部の水平せん断応力は支間長に関わらず一般に無視できることが確認できた。また、曲げ応力に及ぼす死荷重の影響は僅少である。

(3) 杉集成材あるいは米松集成材を使用した幅員4.4mで支間長19.6mまでの単径間プレストレス木床版橋の場合、簡易設計法で用いられる有効幅はFEM解析から得られた有効幅より樹種に関わらず25~35%大きな値を示す。これより、簡易設計法の有効幅値は過大に評価されており結果として危険側の設計を行うことになる。また、有効幅に及ぼす幅員とヤング係数 E_x の影響は無視できることが明らかになった。

(4) 床版断面内に作用する曲げモーメント M_y とせん断力 Q_y はプレストレス力損失に伴い20%程減少するが、T荷重の載荷点付近以外は無視できる程度である。またFEM解析による M_y と Q_y は、簡易設計法で用いられている設計値と支間長により異なる値となった。プレストレス損失により y 軸回りの曲げモーメント M_x とたわみは増加するが、損失が60%の場合でもたわみに及ぼす影響は実験結果と同様に4%程度である。

以上、単径間のプレストレス木床版の有効幅と断面力は、簡易設計法で用いられる設計値と異なる結果となった。ただし両者の差はそれほど大きくはなく、簡易設計法で実用上十分であると考えられるが、我が国の規準に

沿った設計法の開発が望まれる。今回対象とした木床版は、橋軸方向で集成材ラミナ間の継手がない場合を想定しているが、多径間のプレストレス木床版では一般にたて継ぎ方法にバットジョイント（突きつけ）が用いられしており、木床版の曲げ挙動に及ぼすバットジョイントの影響および多径間連続木床版の有効幅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) 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.

- 5) 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.
- 6) (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.
- 7) Ritter, M.A.: Timber Bridges - Design, Construction, Inspection and Maintenance, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990.
- 8) 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.
- 9) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 1995.

(1999年9月17日受付)