

プレストレス L V L 床版の構造特性

CHARACTERISTICS OF PRESTRESSED LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) DECK

長谷部 薫*, 薄木 征三**

Kaoru HASEBE and Seizo USUKI

* 工博 秋田大学助教授 鉾山学部土木環境工学科 (〒010 秋田市手形学園町1-1)

** 工博 秋田大学教授 鉾山学部土木環境工学科 (〒010 秋田市手形学園町1-1)

This paper presents an experimental study on characteristics of prestressed laminated timber deck using cedar LVL beams made in Japan. Loss of prestress in this deck with time is primarily the result of creep in the wood. US design code is based on the assumption that 60% of the bar force will be lost during the lifetime of the bridge. In the design of Douglas-fir decks, the transverse elastic modulus and the shear modulus are assumed to be 1.3% and 3% of the longitudinal elastic modulus for a low level of prestress, respectively. The bending and plate shear tests of the prestressed laminated LVL decks were tested for various levels of prestress between laminae in the plate. From the test results, relationships between the effective elastic modulus and the level of prestress were investigated.

Key Words : prestress, timber deck, LVL, bar force

1. まえがき

LVL (Laminated Veneer Lumber) は、ロータリーレースやスライサー等により切削した厚さ数mmの単板を木材の繊維がほぼ平行になるように接着積層した材であり、木材の繊維を互いに直交するように単板を積層した合板と異なる木質材である。1991年にJAS¹⁾ (日本農林規格) の改訂が行われ、LVLの許容応力度が制定されてから、LVLは集成材とほぼ同等の使用が可能となり、国産材を使用したLVLはまだ少ないが主に建築用構造部材として用いられている。

プレストレス木床版は、製材ラミナ (ひき板) 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工法で²⁾、オンタリオ州の道路橋示方書 (OH BDC)³⁾ に取り入れられている。この床版橋は、1980年代にアメリカでも架設されるようになり、AASHTO⁴⁾ で規格化されている。その後、製材ラミナの代わりに集成材ラミナを用いて横方向からプレストレスする床版橋がアメリカで研究されている⁵⁾。この木床版は、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⁶⁾、また、集成材アーチ橋の床版に利用されている⁷⁾。

このプレストレス木床版は、ラミナを幅員方向に接着剤を用いないで積層し、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、これにプレストレスを与えることにより一体とした構造である。プレス

トレス木床版の設計⁸⁾において、ラミナの側面に与える圧縮応力は、設計荷重による幅員方向のせん断力と曲げモーメントを基に算定するが、架設時に与えるプレストレス力は、耐用年数経過時には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している。また、直交異方性板としての幅員方向のヤング係数とせん断弾性係数は、ベイマツを用いたプレストレス木床版の曲げ試験とプレートせん断試験を基に、橋軸方向のヤング係数との比で与えられているが、これらの関係は、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得られたものである。一方、OH BDCで仮定しているプレストレス力損失は50%であるが、ここで用いられているこれらの値は、構造用集成材の設計計算で一般に用いられている値⁹⁾と同程度で、文献8)より大きな値を採用している。

著者らはすでに、プレストレス集成材床版のたわみと弾性係数に及ぼすプレストレス損失の影響を明らかにしており¹⁰⁾、また、スギLVLを利用したプレストレス床版の静的載荷試験とクリープ挙動について報告している¹¹⁾。ここでは、国産材のスギを主材料としたプレストレスLVL床版の1/2縮小モデルを用い、LVLに作用する圧縮応力を変化させたときの曲げ載荷試験より、たわみに及ぼすプレストレス力損失の影響を調べ、LVL間に作用させる必要圧縮応力を明らかにする。また、

プレートせん断試験と曲げ試験を行い、直交異方性板としてのせん断弾性係数と、幅員方向のヤング係数に及ぼすプレストレス力損失の影響について考察する。

2. LVLのヤング係数

実験で用いた1/2モデルを図-1に示す。図-1(b)で、3mm厚の単板14枚を接着積層したスギLVL51本を主構造材とし、3mm厚の単板28枚からなるベイマツLVL2本が床版の幅員両端部に配置されている。使用されている全てのLVLは、高さ22cm、長さ5mである。図-1(a)より、プレストレス鋼棒φ13mmの橋軸方向の間隔は60cmであり、図-2に締着部の構造を示す。

この1/2モデルは、木材の弾性限曲げ応力を越える荷重により静的載荷-除荷試験が既に行われており¹¹⁾、その後プレストレスLVL木床版のクリープ特性を調べ

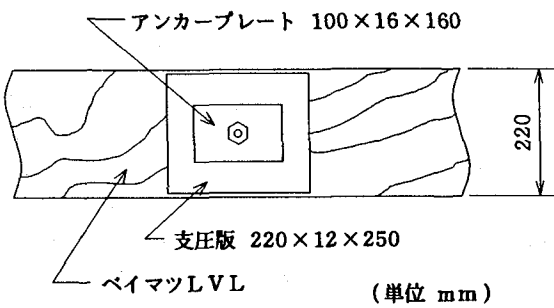
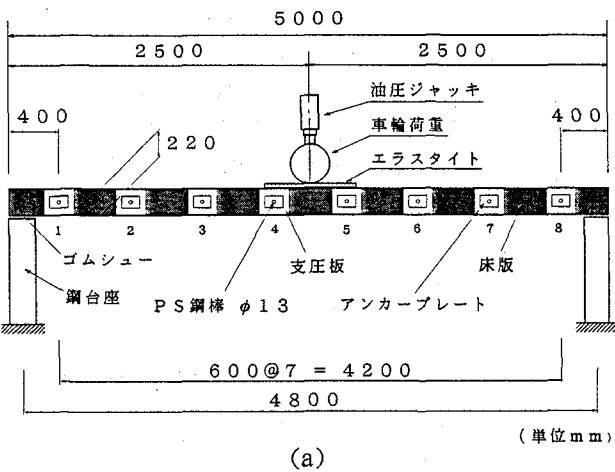


図-2 締着部

表-1 LVLラミナのヤング係数

	本数	平均 E_{xm} (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
スギLVL	51	96700	10.3
ベイマツLVL	2	172700	—

3. 実験結果

3.1 たわみに及ぼすプレストレス力損失の影響

想定したプレストレスLVL木床版橋¹¹⁾では、架設時にスギLVL間に5.3kgf/cm²の圧縮応力(プレストレス力が60%損失後2.1kgf/cm²)が一様に作用するように設計されており、これに対するプレストレス力は7tfである。ここで、プレストレス力が損失後ラミナの側面に作用する圧縮応力2.1kgf/cm²は、設計荷重による幅員方向のせん断力によって隣接するLVLが滑らないこと、および幅員方向の曲げモーメントによって床版下面に引張応力が生じないことにより決定し、初期の圧縮応力5.3kgf/cm²はスギLVLの支圧強度の20~30%程度である。手動式油圧ジャッキを用い、プレストレス鋼棒8本の緊張力を解放した後、2.で示したように各LVLのヤング係数を測定し、再度端部の鋼棒から順次所定の圧縮応力になるまで3回に分けて緊張した。静的荷重の載荷は、図-1に示すように油圧ジャッキと車輪モデルを用いて行った。ここで、アスファルト舗装の代わりに厚さ3cmのエラスタイトを用いている。

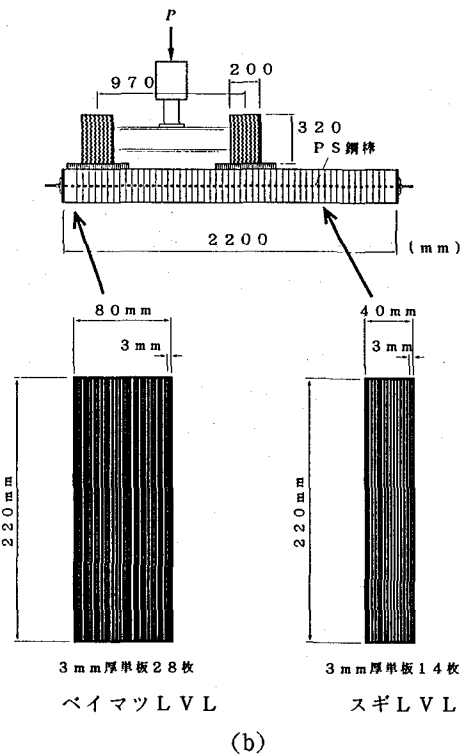
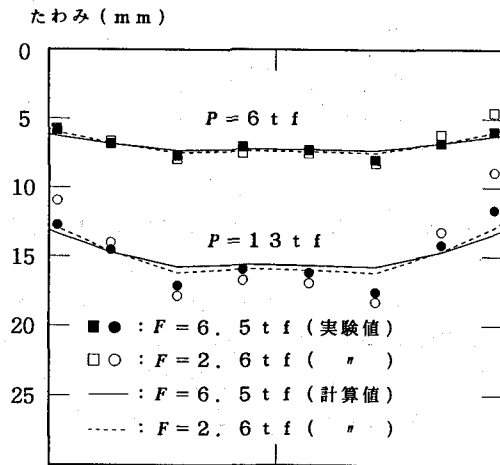
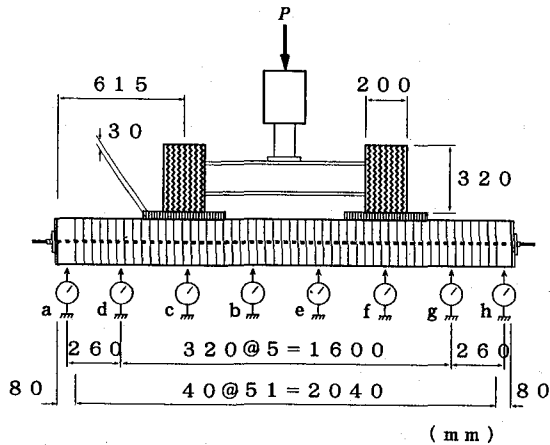


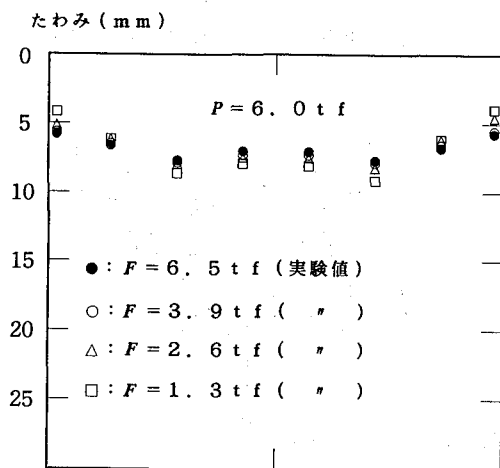
図-1 1/2モデル一般図

図-3(a)は、支間中央でかつ幅員中央に輪荷重を載荷したときの、支間中央におけるたわみの実験値と有限要素法で解析した直交異方性板としての計算値を示している。ここで、橋軸方向の曲げヤング係数 E_x は表-1の値を用い、幅員方向(繊維に直角方向)のヤング係数 $E_y = 1600 \text{ kgf/cm}^2$ とせん断弾性係数 $G_{xy} = 6350 \text{ kgf/cm}^2$ ($= G$)およびポアソン比 $\nu_x = 0.4^{11)}$ を用いて得られた解析値を実線で示している。有限要素法による解析値は、

支点と支間中央間を長方形要素68に分割して計算した値で、級数による解とほぼ一致している。図中で、黒のマークはプレストレス力 $F = 6.5 \text{ tf}$ 時の実験値で、白のマークは、ラミナ間の圧縮応力 N が 2.0 kgf/cm^2 となる $F = 2.6 \text{ tf}$ を作用させたときの結果である。また、破線は $F = 2.6 \text{ tf}$ に対する計算値で、 E_x と ν_x は上記の値を用い、 $G = 4200 \text{ kgf/cm}^2$ (図-9参照)と $E_y = 1050 \text{ kgf/cm}^2$ (図-11参照)を用いて得られたものである。図より、

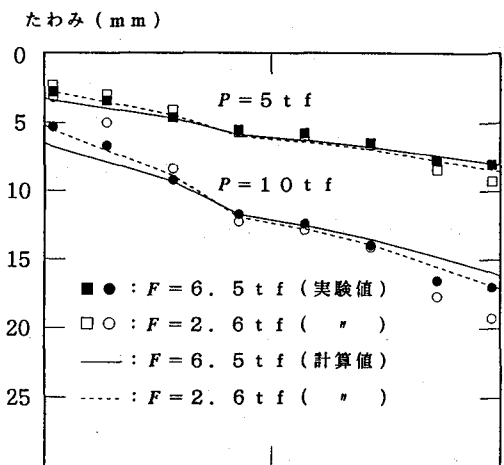
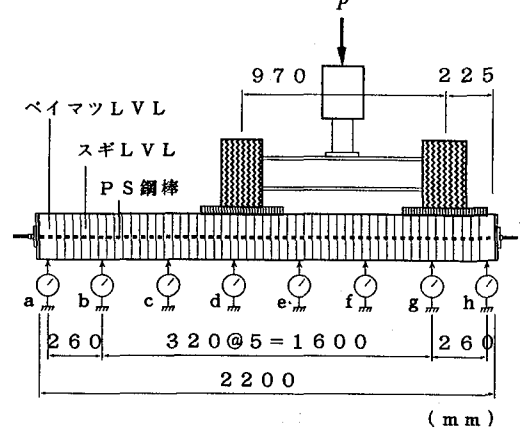


(a)

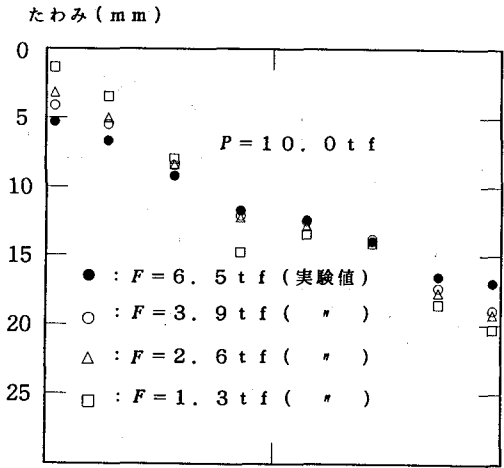


(b)

図-3 たわみ曲線(支間中央断面、中央載荷)



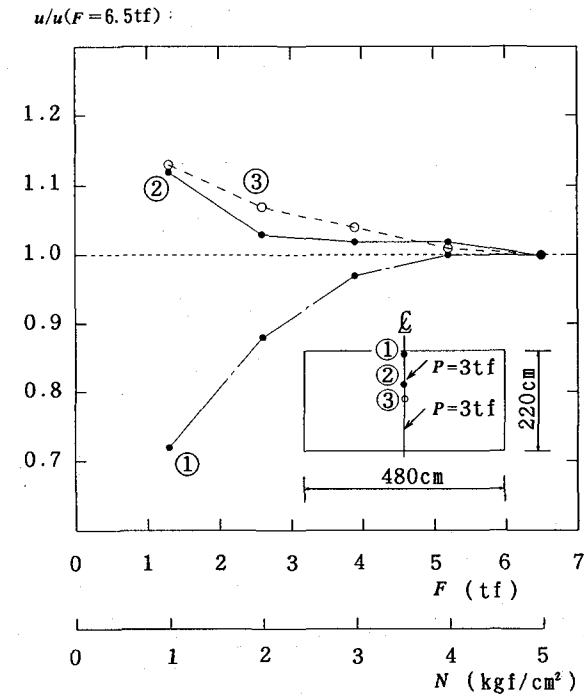
(a)



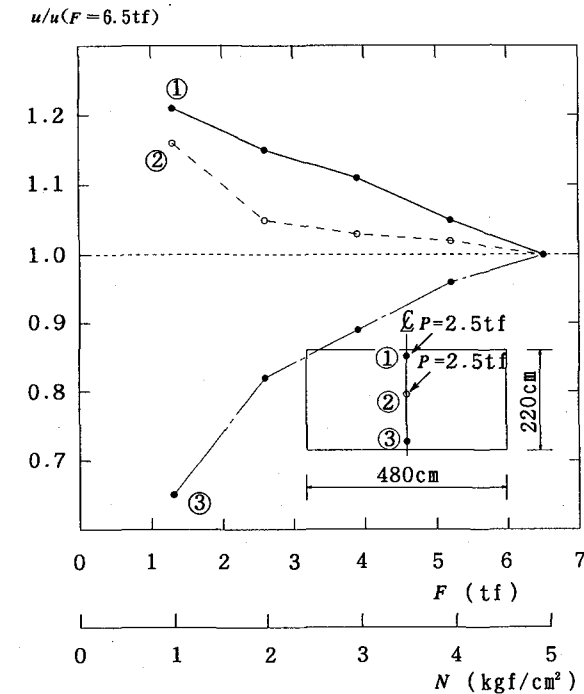
(b)

図-4 たわみ曲線(支間中央断面、偏心載荷)

プレストレス力 $F=6.5\text{tf}$ (目標プレストレス力 $F=7\text{tf}$ の93%) が60%損失しても最大のたわみに及ぼす影響は4%程度であることがわかる。図-3(b)には、 $F=1.3\text{tf}$ と 3.9tf に対する実験結果も示しているが、 $F=6.5\text{tf}$ と 3.9tf の実験結果に差異はほとんど見られない。



(a) 中央載荷 (支間中央断面)



(b) 偏心載荷 (支間中央断面)

図-5 たわみに及ぼすプレストレス力の影響

図-4は偏心載荷した場合で、支間中央で幅員端から22.5cmに輪荷重を載荷したときの、支間中央におけるたわみの実験値と計算値を示している。床版橋では一般に幅員端部に輪荷重が作用する場合が床版のたわみは最大となるが、図-4(a)より、初期プレストレス力が60%損失しても幅員端部の最大たわみに及ぼす影響は15%程度である。

図-5は、プレストレス力 F を変化させたときのたわみに及ぼす影響を示したものである。縦軸は、各測点のたわみと $F=6.5\text{tf}$ 時のたわみの比を表し、横軸は F と N で表示している。偏心載荷した場合、図-(b)より幅員端部 ①のたわみ比は F の減少に伴いほぼ線形的に増加するが、初期プレストレス力が80%程損失した $N=1\text{kgf/cm}^2$ の場合でも21%の差となっており、極端に大きな変形はみられない。また、幅員中央に輪荷重を載荷させた場合、たわみに及ぼすプレストレス損失の影響は偏心載荷より小さいことがわかる。実験結果からみると、スギLVLの場合、 $N=2\sim3\text{kgf/cm}^2$ の圧縮応力を確保すれば直交異方性板として挙動できると考えられるが、この N 値は、スギ集成材ラミナを使用したプレストレス木床版に対する値¹⁰⁾よりやや大となっている。なお、載荷実験中のプレストレス鋼棒のひずみ変化は、プレストレス集成材床版の場合¹⁰⁾と同様に、初期プレストレス力が60%程度損失しても、鋼棒の緊張力に及ぼす荷重の影響は実用上無視できる程度であった。

3.2 セン断弾性係数に及ぼすプレストレス力損失の影響

直交異方性板としてのせん断弾性係数を求めるため、プレートせん断試験を行った。試験体は、図-1(b)の幅員中央部におけるスギLVL30本を切断し、プレストレス鋼棒2本で緊張した板厚 t が22cmで120×120cmの正方形板である。

合板や単板のせん断弾性係数を求めるプレートせん断の試験法として、2隅角点支持で2点隅角加力法¹²⁾と、3隅角点支持で1点隅角加力法¹³⁾が用いられているが、

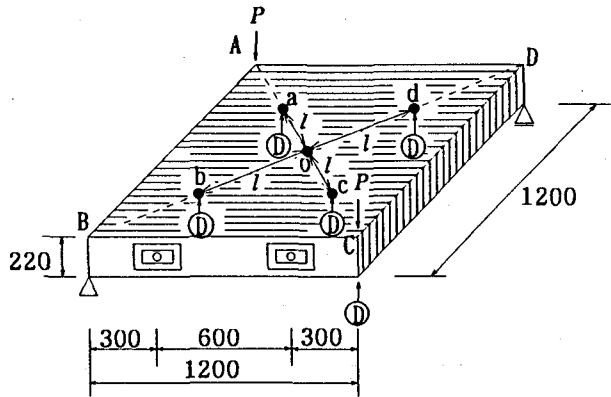


図-6 プレートせん断試験

ここではASTM (アメリカ材料学会)¹⁴⁾で規定されている前者の方法を採用した。図-6のように、試験体の一つの対角線の両端BとDで水平に支え、他の対角線の両端に集中荷重 P を作用させた。試験体の中心Oから対角線上で等距離 l にある点 a , b , c , d でたわみを測定し、中心Oに対する相対たわみ w を求めると、せん断弾性係数 G は次式より得られる¹⁴⁾。

$$G = \frac{3 l^2}{2 t^3} \cdot \frac{P}{w} \quad (1)$$

図-7は、プレストレス力 F を2 tfと5 tfとした試験体の2つの対角線上のたわみを示している。図中の黒丸は実験値の平均値を示しているが、これらの実験値を用いて式(1)よりせん断弾性係数 G が得られる。また、

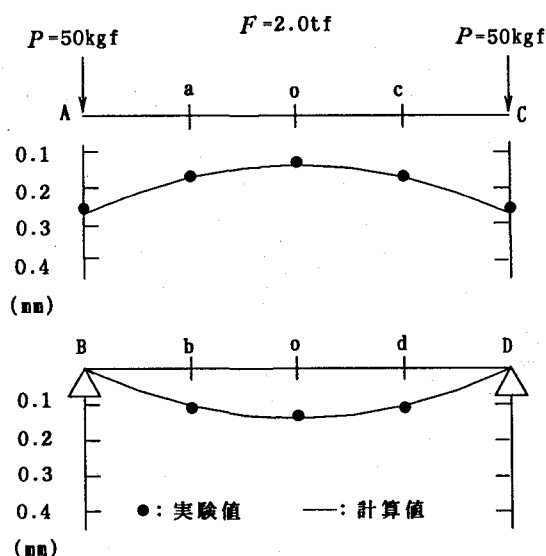


図-7(a) たわみ曲線 (対角線上、 $F = 2$ tf)

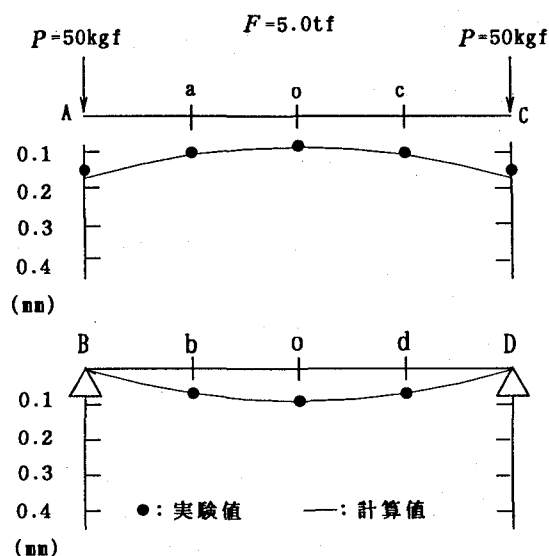


図-7(b) たわみ曲線 ($F = 5$ tf)

実線は有限要素法で解析した直交異方性板としての計算値を示している。ここで、橋軸方向のヤング係数 E_x は、試験体のスギLVL30本の平均が 91000 kgf/cm^2 で、幅員方向のヤング係数 E_y は図-11に示す値を用い、ポアソン比 $\nu_x = 0.4$ として解析した。

図-8は、プレストレス力 F を2 tfから6 tfまで変化させたときの、せん断弾性係数 G の実験値を示したものである。図より、 $F = 5$ tf 以上の試験体の場合、 $E_x = 91000 \text{ kgf/cm}^2$ より、集成材の設計計算で一般に用いられている G の値⁹⁾ ($E_x/15 = 6100 \text{ kgf/cm}^2$) と同程度の値となっている。また、初期プレストレス力が60%損失した $F = 2.8$ tfの場合、 G の値は $F = 6$ tfに対する値より30%程度小さくなる。

図中の実線は、ベイマツを使用したプレストレス床版

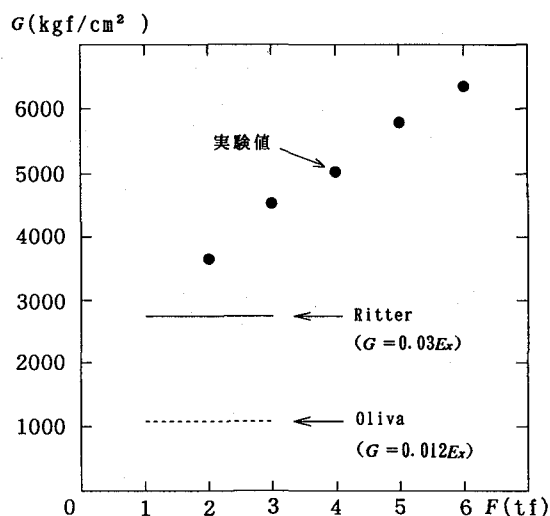


図-8 プレストレス力と G

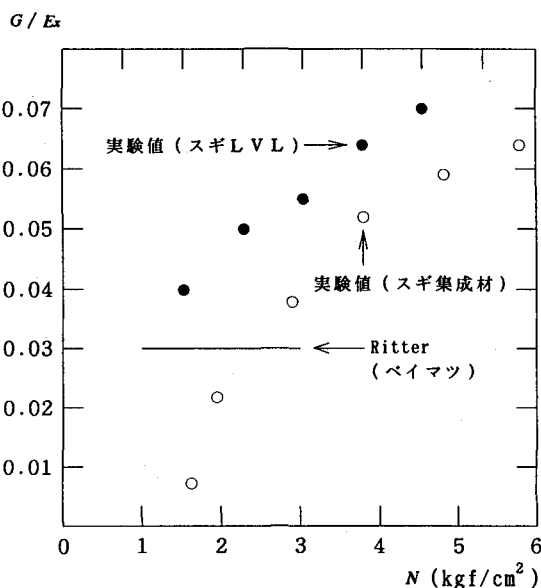


図-9 圧縮応力と G/E_x

の簡易設計法⁸⁾で用いられている関係式、 $G = 0.03 E_x$ を示したものであり、破線は Oliva¹⁶⁾が提示したベイマツに対する関係式 $G = 0.012 E_x$ を示している。図より、プレストレス力損失が60%の場合、実験値は簡易設計法で用いられている値の1.6倍となっている。

プレストレス力を変化させたときの木部に作用する圧縮応力 N と G/E_x の関係を図-9に示す。図中の黒丸は図-8の実験値と同じ値であり、白丸はスギ集成材を使用したプレストレス木床版に対する実験値¹⁰⁾である。プレストレス力損失が60%の場合、LVL床版に作用する N は 2.1 kgf/cm^2 で集成材に対しては 1.5 kgf/cm^2 ⁶⁾ となり、これらの N に対する G/E_x はLVL床版が6倍の値を有しており、また、LVL床版のねじり剛性は N の減少に伴いほぼ線形的に減少することがわかる。

3.3 幅員方向のヤング係数に及ぼすプレストレス力損失の影響

プレートせん断試験で用いたスギLVLを切断し、プレストレス鋼棒1本で緊張した試験体を用い、図-10に示す曲げ試験により幅員方向のヤング係数 E_y を求めた。

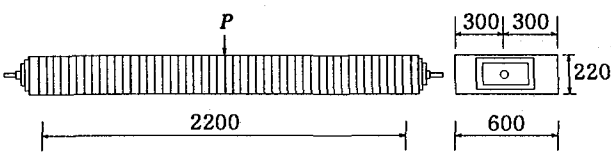


図-10 E_y の測定

プレストレス力 F を 2 tf から 6 tf まで変化させたときの E_y の実験値を図-11に示す。図より、初期プレストレス力に近接する $F = 6 \text{ tf}$ の場合、集成材の設計計算で一般に用いられている E_y の値 ($E_x/25 = 3600 \text{ kgf/cm}^2$) の45%程度の小さな値で、プレストレス力損失が60%の

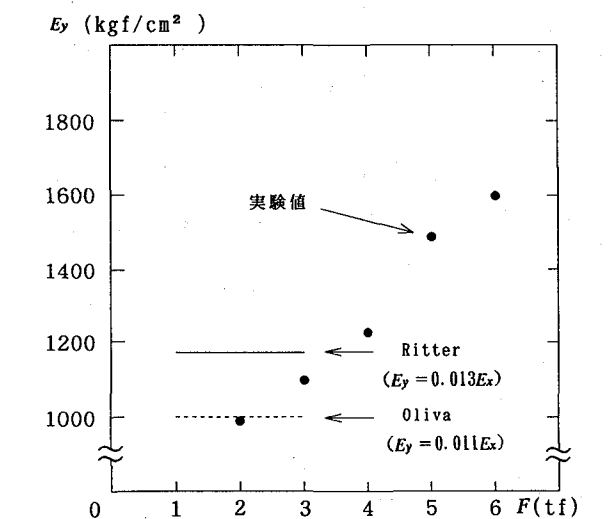


図-11 プレストレス力と E_y

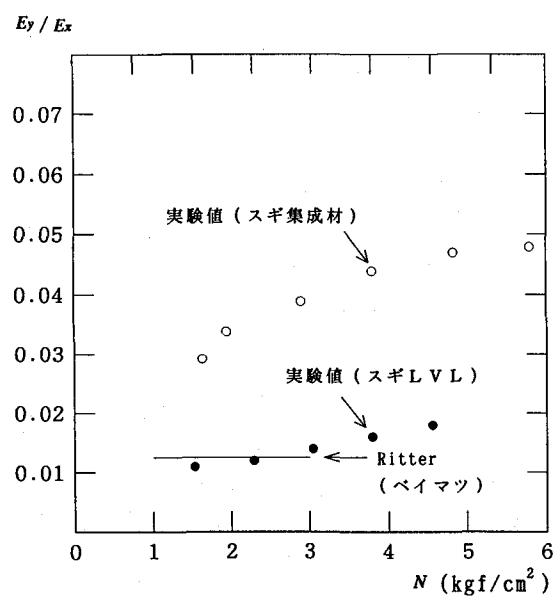


図-12 圧縮応力と E_y/E_x

$F = 2.8 \text{ tf}$ の場合、 E_y の値は $F = 6 \text{ tf}$ に対する値より35%減少する。

図中の実線は、簡易設計法の関係式 $E_y = 0.013 E_x$ で、破線は Oliva¹⁶⁾が提示した関係式 $E_y = 0.011 E_x$ を示している。図より、プレストレス力損失が60%の場合、実験値はこれらとほぼ同じ値が得られている。

プレストレス力を変化させたときの木部に作用する圧縮応力 N と E_y/E_x の関係を図-12に示す。図中の黒丸は図-11の実験値と同じ値であり、白丸はスギ集成材床版に対する実験値¹⁰⁾である。プレストレス力損失が60%の場合、LVL床版と集成材床版に作用する上記の N に対する E_y/E_x は、集成材床版が2.4倍となっており、LVL床版の E_y は集成材床版より著しく小さいことがわかる。

4. あとがき

スギLVLを利用したプレストレス床版について、LVLに作用する圧縮応力を変化させたときの、プレストレス床版の変形挙動に及ぼすプレストレス力損失の影響を調べた。また、直交異方性板としてのせん断弾性係数と、弱軸まわりのヤング係数に及ぼすプレストレス力の影響を考察した。得られた結果をまとめると以下になる。

(1) プレストレス木床版のたわみに及ぼすプレストレス力の影響を調べるために、LVLに作用する圧縮応力を変化させて曲げ試験を行った結果、プレストレス力損失が60%損失しても最大たわみに及ぼす影響は15%程度であった。また、プレストレス力損失が80%の場合でもたわみに及ぼす影響は21%であり、木床版を構成するスギLVLに与える架設時圧縮応力は、5～6 kgf/cm^2 で十分に直交異方性平板の挙動を示すことが明らかになった。

(2) セン断弾性係数 G に及ぼすプレストレス力の影響を調べるために、プレストレス力を変化させてプレートせん断試験を行った。実験結果より、木部に作用する圧縮応力が 4 kgf/cm^2 以上の場合、集成材の設計計算に一般に用いられている G の値と同程度の値が得られた。また、プレストレス力損失が60%の場合、実験値はベイマツに対して用いられている設計値より 1.6倍大きな値が得られた。

(3) 幅員方向のヤング係数 E_y に及ぼすプレストレス力の影響を調べるために、木部に作用する圧縮応力を変化させて曲げ試験を行った結果、初期プレストレス時の E_y は、集成材の設計計算に一般に用いられている E_y の半分以下の値であった。また、プレストレス力損失が60%の場合、 E_y の値は35%減少するが、ベイマツに対して用いられている設計値とほぼ同じ値が得られた。

以上、スギLVLを主構造材としたプレストレス床版の弾性係数 G と E_y は、スギ集成材に対する実験値やベイマツに対する設計値と異なった値が得られた。また、プレストレス力の損失により G と E_y の値は減少するが、プレストレスLVL床版のたわみに及ぼす影響は、スギ集成材床版の場合と同様に僅少であることが実験値と計算値より確かめられた。ただし、ここで示した各種の実験は、プレストレス力の経時変化に伴うものではなく、プレストレス量を変化させて行ったものである。スギLVL床版のプレストレス力の経時変化について、短期間の実測値と計算結果は報告しているが¹¹⁾、長期に亘る経時変動については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 日本農林規格協会：構造用単板積層材の日本農林規格，1991.
- 2) 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.
- 3) Ontario Highway Bridge Design Code，1983 Edition，Ministry of Transportation of Ontario，Downsview，Ontario，Canada.
- 4) AASHTO：Guide Specifications for the Design of Stressed-Laminated Wood Decks，1991.
- 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) (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.
- 8) Ritter，M.A.：Timber Bridges - Design，Construction，Inspection and Maintenance，Forest Service，USDA，Washington，D.C.，1990.
- 9) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，1995.
- 10) 長谷部薫，薄木征三，緑川哲生：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.
- 11) 薄木征三，古村崇，佐々木貴信，長谷部薫：プレストレスLVL床版橋の弾性及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.
- 12) March，H.W.，Kuenzi，E.W. and Kommers，qW.J.：Method of Measuring the Shearing Moduli in Wood，U.S.F.P.L. Report No. 1301，1942.
- 13) Tsai，S.W.：Experimental Determination of the elastic behavior of orthotropic plates，Journal of Engineering for Industry，Transaction American Society of Mechanical Engineering 315，1965.
- 14) American Society for Testing and Materials：Standard Test Method for Shear Modulus of Wood-Based Structural Panels，D3044-94，1994.
- 15) Oliva，M.G. and Dimakis，A.：Behavior of Stress-Laminated Timber Highway Bridge，Journal of Structural Engineering，ASCE，Vol. 114，No. 8，pp. 1850-1869，1988.

(1997年9月26日受付)