

プレストレス木床版の構造特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF PRESTRESSED LAMINATED TIMBER DECK

長谷部 薫*, 薄木 征三**, 緑川 哲生***

Kaoru HASEBE, Seizo USUKI and Tetsuo MIDORIKAWA

* 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)

*** 秋田大学大学院 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 glulam 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 stress will be lost during the lifetime of the bridge. The transverse elastic modulus is assumed to be 1.3%, and the shear modulus is assumed to be 3% of the longitudinal elastic modulus for a low level of prestress in the design of Douglas-fir decks. The bending and plate shear tests of the prestressed laminated timber 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, glued laminated timber

1. まえがき

プレストレス木床版は、製材または集成材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。この木床版は、カナダにおいてひき板を用いた釘打ち積層床版を補強するために1970年代に開発された工法で¹⁾、オンタリオ州の道路橋示方書 (OHBC) ²⁾ 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試験的に架設されるようになり、AASHTO³⁾ で標準化されている。その後、ひき板の代わりに集成材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設計⁷⁾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、鋼棒のリラクセーションと木材のクリープにより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 E_y ($=0.013E_x$) とせん断弾性係数 G_{xy} ($=0.03E_x$) は、米松を用いたプ

レストレス木床版のプレートせん断試験を基に、橋軸方向のヤング係数 E_x 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、OHBC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 ($E_y = 0.05E_x$, $G_{xy} = 0.065E_x$) は、構造用集成材の設計計算で一般に用いられている値⁸⁾と同程度であり、 E_y と G_{xy} に対してはプレストレス損失を考慮していないと考えられる。OHBCの規準値は初期のプレストレス力が保持されている場合、米松を用いたプレストレス木床版の載荷試験結果を説明できるが、プレストレス力が損失すると実験値と合わなくなることが報告されている⁹⁾。

ここでは、秋田県内の林道に架設された国産材の杉を主材料としたプレストレス木床版橋⁶⁾の1/2モデルを用い、集成材ラミナ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、集成材ラミナ間に作用させる必要圧縮応力を明らかにし、設計のための基礎資料を得ることを目的とする。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. 集成材ラミナのヤング係数

実験で用いた1/2モデルを図-1に示す。図-1(b)で、外層1枚がから松、内層5枚が杉で構成されたB断面の複合集成材ラミナ40本を主構造材とし、A断面のなら集成材ラミナ9本が幅員方向の床版端部とその中間部に配置されている。使用されている全ての集成材ラミナは、幅4.35~5cm、高さ17cm、長さ4mである。図-1(a)より、プレストレス鋼棒の橋軸方向の間隔は61.5cmであり、床版端部で15.5cmである。

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¹⁰⁾、その後プレストレス木床版のクリープ特性を調べるために、実験室内でプレストレス鋼棒の緊張力の径時変化の測定に供されてきたものである。今回測定した各ラミナの橋軸方向（繊維方向）の平均曲げヤング係数を表-1

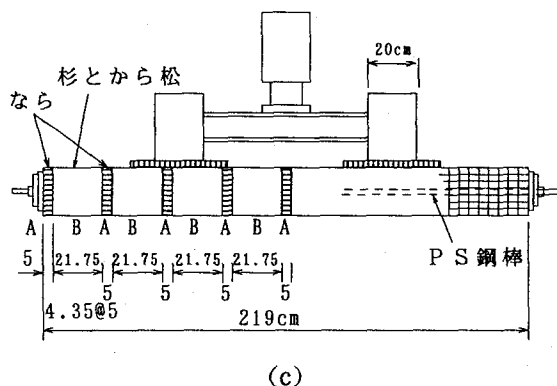
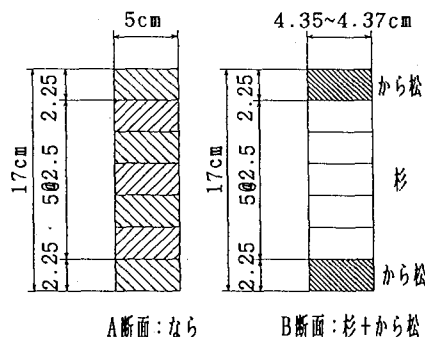
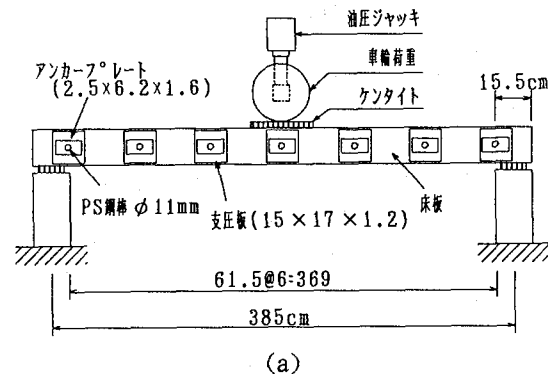


図-1 1/2モデル一般図

に示す。これは、長さ4mのラミナを単純支持し、支間を3.85mとして支間中央に集中荷重を作用させて得られた値である。文献10)の値と比べると、から松と杉の複合集成材ラミナおよびなら集成材ラミナは共に平均で4%の減少で、繊維方向のヤング係数に及ぼす17カ月間のクリープの影響は僅少であった。

表-1 ラミナのヤング係数

	本数	平均 E_{xm} (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
から松+杉ラミナ	40	87600	8.5
ならラミナ	9	113900	8.3

3. 実験結果

3.1 たわみに及ぼす影響

実橋では、架設時に集成材ラミナ間に3.8kgf/cm²の圧縮応力（60%損失後1.5kgf/cm²）が一樣に作用するように設計されている。1/2モデルを製作したときのプレストレス鋼棒に与えた緊張力は5tfで、これによる圧縮応力は4.8kgf/cm²となり、設計値より26%大とした。プレストレス鋼棒の緊張力の測定は、7本の鋼棒に貼付したひずみゲージにより行われ、17カ月後の今回行った実験時の緊張力は、床版端部のNo.1(図-2参照)で60%の損失、支間中央部のNo.4で27%、他の5本は約35%の損失が見られた。

手動式油圧ジャッキを用い、プレストレス鋼棒7本の緊張力を解放した後、2.で示したように各集成材ラミナのヤング係数を測定し、再度No.1の鋼棒から順次所定の圧縮応力になるまで緊張した。静的荷重の載荷は、図-1(a)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のケンタイトを用いている。

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

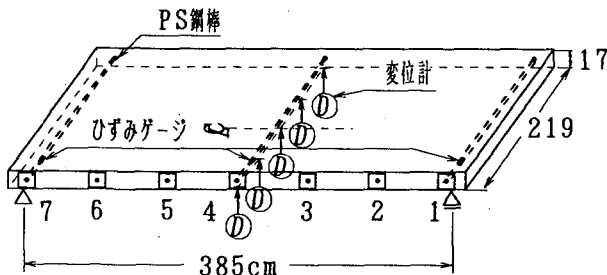


図-2 PS鋼棒と測定具

$E_y = 4050 \text{ kgf/cm}^2$ とせん断弾性係数 $G_{xy} = 3780 \text{ kgf/cm}^2$ ($= G$) およびポアソン比 $\nu_x = 0.4^{(10)}$ 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、黒丸はプレストレス力 $F = 5 \text{ tf}$ 時の実験値で、白丸は、ラミナ間の圧縮応力 N が 1.6 kgf/cm^2 となる $F = 1.7 \text{ tf}$ を作用させたときの結果である。また、破線は $F = 1.7 \text{ tf}$ 対

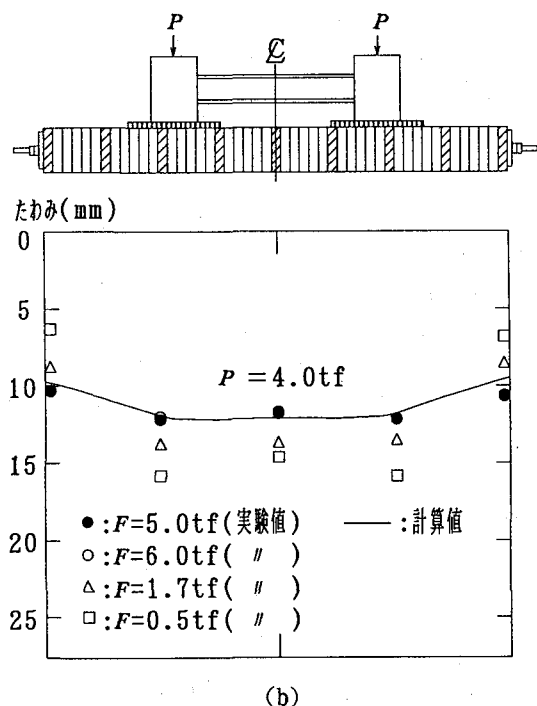
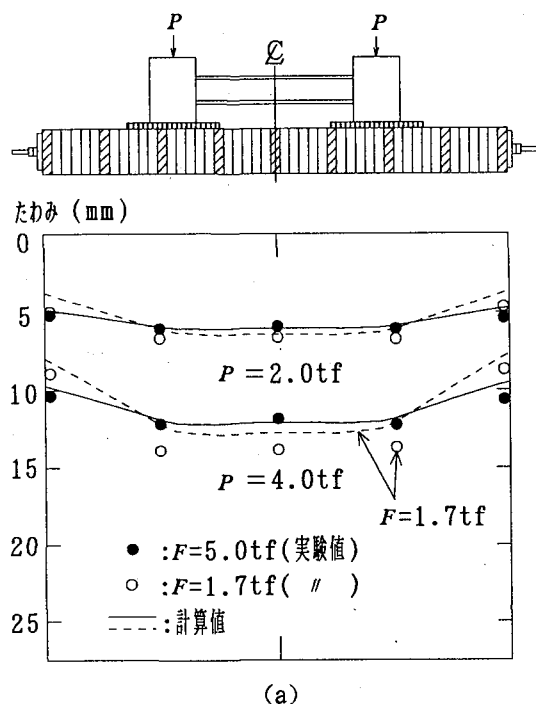


図-3 たわみ曲線(支間中央断面)

する計算値で、 E_x と ν_x は上記の値を用い、 $G = 650 \text{ kgf/cm}^2$ (図-9参照) と $E_y = 2550 \text{ kgf/cm}^2$ (図-11参照) を用いて得られたものである。図より、初期プレストレス力が60%損失してもたわみに及ぼす影響は10%程度であることがわかる。図-3(b)には、 $F = 0.5 \text{ tf}$ と 6 tf に対する実験結果も示しているが、 $F = 5 \text{ tf}$ と 6 tf の実験結果に差異はほとんど見られない。

図-4は、プレストレス力 F を 0.25 tf から 6 tf まで変化させたときの、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 $F = 5 \text{ tf}$ 時のたわみの比を表し、横軸は F と N で表示している。図中の黒丸と白丸は、幅員端部と載荷点付近および幅員中央のたわみ比を示している。図より、 $N = 2.0 \sim 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲では大きな相違は見られず5%前後のたわみ差となっている。また、初期プレストレス力が90%損失した $N = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合でも20%程の差となっており、極端に大きな変形はみられない。実験結果からみると、から松と杉の複合集成材の場合、 $N = 1.5 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 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ものと考えられる。また図-3でも示したように、 $N \geq (4 \sim 5 \text{ kgf/cm}^2)$ の範囲ではほぼ同様な変形挙動を示すものと思われる。

載荷実験中のプレストレス鋼棒1と4のひずみ変化を図-5に示す。実橋の衝撃を含む設計荷重に相当する荷重は $P = 1.5 \text{ tf}$ であり、これの2.7倍の $P = 4 \text{ tf}$ までのひずみ変化を示している。プレストレス力 F が 0.5 tf の場合、鋼棒4のひずみは $P = 1.5 \text{ tf}$ 付近からほぼ線形的に増大していくが、 $F = 2 \text{ tf}$ に対しては最大で10%

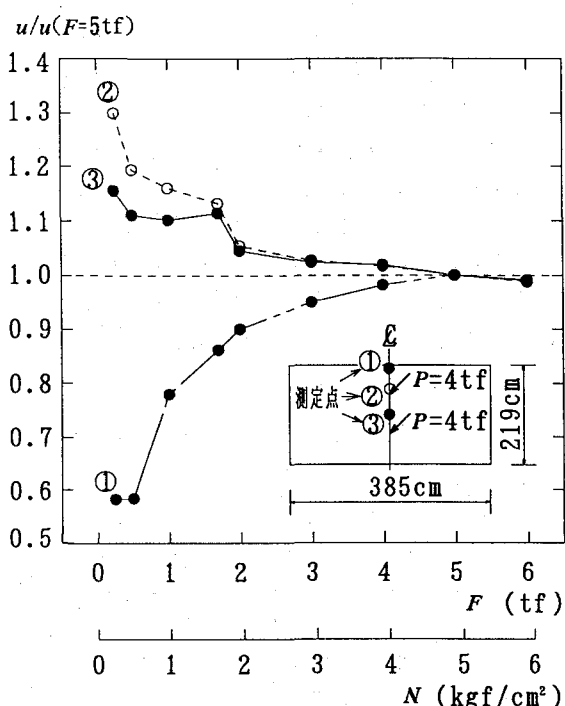


図-4 たわみに及ぼすプレストレス力の影響

$$\varepsilon/\varepsilon_0(P=0)$$

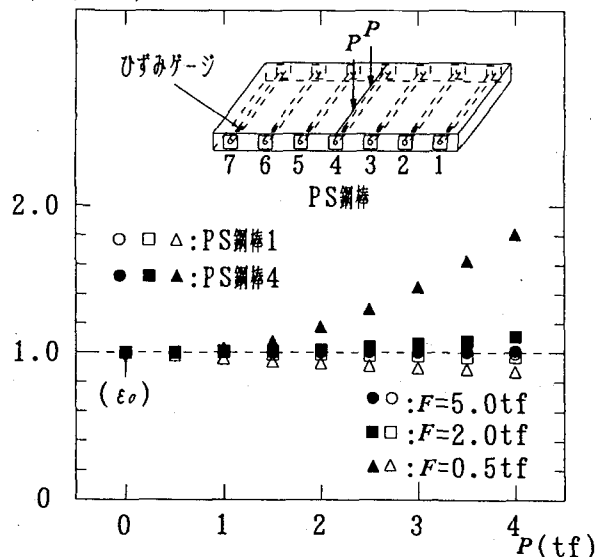


図-5 载荷中の鋼棒のひずみ変化

程度の変動となっており、 $F=5\text{tf}$ の床版ではひずみの変動はほとんど見られない。これより、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問題ないと考えられる。

3.2 セン断弾性係数に及ぼす影響

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-6に示すように、図-1(c)の幅員中央部における集成材ラミナ25本を切断し、プレストレス鋼棒2本で緊張した板厚 t が17cmで112×112cm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¹¹⁾と、3隅角点支持で1点隅角加力法¹²⁾が用いられているが、ここでは前者の方法を採用した。この試験法は平板のねじりせん断を起こさせる方法で、板の変形が板厚に比べてきわめて小さい範囲内で適用できるとされている¹¹⁾。

図-7のように、試験体を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

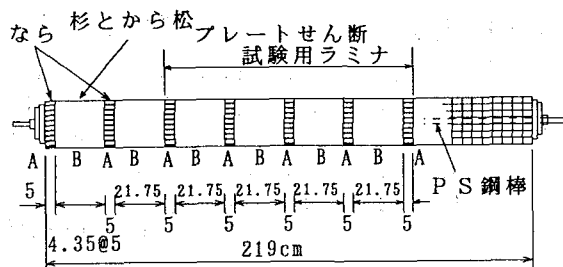


図-6 プレートせん断試験用ラミナ

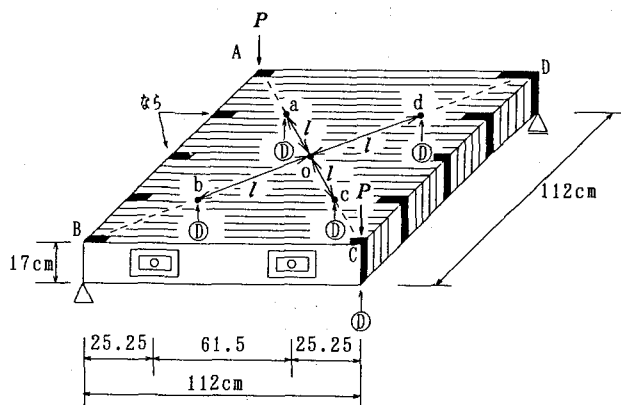


図-7 プレートせん断試験

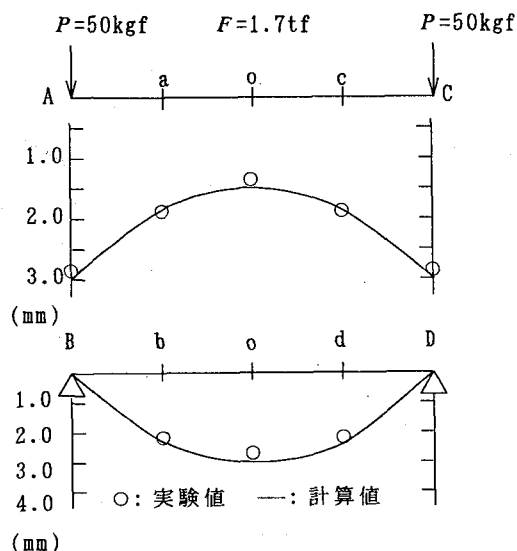


図-8(a) たわみ曲線(対角線上、 $F=1.7\text{tf}$)

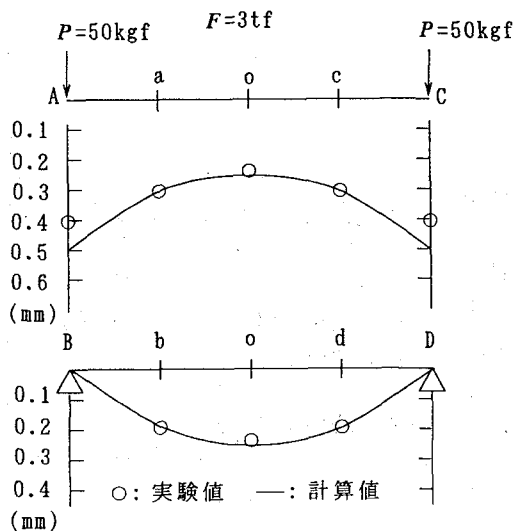


図-8(b) たわみ曲線($F=3\text{tf}$)

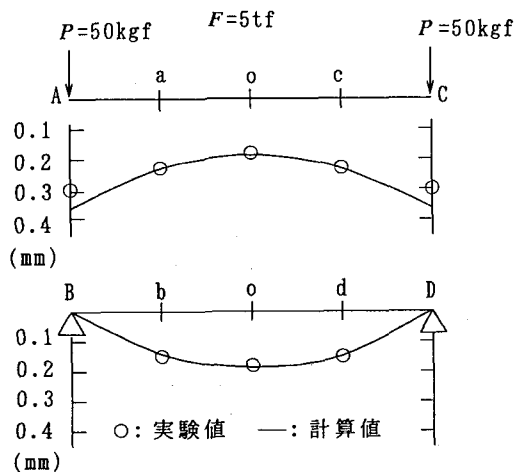


図-8(c) たわみ曲線 ($F = 5 \text{ tf}$)

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。

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

図-8は、プレストレス力 F を1.7tf, 3tf, 5tfとした試験体の2つの対角線上のたわみを示している。図中の白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、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、図-6のラミナに対しから松+杉集成材20本の平均が82700kgf/cm²、なら集成材5本の平均が104200kgf/cm²で、幅員方向のヤング係数 E_y は後述の値を用い、ポアソン比 $\nu_x = 0.4$ として解析した。

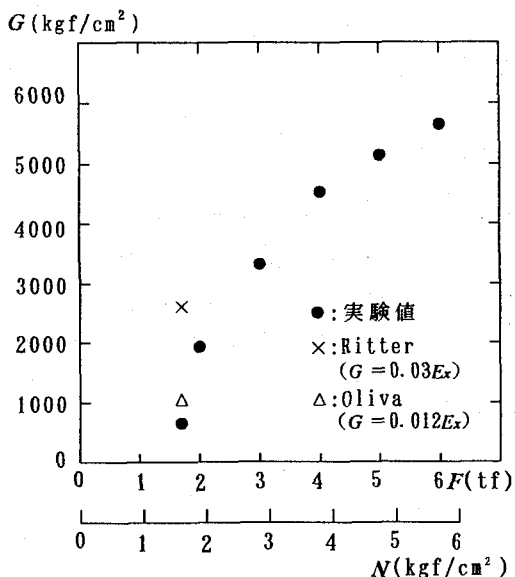


図-9 プレストレス力と G

図-9は、プレストレス力 F を1.7tfから6tf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り、横軸はプレストレス力 F と木部に作用する圧縮応力 N で表示している。図より、 $N = 4 \text{ kgf/cm}^2$ 以上の試験体の場合、プレートせん断試験体としての等価ヤング係数 $E_x = 87300 \text{ kgf/cm}^2$ より、集成材の設計計算で一般に用いられている G の値⁸⁾ ($\approx E_x/15 = 5800 \text{ kgf/cm}^2$) 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 $N = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、 G の値は $N = 4 \text{ kgf/cm}^2$ に対する値より80%程度小さくなる。

図中の×印は、米松を使用したプレストレス木床版の実用的な簡易設計法⁷⁾ で用いられている関係式、 $G = 0.03E_x$ を示したものであり、△印は Oliva⁹⁾ が提示した米松に対する関係式 $G = 0.012E_x$ 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 Oliva の値よりやや小さな値となっている。

3.3 幅員方向のヤング係数に及ぼす影響

プレートせん断試験で用いた集成材ラミナを切断し、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。プレストレス力 F を1.7tfから6tf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、 $N = 4 \text{ kgf/cm}^2$ 以上の場合、集成材の設計計算で一般に用いられている E_y の値($\approx E_x/25$) と同程度の値が得られており、プレストレス力損失が60%の $F = 1.7 \text{ tf}$ の場合、 E_y

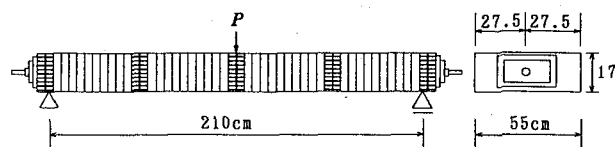


図-10 E_y の測定

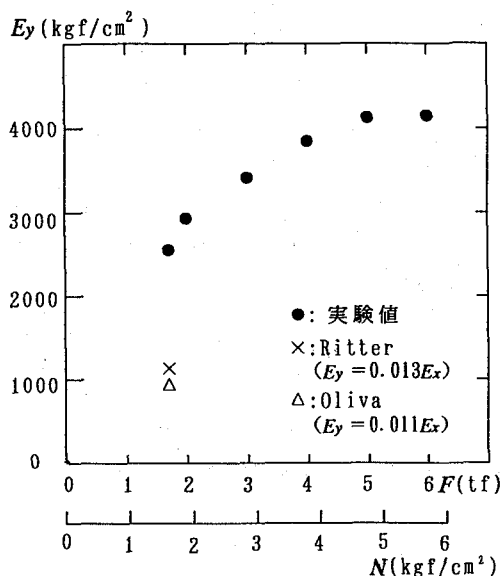


図-11 プレストレス力と E_y

の値は40%程度小さくなっている。

図中の×印は、簡易設計法⁷⁾の関係式 $E_y = 0.013 E_x$ で、△印は Oliva⁹⁾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、実験値はこれらの2倍程度の値が得られている。

4. あとがき

杉を主構造材としたプレストレス木床版について、集成材ラミナに作用する圧縮応力を変化させたときの、プレストレス木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ようになる。

(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、集成材ラミナに作用する圧縮応力を変化させて曲げ試験を行った。設計で想定しているプレストレス力の損失は60%であるが、実験結果より、プレストレス力損失が60%の場合、たわみに及ぼす影響は10%程度であった。また、プレストレス力損失が90%の場合でも、たわみに及ぼす影響は約20%であり、木床版を構成する杉集成材に与える架設時圧縮応力は、4~5 kgf/cm² 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) せん断弾性係数 G に及ぼすプレストレス力の影響を調べるために、プレストレス鋼棒2本を有する厚さ17cmで112×112cmの正方形板を用い、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/cm² 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、実験値は米松に対して用いられている設計値より小さな値が得られた。

(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、プレストレス鋼棒1本を有する55×17×220cmの試験体を用いて模型実験を行った。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、圧縮応力が4 kgf/cm² 以上の場合、集成材の設計計算に一般に用いられている E_y 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、 E_y の値は40%程度低下するが、米松に対して用いられている設計値の2倍程度の値が得られた。

以上、今回行った実験は、限られた樹種で試験体数も少ないが、(2)と(3)で示したように、杉集成材を主構造材としたプレストレス木床版の弾性係数 G と E_y は、米松に対する設計値と異なった値となり、杉を含め他の樹

種に対する設計規準を作成するためには、今後更なるデータの蓄積が必要と思われる。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、(1)で示したように、プレストレス木床版のたわみに及ぼす影響は僅少であることが実験値と計算値より確かめられた。

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) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 1995.
- 9) 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.
- 10) 薄木征三, 清水功雄, 長谷部薫: プレストレス木床版の弾性及びクリープ挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp.1301-1312, 1994.
- 11) March, H.W., Kuenzi, E.W. and Kommers, W.J.: Method of Measuring the Shearing Moduli in Wood, U.S.F.P.L. Report No.1301, 1942.
- 12) 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.

(1996年9月6日受付)