

# 静的4点曲げ試験から得られた合板のヤング率および ポアソン比の測定値におよぼす試験体幅の影響

吉原 浩<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>島根大学大学院総合理工学研究科 建築・生産設計工学領域

## Influence of the specimen width on the values of Young's modulus and Poisson's ratio of plywood measured by static four-point bending test

Hiroshi YOSHIHARA<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Department of Architecture and Production Design Engineering,  
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University*

### Abstract

In this study, Young's modulus and Poisson's ratio of Lauan 5-ply wood as obtained by a static four-point bending test was examined by varying the width of the specimen. Additionally, three-dimensional finite element calculations were conducted to examine the influence of the width. A comparison of the experimental and numerical results revealed that the width of the plywood strip should be large enough to determine Poisson's ratio properly when the fiber direction of the surface veneer coincided with the length direction of the specimen. In contrast, this influence was not so significant when the fiber direction of the surface veneer coincided with the width direction of the specimen. Although Young's modulus can be determined properly independently from the width of the specimen, it is significantly influenced from the measurement method of the deflection. In particular, the Young's modulus obtained from the method determined as that in JIS Z2101-2009 was estimated to be extremely larger than those obtained from the other methods.

### 1. はじめに

合板は構造材料として古くからもっとも頻繁に使用されている木質材料のひとつである。したがって、合板を適切に利用するためには、弾性定数などの力学特性を精度よく評価する必要があり、ASTMやJASには力学特性評価法が規格化されている[1-5]。

合板の弾性定数は、構成する単板の弾性定数を積層理論に依拠して解析することが多い。しかし、これまでの研究結果から、積層による応力やひずみの不均一な分布などによってかならずしも積層理論で予測されるような傾向を示さないことが明らかになってきた。たとえば前報では合板を引張試験することでヤング率とポアソン比の測定を試みた[6]。その結果、ポアソン比の測定値に試験体幅の影響が顕著であり、一定の幅よりも大きな試験体を使用しなければ適切にポアソン比を測定することができないことがわかった。一方、ヤング率の測定には試験体幅の影響が小さいことが示された。

合板の引張試験で得られたヤング率やポアソン比の測

定値におよぼす試験体幅の影響は、曲げ試験にも当てはまると考えられる。しかし、合板のように積層構造を有する材料は、軸力を負荷した場合と曲げ荷重を負荷した場合で得られるヤング率やポアソン比の値が異なるため、精度よくヤング率やポアソン比が得られるために必要な試験体形状が引張試験の場合と異なることが考えられる。また、曲げ試験ではたわみやひずみの測定方法によって得られるヤング率の値が変わるため、合板のヤング率の測定値にいかなる影響があるかについて検討することも重要である。

そこで、本研究ではさまざまな試験体幅のラワン5プライ合板を用いて静的4点曲げ試験を実施し、ヤング率およびポアソン比におよぼす試験体幅の影響について検討した。また、3次元の有限要素法解析を実施して実際の4点曲げ試験の結果と比較し、精度よくヤング率やポアソン比を得るために必要な試験体幅について検討した。

## 2. 曲げ負荷における合板の弾性定数

試験体の長手方向が合板の表層の繊維方向あるいは接線方向と一致するように試験体を採取し、試験体の長手方向、幅方向および厚さ方向をそれぞれ $x, y, z$ 方向と定義する。また、表層単板の繊維方向が試験体の長手方向と一致するものをLタイプ、幅方向に一致するものをTタイプと定義する。これらの試験体の $xz$ 面に曲げ負荷を与えて得られたLタイプおよびTタイプの試験体の $x$ 方向のヤング率をそれぞれ $E_x^L$ および $E_x^T$ 、ポアソン比をそれぞれ $\nu_{xz}^L$ および $\nu_{xz}^T$ で定義する。

積層理論から合板の曲げヤング率は以下の式で与えられる[7].

$$E_x^L, E_x^T = \frac{\sum (E_L I_L + E_T I_T)}{I} \quad (1)$$

ここで $E_L$ および $E_T$ は単板の繊維方向および接線方向のヤング率、 $I_L$ および $I_T$ は繊維方向および接線方向が試験体の長手方向と一致している単板の断面2次モーメント、 $I$ は合板全体の断面2次モーメントである。また、ヤング率と同様、積層理論から合板の曲げ負荷におけるポアソン比は単板のポアソン比と断面2次モーメントを用いて以下のように与えられる。

$$\begin{cases} \nu_{xz}^L = \frac{E_T \nu_{LT}}{E_x^T} \\ \nu_{xz}^T = \frac{E_T \nu_{LT}}{E_x^L} \end{cases} \quad (2)$$

ここで $\nu_{LT}$ は単板の板目面のポアソン比である。

## 3. 実験方法

### 3.1 有限要素法解析

後述する静的曲げ試験に先立ち、3次元の有限要素法解析を実施して試験体幅の影響について検討した。解析には有限要素法解析プログラムのANSYS 12.0を使用した。図1に解析に使用したメッシュを示す。この図のように、全長320 mm、厚さ9 mm、幅10, 15, 20, 30, 40, 50 mmの有限要素モデルを作成した。また、表1に解析に使用したラワンの弾性定数を示す。実験には市販の合板を使用したため、構成する単板の弾性定数を測定することが困難であった。したがって、文献[8]に記載されているラワンの弾性定数を用いた。上述したように、表層および中心層の繊維方向がモデルの長手方向に一致しているものをLタイプ、幅方向に一致しているものをTタイプとした。

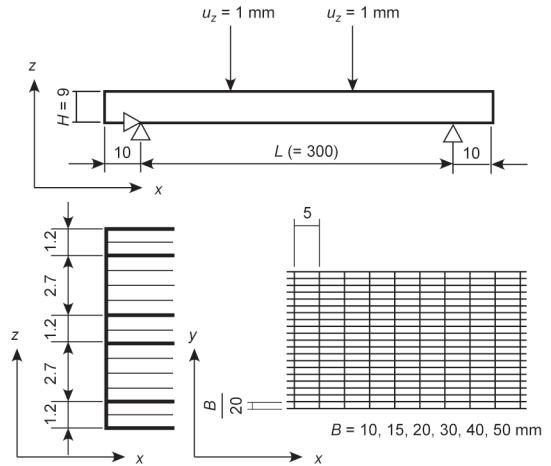


図1 有限要素法解析に使用したメッシュおよび境界条件の概要

表1 有限要素法解析に使用した弾性定数

ヤング率 (GPa)			せん断弾性係数(GPa)			ポアソン比		
$E_L$	$E_T$	$E_R$	$G_{LT}$	$G_{TR}$	$G_{LR}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{TR}$	$\nu_{LR}$
12.9	0.51	1.00	0.48	0.11	0.65	0.61	0.31	0.39

添字L, T, Rはそれぞれラワン単板の繊維方向、接線方向および半径方向を示す

図1のようにモデル下端の節点をスパン300 mmで支持し、モデル上端でスパンの3等分点に相当する節点に $u_z = 1$  mmの変位を下向きに与えた。荷重点における反力の合計 $P$ 、モデル下面のスパン中央部における節点の変位 $\delta_{MS}$ および長手方向のひずみ $\epsilon_x$ 、荷重点裏の節点の変位 $\delta_{LP}$ を得た。以下の式を用いてヤング率 $E_x^L$ および $E_x^T$ を求めた。

$$E_x^L, E_x^T = \begin{cases} \frac{23PL^3}{108BH^3\delta_{MS}} \\ \frac{5PL^3}{27BH^3\delta_{LP}} \\ \frac{PL}{BH^2\epsilon_x} \\ \frac{PL^3}{36BH^3(\delta_{MS} - \delta_{LP})} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)の中で、 $P-(\delta_{MS} - \delta_{LP})$ 関係から曲げヤング率を求める方法は、木材素材のヤング率の測定法としてJIS Z2101-2009に規格化されている[9].

ポアソン比 $\nu_{xz}^L$ および $\nu_{xz}^T$ はモデル下面のスパン中央部における長手方向のひずみ $\epsilon_x$ と幅方向のひずみ $\epsilon_y$ を以下の式に代入して求めた。

$$\nu_x^L, \nu_x^T = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (4)$$

一方、表1に示されたヤング率およびポアソン比を積層理論から得られる式(1)と式(2)に代入することによりヤング率 $E_x^L$ 、 $E_x^T$ とポアソン比 $\nu_{xz}^L$ 、 $\nu_{xz}^T$ を求め、有限要素法解析で得られた結果と比較した。表2に $E_x^L$ 、 $E_x^T$ 、 $\nu_{xz}^L$ および $\nu_{xz}^T$ の値を示す。

表2 表1に示された値を積層理論に代入することで得られた合板モデルのヤング率およびポアソン比

ヤング率 (GPa)		ポアソン比	
$E_x^L$	$E_x^T$	$\nu_{xz}^L$	$\nu_{xz}^T$
8.04	5.37	0.058	0.039

### 3.2 試験体

試験には市販のラワン5プライ合板（上野木材工業社製）を使用した。合板の最初の寸法は $910 \times 1820 \times 9 \text{ mm}^3$ で、奇数層（表層と中心層）および偶数層の厚さはそれぞれおよそ1.2および2.7 mmであった。また、気乾状態における合板の密度は $0.50 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ であった。この合板から、試験体の長手方向が表層の繊維方向あるいは接線方向に一致するようにし、長さ320 mm、幅60 mmの試験体を作製した。表層の繊維方向が試験体の長手方向と一致するものをLタイプ、幅方向と一致するものをTタイプと定義した。LタイプおよびTタイプの試験体をそれぞれ7本ずつ準備し、後述する静的4点曲げ試験に使用した。

試験体の表層の中央部に2軸のひずみゲージ（東京測器FCA-2-11、ゲージ長2 mm）を貼付し、後述する静的4点曲げ試験を実施した。曲げ試験が終了した後、丸のこで試験体の幅方向を切断し再び曲げ試験を行った。試験体の幅は60 mmから20 mmまでは10 mm間隔で、20 mmから10 mmまでは5 mm間隔で狭くした。

### 3.3 静的4点曲げ試験

上述した試験体を用いて静的4点曲げ試験を実施した。スパン300 mmでひずみゲージがスパン中央下部になるように支持し、試験体上面の3等分点にクロスヘッド速度1 mm/minで荷重 $P$ を負荷した。スパン中央のたわみ $\delta_{MS}$ および荷重点におけるたわみ $\delta_{LP}$ は試験体の下に設置した変位計で測定した。試験体に材料非線形が発生しないように、試験体の長手方向のひずみ $\varepsilon_x$ が $1 \times 10^3$ に達した後速やかに除荷した。 $P$ - $\delta_{MS}$ 、 $P$ - $\delta_{LP}$ 、 $P$ - $\varepsilon_x$ および $P$ - $(\delta_{MS} - \delta_{LP})$ 関係の初期の傾きを式(3)に代入し、ヤング率 $E_x^L$ および $E_x^T$ を求めた。また、 $\varepsilon_x$ - $\varepsilon_y$ 関係の初期の傾きを式(4)に代入

し、ポアソン比 $\nu_{xz}^L$ および $\nu_{xz}^T$ を求めた。こうして静的4点曲げ曲げ試験で得られるヤング率とポアソン比におよぼす試験体幅の影響について検討した。

### 3. 結果および考察

図2に有限要素法解析で得られたヤング率と試験体幅の関係を示す。前報で得られた引張ヤング率と同様に、曲げヤング率についても試験体幅の影響は小さいことが示されている。ただし、スパン中央あるいは荷重点におけるたわみのみを使用してヤング率を求めた場合、せん断力に起因する付加たわみの影響でヤング率が小さくなる傾向があるが、ここでも同様の傾向が現れている。

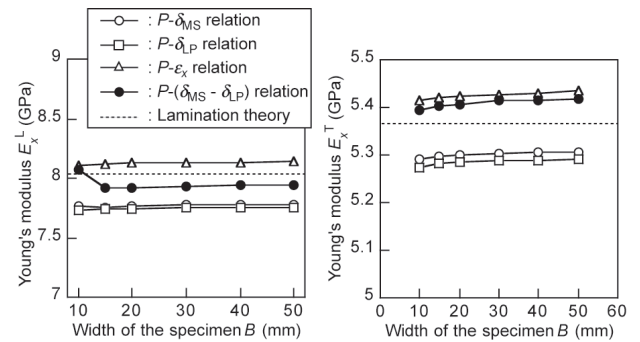


図2 有限要素法解析によって得られたヤング率と試験体幅の関係

図3に有限要素法解析で得られたポアソン比と試験体幅の関係を示す。ヤング率と異なり、ポアソン比には試験体の幅が顕著であり、試験体幅が狭くなるほどLタイプモデルのポアソン比 $\nu_{xz}^L$ は上昇し、Tタイプモデルのポアソン比 $\nu_{xz}^T$ は減少する傾向を示している。こうした試験体幅の影響は引張試験から得られたポアソン比の傾向と同様である[6]。ただし、曲げ試験におけるTタイプモデルのポアソン比の変動は引張試験から得られた変動よりも小さく、試験体幅の影響は小さくなる可能性を示唆している。

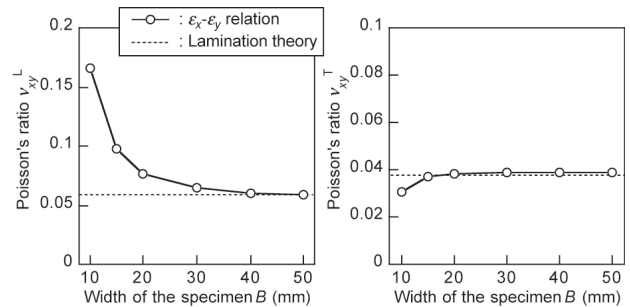


図3 有限要素法解析によって得られたポアソン比と試験体幅の関係

図4に静的4点曲げ試験から得られたヤング率と試験体幅の関係を示す。有限要素法解析の結果と同様、いずれの荷重-たわみ関係あるいは荷重-ひずみ関係を用いても試験体幅の影響は少ないことが示されている。ただし、スパン中央と荷重点におけるたわみの差を用いて求めたヤング率の値は他の方法で求めたヤング率の値よりも著しく大きくなっている。また、変動係数も他の方法に比べて大きいことを示している。この方法はせん断力に起因するたわみの影響を排除する上で効果的で、前述したように木材素材のヤング率の測定法としてJIS Z2101-2009に規格化されている[9]。しかし、本研究の結果ではこの方法では精度よくヤング率を測定することができないことが示されている。ただし、JISに規格化された方法ではスパンを、はりせいの12~16倍にしているのに対し、本研究で実施した曲げ試験ではスパンをはりせいの33倍にしてため、こうした試験条件がヤング率の測定値に影響を与えた可能性がある。こうした影響の解明については今後の検討課題である。

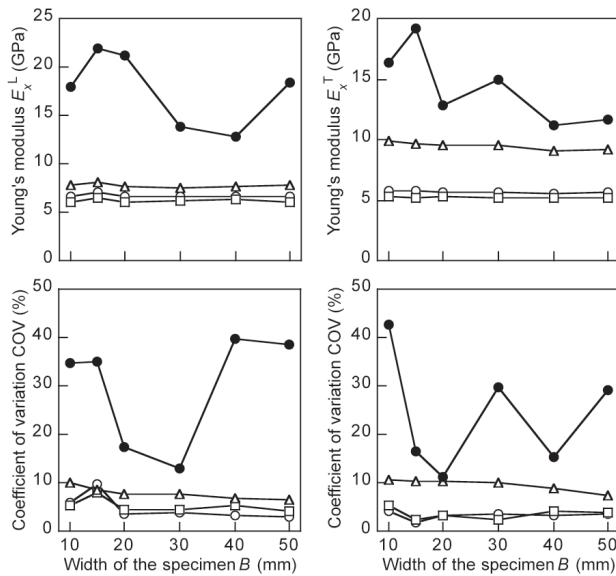


図4 静的4点曲げ試験で得られたヤング率と試験体幅の関係。記号は図2を参照

図5に静的4点曲げ試験で得られたポアソン比と試験体幅の関係を示す。Lタイプの試験体については有限要素法解析の結果と同様に試験体幅が狭くなるほどポアソン比 $\nu_{yz}^L$ は上昇している。各試験体幅から得られたポアソン比について平均値の差の検定を実施したところ、Lタイプの試験体では幅が15 mmでは有意水準0.05でそれ以上の幅を持つ試験体と差があり、幅が10 mmでは有意水準0.01で差があることがわかった。これに対し、Tタイプの試験体のポアソン比 $\nu_{yz}^T$ は試験体幅に関わらずほぼ一定で、すべての試験体幅について平均値に有意差がないことがわ

かった。実験および有限要素法解析の結果から、曲げ負荷で合板のポアソン比を求める場合、Lタイプの試験体では試験体幅を十分に考慮して試験を実施する必要があるが、Tタイプの試験体ではあまり試験体幅の影響を考慮しなくてもいいと思われる。ただし、合板の積層数や単板の厚さなどの構成が変わることによってTタイプの試験体から得られるポアソン比の値も影響を受けることが考えられる。こうした影響についても今後の検討課題である。

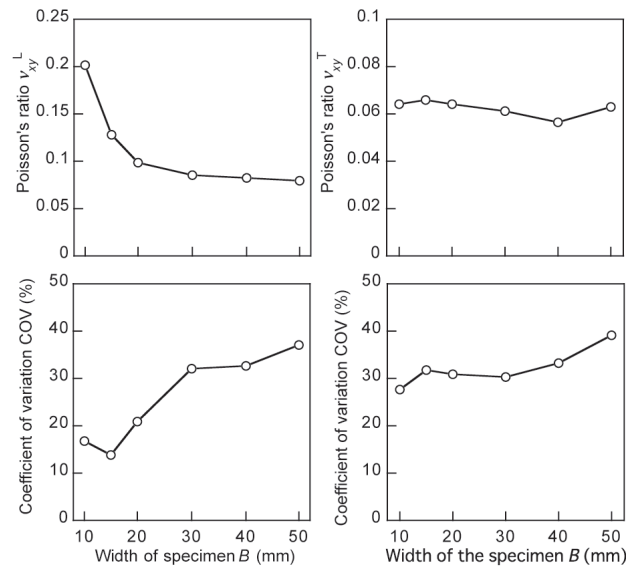


図5 静的4点曲げ試験で得られたポアソン比と試験体幅の関係

#### 4. 結論

ラワン5プライ合板の試験体幅をさまざまに変えて静的4点曲げ試験を実施し、測定されたヤング率およびポアソン比の値におよぼす試験体幅の影響について検討したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 引張試験と同様、曲げ試験で得られたヤング率には試験体幅の影響は見られなかった。
- (2) JIS Z2101-2009に準拠した方法で求めた曲げヤング率は、他の方法で求めたヤング率に比べて大きく、変動も大きくなった。本研究で採用したスパン/はりせい比は33であり、木材素材の規格であるJIS Z2101-2009に定められているスパン/はりせい比よりも大きかったため、このような実験条件がヤング率の測定値に影響を与えたことが考えられるが、今後の検討課題である。
- (3) 合板を構成する表層の単板の繊維方向が試験体の長手方向と一致している場合、得られたポアソン比には試験体幅の影響が大きかったが、試験体の幅方向と一致している場合には試験体幅の影響は見いだせなかった。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費24580246の助成を受けたものです。

## 文献

- [1] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2005. Test method for structural panels in flexure. ASTM D 3043-00. West Conshohocken, Pennsylvania.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2005. Test method for shear modulus of wood-based structural panels. ASTM D 3044-00. West Conshohocken, Pennsylvania.
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2005. Test method for structural panels in tension. ASTM D 3500-00. West Conshohocken, Pennsylvania.
- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2005. Test method for structural panels in compression. ASTM D 3501-00. West Conshohocken, Pennsylvania.
- [5] 日本農林規格協会. 2003. 合板. JAS 233. 東京.
- [6] Yoshihara, H. 2009. Poisson's ratio of plywood measured by tension test. *Holzforschung* 63: 603-608.
- [7] Hearmon, R. F. S. 1948. *Elasticity of Wood and Plywood*. HM Stationary Office, London.
- [8] 森林総合研究所. 2010. 改訂4版木材工業ハンドブック. 丸善, 東京.
- [9] 日本規格協会. 2009. 木材の試験方法. JIS Z2101-2009. 東京.