

集成材の材料定数の測定と数値モデル化

環境構造工学講座 05124 橋本 崇史
指導教官 薄木 征三 後藤 文彦

1. はじめに

近年、鋼板で補強を行うなどして、比較的長スパンの道路橋などにも集成材が広く使用されるようになってきており、このため、集成材構造を有限要素解析などで数値モデル化をする必要性が高まってきている。現在、数値モデル化を行う場合、異方性の強い材料である集成材の材料定数はほとんど測定されることがないため、材料定数は等方性の木材のものが用いられており、材料の異方性が数値モデル化に対してどのように影響するのか、判断材料に乏しい。そこで本研究では集成材を、軸方向、軸直角2方向の計3方向に切り出した試験体柱に対して圧縮試験を行い、直交異方性材料とみなした集成材の3方向のヤング率、6つのポアソン比の測定が可能であるかどうか検討する。また、こうした材料の異方性が曲げ挙動や、座屈挙動にどの程度の影響を与えるかについても考察したい。

2. 実験方法

左の図-1 に示した集成材を、幅 $b = 8\text{cm}$ 、桁高 $h = 32\text{cm}$ を目安¹⁾に、試験体軸方向が、それぞれ集成材の x 、 y 、 z 方向となるように切り出し、対応する方向に合わせ、試験体 x (図-2)、試験体 y (図-3)、試験体 z (図-4) とする。実験は圧縮試験機で試験体の軸方向に対し圧縮を掛け、荷重とひずみを、ひずみゲージ、 π 型変位計、ロッド型変位計を取り付け測定する。ひずみゲージは図-2 のように試験体側面4面に対し縦横一枚ずつ、計8枚をラミナを跨がせないように貼り付け

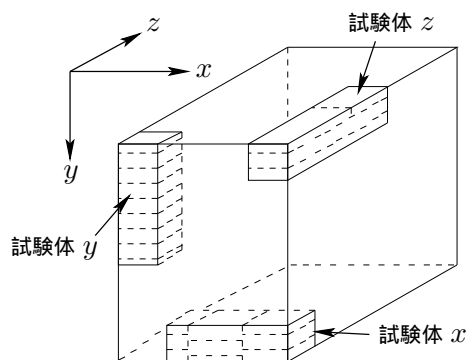


図-1 集成材

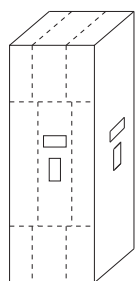


図-2 x 軸:ひずみ

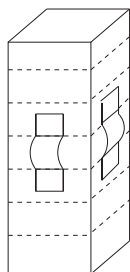


図-3 y 軸: π 型(縦)

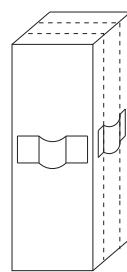


図-4 z 軸: π 型(横)

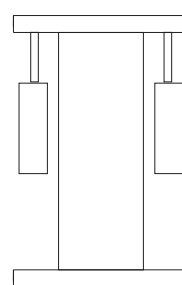


図-5 ロッド型変位計

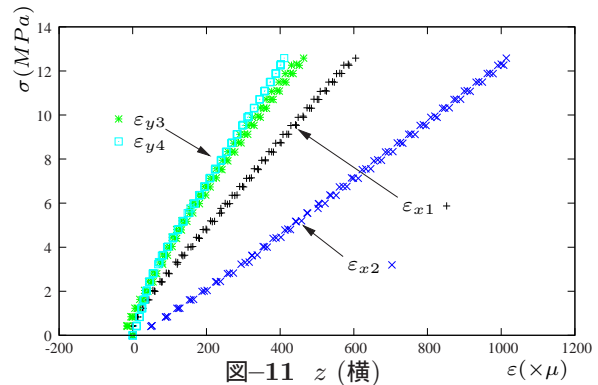
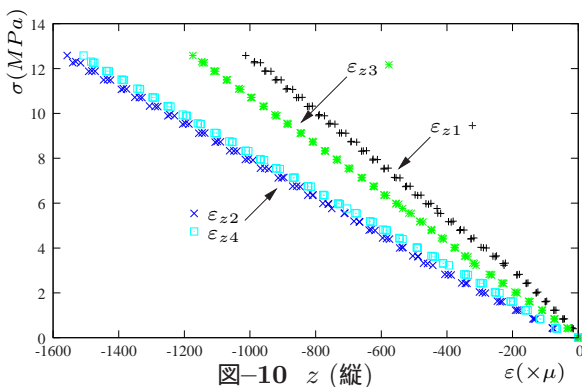
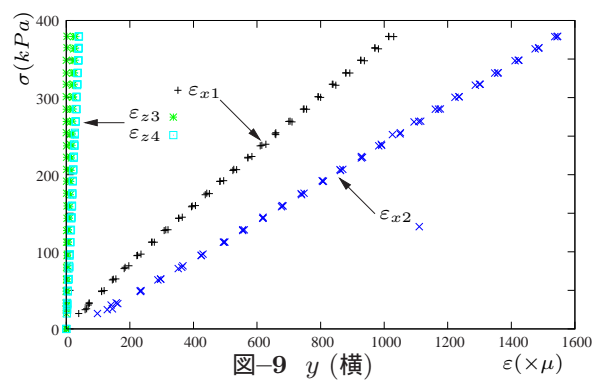
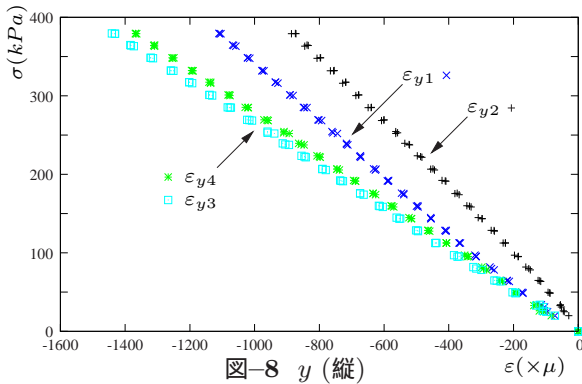
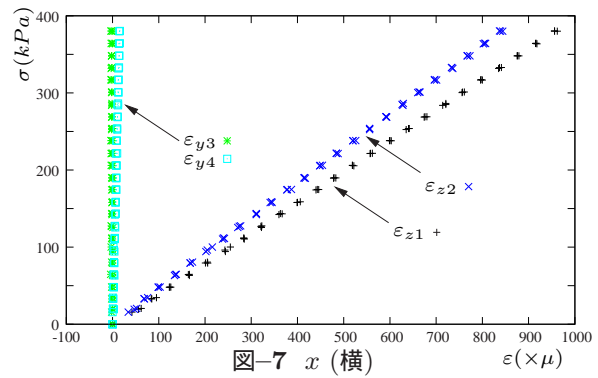
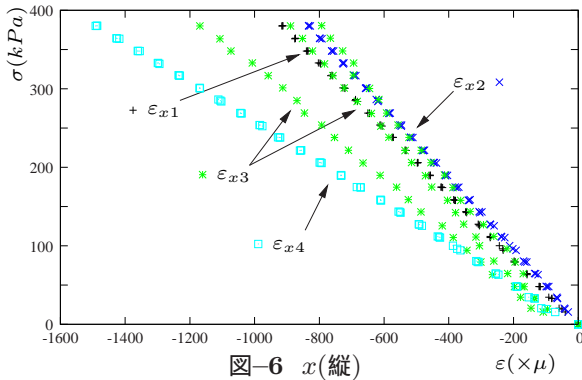
測定する。 π 型変位計は図-3 のように試験体側面4面の縦に4つ取り付け縦ひずみの測定を行った後、同じ試験体で今度は図-4 のように変位計の向きを横に変えて横ひずみの測定する。ロッド型変位計は圧縮試験機で圧縮を掛ける際に試験体を挟んでいる鉄板に対し図-5 のようにロッド型変位計を垂直に当てて設置し、向かい合う2面で測定をした後、残りの2面を測定する。載荷を行う際、集成材の繊維直角方向である試験体 x 、 y では圧縮試験機の荷重レンジを 6kN 、繊維方向である試験体 z では 150kN に設定し、試験体 x 、 y では 100kN 毎、試験体 z では 2.5kN 毎にひずみを測定する。測定はゲージおよび変位計のどれか一つのひずみが $1500(\times\mu)$ を越えた時点で終了とする。

3. 実験結果および考察

測定した測定結果 4 回のうち、1 回目の载荷では圧縮が掛かることにより試験体内部の微小な空隙が詰まるため、ひずみに影響が出るため、1 回目の結果を除き 3 回の結果を重ねてプロットしている。

(1) ひずみゲージ

ひずみゲージでの測定結果の応力-ひずみ曲線を図-6～図-11 に示す。6 つのグラフは左側がそれぞれ試験体ごとの縦ひずみ、右側が横ひずみとなっており、4 本の曲線は試験体の側面 4 面のひずみを表している。



試験体 x の縦ひずみ (図-6) では、同じ測定箇所のひずみゲージであっても測定回数の違いでばらつきが見られ、向かい合った面のひずみ同士ではやや近いひずみの数値が出ているものもあるが、試験体 x 、 y 、 z 全体を通してばらつきが大きく、図に示した 6 本の試験体以外の実験結果においても同様な結果が見られる。

(2) π 型変位計

ひずみゲージと同様に測定結果を応力-ひずみ曲線として図-12～図-17 に示す。

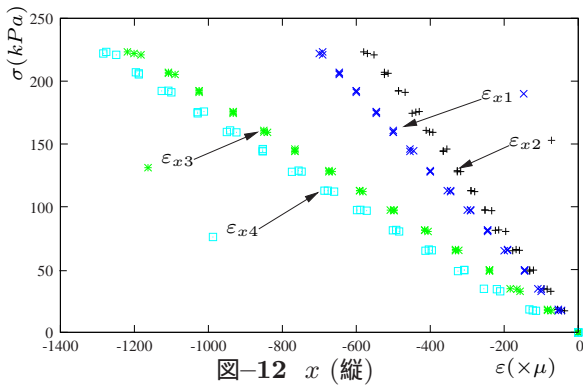


図-12 x (縦)

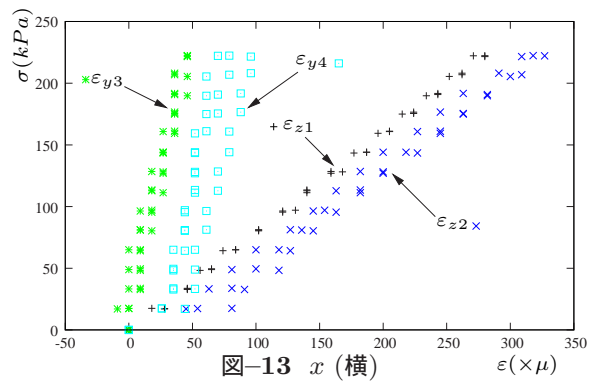


図-13 x (横)

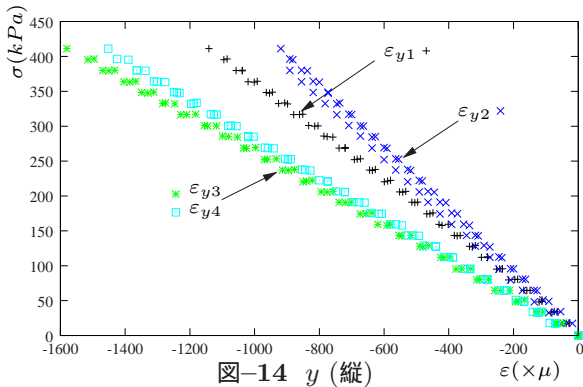


図-14 y (縦)

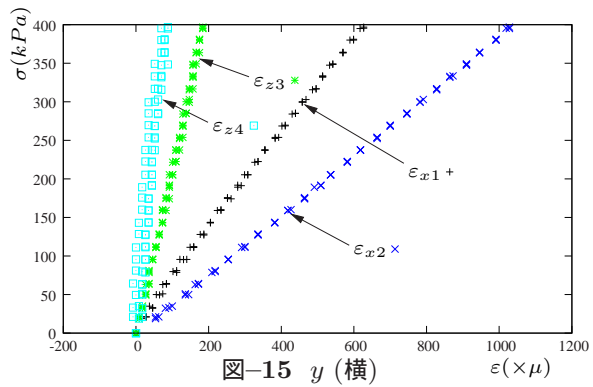


図-15 y (横)

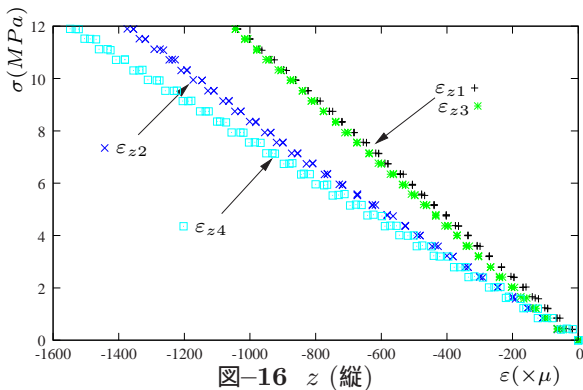


図-16 z (縦)

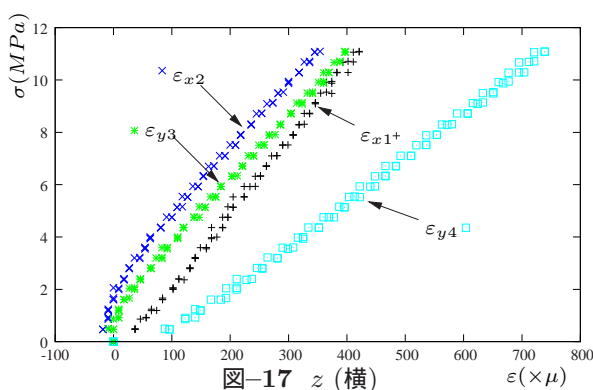


図-17 z (横)

ひずみゲージと違い、 π 型変位計はラミナを跨いで設置するので、より試験体表面の広い範囲を測定出来る。ひずみ-応力曲線はひずみゲージよりばらつきがやや小さいように見えるが、 x の横ひずみ(図-13)のように、回数でのばらつきが見られるものがあったり、 z の横ひずみ(図-17)のように、向かい合う面のひずみが近い数値をとらないといった現象が図に載せた試験体以外でも幾つも見られ、依然として試験体全体でのひずみのばらつきは大きなものとなっている。これは圧縮によって試験体が偏心していることが原因だと考えられる。

(3) ロッド型変位計

圧縮による試験体の偏心を考え、圧縮試験時に試験体を図-5のように挟み固定している上下の鉄板の上側に対してロッド型変位計を鉄板と垂直になるように設置する。ひずみゲージ、 π 型変位計が試験体表面のひずみを測定するのに対して、ロッド型変位計は試験体全体のひずみを測定することができる。以下の図-18～図-20にロッド型変位計で測定した縦ひずみを応力-ひずみ曲線として示す。

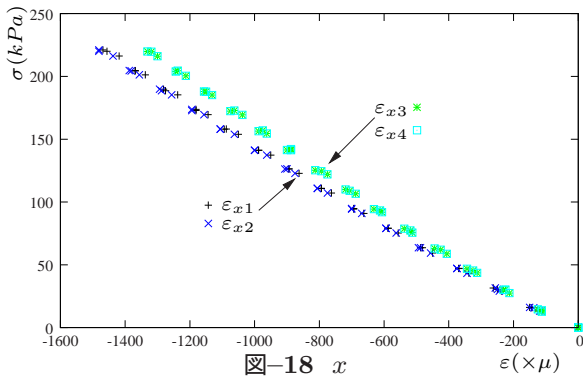


図-18 x

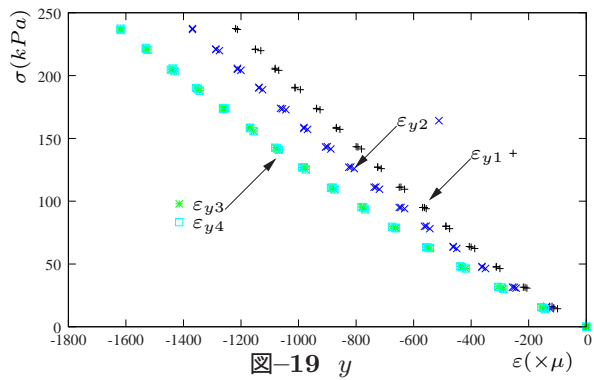


図-19 y

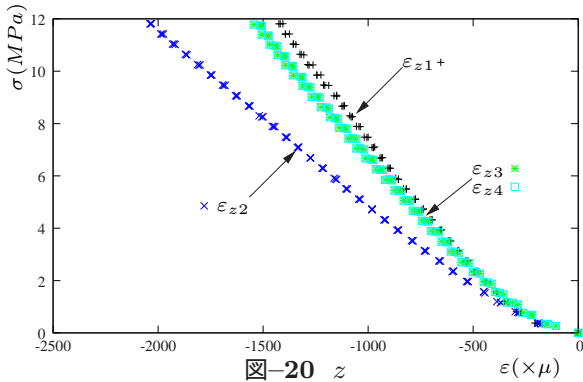


図-20 z

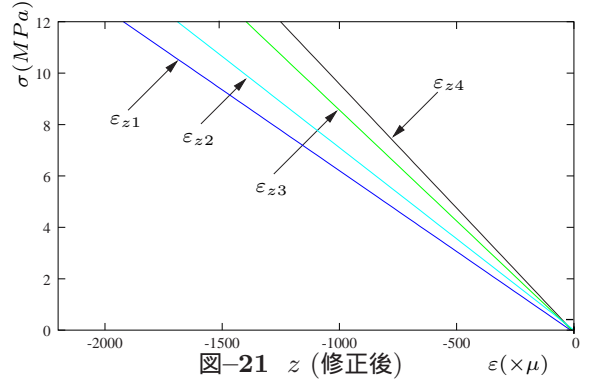


図-21 z (修正後)

ロッド型変位計によって測定されたひずみは x 、 y 、 z 方向のどれもが、前の二つと比べ、ばらつきは小さなものとなっている。 z 方向図-20 に関して、圧縮試験開始直後、応力 1.5GPa 付近までの数値にロッド型変位計の初期不正と思われるひずみの値が出ている。これは z 方向の試験体に圧縮を掛ける際、荷重レンジが 150kN と非常に大きなものであるため、 x 、 y 方向との荷重の載荷スピードの違いや、載荷開始時における圧縮試験機の振動などが原因と考えられる。このためヤング率を求める際には、 x 、 y 方向では応力 200kPa、 z 方向では応力 1.5GPa までのプロットを初期不正として排除する。図-20 の応力-ひずみ曲線を試験体の側面 4 面ごとに線形回帰し、図の 0 点に合わせた修正後の図を図-21 に示す。

4. 数値解析および考察

(1) ヤング率

ひずみゲージ、 π 型変位計、ロッド型変位計で測定した縦ひずみを $\sigma = E\varepsilon$ より線形回帰し、軸方向ごとにヤング率 E_x, E_y, E_z を求める。ひずみゲージ、 π 型変位計では 4 面の縦ひずみを面ごとに線形回帰しヤング率を求め、これを平均して試験体ごとのヤング率を求める。さらにこれを軸方向ごとに平均し、ヤング率を求める。ロッド型変位計ではそれぞれ対面の縦ひずみ 2 組を平均したものが、より試験体中心での縦ひずみに近いと考え、初期不正を排除した後これを線形回帰する。ひずみゲージ、 π 型変位計と同様に試験体、軸ごとに平均し、ヤング率を求める。それぞれのヤング率を表-1 に示す。ひずみゲージで求められたヤング率では繊維垂直方向のヤング率 E_x が、繊維方向のヤング率 E_z の値に対しておよそ $\frac{1}{10}$ ほどの値をとっている。これは縦ひずみを線形回帰した際、ひずみがほとんど出ていないのに応力だけが增加している測定箇所があったためだと考えられる。この点から π 型変位のほうがひずみのばらつきが若干ではあるが、小さいと考えられる。ロッド型変位計では繊維方向のヤング率 E_z の値がせん断変形の影響からやや大きいものの、スギ集成材の JAS 規格、E75-F240 に近い値となっており、このことからひずみゲージ、 π 型変

位計、と比べてロッド型変位計で求めたヤング率のほうが精度の高いものだと考えられる。

表-1 ヤング率

	ひずみゲージ (GPa)	π 型変位計 (GPa)	ロッド型変位計 (GPa)
E_x	0.815,	0.280,	0.147,
E_y	0.329,	0.268,	0.211,
E_z	9.814,	9.580,	7.942,

(2) ポアソン比

ロッド型変位計で測定した実験 3 回分の縦ひずみの平均と求められたヤング率、 π 型変位計で測定した実験 3 回分の横ひずみの平均からポアソン比を求める。ポアソン比はそれぞれ x 方向で $\nu_{zx} = -\frac{E_z \varepsilon_z}{E_x \varepsilon_x}$, $\nu_{yx} = -\frac{E_y \varepsilon_y}{E_x \varepsilon_x}$, y 方向で $\nu_{xy} = -\frac{E_x \varepsilon_x}{E_y \varepsilon_y}$, $\nu_{zy} = -\frac{E_z \varepsilon_z}{E_y \varepsilon_y}$, z 方向で $\nu_{xz} = -\frac{E_x \varepsilon_x}{E_z \varepsilon_z}$, $\nu_{yz} = -\frac{E_y \varepsilon_y}{E_z \varepsilon_z}$, の計 6 つが求められる。この時、それぞれの縦ひずみ ε_x 、 ε_y 、 ε_z はロッド型変位計で測定した 4 面の縦ひずみを平均化したものを用いる。求められたポアソン比を以下の表-2 に示す。表を見ると、 ν_{zx} と ν_{zy} が 1 を超える非現実的な値が出ている。これは圧縮を掛けた際に試験体に起きる偏心、もしくはせん断変形の影響で π 型変位計で測定した横ひずみの数値に実際のひずみの数値との誤差を生じさせているからではないかと考えられる。

表-2 ポアソン比

試験体	ポアソン比	
x	$\nu_{zx}=11.093,$	$\nu_{yx}=0.0631,$
y	$\nu_{xy}=0.0416,$	$\nu_{zy}=14.264,$
z	$\nu_{yz}=0.00434,$	$\nu_{xz}=0.00921,$

(3) 補正計算

前項で求めたポアソン比の値が圧縮による偏心、およびせん断変形の影響で 1 を超えるような値が出たと考えられるため、本項ではこの影響を計算によって和らげることが出来ないか考察する。ロッド型変位計で測定された縦ひずみの値が向かい合う面で異なることから、やはり試験体は圧縮を受けた後に偏心しており、この偏心が縦ひずみ、横ひずみに対してな影響を与えていると考えられる。そこでロッド型変位計で測定した試験体 4 面の縦ひずみを平均化したものを基準とし、 π 型変位計で測定した 4 面それぞれの面の縦ひずみへの偏心による影響の割合を求め、これを用いて π 型変位計で測定された対応する面の横ひずみを補正する。補正は次式、 $\varepsilon_{py} \times \left(\frac{\varepsilon_{pt}}{\varepsilon_{ra}}\right)$, で行う。ただし、 ε_{ra} はロッド型変位計で測定された縦ひずみ側面 4 面の平均、 ε_{pt} は π 型変位計で測定された任意側面の縦ひずみを、 ε_{py} は π 型変位計で測定された任意側面の横ひずみを表す。補正した横ひずみを用いて前項と同様にして求めたポアソン比を表-3 に示す。補正後は ν_{zx} , ν_{zy} の値が若干下がるが、まだ 1 を超えるような値のままである。

表-3 ポアソン比 (補正後)

試験体	ポアソン比	
x	$\nu_{zx}=4.846,$	$\nu_{yx}=0.0541,$
y	$\nu_{xy}=0.0120,$	$\nu_{zy}=6.206,$
z	$\nu_{yz}=0.00296,$	$\nu_{xz}=0.00724,$

(4) 材料定数のたわみへの影響

本項では材料定数が曲げ試験による梁のたわみにどれだけ影響を与えるかを見るため、対称条件から図-23 のような 5 点曲げ載荷モデルで特定の材料定数のみを極端な値に変え立体要素の有限要素解析²⁾を行い、等方性材料の材料定数で求めたたわみと比べどれだけの影響が出るかを調べる。梁の寸法は幅 $b=2\text{cm}$, 桁高 $h=10\text{cm}$, 軸長 $\ell=100\text{cm}$ とし、対称性を利用し、 yz 面で切断された半分 ($\frac{b}{2}$) を解析対象とする。要素分割数は幅方向 $n_x=5$, 桁高方向 $n_y=20$, 軸長方向 $n_z=100$, とする。境界条件は固定端断面 (xy 断面) 上の節点の中立軸の y 方向、 z 方向変位、対称面 (yz 面) 上の節点の x 方向変位、そして単純支持面の中立軸の y 方向変位を拘束する。基本となる材料定数は、ヤング率が $E_x = E_y = 0.4\text{GPa}$, $E_z = 10\text{GPa}$, せん断弾性係数が $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 0.7\text{GPa}$, ポアソン比が $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yx} = \nu_{yz} = 0.016$, $\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.4$, を用いる。材料定数を変える時には直交異方性材料のひずみ-応力関係の式より、行列の対称性を満たすように対応する数値も変える必要がある。例えば表中に $E_x = 2E_x$ とある場合、 ν_{yx} と ν_{zx} の数値も変えている。等方性材料の材料定数で求めたたわみとの誤差を表-22 に示す。

図-22 材料定数の影響 1

材料定数	たわみの誤差 (%)	材料定数	たわみの誤差 (%)
$2E_x$	0.00	$0.5E_x$	-0.01
$2E_y$	-2.25	$0.5E_y$	3.41
$2E_z$	-33.15	$0.5E_z$	65.72
$2G_{xy}$	0.00	$0.5G_{xy}$	0.00
$2G_{xz}$	-0.89	$0.5G_{xz}$	0.00
$2G_{yz}$	-15.46	$0.5G_{yz}$	29.48
$\nu_{yx} = 0$	0.00	$\nu_{yx} = 1$	-4.3
$\nu_{zx} = 0$	0.01	$\nu_{zx} = 1$	-0.01
$\nu_{zy} = 0$	-0.21	$\nu_{zy} = 1$	0.25

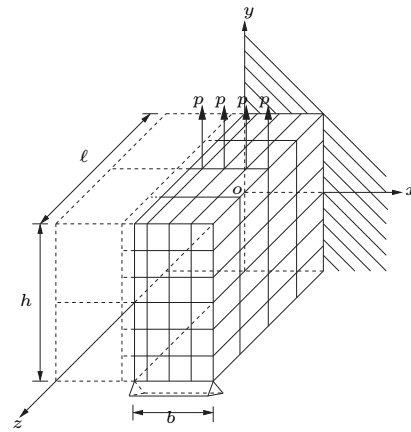


図-23 解析モデル 1

(5) 材料定数の座屈荷重への影響

前項と同様に材料定数を極端な値に変え、今度はオープンソースの有限要素解析ツール CalculiX³⁾を用いて図のように立体要素でモデル化した片持ち梁の座屈解析を行い、材料の異方性が座屈荷重へ与える影響を見る。断面寸法は幅 $b = 5\text{cm}$ 、高さ $h = 25\text{cm}$ 、軸長 $l = 10\text{m}$ 、とし解析を行う。要素分割数は幅方向 $n_x = 6$ 、桁高方向 $n_y = 20$ 、軸長方向 $n_z = 100$ 、とするし、境界条件は固定端断面 (xy 断面) 上にある節点の z 方向を拘束し、対称面 (yz 面) 上の節点の x 方向変位を拘束する。載荷方法は図に示すように等間隔にメッシュを切り、自由端断面の各節点に等分布に荷重を分散させて載荷する。基本となる材料定数は前項と同様の等方性材料のものとし、座屈荷重との誤差を表-24 に示す。

図-24 材料定数の影響 2

材料定数	座屈荷重の誤差 (%)	材料定数	座屈荷重の誤差 (%)
$2E_x$	-0.01	$0.5E_x$	0.01
$2E_y$	-0.02	$0.5E_y$	0.07
$2E_z$	34.74	$0.5E_z$	-22.41
$2G_{xy}$	0.03	$0.5G_{xy}$	-0.02
$2G_{xz}$	13.3	$0.5G_{xz}$	-8.94
$2G_{yz}$	35.64	$0.5G_{yz}$	-26.71
$\nu_{yx} = 0$	0.00	$\nu_{yx} = 0.9$	0.08
$\nu_{zx} = 0$	-0.01	$\nu_{zx} = 1$	-0.01
$\nu_{zy} = 0$	-0.04	$\nu_{zy} = 1$	0.16

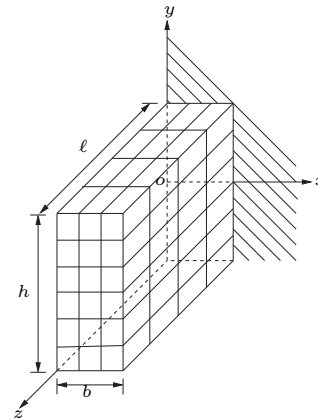


図-25 解析モデル 2

5. まとめ

ひずみゲージ、 π 型変位計、ロッド型変位計、3つの測定結果で測定したひずみにばらつきが生じている。これは圧縮によって試験体が偏心していることが原因と考えられ、特に横ひずみに対してのこの影響は大きく、数値解析で求めたポアソン比に 1 を超えるような非現実的な数値が出てしまっている。偏心の影響を和らげられないかと補正計算を行ってみたが、ある程度はポアソン比の値が下がるものの、今回の実験、および解析では実用に足るポアソン比の値は得ることは出来なかったが、ロッド型変位計の測定結果から求められた繊維方向のヤング率に関しては、JAS 規格に近い値を得ることが出来た。材料定数が曲げ挙動、座屈挙動に対して与える影響について調べてみたところ、特定の材料の異方性が極端なものになったとしても、曲げ挙動や、座屈挙動に大きく影響をおよぼすのは、梁軸方向の圧縮・引張に対するヤング率 E_z や曲げ面内のせん断変形やねじれ剛性に対するせん断弾性係数 G_{yz} ぐらいであり、ポアソン比の影響はかなり小さいものなので、数値モデル化においてポアソン比の影響は少ないものであるとも考えられる。今後、何らかの方法で偏心の影響を排除し、再度圧縮試験を行うか、あるいは引張試験を行うことでより精度の高い材料定数を測定できるかもしれない。

参考文献

- 1) American Society for Testing and Materials: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes, ASTM Standards, D198-94, 1994.
- 2) 後藤文彦・麓貴幸・薄木征三・佐々木貴信: 曲げ試験による木材梁せん断弾性係数推定の精度, 構造工学論文集, Vol.49A, 2003
- 3) <http://www.calculix.de/>