



## 第5章 木質部材のモデル化と解析

木質構造物の構造解析を行うにあたり、木質系構造材断面の特性を如何に表すかが問題となる。木材は異方性であり、しかも繊維方向においても引張方向と圧縮方向ではその特性が異なる。

本章では、まず木質構造材のモデル化について述べる。SPACE では構造材の断面をファイバーモデルで表し、引張試験、圧縮試験、曲げ試験の結果とこのモデルによる解析結果との比較検討を行い、モデル化の妥当性について検討する。次に、接合部のモデル化についても単純な試験体の実験結果と解析結果とを比較検討する。最後に、湾曲集成材の取り扱い方法について述べる。

本節では、断面の特性を木質構造材用に作成した第3章の図3-3の履歴特性を組み込んだファイバーモデルが材の特性を的確に表現可能であるかどうかを検証する。ここでは引張試験の結果を元に静的弾塑性解析を行い、載荷点における荷重と変位の関係を比較検討する。また、実験結果と比較することで、断面内のひずみ状態が材料破断まで追従できているかを検証する。更に、ファイバーモデルによる断面の評価を詳しく検証するために、部材モデルの内部分割数を増やし、ファイバーモデルを多く組み込んだ場合との違いについても分析する。

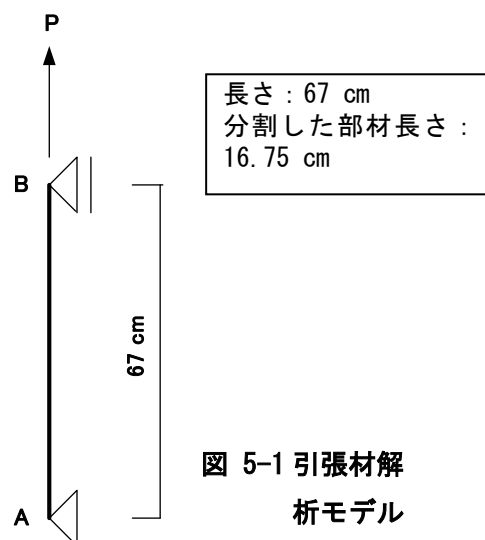
最初に引張材のモデル化を試みる。引張材の解析に用いるモデルは、小松・森ら<sup>21), 27), 28)</sup>の実験的研究を元に作成する。解析対象は、上端で引張方向に荷重を受ける異樹種で構成された集成材である(図5-1)。長さ67cmの部材を4部材に分割しモデル化する。断面を構成するラミナは米松と杉であり、断面の詳細は図5-2、図5-3に示される。部材モデルは両端と中央にファイバー断面を有する3ファイバーモデルと、9つのファイバー断面を均等に並べた9ファイバーモデルの2種とする。

解析は荷重増分法を用い、与える荷重は実験結果で得られた最大耐力時の荷重に荷重増分係数0.01を乗じて、100ステップ加えることとする。

### 5.1 はじめに

### 5.2 引張材のモデル化

#### 5.2.1 モデル化の概要



## 5.2.2 解析に用いた集成材断面

引張試験及び静的解析に使用された2つの断面形状及び断面特性が、図5-2と図5-3に示されている。これらは小松・森ら<sup>7)</sup>の実験的研究に用いられた断面のうちの2つである。断面E105-120x150は、幅12cm、せい15cmで、5層のラミナで構成されている。また、断面E105-120x300は、幅12cm、せい30cmで、10層のラミナで構成されている。なお、断面内の記号L140などはラミナの種類を示す。

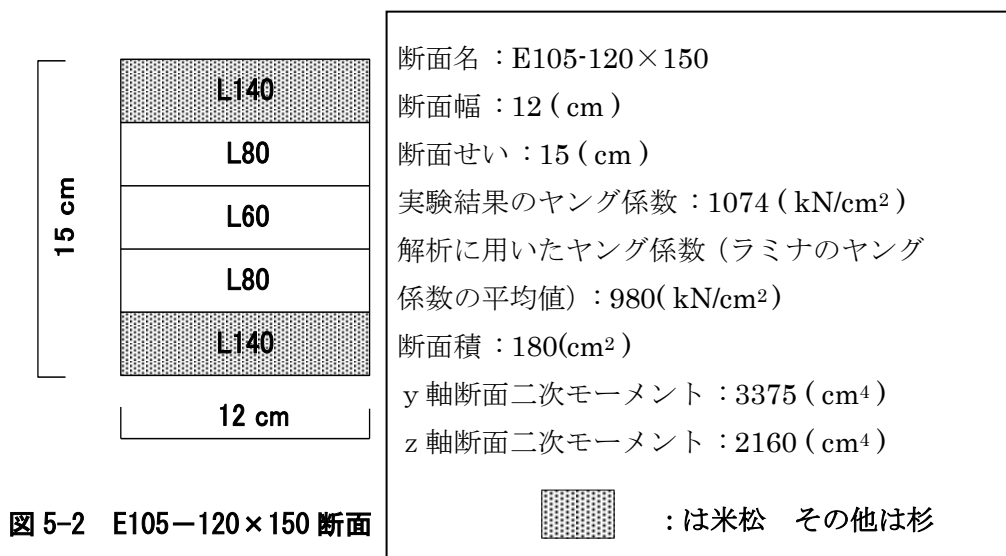


図 5-2 E105-120×150 断面

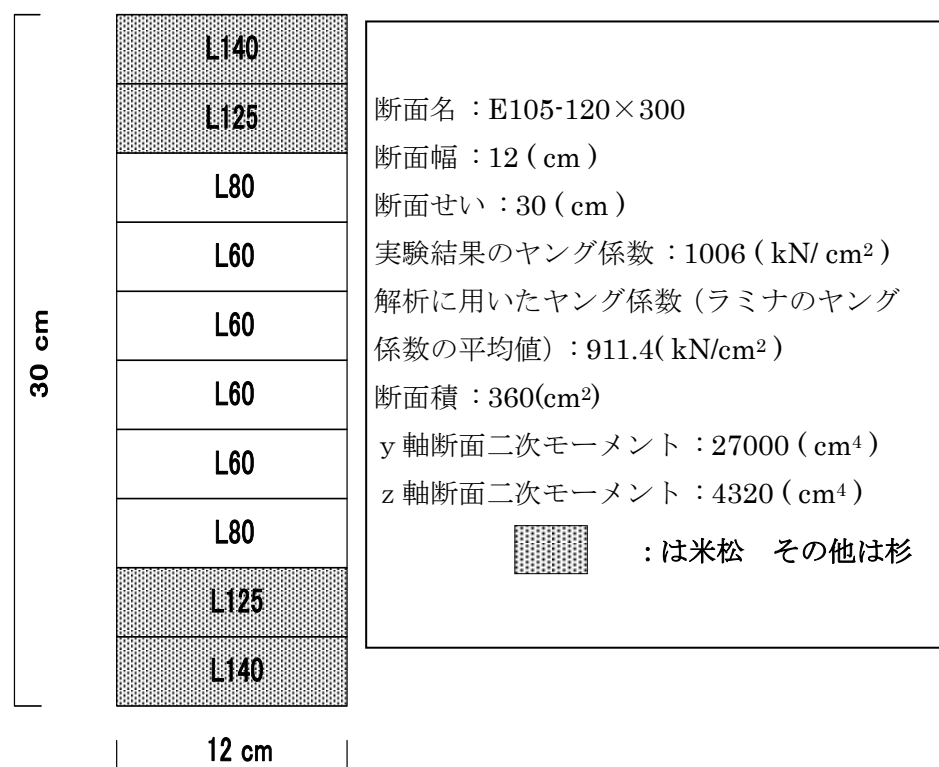


図 5-3 E105-120×300 断面

表 5-1 に断面を構成するラミナの特徴がまとめられている。解析では、第3章で述べたトリリニアの骨格曲線を有する木質構造材の材料復元力履歴モデルを用いる(図 5-4)。履歴モデルに適用するために、短期の許容応力度を第一折れ点とし、許容応力度の 1.5 倍を第二折れ点とする。これは最大耐力が引張・圧縮共に短期許容応力度の 1.5 倍である事による。降伏後のヤング係数は小松ら<sup>30, 47)</sup>の実験的研究により、引張側は初期の 70 パーセント、圧縮側は初期の 35 パーセントと仮定する。

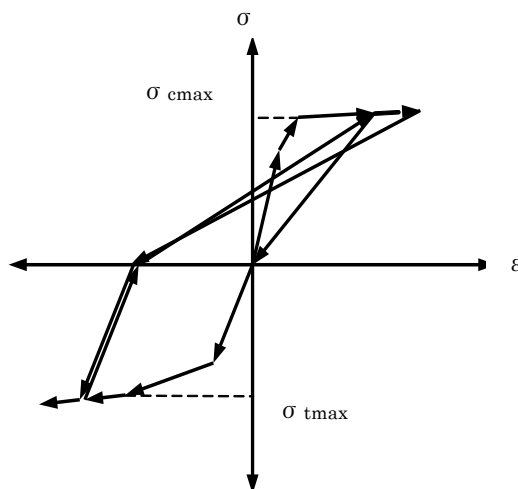


図 5-4 ファイバーの履歴特性

表 5-1 構成ラミナの特性

ラミナ	引張側ヤング係数: $E_t$	圧縮側ヤング係数: $E_c$	短期引張許容応力度: $f_t$	短期許容圧縮応力度: $f_c$
L50(杉)	490 (kN/cm <sup>2</sup> )	490 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.47 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.568 (kN/cm <sup>2</sup> )
L60(杉)	588 (kN/cm <sup>2</sup> )	588 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.47 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.568 (kN/cm <sup>2</sup> )
L70(杉)	686 (kN/cm <sup>2</sup> )	686 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.764 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.862 (kN/cm <sup>2</sup> )
L80(杉)	784 (kN/cm <sup>2</sup> )	784 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.156 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.254 (kN/cm <sup>2</sup> )
L110(米松)	1078 (kN/cm <sup>2</sup> )	1078 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.764 (kN/cm <sup>2</sup> )	1.96 (kN/cm <sup>2</sup> )
L125(米松)	1225 (kN/cm <sup>2</sup> )	1225 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.156 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.45 (kN/cm <sup>2</sup> )
L140(米松)	1372 (kN/cm <sup>2</sup> )	1372 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.646 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.744 (kN/cm <sup>2</sup> )
L160(米松)	1568 (kN/cm <sup>2</sup> )	1568 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.646 (kN/cm <sup>2</sup> )	2.744 (kN/cm <sup>2</sup> )

ファイバーモデルの分割数は、せいをラミナの枚数で分割し、幅は 10 分割する。ファイバーモデルは木質構造材用に作成した履歴モデル(図 5-4)を使用し、各要素に設定する値は表 5-1 を参考にする。第二折れ点以降のヤング係数については、引張側で初期剛性の 1/10000、圧縮側では初期剛性の 1/100 とする。これは、引張側では最大耐力以降脆性的に破壊に至り、圧縮側では引張側と比べると十分に靱性を有するからである。

モデラーを使用して設定する場合は、材質を選択することで、各特性値が自動的にセットされる。その際、規定として履歴の第二折れ点、第二勾配などは決められている。詳細は第 4 章を参照されたい。

ここでは、図 5-2 に示す部材 (E105-120×150) の静的弾塑性解析を行い、荷重と変位の関係を用いて実験結果<sup>28)</sup>との比較を行う。図 5-5 には引張状態における荷重と変位の関係を示す。実験結果は最大耐力時

### 5.2.3 E105-120× 150 モデルの解析 結果と実験結果と の比較

(破壊時)の数値しか示されておらず、ここでは最大耐力時の荷重と変位を直線に結んだ線分を実験結果とする。また、実験で得られた値と解析で得られた値を表5-2に示す。表中の引張剛性及びヤング係数は断面全体で求めた等価な値である。

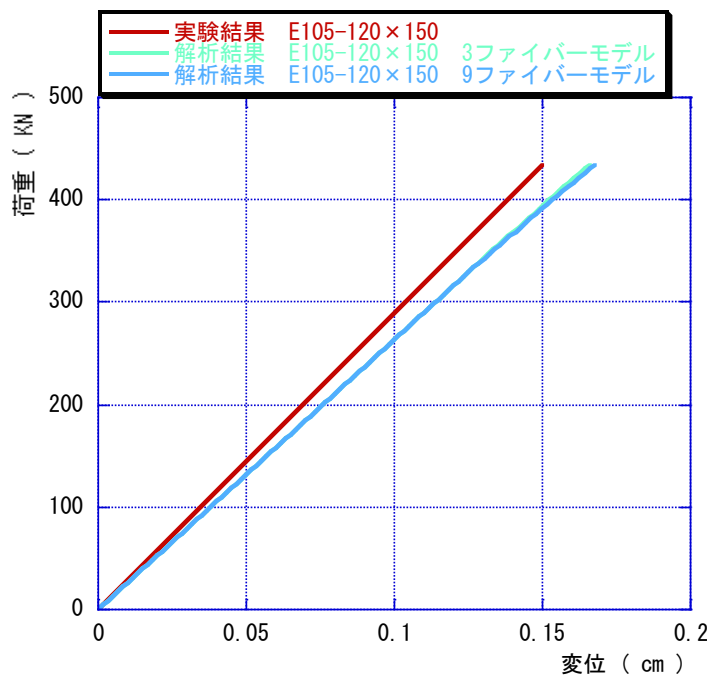


図 5-5 引張材の荷重－変位関係 (E105-120×150)

表 5-2 実験結果と解析結果 (E105-120×150)

	実験結果	解析結果
引張剛性: $K$ (kN/cm)	2936.3	2588.21
断面のヤング係数: $E$ (kN/cm <sup>2</sup> )	1093	980
最大荷重: $P_{max}$ (kN)	434.82	434.82
最大変位: $U_{max}$ (cm)	0.15	0.168

※ただし、引張剛性は次式で計算  $K = P_{max}/U_{max}$

図5-5と表5-2から理解できるように、実験結果よりも解析で得られた最大変位は約12パーセント大きい。これは表中に示されているように解析に用いた引張剛性とヤング係数が共に実験結果より小さく評価され、約88%になっていることによる。その原因は、表5-1のL140などの公証データを用いて解析を行ったことによるもので、実際の実験用材料のヤング係数などは表に示されるように、この公証値より高い値となっている。このため上記の誤差が生じたものと考えられる。

次に、断面内のひずみ状態を検討する。図 5-6 は増加する荷重に従ってラミナに生ずるひずみ分布を実験結果と解析結果とを同時に示した図である。解析では、断面内は平面保持を仮定しているため、荷重が増加しても、断面内に生じる引張ひずみは一定分布となる。

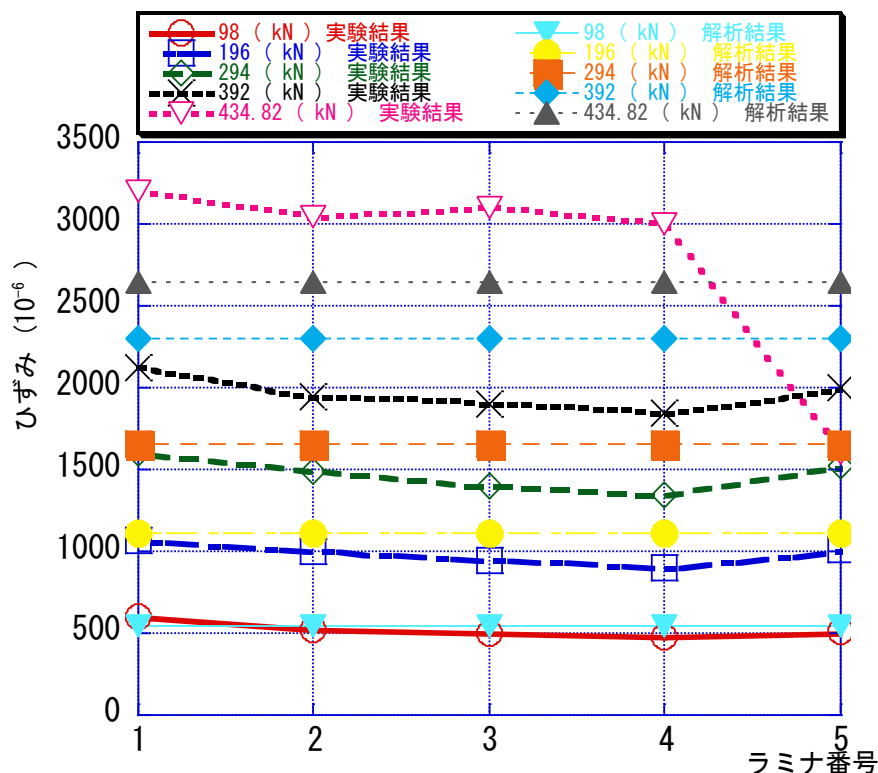


図 5-6 荷重－ラミナのひずみ分布 (E105-120×150)

同図から分かるように、実験においても初期の段階ではほぼひずみ分布は一定であり、そのため外層のラミナほど剛性が高いことから、外層のラミナに応力集中が起きている。このため、断面内の応力はラミナの接触面（接着面）を介して中央から外側に伝達されることになる。実験結果では、荷重が大きくなるに従って断面内のひずみ分布は一様でなくなっている。最終的に、最初に引張破断点に達したラミナから脆性破壊することになり、この実験では5番目のラミナに生じている。

解析において各ラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重と、最外層のラミナが最大耐力に到達した時の荷重を以下にまとめる。

最外層のラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重・・・・・・317.42 (kN)  
 2層目のラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重・・・・・・373.95 (kN)  
 中心のラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重・・・・・・408.73 (kN)  
 最外層のラミナが最大耐力に到達した時の荷重・・・・・・487.0 (kN)

一般的にフィンガージョイント（以下F J）は80%程度耐力が低下すると言われている。実験では最外層にあるラミナのF Jから破壊し、図5-6に示されるように、一様分布から大きくずれるひずみ分布となっていると考えられる。

ここでは、部材モデル（E105-120×300）の静的弾塑性解析を行い、実験結果と解析結果の比較を行う。図5-7に引張状態における荷重と変位関係を示す。また、実験及び解析で得られた断面特性、最大荷重を表5-3に示す。

#### 5.2.4 E105-120×300の解析結果と実験結果との比較

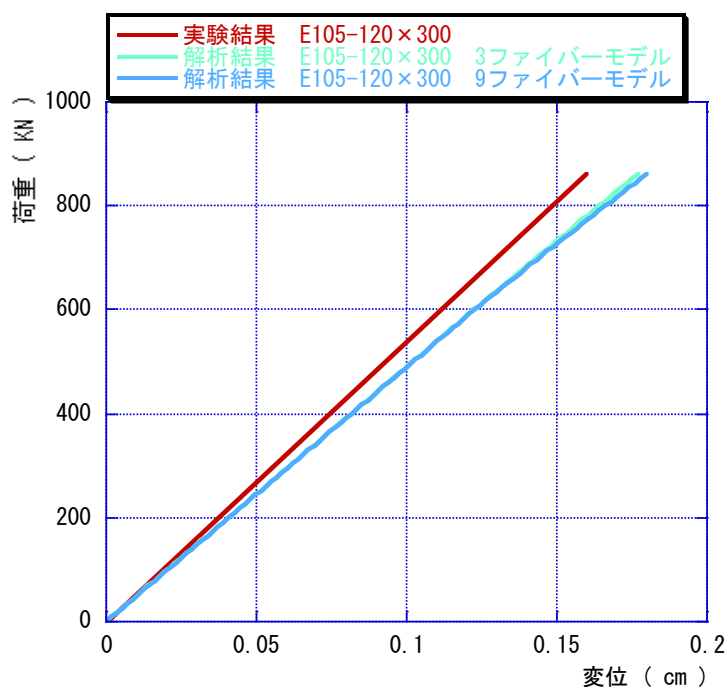


図5-7 引張材の荷重－変位（E105-120×300）

表5-3 実験結果と解析結果（E105-120×300）

	実験結果	解析結果
引張剛性: $K$ (kN/cm)	5407.6	4782
断面のヤング係数: $E$ (kN/cm <sup>2</sup> )	1006	911.4
最大荷重: $P_{max}$ (kN)	860.76	860.76
最大変位: $U_{max}$ (cm)	0.16	0.18

※ただし、引張剛性は次式で計算  $K = P_{max} / U_{max}$

図5-7と表5-3より分かるように、最大変位は解析結果が実験結果より約12%大きくなっている。ヤング係数、引張剛性共に解析結果は実験

結果の約 88%で、前節の断面 E105-120×150 と同様の結果となった。

図 5-8 では、荷重の増加に対する断面内部のラミナに生ずるひずみ分布を、実験結果と共に示す。前節の断面と同様、応力が小さい範囲ではひずみ分布は一樣に近いが、応力が大きくなるとひずみ分布が一樣でなくなる。この一樣でない分布状態は、多くの不確定要因が考えられるため、容易に決定できるものではない。

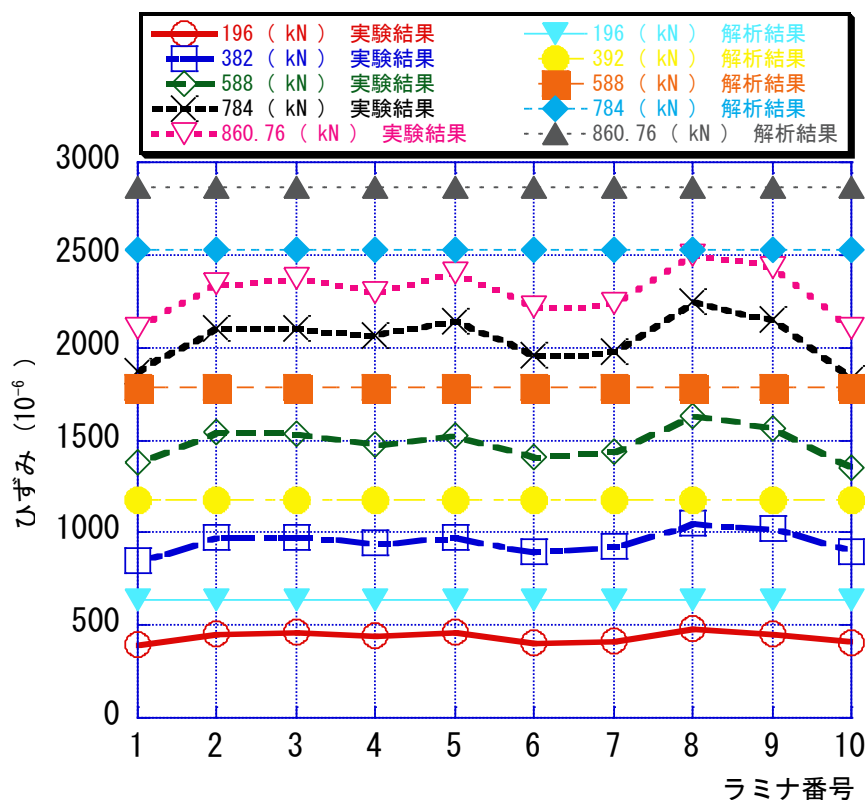


図 5-8 荷重－ラミナのひずみ分布 (E105-120×300)

次に解析における外から3層のラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重と、外から2層のラミナが最大耐力に到達した時の荷重をまとめる。

最外層のラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重・・・・・・576.71 (kN)  
 2層目のラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重・・・・・・585.32 (kN)  
 3層目のラミナが短期許容応力度に到達した時の荷重・・・・・・714.43 (kN)  
 最外層のラミナが最大耐力に到達した時の荷重・・・・・・895.19 (kN)  
 2層目のラミナが最大耐力に到達した時の荷重・・・・・・895.19 (kN)

図 5-8 から理解できるように、E105-120×150 と同じラミナを使用しているにもかかわらず、最大ひずみは小さい値となっている。実験では

低い応力時にF J 部から破壊したためであるが、ただしF J 付近に張られていたひずみゲージに顕著な変化が現れていなかった。

本節では、圧縮を受ける集成材について考察する。前節の引張材と同様ファイバーモデルを用いて静的弾塑性解析を行い、載荷点における荷重と変位の関係を用いて、実験と解析結果を比較検討する。また、断面内のひずみ分布状態が実験結果と比較して精度が保たれているか否かを検討する。更にファイバーモデルによる断面の評価を詳しく検証するために、部材モデルの内部分割数を増やし、ファイバー数の相違による結果への影響についても分析する。

### 5.3 圧縮材のモデル化

#### 5.3.1 解析方法の概略

圧縮材の解析に用いるモデルは、藤田ら<sup>30)</sup>の実験的研究を元に作成される。解析モデルは、図 5-9 に示す上端に荷重を受ける異樹種で構成された集成材である。断面を構成するラミナは米松と杉であり、断面の詳細は図 5-10 と図 5-11 に示される。図 5-9 に示されるように長さ 24cm の部材を 3 部材に分割しモデル化を行う。また、引張材と同様に、部材モデルとして 1 部材中 3 ファイバーモデルと、9 ファイバーモデルとを用いて解析し、その結果を比較する。

解析には荷重増分法を用いる。与える荷重は各断面の最大耐力時の荷重を用い、荷重増分係数を 0.01 として 100 ステップ加える。ただし、両端中央にファイバーモデルを持つ部材モデルを使用する際、9 つのファイバーモデルを配置するモデルで得られた最大変位まで更に荷重を加えることとする。

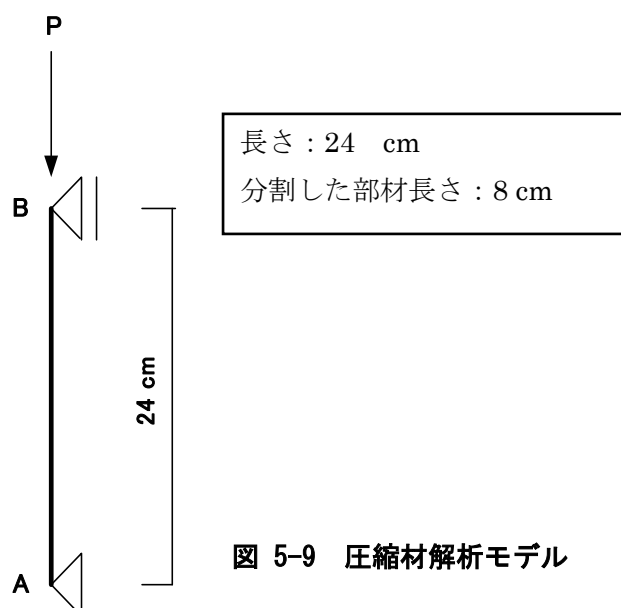


図 5-9 圧縮材解析モデル



圧縮試験に使用された2つの断面について、図5-10と図5-11に詳細を示す。また、断面を構成するラミナに用いたヤング係数等についても以下にまとめる。

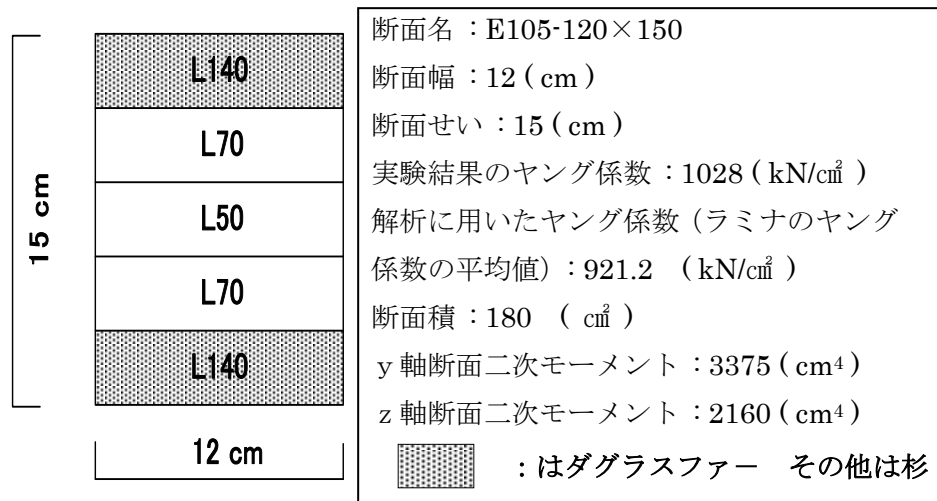


図5-10 E105-120×150 断面



図5-11 E105-120×300 断面

構成ラミナの特性については、表5-1を参照されたい。また、ダグラスファーの性能は米松と等しいものとする。

圧縮材の静的弾塑性解析を行い、その結果について分析する。ファイバーモデルの分割数は、せいをラミナの枚数で分割し、幅は10分割とした。ファイバーモデルは木質構造材用に作成した履歴モデルを使用し、各要素に入力する値については、表5-1を参照する。第二折れ点以降のヤング係数は圧縮側では初期剛性の1/100とする。

### 5.3.2 圧縮材の解析結果

部材モデル (E105-120×150)、(E105-120×300) を用いて、静的弾塑性解析を行い、実験結果<sup>30)</sup>と比較する。ここで用いる実験結果は、文献では最大耐力時（破壊時）の値と、降伏時の値しか示されておらず、ここでは、それらの荷重と変位を直線で結んだ線分を実験結果とする。また、実験結果では最大耐力以降の結果はないが、解析結果から得られたグラフとの比較を行うために図のように最大荷重を水平に引く。これは、木材は圧縮最大耐力以降剛性が負となる性質であることを考慮したためである。

### 5.3.3 各断面の解析結果

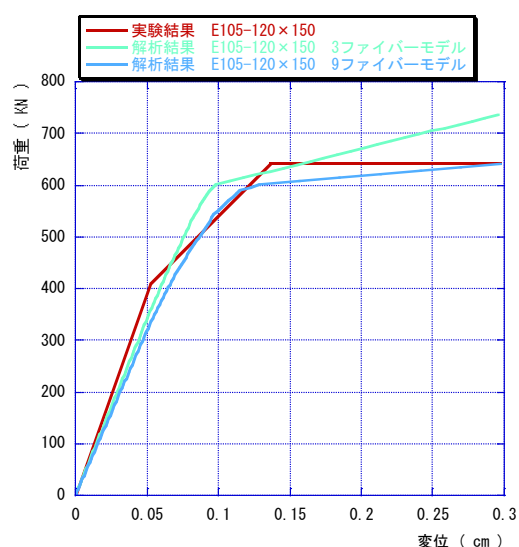


図 5-12 荷重－変位 (E105-120×150)

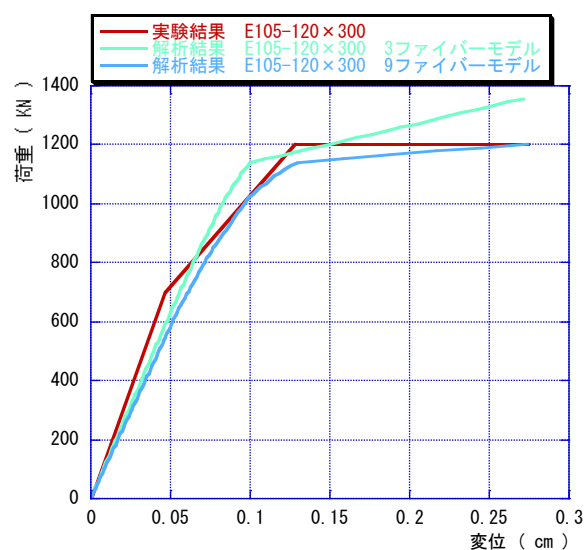


図 5-13 荷重－変位 (E105-120×300)

解析結果を実験結果と比較すると、両断面共に最大耐力は良い一致を示している。ただし、3 ファイバーモデルを使用した場合、実験結果と比較して、降伏後の剛性低下が小さく、硬い結果が得られている。

一方、9 ファイバーモデルを使用した場合、実験結果と比較して、多少剛性が低くなっているが、降伏後の挙動は良い一致を示している。藤田ら<sup>30)</sup>の実験的研究で実験結果より計算結果の方が、剛性が低く得られたという事が報告されており、ここでも同様の結果が得られている。ま

た、この9ファイバーモデルは、3ファイバーモデルよりも降伏後の剛性低下は適切で、圧縮側の塑性域を考慮する解析では、このモデルが最も適していると言える。

更に、実験で得られた値と解析で得られた値を 表 5-4 に示す。

表 5-4 解析結果のまとめ

E105-120×150	実験結果	解析結果
最大荷重 : $P_{\max}$ ( kN )		641
最大荷重時応力度 : $\sigma_{\max}$ ( kN/cm <sup>2</sup> )		3.56
初期のヤング係数 : $E_c$ ( kN/cm <sup>2</sup> )	1028	920.29
降伏後のヤング係数 : $E_c'$ ( kN/cm <sup>2</sup> )	368.6	
構成ラミナのヤング係数平均 : $E_e$ ( kN/cm <sup>2</sup> )		921.2
実験結果の最大ひずみ度 : $\varepsilon_{\max}$	$5708 \times 10^{-6}$	
$\varepsilon_{\max}$ 時の荷重 : $P_c$ ( kN )	641	544.85
$\varepsilon_{\max}$ 時の応力度 : $\sigma_c$ ( kN/cm <sup>2</sup> )	3.56	3.03
E105-120×300	実験結果	解析結果
最大荷重 : $P_{\max}$ ( kN )		1202
最大荷重時応力度 : $\sigma_{\max}$ ( kN/cm <sup>2</sup> )		3.34
初期のヤング係数 : $E_c$ ( kN/cm <sup>2</sup> )	994	842.39
降伏後のヤング係数 : $E_c'$ ( kN/cm <sup>2</sup> )	417.48	
構成ラミナのヤング係数平均 : $E_e$ ( kN/cm <sup>2</sup> )		852.6
実験結果の最大ひずみ度 : $\varepsilon_{\max}$	$5313 \times 10^{-6}$	
$\varepsilon_{\max}$ 時の荷重 : $P_c$ ( kN )	1202	1027.71
$\varepsilon_{\max}$ 時の応力度 : $\sigma_c$ ( kN/cm <sup>2</sup> )	3.34	2.85

ここで、表 5-4 中の記号は以下のとおりである。

$P_{\max}$  : 実験で得られた最大耐力時の荷重

$\sigma_{\max}$  : 最大荷重時応力度

$E_c$  : 実験結果は実験から得られた初期ヤング係数

解析結果は解析より得られた弾性域内の応力とひずみにより計算したヤング係数

$$P_y / A = \sigma_y$$

$$\sigma_y / \varepsilon_y = E_c$$

$E_c'$  : 実験結果より計算された降伏後のヤング係数

$P_y$  : 解析における比例限荷重

$A$  : 断面積

$\sigma_y$  : 解析における断面の比例限応力度

$\varepsilon_y$  : 解析における比例限ひずみ度

$E_e$	: 想定した解析断面を構成するラミナのヤング係数の平均
$\varepsilon_{\max}$	: 実験結果より得られた最大荷重時のひずみ度
$P_c$	: 実験結果では最大荷重 解析結果では実験で得られた最大ひずみ度まで進行した時の荷重
$\sigma_c$	: 実験結果では最大荷重時応力度 解析結果では、 $P_c$ を断面積で除した値

表 5-4 では、断面に用いたラミナのヤング係数の平均値と、解析によって得られたヤング係数は比較的近い値が得られている。しかしながら、解析で用いたヤング係数は実験結果と比較すると低く、その結果、圧縮剛性が低くなっている。ここでは降伏後のラミナのヤング係数を初期のヤング係数の 35%としたが、実験結果ではそれぞれの断面によって違いがある。下記にまとめると、以下のようであった。

E105-120×150	: 36%
E105-120×300	: 42%
E120-120×150	: 42%
E120-120×300	: 52%

したがって、降伏後の剛性低下も解析値の方が低く、より柔らかい結果が得られていると考えられる。一般に各種の断面を作成した場合、どのような低下率となるか理解できないため、SPACE のモデラーでは、全ての断面に対し同一低下率を規定値としている。実験などで適切な値が得られている場合は、その値を用いることになる。

これらの結果より、部材を細かく分割し、ファイバーモデルを用いて解析を行う事によって、圧縮材の特性を表す事が可能であると言える。

#### 5.4 曲げ材のモデル化

本節では、曲げモーメントを受ける集成材について考察する。ファイバーモデルを用いて静的弾塑性解析を行い、梁中央部における変位と荷重の関係を用いて実験結果と比較検討する。五十田ら<sup>31)</sup>の研究では、断面内の応力とひずみの状態が詳細に報告されていないが、矢島ら<sup>32)</sup>の研究では、部材内の応力とひずみの状態が報告されているため、この結果と解析に用いたファイバーモデル断面の応力状態との比較を行う。更に前節と同様に断面の内部分割数を増やし、ファイバー数の違いによる影響を分析する。

## 5.4.1 曲げ材の解析

曲げ材の解析に用いるモデルは、五十田ら<sup>31)</sup>と矢島ら<sup>32)</sup>の実験的研究を元に作成される。どちらの実験においても、曲げ強度と破壊性状等の検討を行う事が目的とされている。ここでは実験を元に断面をモデル化し、実験と同条件で解析を行う。その結果を実験結果と比較・検討する。解析に用いる部材モデルには、3 ファイバーモデルと、9 ファイバーモデルの2通りとし、両モデルの解析結果の比較も行う。

解析には、荷重増分法を用いる。与える荷重は実験で得られた最大荷重を用い、荷重係数を0.01とし100ステップ加える。

## 5.4.2 解析モデル

五十田ら<sup>31)</sup>の実験を元にした解析モデル（Aモデル）を図5-14に示す。スパン600cm、断面幅15cm、梁せい30cmの長方形断面であり、構成するラミナの樹種は信州産からまつである。ラミナの厚みは1.2、1.8、2.4cmであり、断面の構成を表5-5に、ラミナの特性を表5-6に示す。また、断面のラミナの配置を、ラミナの厚み1.2、1.8に対して図5-15と図5-16に示す。ファイバーモデルの復元力特性は木質構造材用の履歴モデルを用い、初期剛性以外の剛性は、引張・圧縮材と同様の方法で仮定する。梁は12部材に分割して解析を行う。

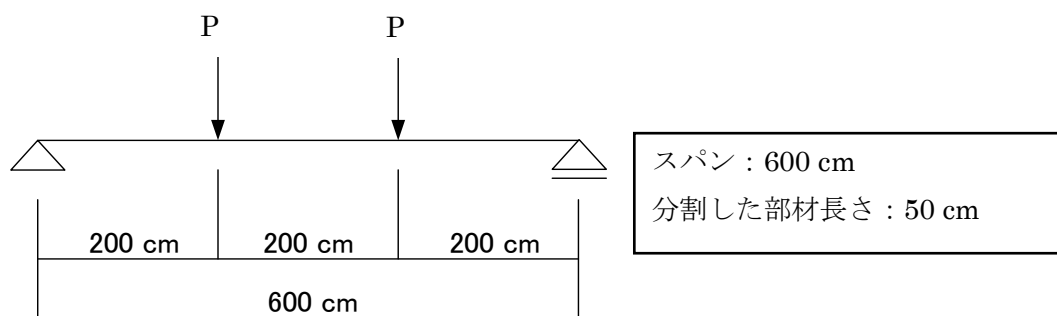


図5-14 五十田らの解析モデル（Aモデル）

表5-5 断面の構成とラミナの等級

ラミナ	位置	異等級構成	同等級構成
外層	両外側から梁せいの1/8以内のラミナ	1等	2等以上
中間層	外層・内層以外のラミナ	3等以上	2等以上
内層	両外側から梁せいの1/4以上離れたラミナ	4等以上	2等以上

表 5-6 ラミナの等級と特性

ラミナの等級	E (kN/cm <sup>2</sup> )	ft (kN/cm <sup>2</sup> )	fc (kN/cm <sup>2</sup> )
1 等	1127	2.352	2.45
2 等	1029~1127	1.96	2.058
3 等	931~1029	1.96	2.058
4 等	931 未満	1.568	1.666

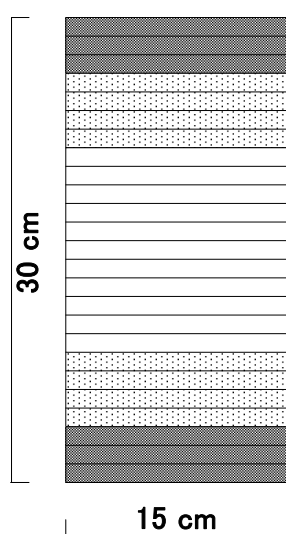
表中の記号は以下の通りである。

E : ラミナのヤング係数

ft : ラミナの引張側短期許容応力度

fc : ラミナの圧縮側短期許容応力度

ただし、ft・fc は木質構造設計基準同  
解説参照



断面名 : 15×30-1.2

断面幅 : 15 (cm)

断面せい : 30 (cm)

ラミナ厚×枚数 : 1.2 (cm) × 25 (枚)

実験結果のヤング係数 : 1198.54 (kN/cm<sup>2</sup>)

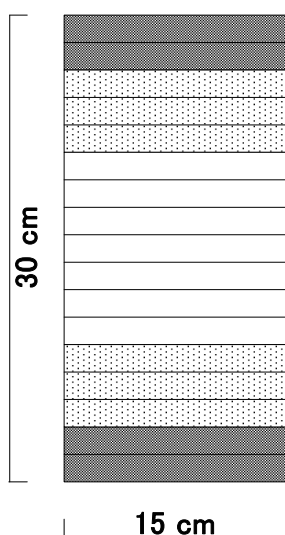
解析に用いたヤング係数 (ラミナのヤング  
係数の平均値) : 1021.85 (kN/cm<sup>2</sup>)

断面積 : 450 (cm<sup>2</sup>)

y 軸断面二次モーメント : 33750 (cm<sup>4</sup>)

z 軸断面二次モーメント : 8437.5 (cm<sup>4</sup>)

図 5-15 15×30-1.2 異等級集成材



断面名 : 15×30-1.8

断面幅 : 15 (cm)

断面せい : 30 (cm)

ラミナ厚×枚数 : 1.8 (cm) × 17 (枚)

実験結果のヤング係数 : 1146.6 (kN/cm<sup>2</sup>)

解析に用いたヤング係数 (ラミナのヤング  
係数の平均値) : 1023.82 (kN/cm<sup>2</sup>)

断面積 : 450 (cm<sup>2</sup>)

y 軸断面二次モーメント : 33750 (cm<sup>4</sup>)

z 軸断面二次モーメント : 8437.5 (cm<sup>4</sup>)

図 5-16 15×30-1.8 異等級集成材

次に、矢島ら<sup>32)</sup>の実験を元にした解析モデル（Bモデル）を図5-17に示す。スパンは梁せいの18倍で、断面は幅15cm×せい60cmと幅15cm×せい80cmの2種類である。構成するラミナの樹種は信州産からまつであり、構造用集成材の日本農林規格でE105-F300である。ラミナの厚みは2.5cmであり、断面の構成を図5-18と図5-19に示す。また、使用するラミナの特性を木質構造設計規準・同解説を元に想定し、表5-16に示す。また、前述のAモデルと同様に、初期剛性以外の剛性を仮定する。

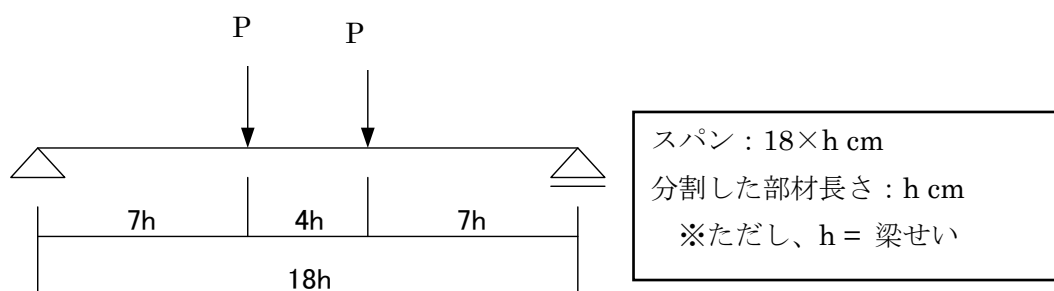


図5-17 矢島らの解析モデル（Bモデル）

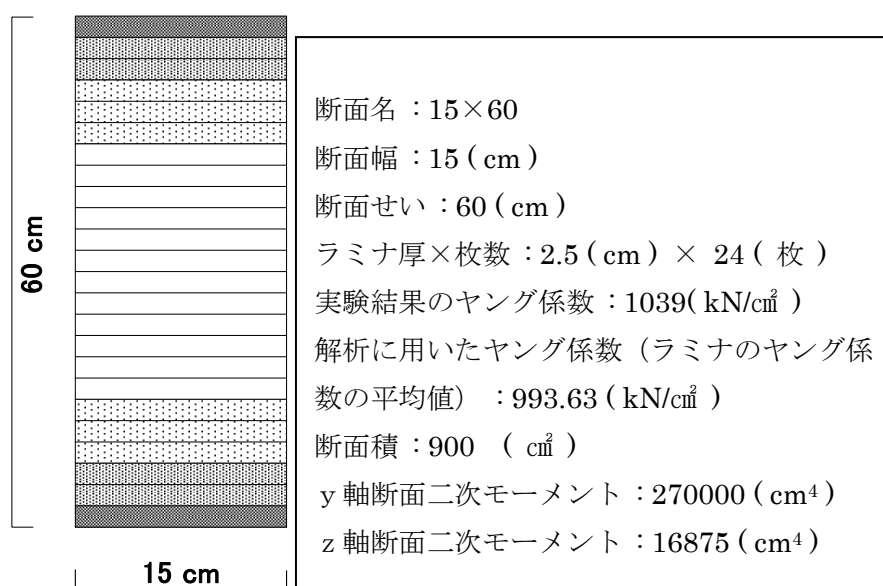


図5-18 15×60断面

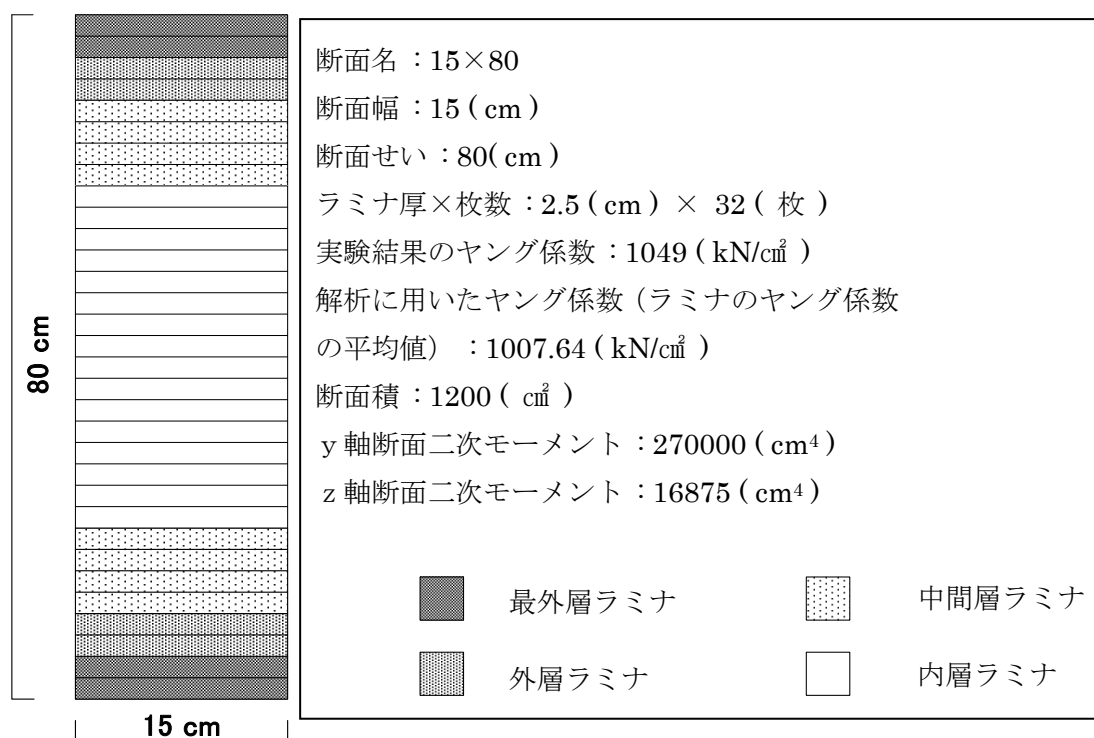


図 5-19 15×80 断面

断面のラミナ配置は、図 5-18 に図 5-19 に示されており、各層のラミナ  
の特性は表 5-7 に示す。

表 5-7 構成ラミナの特性

ラミナの位置	E (kN/cm <sup>2</sup> )	ft (kN/cm <sup>2</sup> )	fc (kN/cm <sup>2</sup> )
最外層	1225	2.352	2.45
外層	1078	1.96	2.058
中間層	980	1.96	2.058
内層	784	1.568	1.666

表中の記号は以下の通りである。

E：ラミナのヤング係数  
ft：ラミナの引張側短期許容応力度  
fc：ラミナの圧縮側短期許容応力度  
ただし、ft・fc は木質構造設計基準同解説参照



5.4.3 Aモデルの  
解析結果

五十田らの実験的研究を元に、図 5-14 示した A モデルを解析し、各断面に対し、実験結果と解析結果で得られた梁中央部の荷重とたわみの関係を比較する。それぞれの断面に対する荷重変位関係は図 5-20 から図 5-25 に示す。

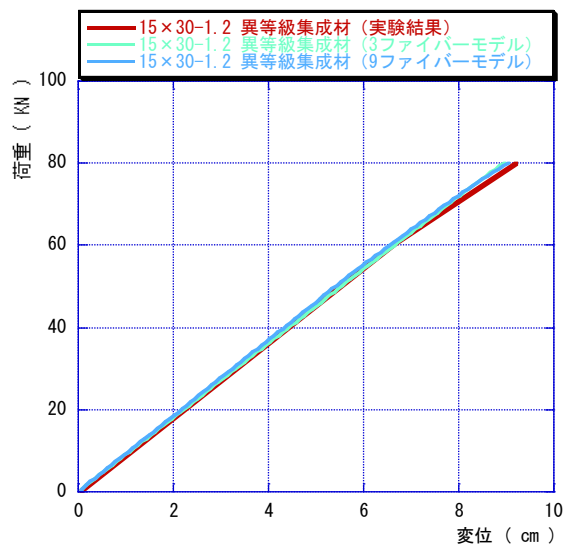


図 5-20 1.2cm 異等級集成材荷重－変位関係

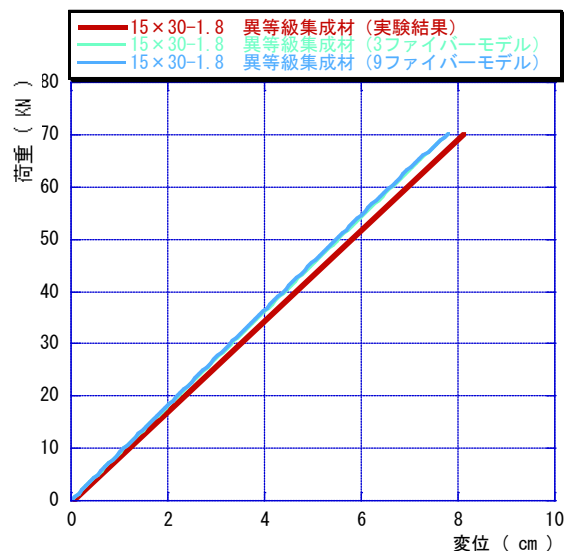


図 5-21 1.8cm 異等級集成材荷重－変位関係

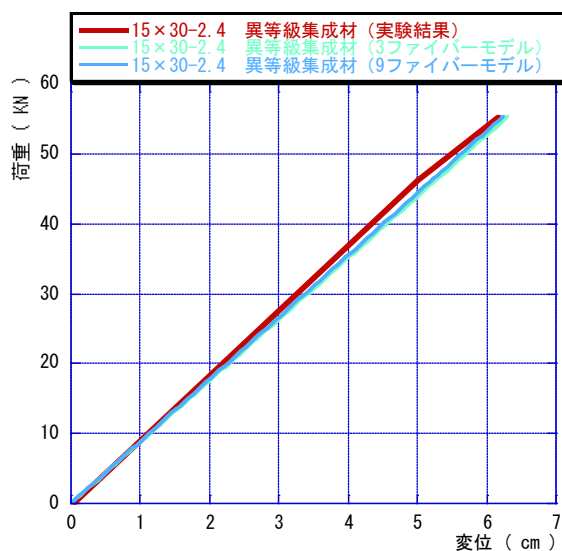


図 5-22 1.2cm 異等級集成材荷重－変位関係

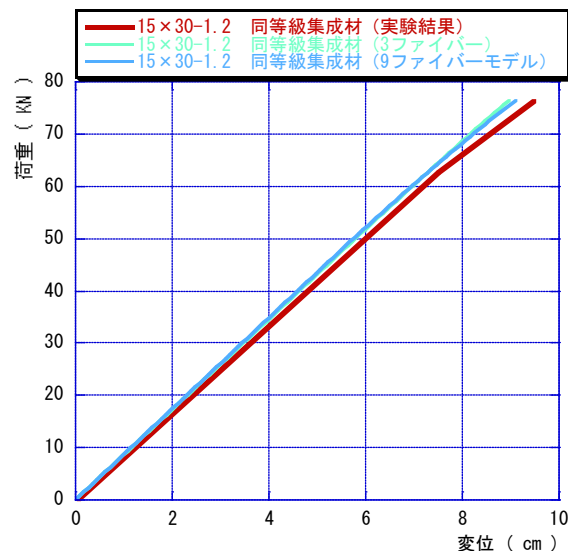


図 5-23 1.2cm 同等級集成材荷重－変位関係

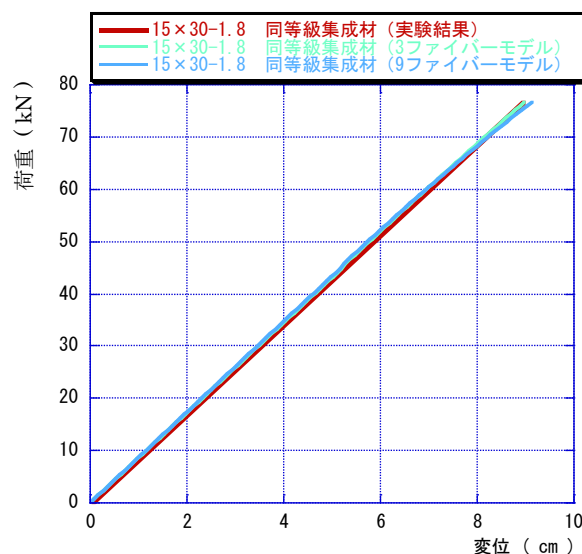


図 5-24 1.8 同等級集成材荷重－変位関係

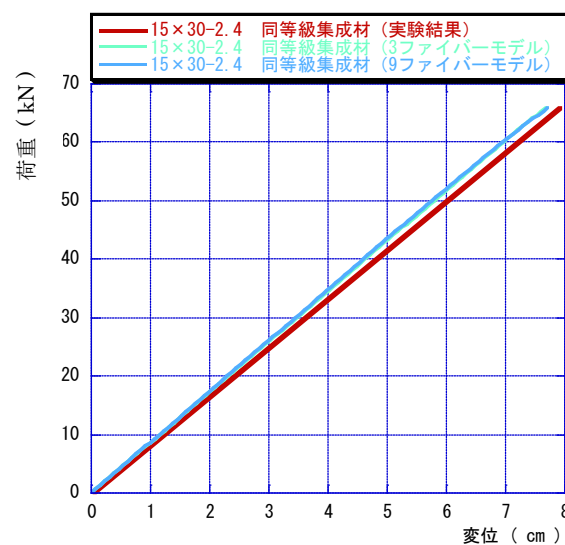


図 5-25 2.4 同等級集成材荷重－変位関係

図 5-20 から 5-25 に示されるように、いずれの結果も良い一致が見られる。各結果を詳細に見ると、解析の剛性が低い場合や高い場合があるが、その差異は非常に小さい。図から分かるように実験結果、解析結果共にほぼ線形状態で断面が破断している。実験では、断面の破壊は、引張側のラミナで発生し、引張側のラミナが最大耐力を越えることで脆性的に生じている。最初に破壊する位置はほとんど引張側ラミナにある FJ 部であり、これはラミナに対して一般的に約 20%程度、FJ の耐力が低いことよると考えられる。このような断面内部の応力状態については次節で検討する。

矢島らの実験的研究を元に、図 5-17 に示す B モデルの静的弾塑性解析を行い、荷重と変位の関係を用いて、実験結果と比較する。前項で、荷重と変位の関係については、解析結果と実験結果に非常に良い一致が見られた。ただし、断面内の応力とひずみの状態の検討を行う必要があると考えられ、本節では、実験で報告された断面内のひずみ度と解析結果で得られた各ラミナのひずみ度の比較を行い、断面特性がよりの確に評価されているか否かを検証する。まず、荷重と変位の関係を図 5-26 と図 5-27 に示す。

#### 5.4.4 B モデルの 解析結果

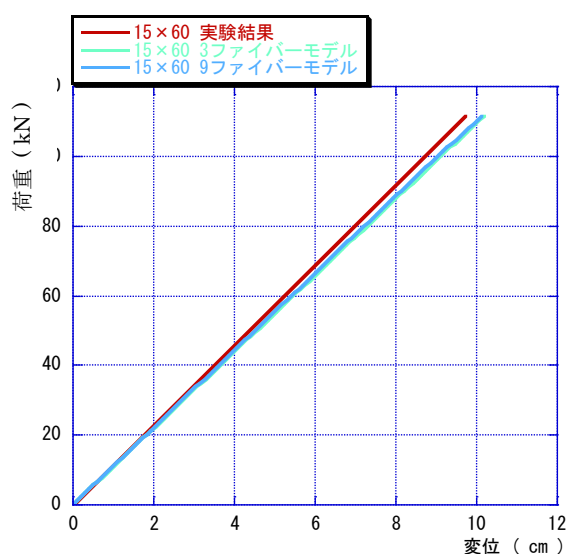


図 5-26 15×60 断面の荷重－変位関係

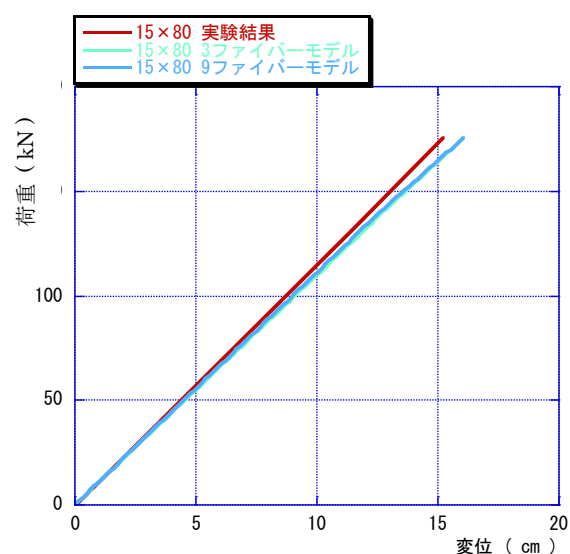


図 5-27 15×80 断面の荷重－変位関係

これらの結果を見ると前項の結果と同様に非常に良い一致が得られており、曲げに対する断面特性は的確に評価されていると言える。

更に、実験結果で報告されている断面内のひずみ度と解析で用いたファイバーモデルの各ラミナのひずみを比較し、詳細に検討する。図 5-28 と図 5-29 には、梁中央部のラミナの位置とひずみ度の関係が示される。断面 15x60 では、最大荷重時に断面端部で平面保持にみだれが見られるが、断面内のひずみ度分布は的確に評価されており、良い一致が得られている。

一方、断面 15×80 では、最大荷重時に実験結果よりひずみが大きくなり、剛性が柔らかく評価されている。ただし、弾性範囲内では、良い一致が得られている。

実験結果より集成材断面では平面保持の仮定が成り立ち、ファイバー

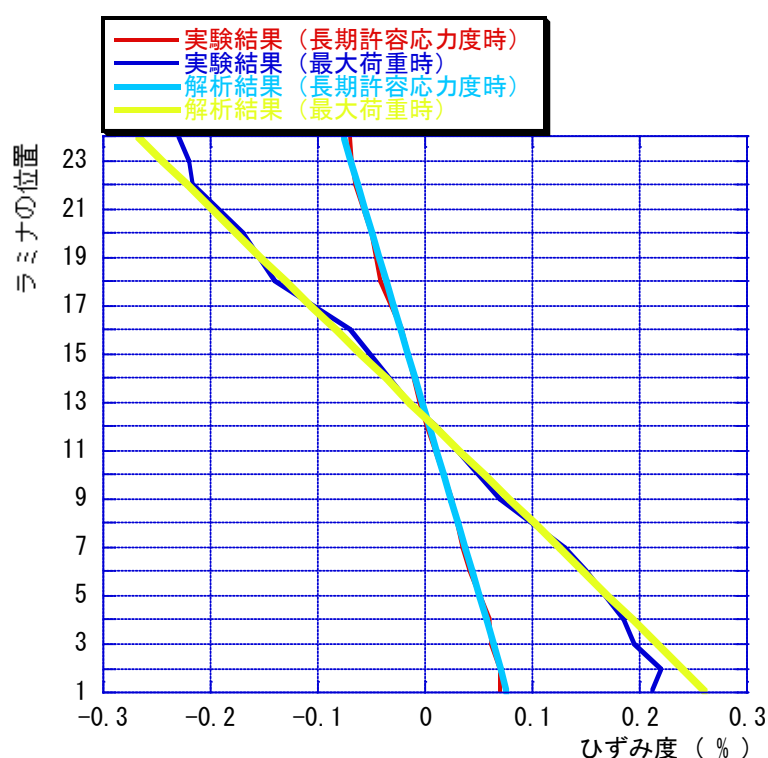


図 5-28 15×60 断面 各ラミナのひずみ度分布

モデルは、断面の応力とひずみの関係を的確に評価し、曲げを受ける集成材の部材モデルとして十分であると言えよう。

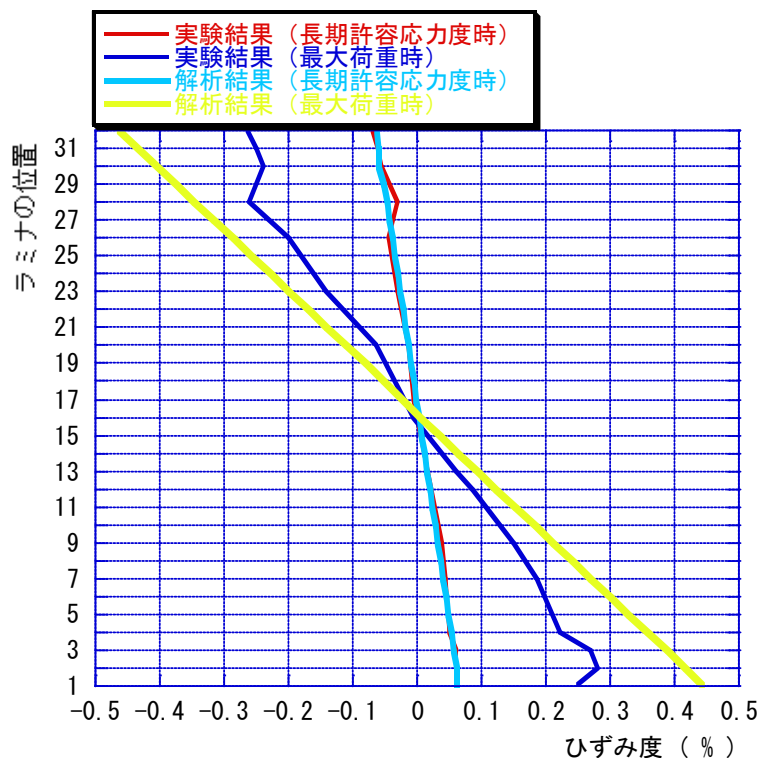


図 5-29 15×80 断面 各ラミナのひずみ度

本節では、各種の力を受ける接合部について考察する。木質構造の接合部は半剛接合という性質から、構造物の変形を大きく左右する要素となっている事は先にも述べた。木質構造には鉄骨構造のような接合部の定式化が為されておらず、様々な接合具や接合法が開発されている。

接合部にはめり込みなどにより、複雑な応力が発生して様々な破壊形態が生じる。したがって、接合部の詳細な解析はかなり難しい。そこで、本章では第3章で説明した並列バネを持つ部材モデルを使用して、実験結果を元に提案された設計式による復元力特性を用いることになる。ただし、ここでは実験より得られたデータを直接用いて解析し、解析システム SPACE が適切に動作するか否かを検証する。

## 5.5 接合部のモデル化

### 5.5.1 曲げバネの解析モデル

荘所ら<sup>36)</sup>の実験的研究を元に曲げバネを組み込んだ部材モデルを作成して解析を行い、実験結果と比較する。接合方法は接合金物に鋼管と

ドリフトピンを用いた接合部であり、試験体が図 5-30 に示される。

実験を元に作成した解析モデルを図 5-31 に示す。長さ 145cm の柱材 (①) と、長さ 180cm のはり材 (②) で構成されており、どちらも 2 部材に分割してモデル化を行う。使用する部材モデルは、①部材には 3 ファイバーモデルを使用し、②部材には接合部には曲げバネを持つ 3 ファイバーモデルを用いる。ここで使用する全てのファイバーモデルは断面を  $10 \times 10$  に分割する。

解析は荷重増分法を用い、スリップ時の剛性が低いため解析が発散する危険性を考慮して荷重係数を 0.001 とする。

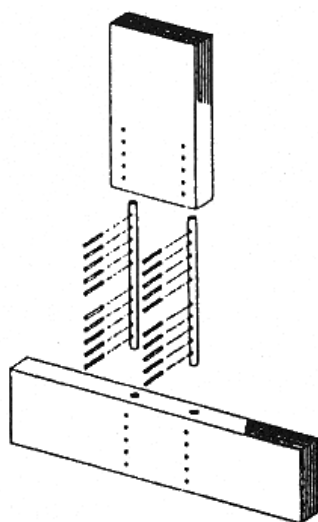


図 5-30 試験体

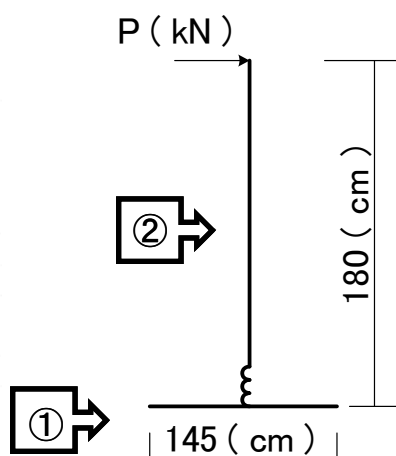


図 5-31 曲げバネの解析モデル

部材分割数	: ①・②とも 2 部材
部材長さ	: ①72.5 (cm) ②90 (cm)

実験結果で報告されている接合部のモーメントと回転角の関係をを用いて、履歴特性を作成する。作成した履歴特性を図 5-32 に示す。実験では破壊時まで繰り返し載荷を行っており、破壊する前に剛性が負となっているが、解析上では剛性が負となる部分は考慮せず、直線的に 3 次の勾配を伸ばす事とした。復元力特性はトリリニアの骨格曲線を持つ S 字スリップモデルとし、設定値は、第一剛性 ( $K_1$ )、第二剛性 ( $K_2$ )、第三剛性 ( $K_3$ )、除荷剛性 ( $K_4$ )、スリップ剛性 ( $K_5$ )、第一降伏モーメント ( $M_1$ )、第二降伏モーメント ( $M_2$ ) とする。それぞれの数値は実験結果より算出し、各値を表 5-8 にまとめる。

### 5.5.2 曲げバネの履歴特性

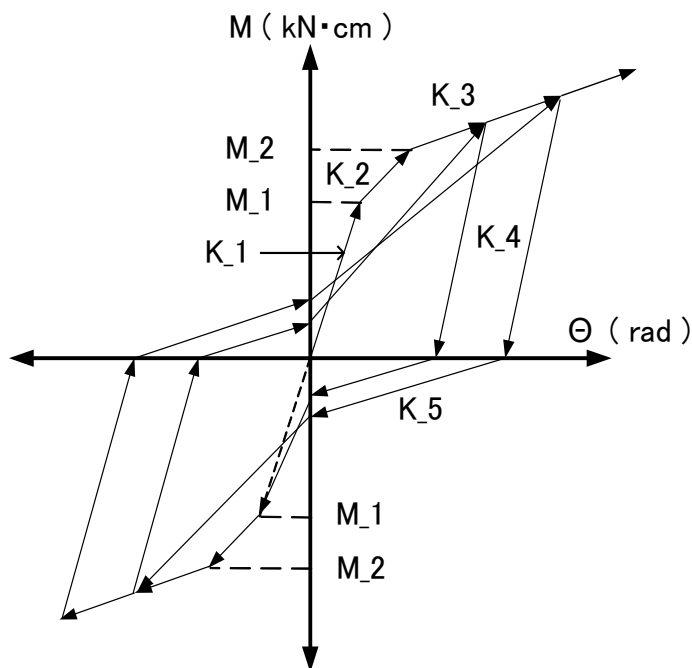


図 5-32 曲げバネの復元力特性

表 5-8 曲げバネの諸元

	実験結果
$K_1$ ( $\text{kN}\cdot\text{cm}/\theta$ )	28301.89
$K_2$ ( $\text{kN}\cdot\text{cm}/\theta$ )	14285.71
$K_3$ ( $\text{kN}\cdot\text{cm}/\theta$ )	3571.43
$K_4$ ( $\text{kN}\cdot\text{cm}/\theta$ )	41411.04
$K_5$ ( $\text{kN}\cdot\text{cm}/\theta$ )	3571.43
$M_1$ ( $\text{kN}\cdot\text{cm}$ )	150
$M_2$ ( $\text{kN}\cdot\text{cm}$ )	240

断面の諸元を表 5-9 と表 5-10 にまとめる。弾性部材・単板共にこのヤング係数を用いる。また、構造材は LVL（ラミナ厚 4mm、37 層、NZ 産ラジアータパイン）である。

表 5-9 部材の諸元

部材①	
断面	14 ( cm ) × 36 ( cm )
断面積	504 ( $\text{cm}^2$ )
強軸の断面二次モーメント	54432 ( $\text{cm}^4$ )
弱軸の断面二次モーメント	8232 ( $\text{cm}^4$ )
断面のヤング係数	882 ( $\text{kN}/\text{cm}^2$ )

### 5.5.3 断面の諸元

表 5-10 部材の諸元

部材②	
断面	14 ( cm ) × 45 ( cm )
断面積	630 ( cm <sup>2</sup> )
強軸の断面二次モーメント	106312.5 ( cm <sup>4</sup> )
弱軸の断面二次モーメント	10290 ( cm <sup>4</sup> )
断面のヤング係数	882 ( kN/cm <sup>2</sup> )

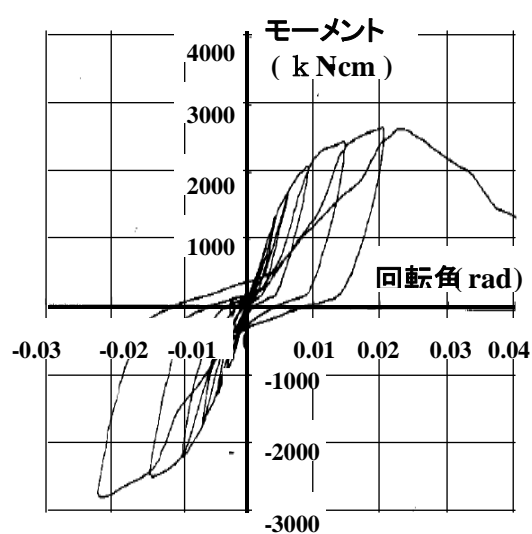


図 5-33a 実  
験結果のモー  
メントー回転  
角関係

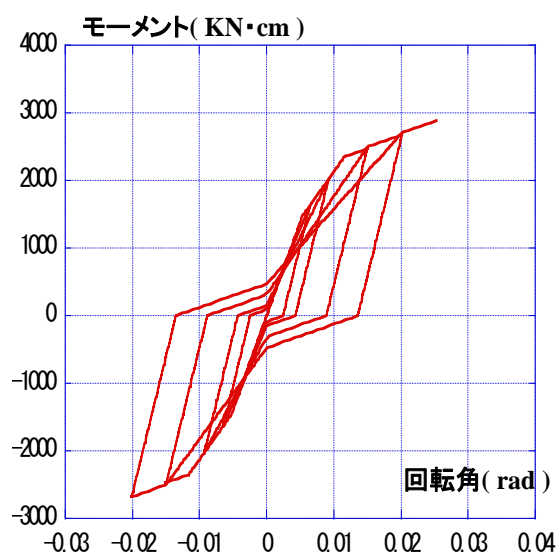


図 5-33b 解  
析結果のモー  
メントー回転  
角関係

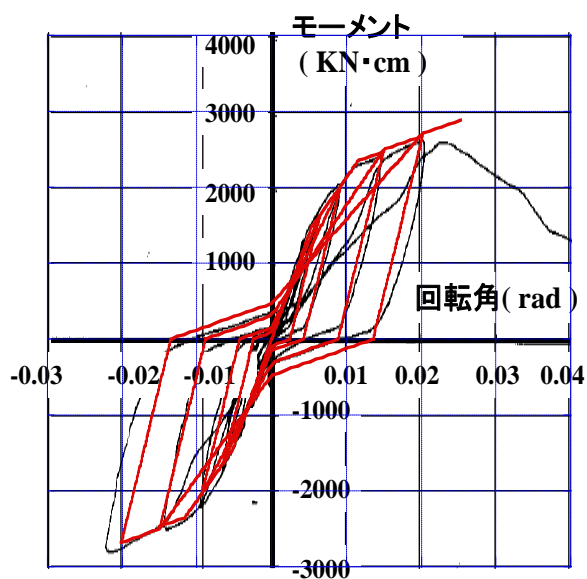


図 5-33c 解  
析と実験結果  
のモーメント  
ー回転角関係

接合部のモーメントと回転角の関係を図 5-33a に実験結果、図 5-33b に解析結果、図 5-33c に実験結果と解析結果を重ねて示す。

この結果より、概ね良い近似が得られていることが分かる。この実験はT字型のモデルであり、対称の履歴となっているが、L字型のモデルでは、履歴が非対称となる場合があり、用いる復元力特性に注意が必要である。

#### 5.5.4 曲げバネの解析結果

#### 5.6 軸方向バネの解析

佐久間ら<sup>38)</sup>の実験的研究を元に、軸方向バネを組み込んだ部材モデルを作成して解析を行い、実験結果との比較を行う。接合方法は接合金物に M20 ボルトを用いた 2 面せん断であり、図 5-34 に示される。

実験を元に作成した解析モデルを図 5-8 に示す。長さ 30cm の材で構成されており、2 部材に分割して、部材と部材の接合部分に軸方向バネを組み込んでモデル化を行う。使用する部材モデルは左端に軸方向バネをもつ部材モデルと、バネを持たない弾性部材のみの部材モデルを使用する。解析には荷重増分法を用い、スリップ時の剛性が低いため、解析が発散する危険性を考慮して荷重係数を 0.001 とする。

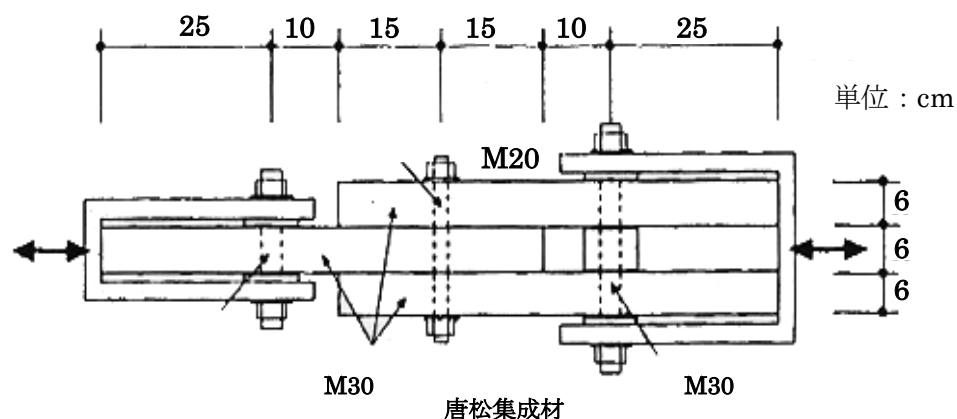


図 5-34 軸方向バネの解析モデル

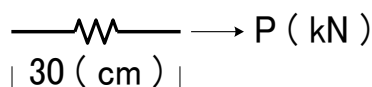


図 5-35 軸方向バネの解析モデル

部材分割数	: 2 部材
部材長さ	: 15 (cm)
部材モデル	:
	左端軸方向バネを持つモデル
	弾性部材



### 5.6.1 軸方向バネの履歴特性

実験結果で報告されている接合部の軸力と水平変位の関係を用いて、復元力特性を作成する。作成した履歴特性を図 5-36 に示す。実験では曲げバネと同じく破壊時まで繰り返し载荷を行っており、破壊する前に剛性が負となっているが、解析上では剛性が負となる部分の解析は考慮せずに直線的に 3 次の勾配を伸ばす事とした。復元力特性はトリリニアの骨格曲線を持つボックス型スリップモデルとし、設定値は第一剛性 ( $K_1$ )、第二剛性 ( $K_2$ )、第三剛性 ( $K_3$ )、除荷剛性 ( $K_4$ )、スリップ剛性 ( $K_5$ )、第四剛性 ( $K_6$ ) 第一降伏軸力 ( $N_1$ )、第二降伏軸力 ( $N_2$ )、除荷時の折れ点となる軸力 ( $N_3$ ) とする。それぞれの数値は実験結果より算出し、各値を表 5-11 にまとめる。

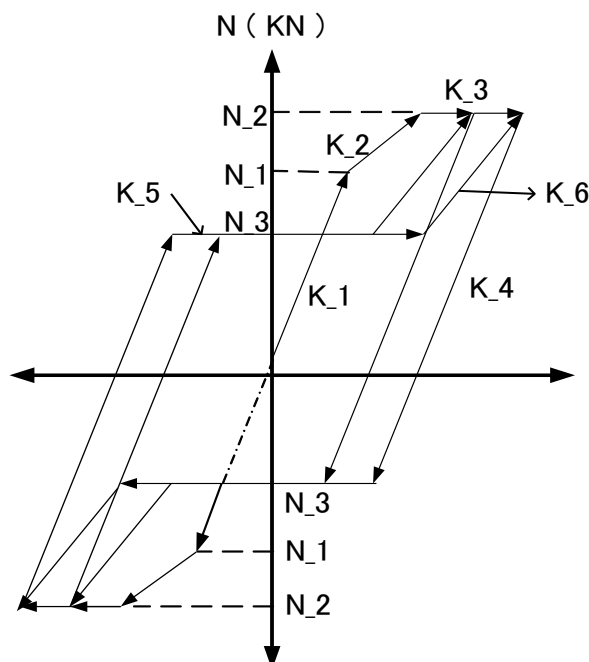


図 5-36 軸方向バネの復元力特性

表 5-11 軸方向バネの諸元

	実験結果
$K_1$ (kN/cm)	30.26
$K_2$ (kN/cm)	5.8
$K_3$ (kN/cm)	0.058
$K_4$ (kN/cm)	39.11
$K_5$ (kN/cm)	0.058
$K_6$ (kN/cm)	13.86
$N_1$ (kN)	3.45
$N_2$ (kN)	4.5
$N_3$ (kN)	0.73

## 5.6.2 断面の緒元

断面の諸言を表 5-12 にまとめる。構造材は唐松集成材、幅 6cm×せい 13cm である。

表 5-12 断面の諸元

部材	
断面	6 ( cm ) × 13 ( cm )
断面積	78 ( cm <sup>2</sup> )
強軸の断面二次モーメント	1098.5 ( cm <sup>4</sup> )
弱軸の断面二次モーメント	234 ( cm <sup>4</sup> )
断面のヤング係数	980 ( kN/cm <sup>2</sup> )

## 5.6.3 軸方向バネの解析結果

接合部の軸力と水平変位の関係を図 5-37 に実験結果、図 5-38 に解析結果、図 5-39 に実験結果と解析結果を重ねて示す。同図より分かるように、両者は非常に良い一致を示し、軸方向バネモデルは軸方向接合部を模擬できよう。

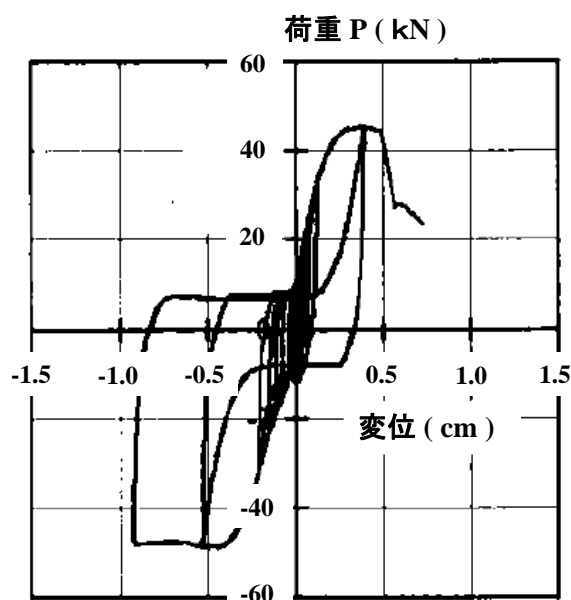


図 5-37 実験結果の軸力－水平変位関係

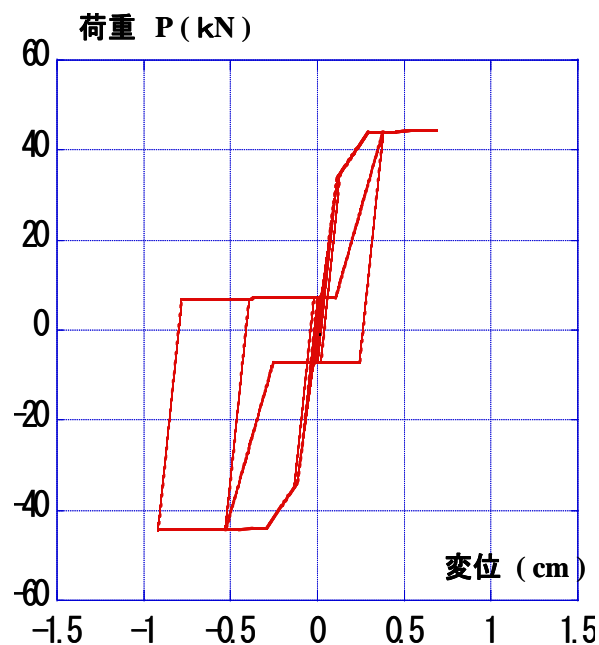


図 5-38 解析結果の軸力－水平変位関係

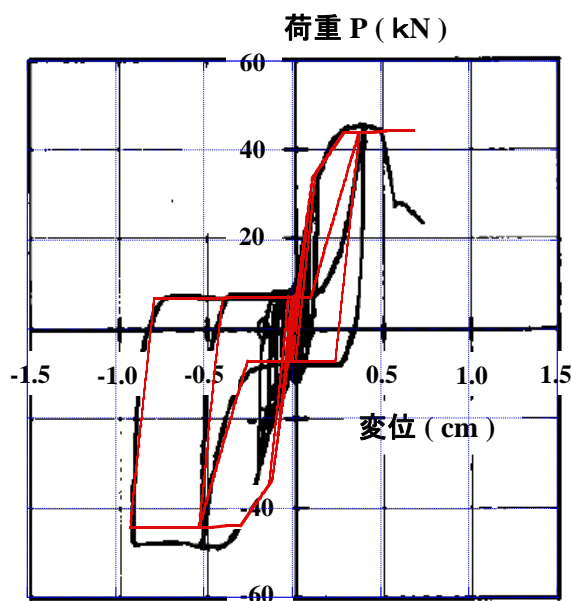


図 5-39 実験  
結果と解析結  
果の軸力－水  
平変位関係

本節では湾曲した部材の取り扱いと注意点について解説する（文献 39）, 40）参照）。湾曲集成材は鋼材などとは異なり、製造時に生じる曲げ応力を取り除くことができない。これまでいくつか行われた実験においても各ラミナに残留応力が存在していることが確かめられている。そのため、残留応力が耐力等に何らかの影響を及ぼすと推察される。そこで、まず各ラミナに生ずる残留応力を、理論的に求めていくことにする。

湾曲集成材の内部として、図 5-40a に示す各ラミナを曲率半径  $R$  に湾曲させるための曲げモーメント  $M_i$  と、図 5-40b に示す接着後に  $M_i$  を零に戻す際、はりが反りを戻そうと弾性的に回復するモーメント  $M_0$  とが存在する。すなわち、湾曲集成材の各ラミナには、はりを湾曲させるための  $M_i$  による軸方向応力  $\sigma_i$ （式 (5.1) 参照）及び、弾性回復する際の  $M_0$  による軸方向応力  $\sigma_0$ （式 (5.2)）が生じ、これらの合力が残留応力  $\sigma_r$ （式 (5.3)）となる（図 5-40c 左）。

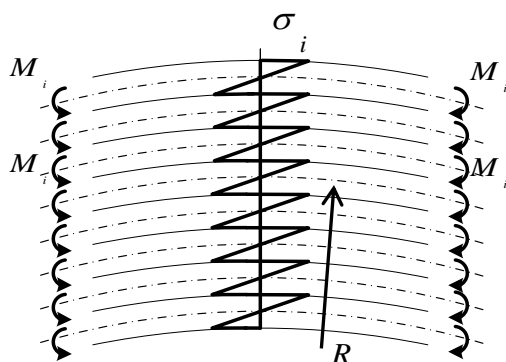


図 5-40a ラミナ内の残留応力

$$\sigma_i = \frac{M_i \cdot \eta}{I_0} \dots\dots\dots (5.1)$$

$M_i$  : 各ラミナの曲げモーメント

$\eta$  : 各ラミナの中立軸からの距離

$I_0$  : 各ラミナの断面2次モーメント

## 5.7 湾曲集成材 のモデル化

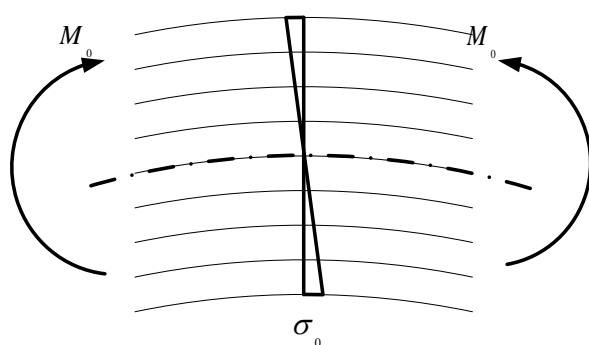


図 5-40b ラミナ内の残留応力

$$\sigma_0 = \frac{M_0 \cdot y}{I_0} \dots\dots\dots (5.2)$$

$M_0$  : 弾性回復における、曲げモーメント

$y$  : 断面の中立軸からの距離

$I_0$  : 断面全体の断面2次モーメント

ここで、曲率半径を減ずる方向に外力が作用(図 5-40c 右)すると、図 5-40d のような応力状態となり、○で示す最下層ラミナの凸側に最大応力が生じることとなる。なお、ここでは接着面におけるせん断力、及び半径方向応力は無視する。

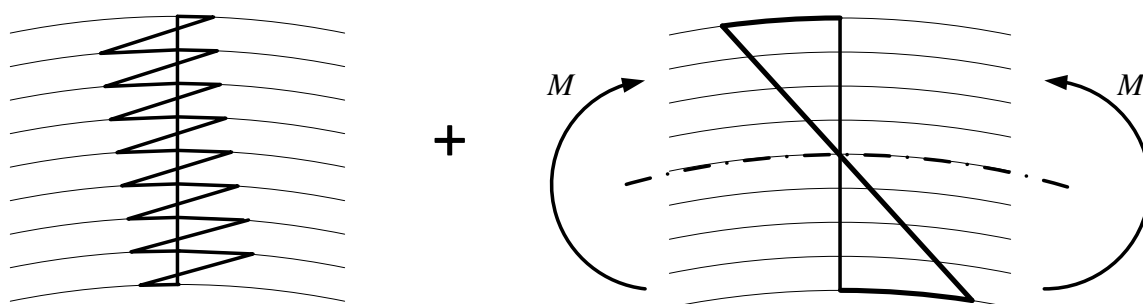
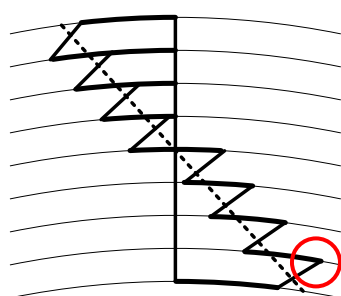


図 5-40c ラミナ内の残留応力



$$\sigma_r = \sigma_i - \sigma_0 \dots\dots\dots (5.3)$$

$\sigma_r$  : 残留応力

$\sigma_i$  : 各ラミナの軸方向応力

$\sigma_0$  : 弾性回復における軸方向応力

図 5-40d 残留応力の理論的な算定方法

## 5.7.1 解析モデル

実験<sup>39)</sup>を元に、図 5-41 に示す湾曲集成材梁のモデル化を行う。境界はピン・ローラ支持とし、各緒元は表 5-13 に示す。

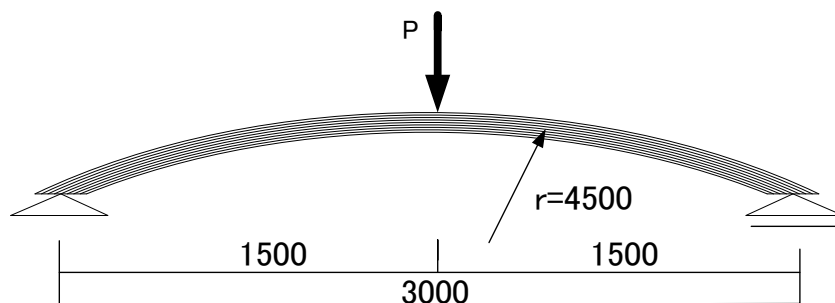


図 5-41 解析モデル

表 5-13 解析モデルの各緒元

曲率半径 (mm)	ライズ (mm)	スパン (mm)	梁せい (mm)	梁巾 (mm)	ラミナ厚 (mm)	積層数
4500	257	3000	144	74	18	8

部材断面は、実験と同様に同一等級ラミナで構成された集成材 (E95-F315 図 5-42) とし、各緒元は JAS で定められた繊維方向特性値 (表 5-14) を用いる。

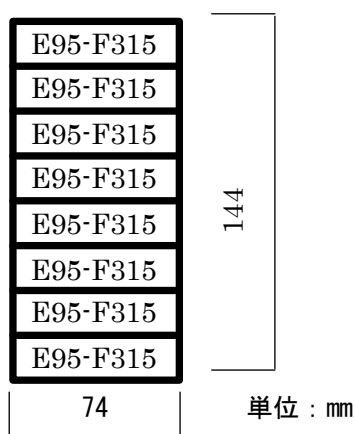


表 5-14 同一等級構成集成材の繊維方向特性値

強度等級	基準材料強度 kN/cm <sup>2</sup>		基準許容応力度 kN/cm <sup>2</sup>		基準弾性係数 kN/cm <sup>2</sup>
	Fc	Ft	fc	ft	
E95-F315	2.58	2.28	0.86	0.76	950

図 5-42 部材断面

### 5.7.2 ファイバーモデルを用いた部材断面のモデル化

ファイバーモデルに組み込む履歴特性は、引張力に対しては脆性的で、圧縮力に対しては比較的靱性を有する木材の性質(図 5-43)を考慮した非対称トリリニア型とする。なお、特に引張側において脆性的な破壊が生じることを考慮して、第三剛性を初期剛性の  $1/1000$  とする履歴特性(図 5-44(a))と、第二折れ点に達した時点で応力を零とする履歴特性(図 5-44(b))の2種類とする。ただし、図 5-44(b)の履歴特性の  $k_{t3}$  は0である。

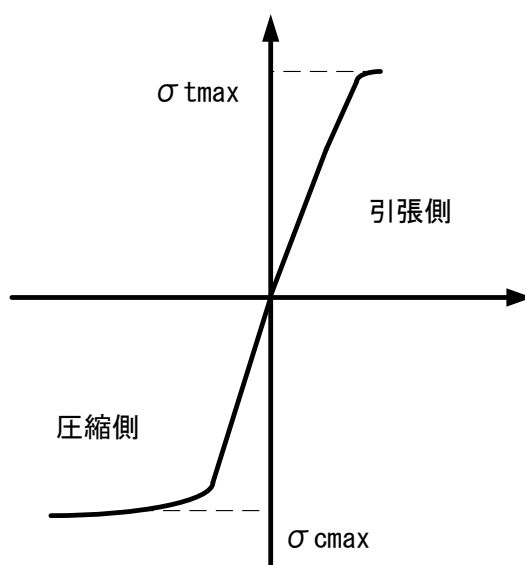


図 5-43 一般的な木材の応力度・ひずみ度曲線

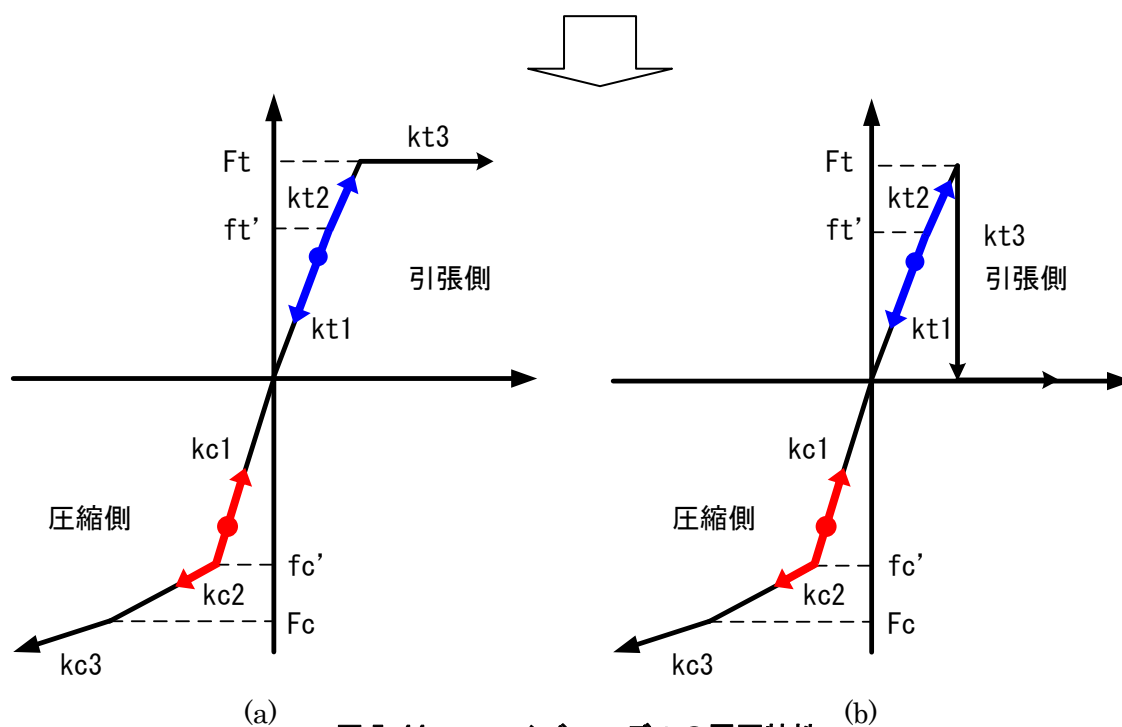


図 5-44 ファイバーモデルの履歴特性

各ファイバーモデルの初期剛性及び第二、第三剛性を表5-15に示す。

表 5-15 履歴特性の剛性

引張	$k_{t1}$	$k_{t2}$	$k_{t3}$
	950.0	665.0	0.095※
圧縮	$k_{c1}$	$k_{c2}$	$k_{c3}$
	950.0	332.5	9.5

単位：kN/cm<sup>2</sup>

次に、式(5.3)の算定方法より各ラミナの理論的な残留応力を算出し、図5-44(a)(b)に示すように、各履歴の開始点とする。一枚のラミナを縦方向に4分割し(図4-45)、引張側及び圧縮側の残留応力を有するファイバーとして部材断面のファイバーモデルを作成する(図5-46)。なお、各ラミナの残留応力は図に示すように面積等価した値とする(図5-45左)。

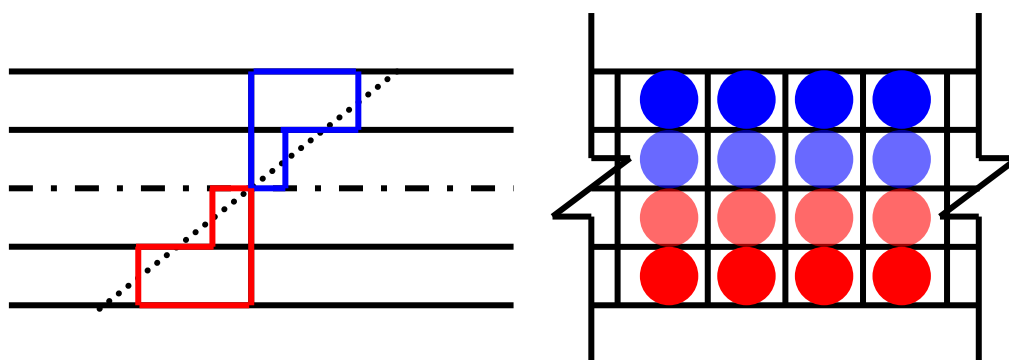


図 5-45 各ラミナの残留応力及び残留応力を与えたファイバー断面の一部

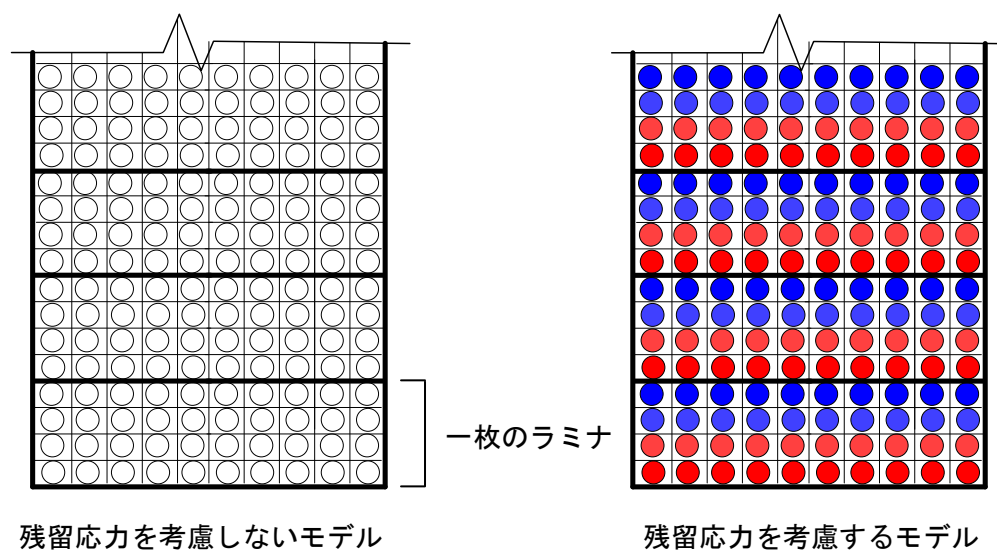


図 5-46 ファイバーモデル断面

### 5.7.3 ファイバーモデルを用いた部材のモデル化

部材モデルは、図 5-47 に示す 9 つのファイバーモデルを均等に配したモデル(9fiber\_model)とする。これは、湾曲集成材の弾塑性挙動を精度よく解析すること、及び残留応力を与えるためである。

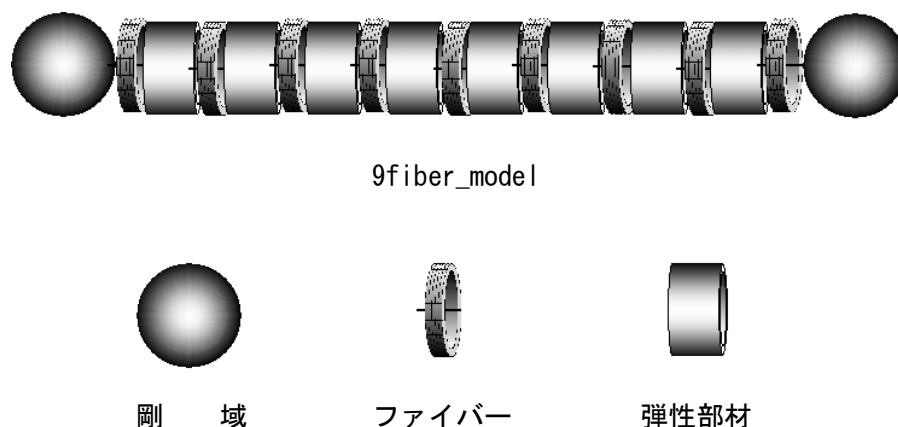


図 5-47 部材モデル

ここで、弾性部材の弾性係数は木質構造設計基準・同解説より式(5.4)によって算定する。

$$E_b = 0.95 \Sigma(E_i I_i) / I \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

式の各値は次の通りである。

- $E_b$  : 弾性部材の弾性係数
- $E_i$  : 各ラミナの基準弾性係数
- $I_i$  : 各ラミナの断面二次モーメント
- $I$  : 全断面の断面二次モーメント

### 5.7.4 解析手法

幾何学的非線形性を考慮した弾塑性解析を行い、載荷荷重は実験の最大荷重(14.29kN)とする。荷重増分係数は0.01とし、100ステップで解析を行う。

実験では、遊びが考慮されているがここでは遊びが0の場合について解析を行う。遊びがあり、初期にスリップが生じる場合は復元力特性に初期スリップを表す履歴を組み込む事によって解析が可能であると考えられる。



## 5.7.5 解析結果

図 5-48、図 5-49 に各モデル頂点の荷重と鉛直変位の関係を、また、図 5-50、図 5-51 に各々のモデルの応力度・ひずみ度関係を示す。

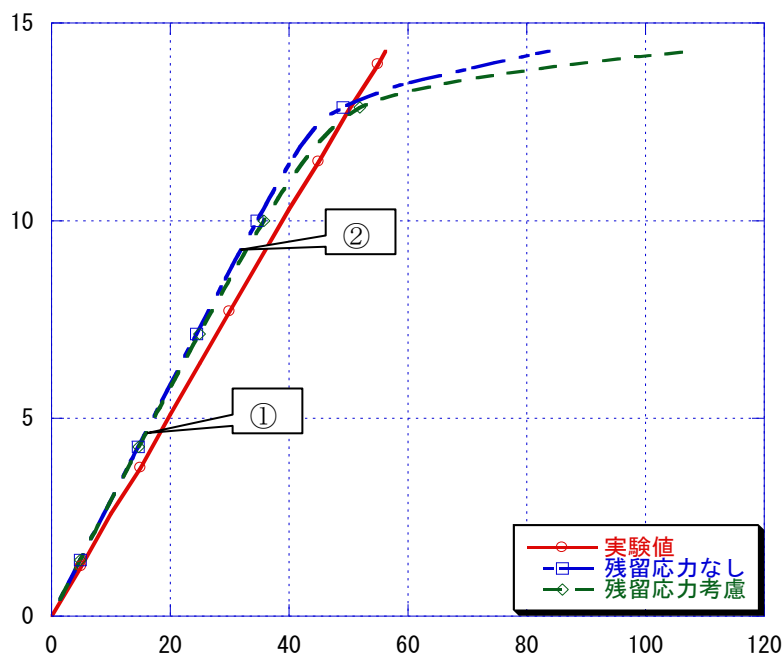


図 5-48 湾曲頂点における荷重と鉛直変位の関係  
(引張降伏後の剛性が初期剛性の 1/10000)

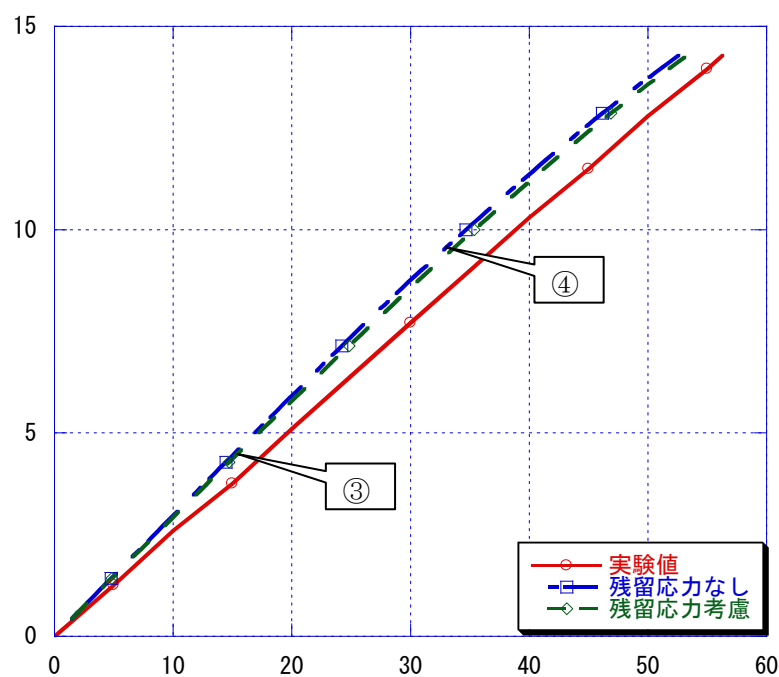


図 5-49 湾曲頂点における荷重と鉛直変位の関係  
(引張降伏後の剛性が 0)

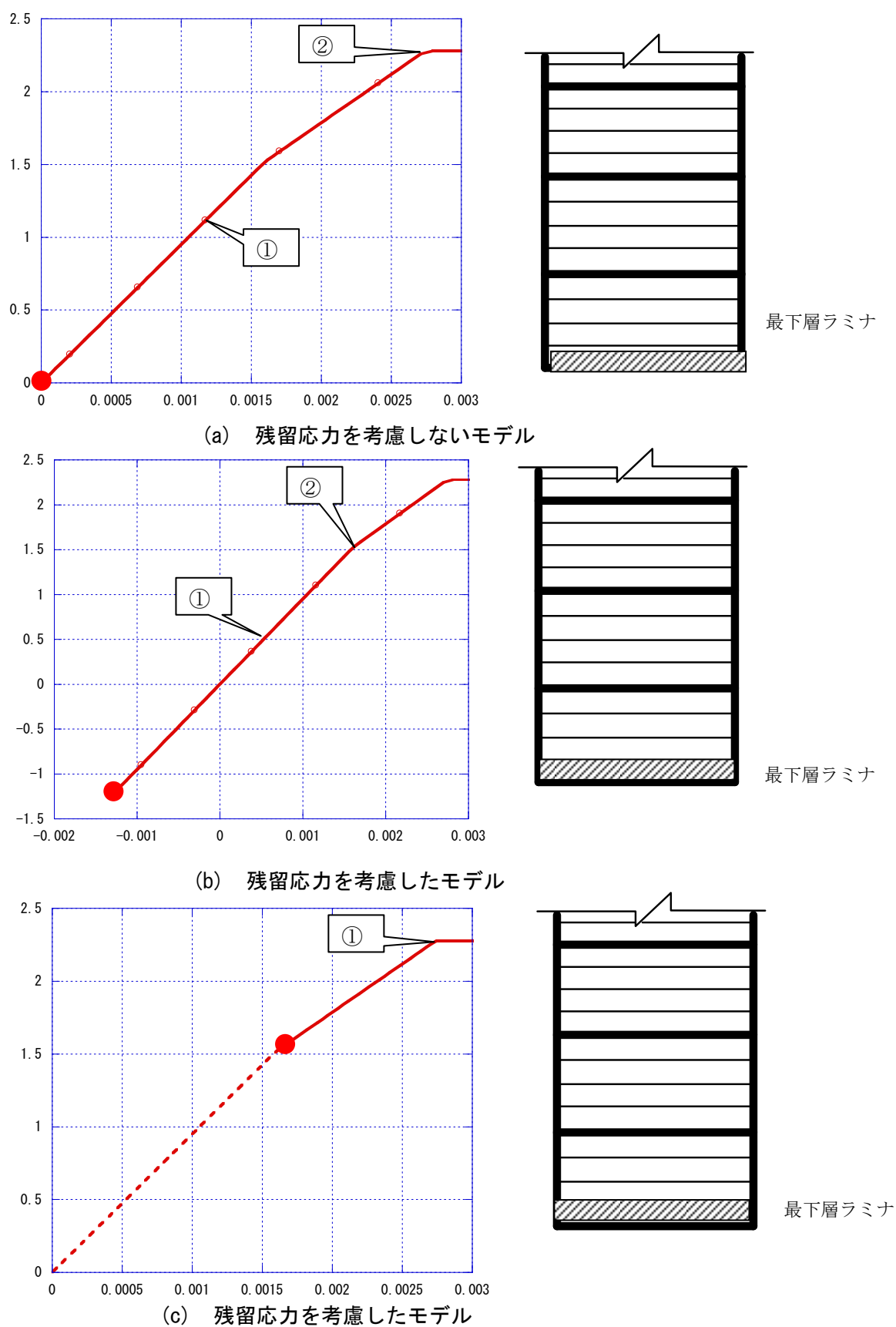
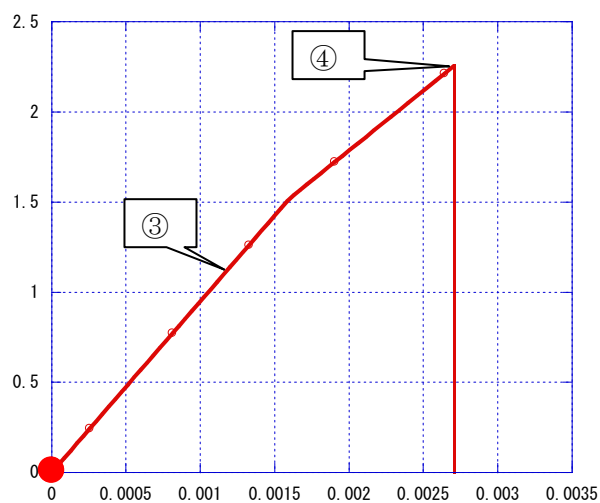
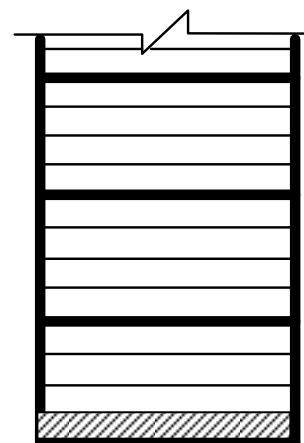


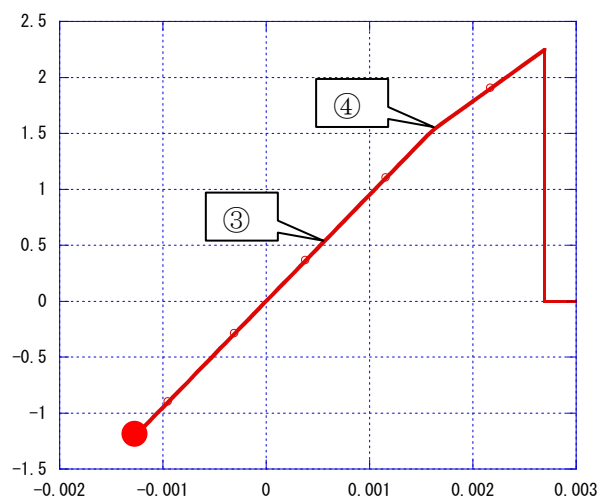
図 5-50 応力度-ひずみ度曲線(引張降伏後の剛性が初期剛性の 1/10000)



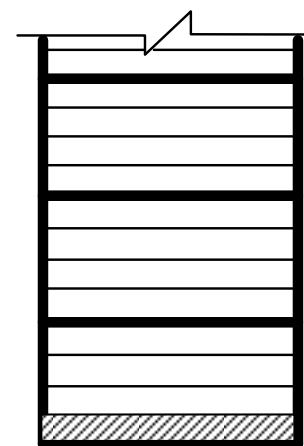
(a) 残留応力を考慮しないモデル



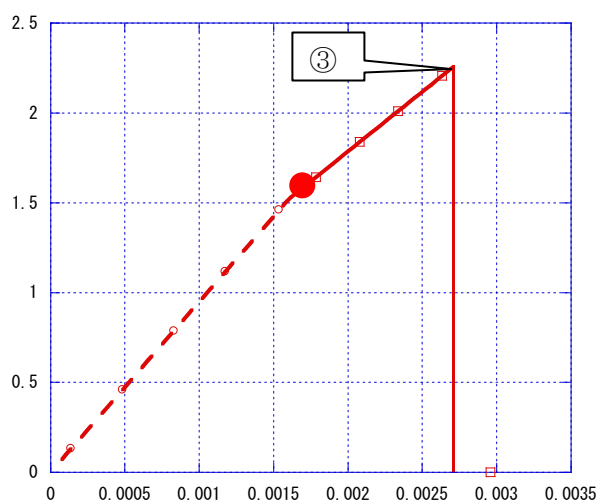
最下層ラミナ



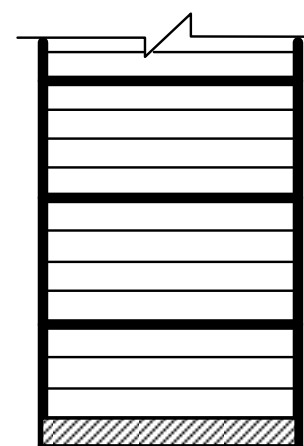
(b) 残留応力を考慮したモデル



最下層ラミナ



(c) 残留応力を考慮したモデル



最下層ラミナ

図 5-51 応力度-ひずみ度曲線(引張降伏後の応力が 0)

図 5-48 と図 5-49 に示すように、両モデルとも解析の初期剛性は、実験値に比べて 20%程度大きくなる結果を得た。これは、湾曲集成材を製造する際、各ラミナでの剛性低下が生じたことによると考えられる。

図 5-48 において、実験がほぼ線形で破壊に至っているのに対して、解析では最大荷重の 80%前後で非線形性が表れた。これは、解析モデルに用いた安全率を見込んだ JAS の特性値と比較して、実験で用いた材の強度が高かったためと考えられる。また、実験では脆性的な破壊に至るのに対して、解析で非線形性が表れたのは、履歴特性の第 3 勾配を正として解析を行ったためである。一方、図 5-49 に示す履歴特性の引張側の第 3 剛性を 0 とし、第 2 折れ点以降を無応力としたモデルでは、実験と同様にほぼ線形のまま最大荷重に達する結果を得た。

図 5-48 に示す①と②、及び図 5-49 に示す③と④は、残留応力を考慮したモデルと考慮しないモデルが各々剛性低下し始めた点である。①及び③が最大荷重の 30%であるのに対し、②及び④は 59%という結果を得た。しかし、各モデルの残留応力を考慮したモデルとしないモデルでは、最大荷重まではほぼ同じ挙動を示す結果となった。

次に、各モデルの断面応力状態について分析する。図 5-50、図 5-51 に各モデルの応力度・ひずみ度関係を示す。図 5-50 の①②は、図 5-48 の荷重・変位曲線上の①②に、図 5-51 の③④は、図 5-49 の荷重・変位曲線上の③④に対応する。ここで、応力度・ひずみ度曲線は、各々右に

示す断面の斜線部位置における関係を示す。①または③の状態、残留応力を考慮したモデルの最下層凸側ラミナが第 2 折れ点に達する。さらに、②または④のとき、残留応力を考慮しないモデルにおいても、最下層凹側ラミナが塑性域に達する。一方、①②または③④の状態のとき、残留応力を考慮したモデルの最下層凹側では第 2 折れ点に達していない。以上のことより、残留応力を考慮したことで、各ラミナは、外力による内部応力を減ずる残留



図 5-52 最初に塑性域に達する箇所

応力と、逆に増大させる残留応力を有していることが伺え、残留応力を考慮するモデルと考慮しないモデルの挙動が比較的近似する結果となったと考えられる。

次に、残留応力を考慮したモデルと考慮しないモデルの最も早く塑性域に達する箇所を図 5-52 に示す。これによると、残留応力を考慮するモデルの最下層ラミナ凸側からの塑性進行は、理論的に最も応力が卓越する位置、及び実験において破壊が始まる位置と一致していると言える。

## 5.8 まとめ

本章では、ファイバーモデルを用いた木質構造部材の静的解析、ばねモデルを用いた接合部の静的解析を行い、実験結果と比較することで、モデル化の妥当性を検証した。以下に、その結果をまとめる。

### 1) 木質構造部材の解析

1. 引張材においてはほぼ線形に破壊するため、断面を構成するラミナの剛性を設定する事によって、精度良く解析することが可能である。
2. 圧縮材は非線形性を有するため、部材の分割数を増やすか、ファイバーモデルの数を増やす事によって精度良い解析を行う事が可能である。
3. 曲げ材は、異等級で構成される集成材であっても、ファイバーモデルを用いて積層数に分割し、各層のラミナの特性をを用いる事によって、精度の良い解析が可能である。
4. FJ 等によっての耐力低下が著しい場合があり、今後その影響を考慮する必要がある。

### 2) 接合部の解析

1. 木質構造の接合部を、各力に対するばねを並列に並べて解析する事で、接合部の複雑な挙動を表す事ができる。
2. 単純な曲げ、軸力に対する挙動は精度良く解析できる。

### 3) 湾曲集成材の解析

1. 湾曲集成材の残留応力を、ファイバーモデルを用いて考慮することにより、実験での最下層ラミナの凸側からの破壊性状は、同位置での塑性進行という形で捉えることができた。
2. 残留応力を考慮することで、考慮しないモデルよりも先に塑性域に達するが、全体の挙動はほぼ近似している結果を得た。
3. 解析の初期剛性が実験値に比べて 20%程度大きくなる結果を得た。

