

# 開放的空間を可能にする中断面集成材を用いた新しい軸組住宅構法の開発

—信頼性向上のための部材及び架構の開発—

主査 三橋 博三\*<sup>1</sup>  
委員 板垣 直行\*<sup>2</sup> 梅田 久男\*<sup>3</sup>  
委員 江刺 拓司\*<sup>4</sup> 佐藤 夕子\*<sup>5</sup>

キーワード：1) ラミナ, 2) 集成材, 3) 性能設計, 4) 信頼性, 5) 確率モデル, 6) シミュレーション, 7) 張弦梁, 8) 木造住宅, 9) 軸組構法, 10) グリッドプラン

## 1. 研究の目的

近年、人々の住生活に対する意識が向上し、より快適で質の高い空間が求められている。そして、そのような空間におけるプラスアルファの要素として、木という素材がもつ、あたたかみ、風合い、といったものが見直され、木造住宅への関心が非常に高まっている。

しかし、一昨年の阪神大震災においてかなりの木造住宅が倒壊し、多数の犠牲者を生んだことは周知の事実である。その後の調査によって、現行の基準を遵守していた木造住宅はそれほど被害を受けておらず、高度成長期に量産された粗悪な住宅や、設計者や職人の構造的な配慮が欠けた住宅が多数被害を受けたことが明らかにされた<sup>2)</sup>が、在来木造住宅が耐震性の確保が難しく、構造計算が曖昧であるといった問題点も再認識されたといえる。

一方、我が国の伝統的木造住宅は軸組によって造られる開放的な空間が特徴であり、現在でもこのような空間を望む声も多い。また、最近ではリビング、ダイニング、キッチンを連続した一つの空間としたり、さらには住宅の間取りをそれぞれのライフステージに応じて簡単に改変できるような、フレキシブルに対応できる住宅架構が求められている。

ところが在来構法では、細い柱や梁を組み合わせる“総持ち”として骨組みを構成しているため、部材の構成が複雑で力の流れが分かりにくく、構造計算が困難である。また、外力に抵抗するには随所に柱や耐力壁を入れる必要があり、空間は閉鎖的になりがちである。

したがって、伝統的な“木の空間”を再現しつつ、ライフステージに応じて改変できる豊かな住空間を実現するためには、以上の様な問題を踏まえた新たな軸組住宅構法を開発することが必要である。本研究では、そのための具体的な方法として、住宅架構の主要な部材を中断面集成材で統一し、部材と接合部の耐力及び剛性を高め、

全体の架構をシンプルかつ開放的にすることを検討する。

本研究では、まず信頼性が高く耐力及び剛性に優れた中断面集成材を作製するため、その構成要素となるラミナの性能を調べ、その性能特性を基にシミュレーションにより集成材の性能を予測し評価する方法を検討するとともに、それらのラミナを構成して作製される実大の中断面集成材について実験を行い、力学的特性を調べる。また、より広いスパンを可能にするため、中断面集成材をハイブリッド化した張弦梁を作製し、その性能特性及び性能設計方法を検討する。さらに、これらの部材を用いて、構造耐力と信頼性の向上を図りつつ、開放的な空間を可能にする架構及びその接合方法を検討し、中断面集成材を用いた新たな木造軸組住宅構法開発のための基礎資料とする。

## 2. 中断面集成材の性能特性評価及び性能設計方法の開発

### 2.1 目的

集成材は集成化により構成要素（ラミナ）の性能が平均化されるため、そのばらつきが減少し、信頼性の向上が図られる。また合理的なラミナの配置により、有効に剛性の向上を図ることができる。しかしながら現在生産されている集成材ではこれらの利点が十分に活かされておらず、供給される材の性能も保証できない状況にある。

本研究では中断面集成材を住宅架構の基本部材として用いるにあたり、中断面集成材の性能特性を把握すると共に、効率的で安定した性能の材料を供給するための、集成材の性能設計方法の確立を目的とする。

そのためにまず集成材のラミナについて力学的特性を測定し、それらを構成して作られる集成材の性能との関係を検討する。さらに、ラミナの試験結果をデータベースとし、確率モデルを用いて集成材の性能予測を行う方

\*1 東北大学大学院工学研究科 教授

\*2 東北大学大学院工学研究科 助手

\*5 宮城県林業試験場木材利用科 技師

\*3 宮城県林業試験場木材利用科 科長

\*4 宮城県林業試験場木材利用科 技師

法を開発し、実験より得られた中断面集成材の性能と比較検討する。

## 2.2 ラミナの性能評価

### 2.2.1 試験体の作製方法

宮城県産スギ中径木（樹齢約40年）より、厚さ30mm、幅120mm、全長4,000mmのラミナを173体採材した。これらについて、動的ヤング係数（ $E_d$ ）を測定し、ノンジョイントラミナ（以後NJラミナ）試験体とフィンガージョイントラミナ（以後FJラミナ）試験体のヤング係数分布がほぼ同じになるように仕分けした。最終的な試験体の全長を2,500mmとし、NJラミナ、FJラミナをそれぞれ100体作製した。作製したFJラミナのフィンガー形状は図2-1に示す通りであり、縦継ぎ時のエンドプレッシャーは18kgf/cm<sup>2</sup>とした。はじめに引張試験を行い、その後試験体の非破壊部より曲げ試験体を採材した。その際、FJラミナについては、両端の非破壊部分を再びフィンガージョイント加工して試験体を作製した。

### 2.2.2 試験方法

引張試験は引張強度試験機能を備えた保証荷重試験機（NET-40：飯田工業製）を用い、「構造用集成材の日本農林規格（JAS）」の引張試験に準拠して行った。チャック間距離は約1,100mmとした。荷重をロードセルにより連続的に測定し、破壊時に得られた最大荷重値から引張強度（TS）を算出した。破壊までに要した時間はおよそ1～3分であった。

曲げ試験は木材用万能試験機（TCM-10000：ミネベア）を用い、同規格の曲げC試験に準拠して行った。スパンは630mmとし、3等分4点荷重による静的載荷で行った。最大荷重より曲げ破壊係数（MOR）を求め、スパン中央及び載荷点の変位より全スパンたわみによる曲げヤング係数（ $MOE_L$ ）及びモーメント一定区間のたわみによる曲げヤング係数（ $MOE_I$ ）を求めた。

### 2.2.3 試験の結果及び考察

#### 1) 引張試験

試験より求められた強度の集計結果及びヤング係数等を表2-1に示す。またそれぞれの分布を図2-2、図2-3に示す。

NJラミナのTSは平均で322.2kgf/cm<sup>2</sup>であったのに対し、FJラミナのTSは平均で225.2kgf/cm<sup>2</sup>であり、100

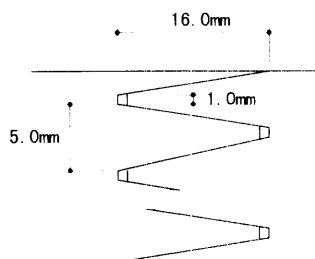


図2-1 フィンガー形状

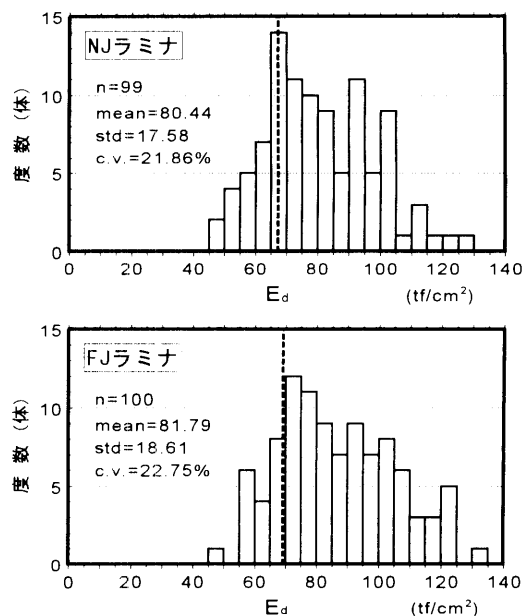


図2-2 引張試験体ラミナのEd分布

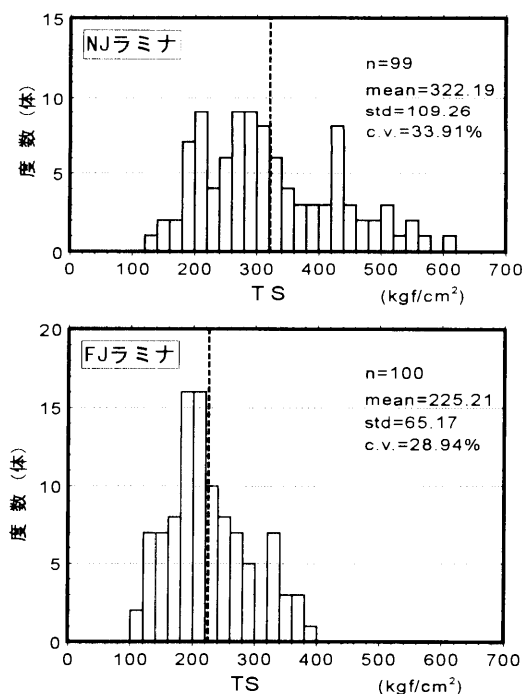


図2-3 引張試験におけるTS分布

表2-1 各試験によるヤング係数及び強度

試料数	NJラミナ				FJラミナ			
	密度 $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	ヤング係数 $E_d$ tf/cm <sup>2</sup>	引張強度 TS kgf/cm <sup>2</sup>	含水率 MC %	密度 $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	ヤング係数 $E_d$ tf/cm <sup>2</sup>	引張強度 TS kgf/cm <sup>2</sup>	含水率 MC %
	99				100			
最大値	0.46	126.5	619.4	18.60	0.48	125.4	390.4	18.66
平均値	0.38	80.4	322.2	15.60	0.39	81.8	225.2	13.85
最小値	0.30	46.4	138.3	13.46	0.30	41.5	102.0	11.94
標準偏差	0.03	17.6	109.3	0.01	0.03	18.6	65.2	1.16
変動係数(%)	8.59	21.86	33.91	7.86	8.21	22.75	28.94	8.37

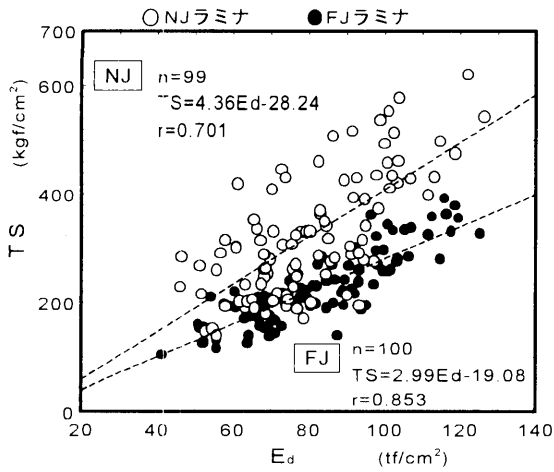


図2-4 E<sub>d</sub>とTSの関係

表2-2 破壊部位ごとの引張試験結果

破壊部位	ジョイント	節	その他
試料数 (体)	71	24	5
TS 平均(kgf/cm <sup>2</sup> )	233.2	213.2	-
E <sub>d</sub> 平均(tf/cm <sup>2</sup> )	82.3	81.8	-
相関係数	0.893	0.746	-

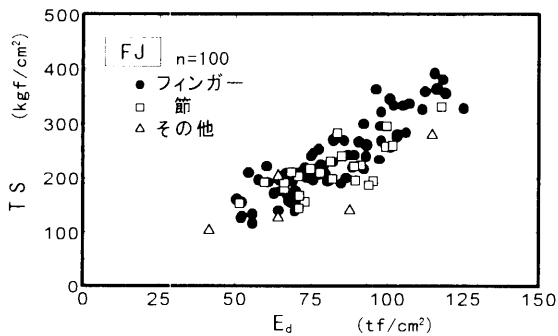


図2-5 破壊部位別にみたE<sub>d</sub>とTSの関係

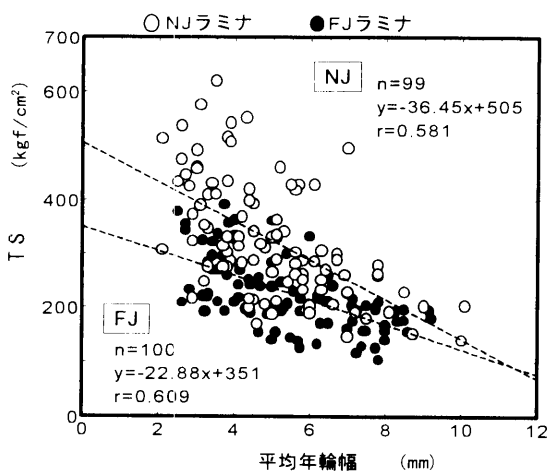


図2-6 平均年輪幅とTSの関係

kgf/cm<sup>2</sup>ほど差があった。NJラミナに対するFJラミナの平均TS比を接合効率と考えると69.9%となり、フィンガージョイントとして一般的な接合効率であったといえる。

両者のヤング係数分布はほぼ同じであったのに対し、TS分布はかなり異なったものとなった。TSの下限値にはあまり差がないが、NJラミナは100~600kgf/cm<sup>2</sup>の範囲に広く分布しているのに対し、FJラミナは200kgf/cm<sup>2</sup>付近に集中して分布している。

図2-4にE<sub>d</sub>とTSの関係を示す。それぞれの回帰式の傾きにはかなり差があり、FJラミナの回帰直線上の強度はNJラミナの約70%の強度となっている。またNJラミナは相関係数が0.7程度でかなりばらついているのに対し、FJラミナでは相関係数は0.85であり、かなり高い相関となっている。

このようなNJラミナとFJラミナの強度特性の差はそれぞれの破壊のメカニズムが異なっているためと考えられる。NJラミナでは破壊のほとんどが節などの欠点部分で破壊しているのに対し、FJラミナの破壊形態を観察すると、表2-2に示されるように70%がジョイント部でフィンガーが破断して破壊している。従って、NJラミナの場合は節などの欠点はその特性に応じて破壊するため、材質に関係なく強度の値がばらつくといえる。一方、FJラミナでは強度を支配する因子がヤング係数をはじめ、ジョイント部の材質にかかわる特性に絞られるため、強度のばらつきが小さくなるものといえる。FJラミナにおいてジョイント部で破壊した試験体のみとE<sub>d</sub>との相関係数は0.89となり、更に高いヤング係数との相関を示している(図2-5参照)。

ヤング係数以外にジョイント部の材質にかかわる因子として、平均年輪幅が考えられる。TSと平均年輪幅との相関関係を図2-6に示す。平均年輪幅とTSの関係においてもやはりFJラミナの方が相関が高く、NJラミナの方がばらつきが大きい事が明らかである。

以上のことより、NJラミナに比べFJラミナのTSは低かったものの、性能のばらつきが小さく、またヤング係数などとの相関が高いため、これらをパラメータとした強度の予測が可能であると考えられる。

## 2) 曲げ試験

試験結果より求められたヤング係数及び強度の集計を表2-3に示す。またそれぞれの分布を図2-7、図2-8に示す。

MOE<sub>L</sub>とMOE<sub>i</sub>の分布ではMOE<sub>i</sub>の方が分布のばらつきが大きくなっているが、これはMOE<sub>i</sub>の方が測定区間が短いため材内の性能分布の差が顕著に表れたことと、たわみの変位が微小であるため、測定の誤差の影響が大きかったものと考えられる。NJラミナとFJラミナの両

表2-3 各試験によるヤング係数及び強度

試料数	NJラミナ			FJラミナ		
	曲げヤング係数		曲げ強度	曲げヤング係数		曲げ強度
	MOE <sub>L</sub> tf/cm <sup>2</sup>	MOE <sub>1</sub> tf/cm <sup>2</sup>	MOR kgf/cm <sup>2</sup>	MOE <sub>L</sub> tf/cm <sup>2</sup>	MOE <sub>1</sub> tf/cm <sup>2</sup>	MOR kgf/cm <sup>2</sup>
99	114.4	437.2	801.5	114.0	133.5	462.0
最大値	114.4	437.2	801.5	114.0	133.5	462.0
平均値	71.5	89.3	506.7	69.6	79.5	321.3
最小値	35.3	29.8	289.2	22.7	19.9	173.3
標準偏差	19.2	48.6	100.1	18.2	24.5	69.0
変動係数(%)	26.85	54.41	19.76	26.12	30.85	21.47

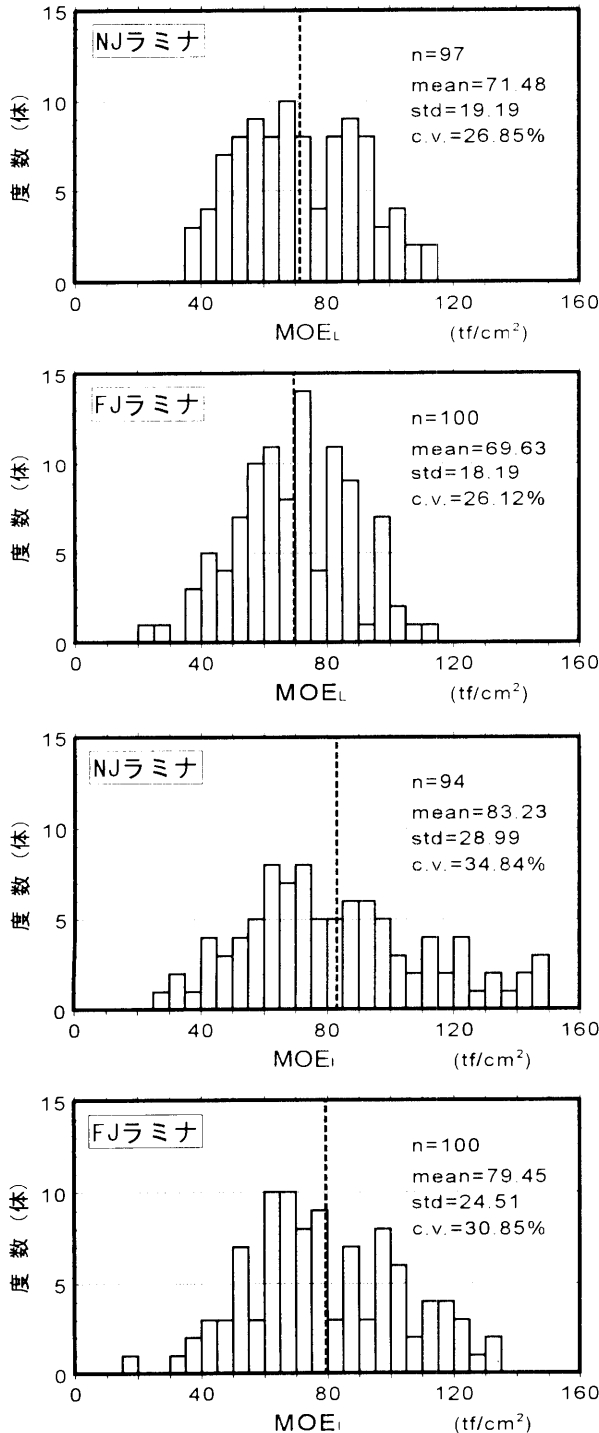


図2-7 曲げ試験におけるヤング係数分布

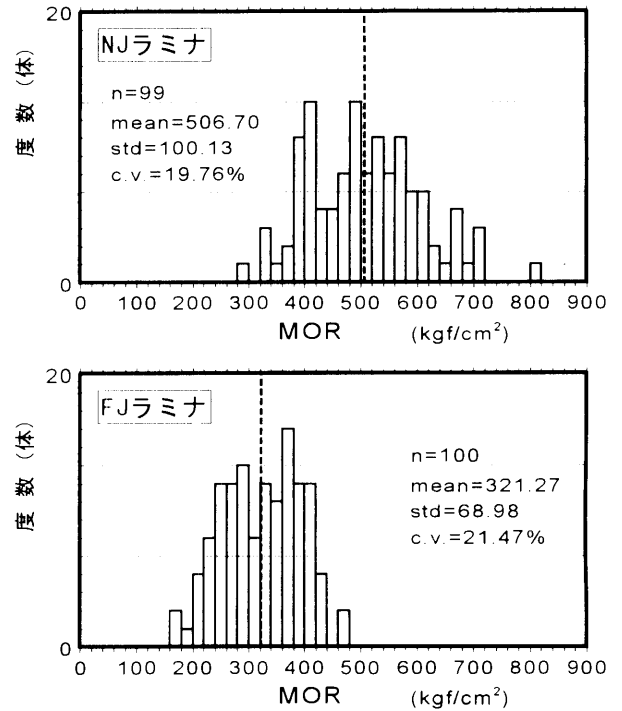


図2-8 曲げ試験におけるMOR分布

者のヤング係数分布の形状には多少差はあるものの、平均、標準偏差はほぼ同じであった。

NJラミナのMORは平均で506.7kgf/cm<sup>2</sup>であったのに対し、FJラミナのMORは平均で321.3kgf/cm<sup>2</sup>であり、かなり差がみられた。接合効率として考えると63.4%となりTSの場合より幾分低い値となった。

また分布の形状もNJラミナとFJラミナのMOR分布ではかなり異なったものとなった。TS分布では下限値にあまり差がなかったが、MOR分布ではFJラミナの分布の下限値はNJラミナの分布の下限値よりかなり低くなっている。またTS分布と同様にFJラミナが200~500kgf/cm<sup>2</sup>の範囲に値が集中しているのに比べ、NJラミナは300~800kgf/cm<sup>2</sup>のかなり広い範囲に値がばらついている。

MOE<sub>L</sub>とMORとの相関関係を図2-9に示す。NJラミナに比べFJラミナの回帰式は若干傾きが小さく、また切片が100kgf/cm<sup>2</sup>程度ずれている。しかしTSとE<sub>0</sub>の関係と異なり、それぞれの相関係数はNJラミナで0.802、FJラミナで0.805といずれも高い相関が得られており、両者にあまり差がなかった。

TSの場合と異なり、NJラミナにおいてもMORとヤング係数との相関が高かったのは、曲げ試験においてはモーメント最大区間が短いため節などの欠点はその区間に存在する確率が低く、さらに欠点に大きく影響する引張応力成分が曲げ試験の場合は小さいため、欠点による破壊がそれほど多くなかったことが挙げられる。

以上のことより、MORについてはNJラミナ及びFJ

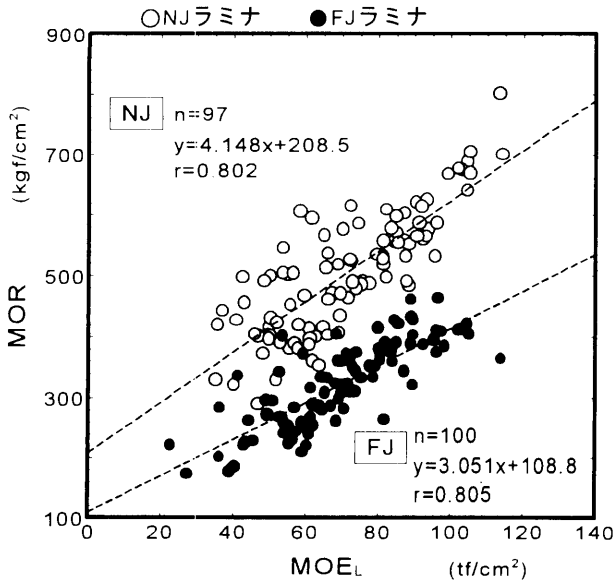


図2-9 MOE<sub>L</sub>とMORの関係

ラミナのいずれにおいても、ヤング係数などの相関が高いため、これらをパラメータとした強度の予測が有効であると考えられる。

## 2.3 集成材の性能設計

### 2.3.1 集成材のヤング係数の設計

集成材のMOEは、各ラミナのMOEが均質であると仮定すれば、(1)式に示される等価曲げ剛性の関係<sup>32)</sup>により算定する事ができる。

$$EI = \sum_{i=1}^n E_i I_{i-nn'} \quad (1)$$

E：積層材のヤング係数

I：積層材の断面2次モーメント

E<sub>i</sub>：各層のヤング係数

I<sub>i-nn'</sub>：各層の中立軸に関する断面2次モーメント

### 2.3.2 集成材の曲げ破壊係数の予測

集成材の曲げ破壊係数は基本的にはラミナの性能に依存するものといえるが、ラミナの破壊性能についてもバラツキがあり、厳密な破壊強度を求めることは不可能である。しかしこのようなバラツキを確率モデルを用いて考慮し、シミュレーションにより性能分布を予測すること<sup>33,4,5)</sup>は可能である。

シミュレーションは、まずモンテカルロ法を用いて仮想のラミナを作製し、そのラミナのデータを各構成に従い性能予測解析モデルに入力し、ヤング係数及び曲げ破壊係数を求めるという手順で行う。以下にこの手順を示す。

#### 1) 仮想ラミナの力学的性能を決定する確率モデル

①集成材の作製に用いるラミナのヤング係数分布を求め、

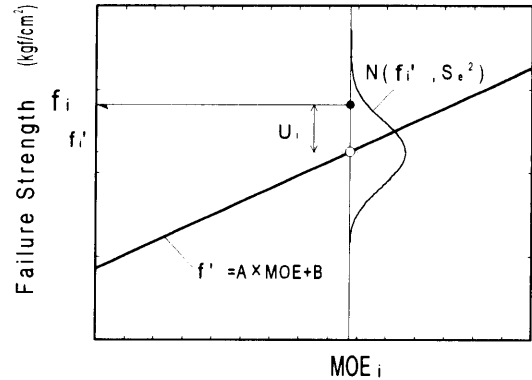


図2-10 ラミナのヤング係数と強度の決定方法

その分布に適合する分布関数を仮定する。

②仮定した確率密度関数に従う乱数を発生させ、仮想ラミナのMOEを決定する。例えば、分布関数を3パラメータ・ワイブル関数に仮定した場合、MOEは一様乱数  $r$  をワイブル分布関数  $F(x)$  の逆関数  $F^{-1}(x)$  (式(2))に代入して求められる。その際に、ラミナのMOEの範囲が、実在するラミナのMOE分布の最小値と最大値の間に値が発生するように範囲を調整する。即ち、ヤング係数の下限値 (MOE<sub>low</sub>) と上限値 (MOE<sub>up</sub>) の確率密度、 $X_{low}$ 、 $X_{up}$  を求め、一様乱数 ( $r=0\sim 1$ ) の発生範囲を  $r' = X_{low} \sim X_{up}$  の範囲に変換する。

$$MOE = \theta \times \{-\ln(1-r)\}^{1/m} + \gamma \quad (2)$$

m：形状パラメータ、 $\theta$ ：尺度パラメータ、 $\gamma$ ：位置パラメータ

②決定したMOEに対応する強度との回帰線上の値を求める。

$$f'_i = A \times MOE_i + B \quad (3)$$

③回帰線上の値に回帰からの誤差  $U_i$  を与える (図2-10参照)。このとき  $U_i$  は、MOEと各強度の相関における回帰直線に対する強度の標準誤差  $S_e$  を標準偏差とする正規分布  $N(0, S_e^2)$  に従って分布しているとし、また各強度の  $U_i$  は互いに相関をもっていると仮定する。これより曲げ破壊係数(MOR)、引張強度(TS)、圧縮強度(CS)の各強度とMOEとの回帰データ及び各強度間の相関係数により共分散行列づくり、3変量正規乱数を発生させ  $U_i$  を決定する。ラミナの強度  $f_i$  は式(4)に示すように、回帰上の値  $f'_i$  に  $U_i$  を加えて求められる。

$$f_i = f'_i + U_i \quad (4)$$

#### 2) 集成材の破壊解析モデル

①集成材の破壊が引張側外縁部より生じると仮定し、図2-11に示されるような集成材外縁における応力分布に基づき、破壊条件として(5)式に示される最外層ラミナのMOR、TSによる複合応力についての破壊条件式<sup>33,5)</sup>を用いる。

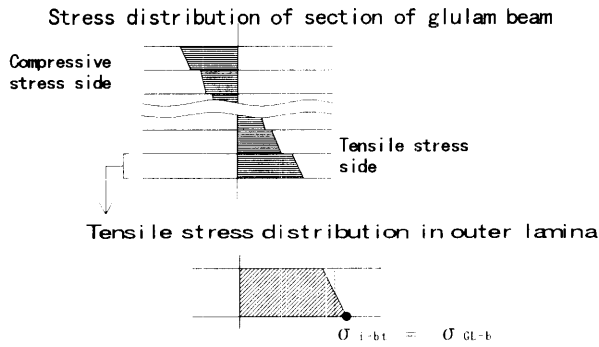


図2-11 集成材外層の応力分布

$$\left[ \frac{\sigma_{i-b}}{f_{i-b}} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{i-t}}{f_{i-t}} \right]^2 = 1 \quad (5)$$

- $\sigma_{i-b}$ : i層ラミナの曲げ応力成分
- $\sigma_{i-t}$ : i層ラミナの引張応力成分
- $f_{i-b}$ : i層ラミナの曲げ破壊係数
- $f_{i-t}$ : i層ラミナの引張強さ

②仮想ラミナのデータはラミナ単体を試験した性能を基にしたものであるが、引張強度は破壊において欠点の影響を受けやすく、積層された場合これらが補強されラミナ単体の性能より強度が向上すると考えられる。この欠点による破壊発生を確率過程理論<sup>26)</sup>により考慮し、補強効果を評価する。積層により欠点が補強される効果を欠点の減少として考え、m個の欠点を持ったラミナが積層接着されることにより欠点がm'個に減少すると考えると、破壊強度の増大、すなわち補強効果は

$$\frac{\bar{\sigma}'}{\bar{\sigma}} = \left[ \frac{m}{m'} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (6)$$

となる。ここで $\bar{\sigma}$ はラミナの破壊強度の最頻値、 $\bar{\sigma}'$ は補強されたラミナの破壊強度の最頻値であり、 $(\beta+1)$ は(7)式で示される。

$$\ln\{-\ln P(\sigma)\} = (\beta+1)\ln \sigma + \text{const.} \quad (7)$$

ただし、 $P(\sigma)$ は応力が $\sigma$ の時の生存確率である。本実験におけるNJラミナの引張試験の結果についてこの関係を表したものを図2-12に示す。この回帰式より $\beta+1=4.14$ が求められる。ラミナの片面が接着されることにより欠点が半減すると仮定し、 $m'=0.5m$ と考えると、補強効果により引張強さは1.18倍になると評価できる。

③実大集成材の曲げ破壊においては破壊に達するとき、梁断面には塑性化がかなり進行していると考えられる。木材の塑性化に関する引張及び圧縮応力-ひずみ曲線

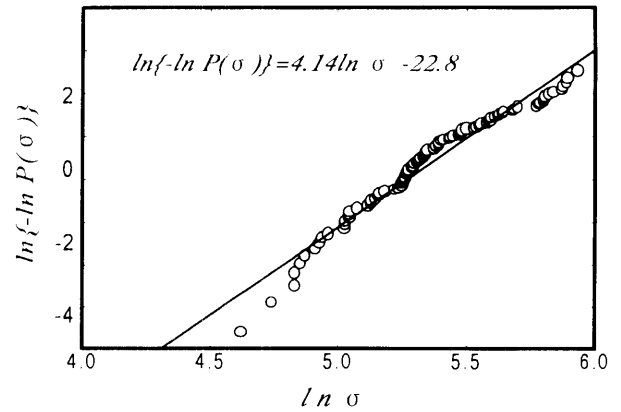


図2-12 ラミナの引張強度と生存確立の関係

の仮定についてはいくつかの提案がなされているが、本研究では金の提案した仮定<sup>27)</sup>を適用した。この仮定は、応力-ひずみ曲線を図2-13の様に近似化しており、圧縮については圧縮強度に達するまでは線形弾性で、それ以後は完全塑性とし、引張については線形弾性ととするものである。

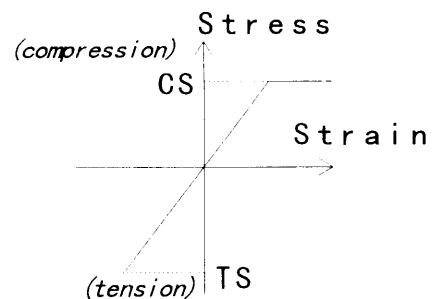


図2-13 金のモデルによる応力-ひずみ曲線

以上のモデルを用いて、仮想ラミナのヤング係数及び強度から集成材の曲げ破壊係数を求める。このシミュレーションを1,000~3,000回程度繰り返すことにより、集成材の曲げ破壊係数分布を予測することができる。

## 2.4 中断面集成材の製造及び実験

### 2.4.1 中断面集成材の製造

宮城県黒川森林組合より30×140×6,500mmのスギラミナを84枚購入し、これらについて縦振動法により動的ヤング係数( $E_d$ )を測定した。得られた $E_d$ の分布を図2-14に示す。

これらのラミナを用いて、8 ply集成材を5体製造し、このうちの3体を曲げ及び圧縮試験体とし、残り2体を後述する張弦梁の上弦材とした。断面の構成は、ラミナの $E_d$ を基に等価曲げ剛性の関係から求められる集成材の計算値がほぼ79tf/cm<sup>2</sup>になるように、図2-15に示される等級区分で構成した。ラミナの接着はレゾルシノール

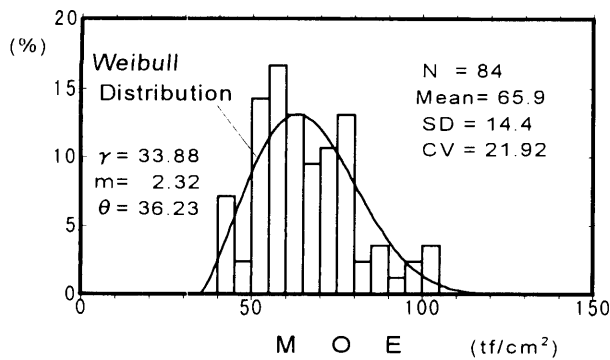


図2-14 ラミナのMOE分布

系接着剤（大鹿レジンD-40）を両面塗布し、圧縮圧を9～10kgf/cm<sup>2</sup>として行った。圧縮時間は24時間とし、接着不良を避けるためヒーターで加温した。

#### 2.4.2 中断面集成材の実大曲げ試験及び圧縮試験

集成材の曲げ試験は「構造用集成材の日本農林規格（JAS）」に準拠し、スパン4,320mmの4点荷重方式で行った。载荷は容量100tfの油圧式実大強度試験機（東京衡機）で行い、ロードセルにより荷重値を測定し、曲げ破壊強度を求めた。また、スパン中央で全スパンにおけるたわみ量を測定し、曲げヤング係数（MOE<sub>L</sub>）を求め、モーメント一定区間となる荷重点間内の600mm間での微小たわみ量を測定し、純曲げモーメントによるヤング係数（MOE<sub>I</sub>）を求めた。

圧縮試験は短柱縦圧縮試験とし、全長を短辺の6倍として行った。载荷及び荷重値の測定は曲げ試験と同様の装置を用い、圧縮強度（CS）を求めた。

各試験の結果を表2-4に示す。作製された集成材はJAS等級区分のE95-F270（曲げヤング係数、曲げ強さの5%下限値がそれぞれ80tf/cm<sup>2</sup>、270kgf/cm<sup>2</sup>以上：No.1）及びE85-F255（同様に70tf/cm<sup>2</sup>、250kgf/cm<sup>2</sup>以上：No.2,3）に適合するものであり、強度性能についてはこれらの等級をはるかに上回る性能であった。

MOE<sub>L</sub>のバラツキが大きく、計算されたヤング係数とかなり差が見られた。これはラミナのヤング係数の測定が、6,500mmという非常に長い区間で行われているのに対し、集成材として測定している区間、特にMOE<sub>I</sub>を測定している区間は非常に短い区間であるため、材内のヤング係数の変動による影響が出てしまった事が考えられる。また荷重点間内の600mm間では、たわみ量が非常に小さいため、測定誤差が大きく影響してしまった事も考えられる。

#### 2.4.3 シミュレーションによる性能予測

作製した集成材の構成条件をシミュレーションモデルに与え、曲げ破壊係数の性能予測を行った。ラミナのヤング係数分布を、図2-14に示すワイブル分布に仮定し、ラミナの曲げ及び引張強度性能については2.1で報告したラミナの実験データを、圧縮強度性能については既往

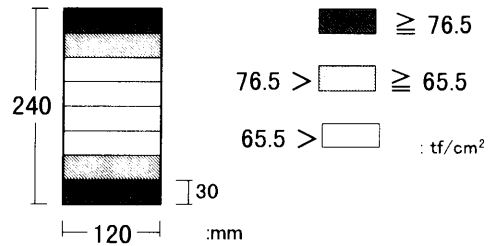


図2-15 中断面集成材の断面構成

表2-4 中断面集成材実大曲げ試験及び圧縮試験結果

No.	比重 ρ g/cm <sup>3</sup>	ヤング係数 MOE <sub>L</sub> tf/cm <sup>2</sup>	ヤング係数 MOE <sub>I</sub> tf/cm <sup>2</sup>	曲げ強度 MOR kgf/cm <sup>2</sup>	圧縮強度 CS kgf/cm <sup>2</sup>
1	0.40	80.4	91.9	420.7	251.2
2	0.39	70.6	69.9	345.4	213.8
3	0.40	73.0	73.0	337.4	264.0
Avg.	0.40	74.7	78.3	367.8	243.0

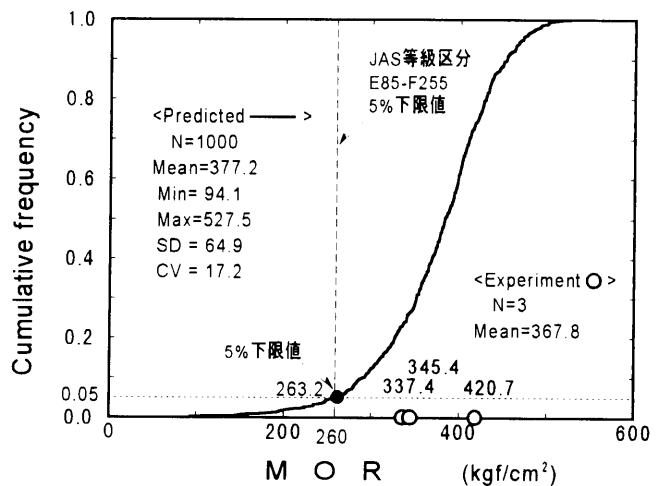


図2-16 シミュレーションによるMOR予測分布

の実験データ<sup>※8)</sup>を用いた。

シミュレーションにより予測されたMORの分布及び、実験の結果を図2-16に示す。実験の試験体数が3体と少ないため、予測分布との適合性を統計的に判断することはできないが、予測された分布の平均値に対する各試験体の実験値の比は0.89～0.12となっており、いずれの試験結果も十分分布内に収まっているといえる。また予測されたMOR分布はJAS等級区分のE85-F255等級の5%下限値を若干ではあるがクリアしている。今回のシミュレーションでは、原木の長さの関係で同じ林分の供試木が用意できなかったため、試験に用いたラミナと必ずしも一致しない母集団からラミナの強度データを得ているため、予測性能の信頼性に欠ける面もあるが、同一母集団から得られたラミナのヤング係数及び強度データを用いることにより、集成材の試験を行わなくても性能を保証することが可能であると考えられる。

### 3. 中断面集成材を上弦材に用いた張弦梁の開発

#### 3.1 目的

一般の木造住宅に用いられる梁の最大スパンはせいぜい3間程度であり、ほとんどの場合は、途中で柱を入れて2間程度に納めてしまう事が多い。これは昔のような大断面の良質な梁材が少なく、また非常に高価であるため、細い部材で納めるように工夫された結果であると思われるが、このような架構であるがために、空間が小分割され閉鎖的になり、構造が複雑になっているともいえる。

集成材では大断面の材を製造することも容易であり、合理的な構成により剛性を高めにすることも可能である。そのため集成材を安く供給できる大手住宅メーカーでは、梁材に集成材を用いているところが増えてきている。しかしながら、大断面集成材を住宅に用いるにしても、1つの住戸において大断面材を用いる部分はわずかであるため、需要が少なく、それほど安い価格では供給ができない。また大断面材になると、施工時にクレーンなどを必要とするため、あまり実用的ではない。これらの問題点を踏まえ、大断面材を用いずに広いスパンを可能にする方法として、本研究では中断面集成材を用いた張弦梁を試作し、その性能を調べると共に性能の設計方法を検討する。

#### 3.2 中断面集成材を用いた張弦梁の設計及び製造

中断面集成材を上弦材とし、束と下弦材に鋼材を用いてスパン5,400mm（3間）の張弦梁を作製した。張弦梁の形状を図3-1に示す。

上弦材の中断面集成材は2.3で作製した中断面集成材と同様の断面形状であり、ヤング係数が72tf/cm<sup>2</sup>になるようにラミナを構成した。下弦材は丸鋼16φ（SS400）を用い、下弦材端部及び束は鋼材（SS400）を加工して作製した。また各接合部はボルトM22によりピン接合とした。

張弦梁の形状は、在来木造住宅の3間スパンに用いられることの多い360×150断面のベイマツ梁と同程度の剛性になるように、張弦梁の束の突き上げ力を求める式(8)に基づき<sup>9)</sup>、弦角度θを14.9°とした。

$$R = \frac{P}{1 + \frac{12 \sec \theta}{l^2 \sin^2 \theta}} \times \frac{E_r I_r}{A_n E_n} \quad (8)$$

R：束の突き上げ力， P：中央荷重，  
E<sub>r</sub>I<sub>r</sub>：上弦材の曲げ剛性， A<sub>n</sub>E<sub>n</sub>：下弦材の剛性

#### 3.3 張弦梁の荷重試験

##### 3.3.1 荷重試験方法

荷重は中央集中荷重方式で行った。最初に上弦材の曲

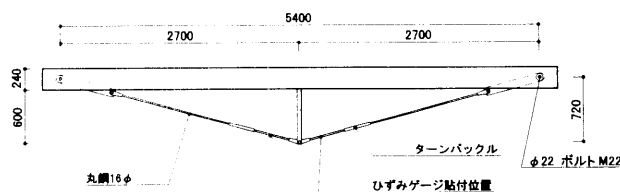


図3-1 中断面集成材を用いた張弦梁

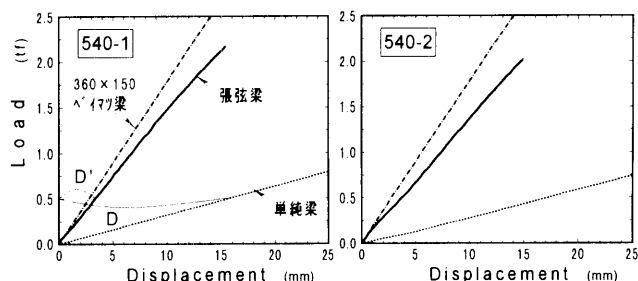


図3-2 単純梁張弦梁の荷重-たわみ曲線

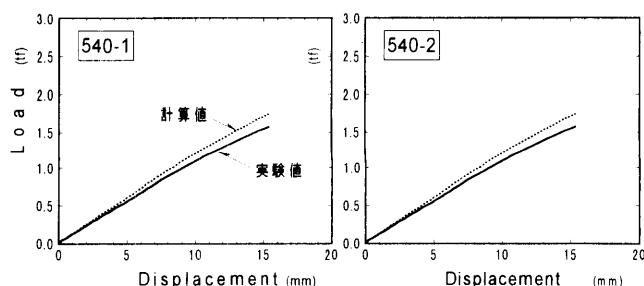


図3-3 束の突き上げ力の実験値及び計算値

げ剛性を求めるために、集成材のみの単純梁に荷重し、荷重に対するスパン中央のたわみ量を測定した。その後、束及び下弦材を装着し、同様に荷重試験を行った。その際に、下弦材の鋼材にひずみゲージを貼り付け、荷重によるひずみ量を測定し下弦材の分担力を求めた。

##### 3.3.2 試験結果及び考察

各試験体の単純梁と張弦梁及び、360×150断面のベイマツ梁（ヤング係数100tf/cm<sup>2</sup>）を仮定した場合の荷重-たわみ曲線を図3-2に示す。

単純梁は荷重当初からはほぼ線形であるのに対し、張弦梁では若干非線形の部分が見られた。これは下弦材などの接合部の遊びやすさによるものと考えられる。

同一荷重における単純梁のたわみ量（D）に対する張弦梁のたわみ量（D'）の比（D'/D）は、両者ともほぼ0.21となり、張弦架構にすることによりたわみ量を約20%に抑制できている。また張弦梁はベイマツ梁よりも若干低い剛性であったが、弦角度の調整により十分360×150断面のベイマツ梁に等しい剛性の張弦梁を作製できると考えられる。

束の突き上げ力について、式(8)より求めた計算値及



び、ひずみゲージより求められた下弦材の張力の合力による実験値を図3-3に示す。計算値は実験値を若干上回っているものの大変近い値が得られており、式(8)により張弦梁の設計が可能であることを示している。実験値と計算値の若干の差は、束の上弦材へのめりこみや、下弦材端部と集成材を接合するボルトのめりこみなどによるものと考えられる。

#### 4. 中断面集成材を用いた構法の提案

##### 4.1 中断面集成材を用いたグリッドプラン住宅

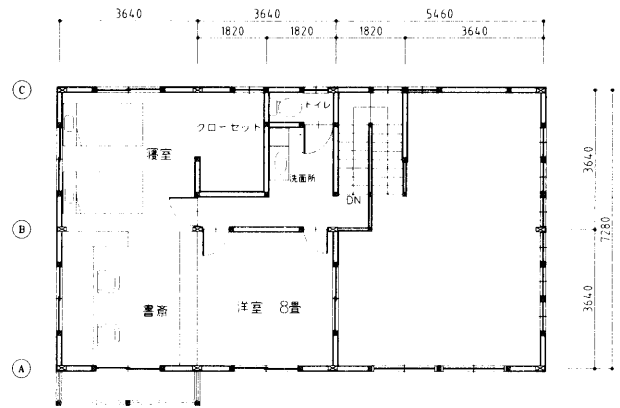
住宅の主要構造部材に中断面集成材を用いて架構のスパンを広くし、内部空間の柱や耐力壁をできるだけ少なくすることにより、広い連続した空間が作り出せる。この空間をフレキシブルに分割し、それぞれのライフステージに応じてプランを変更していくことにより、建て替える事なく1つの住宅を利用していくことが可能になる。このような架構を作る際、基本となるグリッドを定めて構成した方が、プラン計画の面からも構造的な面からも合理的である。中断面集成材を用いた架構に適応する、グリッドプランによる住宅モデルを図4-1に示す。また架構のアクソメ図を図4-2に、1階小屋伏及び2階床伏図を図4-3に示す。

この住宅モデルでは1～3通りの部分が3,640mm(2間)グリッドで構成されており、3～4通りが3,640×5,460mm(3間)のグリッドになっている。これらのグリッドの節点に柱を配置し、それぞれをつなぐ胴差、桁、及び梁を図4-3のように構成する。これらの部材をスギ集成材とし(長期許容応力度:95kgf/cm<sup>2</sup>, ヤング係数:70tf/cm<sup>2</sup>), 表4-1に示す荷重を仮定して、各部材が許容応力度及びたわみ制限(10mm以下)をクリアするための必要断面を計算した。この結果を踏まえ、各部材の断面を図4-2に示す通りとした。部材cについては、240×120mmの断面とした場合、許容応力度はクリアできるが、たわみが11mm程度生じてしまうので、部材を張弦梁とし、たわみを低減させ用いることとする。

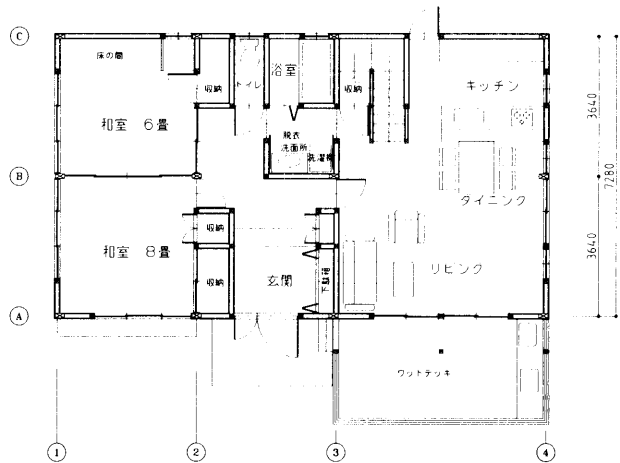
表4-1 単位荷重計算表

屋根荷重		床荷重		壁荷重		(kg/m <sup>2</sup> )		
仕上げ	薄鉄板瓦棒葺	25	仕上げ	根太直張り	15	壁の軸組	柱 10cm 角	15
母屋	支点間2m以下	5	床梁	張間4m以下	10	外壁仕上	下見板張り	10
天井仕上	石膏ボード	20	天井仕上	石膏ボード	20		石膏/スサ塗	40
積雪荷重	0	積載荷重	居室用	130	間仕切壁	両面羽目板張		20
単位荷重	50	単位荷重		175	単位荷重	外壁		65
						間仕切壁		35

このような2～3間をグリッドとする架構では、240×120mm及び300×120mmの2種類の断面のみで、主要な骨組みを構成する事が可能である。この程度の断面の部材であれば、施工時も人力で取り扱いが可能であり、材料の供給においても経済的であるといえる。



2階平面図



1階平面図

図4-1 モデル住宅平面図

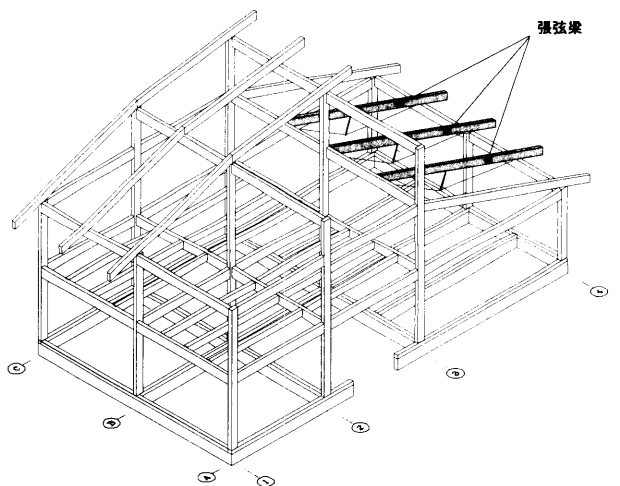


図4-2 モデル住宅架構アクソメ図

##### 4.2 中断面集成材を用いた架構の接合部の検討

一般的な木造軸組架構では接合部をピン接合と見なし、耐力壁のみが水平力に抵抗すると考えるが、ラーメン構造のように接合部が剛接合であれば、モーメントが伝達され、柱の曲げ抵抗によっても水平力を負担することができ、開放的な空間を作ることが容易になる。中断面材

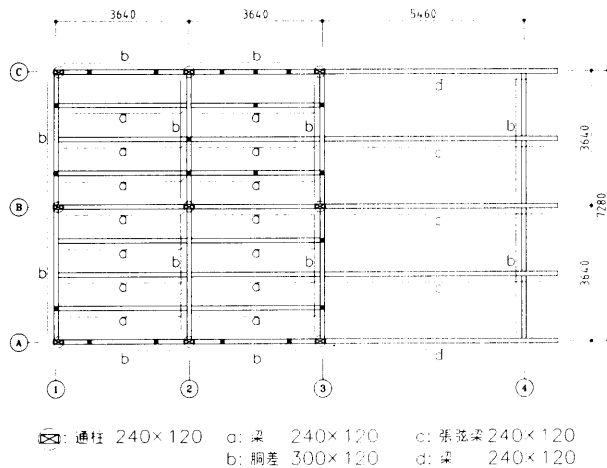


図4-3 モデル住宅1階小屋伏・2階床伏

を用いた架構では部材断面が大きいので、接合部に金物などを用いることにより、ある程度剛な接合が可能であると考えられる。木造における剛接合方法については、モーメント抵抗接合としてかなり多くの研究がされており<sup>210)</sup>、いくつかのタイプが提案されている。しかし、より開放的な架構を実現するためには、これらの接合方法をさらに改良し、中断面材に適した接合方法を検討していく必要がある。

## 5. 結語

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) FJラミナは、NJラミナの平均強度に対して引張強度については約70%、曲げ強度については約63%の性能であった。しかしFJラミナは破壊に影響する因子が限定されるため値のばらつきが小さく、ヤング係数などの材質に関わる因子と高い相関を示した。
- (2) 試作された30mmラミナによる8plyスギ中断面集成材は、JAS強度等級区分におけるE85-F255に適合した。しかし曲げ強度性能はこれらの等級基準をはるかに上回るものであった。
- (3) 確率モデルを用いたシミュレーションにより、ラミナの性能を基にして、集成材の曲げ破壊係数分布をほぼ予測することができた。この方法により集成材の強度性能保証が可能であると考えられる。
- (4) 試作した中断面集成材を上弦材とする張弦梁では、たわみ量を20%程度に低減できた。また式(8)による計算値は実験値とよく一致しており、性能設計が可能であると考えられる。
- (5) 240×120及び300×120mm断面の中断面集成材を用いることにより、2～3間グリッドの住宅架構を構成できる。さらにこれら骨組みを剛接する事により、連続的な開放的空間を可能にすることができると考えられる。

## <参考文献>

- 1) 例えば 安村基：阪神・淡路大震災 木造建築物の被害報告，木材工業，Vol.50, No.11, 1995
- 2) 小松幸平：構造用集成材の強度と破壊性状 Part. II，木構造設計資料編集委員会編，財団法人日本住宅・木材技術センター，1991
- 3) 林知行：材料，39(444)，pp.1197-1202, 1990
- 4) 平嶋義彦，山本幸雄，鈴木滋彦：木材学会誌，40(11)，pp.1178-1179, 1994
- 5) 三橋博三，板垣直行，他2名：木材学会誌，42(2)，pp.122-129, 1996
- 6) 横堀武夫：材料強度学第2版，岩波書店，pp.161-218, 1964
- 7) 金俊三：土木学会論文集，5，pp.41-55 1950
- 8) 江刺拓司，他4名：スギ積層材の性能設計に関する実験的研究(1) -スギ積層材エレメントの性能-，日本木材学会大会研究発表要旨集，Vol.46, p.132, 1996
- 9) 平嶋義彦：張弦梁，木構造設計資料編集委員会編，財団法人日本住宅・木材技術センター，1991
- 10) 小松幸平：木質構造研究の現状と今後の課題Part-2 [2] 接合・構造体要素，日本木材学会木材強度・木質構造研究会，pp.123-141, 1994