

## 小径材を格子状に積層した 住宅のための木造梁に関する開発研究(1) (梗概)

内田 祥哉  
大橋 好光

### 1章 研究の概要

#### 1-1 研究の目的

在来木造住宅の屋根構法は、その増改築が比較的容易という特徴を有している。しかし、それでも、桁の太さ配置など、平面形に対する制限が多い。また、増改築時に間取りを変えようとする、構造的な不都合が生じる危険性が高い。本研究は、小径の木材を重ねた合成梁で格子状の骨組(格子梁)をつくり、これを2階床組・小屋組システムとするもので、これによって平面計画及び平面形の変更の自由なシステムを実現しようとするものである。

想定する建物の基本的なモジュールは、既往の木造住宅のそれに近く、かつ丸い値として90cmとする。梁は、6~10cm程度の比較的小径の木材を4段程度積層する。この際、木材を図1.1のように重ねて、でき上がった時に格子状になるように配置する。こうすることにより、平面的に方向性がなく、また連続的な床面・屋根面を構成することができる。

本研究では、第1に、この積層した場合の梁の曲げ応力及びせん断応力を円滑に伝達する構法の開発を目的としている。木材を積層すると、同断面の単体の梁に比べ断面性能の低下は避けられない。この低下を最低限に抑えることができなければ、本構法の実現は難しい。この点について、考えられる方法には、①接着剤を用いる、②ジベルを用いる、③車知を打つなどがある。これらのうち、接着剤を用いる方法は強度的には優れているものの、現場での施工には不向きであり、また、将来の増築や材の取替えに融通がきかない。②、③は単体での実験例はいくつか見られるが、これを格子梁で実験したものは皆無である。強度的にもある程度満足が行くもので、かつ構成部材の取替えが可能な積層方法として、例えば金物のベルトで締める、あるいは木材をくさび状に入れるなどのアイデアが考えられた。本研究はこれらの積層方法による強度の相違を検証し、最適な積層方法による格子梁を製作して、その強度性状を調べ、積層梁の実現性を検討するものである。

なお、本研究の基礎的な考察は、昭和59、60年度文部省科学研究費試験研究(1)「床及び屋根に立体トラスを用

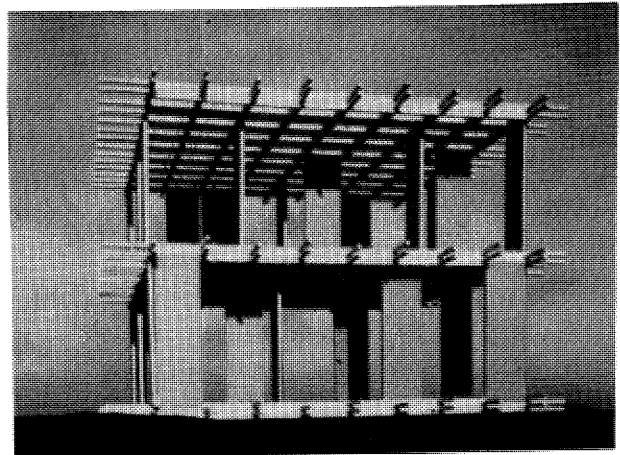


写真1.1 架構模型

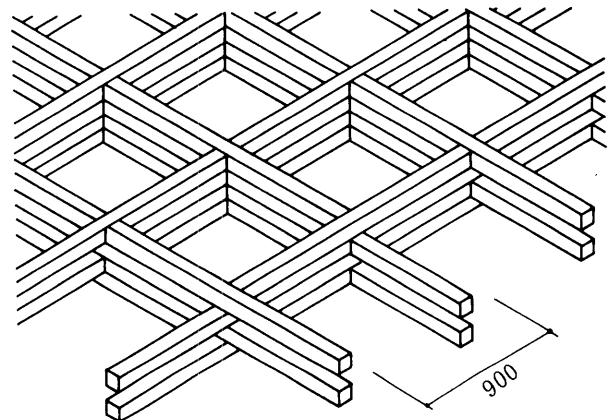


図1.1 アイソメ

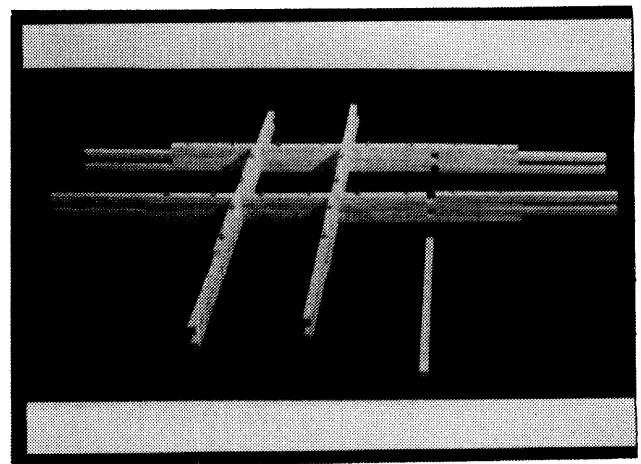


写真1.2 部分模型

い、任意に増改築を可能にする構法の開発に関する研究」(代表 内田祥哉)の一部として行われた。

また、本研究のアイデアは「規格部材で構成された木造格子梁」(特願昭60-138890)として特許出願中である。

## 1-2 研究の経過

研究は、委員会を組織して進めた。まず、基本的な構成は一本1800mm程度の小径材を4層重ねて、900mmグリッドの格子梁をつくるということとした。

そして、ここで提案された15種類、合計22タイプ38体の試験体を製作し、これにせん断力を加え試験した。

また、これらの実験と並行して、積層の単体梁、格子梁モデルの解析を行い、その可能性について検討を加えた。

これらの結果をもとに、最も効果的と思われる六角の車知について、木材の繊維の方向の影響を調べ、またその他にモルタルブロック、鋼管など、10体の試験体を製作して、前回と同様の実験を行った。

また、同様の積層法による、2間(3600mm)梁の試験体4体を製作して鉛直加力による撓みの実験を行った。最後に、8畳間相当の実大格子梁試験体1体を製作して、支点条件・加力位置を変えて、鉛直荷重を加え、各交差部の撓みを測定した。

## 2章 積層方法の研究

### 2-1 材の積層方法の可能性とせん断実験

材を積層すると一木(いちぼく)物に比べ強度の低下は避けられない。積層梁の構造的な性能は、積層材間のつなぎ部分が材軸方向のずれに対してどれだけの剛性と強度をもっているかで決まる。そこで、本研究では、まず積層方法についてその構法の検討を行った。

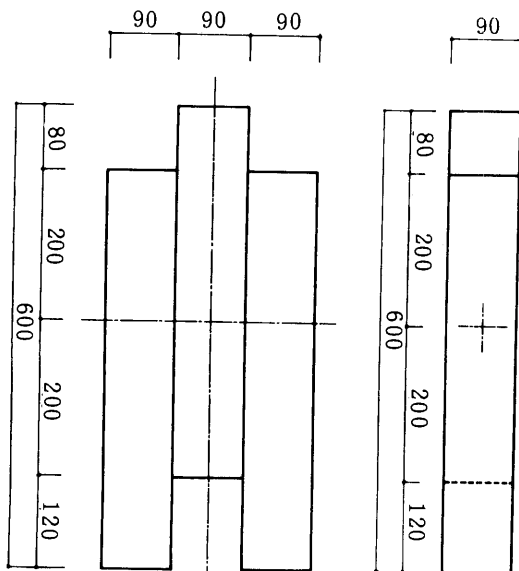


図2.1 試験体の寸法と測定点

格子梁の積層方法について、いくつかのユニークなアイデアが提案された。中で、実現性の高いものについて、試験体を製作し、その材軸方向のずれと剛性の関係を測定した。

#### 2-1-1 試験体の種類

委員会で提案され、今回実験を行ったものは、次の7種のグループに分けられる。

(個々の形状は実験結果の図を参照)

- ①構成材の間にだぼを入れ、ボルト締めする
- ②構成材の間に車知を入れ、ボルト締めする
- ③積層する母材を直接釘打ちする
- ④側面から合板や鉄板などの添え板を釘打ちする
- ⑤接着剤を用いる
- ⑥積層方向に貫通させた穴に鉄筋を挿入し、モルタルなどを充填する
- ⑦その他(麻紐、荷造り用紐等で縛るもの)

#### 2-1-2 試験体とその製作

試験体は図2.1のように3本の母材を用意して、中央の材の両側材に車知などの接合構法を対称形に施し試験体を製作した。

母材は大量かつ安価に入手できるスギとしたが、主要なものはヒノキでも製作した。個々の積層方法のディテールは実験結果のグラフ中に示している。

せん断実験のための試験体は、積層部分を取り出した形状をしているので、製作上の困難はなかったが、実用化を考えればいくつかの問題点があった。

例えば、材中に埋め込まれるだぼは、梁を延長する時に施工するのが困難である。また、鉄板等の添え板はせっかくの格子梁が見え掛かり上覆われてしまう欠点がある。紐の類は、現場の施工性、耐火性に難点がある。ま

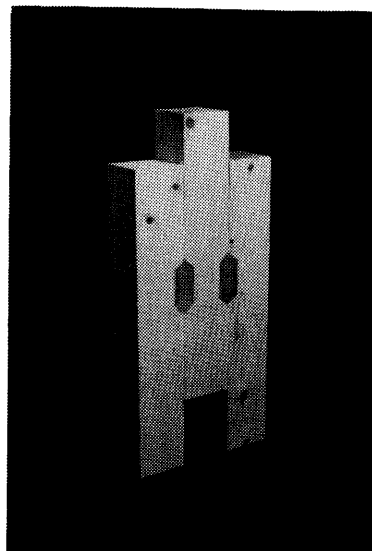


写真2.1 試験体形状

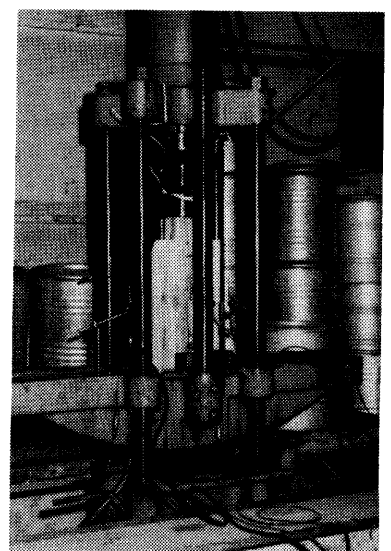


写真2.2 実験装置

た、接着剤は増改築や現場施工にも難点がある。

### 2-1-3 実験方法

東京大学工学部建築学科・岸谷研究室のアムスラー型試験機を用いた。測定は3本の材の上下方向の変位を表裏合計6点で測定し、中央材と両側の材の相対的なずれを求めた。変位の測定には電気変位計、荷重にはロードセルを用い、これらを歪測定器により検出した。データはマイクロコンピュータにより収集した。

### 2-1-4 実験結果

表2.1に試験結果の一覧を示した。ここで初期剛性は、ずれが0.2cmのときの荷重から求めた。実験は2面せん断実験のため、表2.1では耐力・剛性を実験値の1/2にして示している。

実験結果を箇条書きにまとめると次のようになる。

①車知、かすがい、麻紐、釘打ち、合板、鉄板プレート、

は剛性・強度ともに小さい。

②鉄筋にモルタル、エポキシ、プラスターを充填したものは、初期剛性は比較的高いものの最大耐力が小さい。また、硬化するまで母材を緊結しておかねばならず、現場での養生をどうするか等の問題がある。

③円形や立方体の木製あるいはネオプレンゴムのだぼは、靱性に富んでいるものの初期剛性が小さい。また、これらだぼ埋め込み式のもの、加工精度が良くないと組み立てにくい。

④接着剤は、初期剛性が非常に高いものの脆性である。また、現場での施工性を考慮すると接着剤だけの接合では信頼性に欠ける。

⑤ボルトを併用した六角車知・ジベルは、比較的剛性が高く、強度・靱性の点でも優れている。特に六角車知を用いたものは、車知を溝よりもやや大きめに作っておけば、それほど精度は必要なく、施工性も良い。

表2.1 最大耐力と剛性

試験体	接 合 方 法	母材スギ		母材ヒノキ	
		最大荷重 (ton)	初期剛性 (ton/cm)	最大荷重 (ton)	初期剛性 (ton/cm)
A-1	ジベル(スプリットリング)	3.324	8.1	4.592	13.1
B-1	ちぎり	1.108	5.3	1.396	5.8
B-2	ちぎり(ボルト併用)	4.120	7.4	4.138	9.8
C-1	鉄板プレート釘打ち	0.723	1.25		
D-1	偏平六角車知(ナラ)	4.177	12.5	4.356	10.2
D-2	偏平六角車知(ネオプレンゴム)	2.736	3.3		
E-1	接着剤	3.136	50.58		
F-1	だぼ(ヒノキ、立方体)	3.014	2.0	3.421	3.3
F-2	だぼ(ナラ、立方体)	3.630	5.6		
F-3	だぼ(ネオプレンゴム、立方体)	2.782	3.5		
F-4	だぼ(ヒノキ、円柱形)	3.080	3.8		
G-1	合板釘打ち	0.593	2.0	0.922	2.5
G-2	コンパネ釘打ち	0.620	2.0	0.790	2.7
H-1	異形鉄筋モルタル充填	1.848	8.0	2.401	10.2
H-2	異形鉄筋エポキシ充填	2.004	5.2		
H-3	異形鉄筋プラスター充填	1.025	2.7		
I-1	麻紐			0.474	0.25
J-1	荷造り紐	0.069	0.35		
K-1	釘斜め打ち	1.861	4.3		
K-2	スクリュー釘斜め打ち	1.210	3.3		
L-1	かすがい	0.453	1.8	0.583	2.4

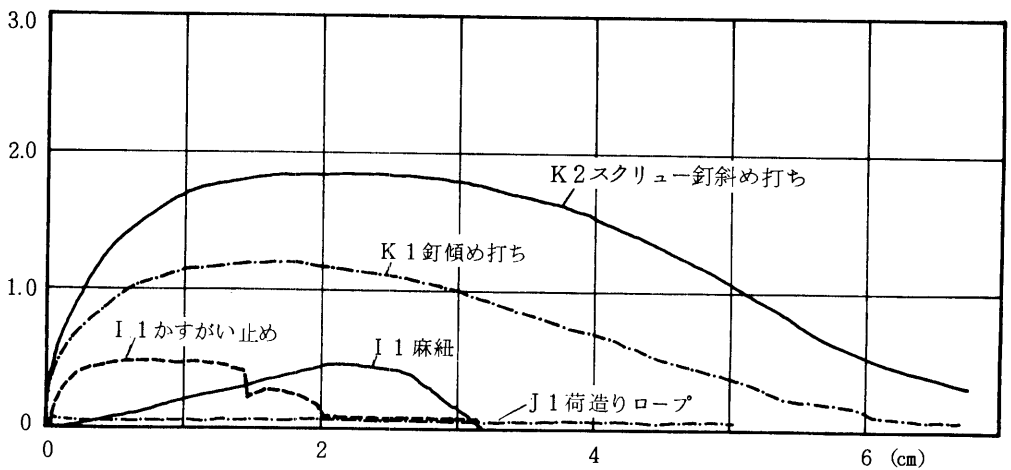
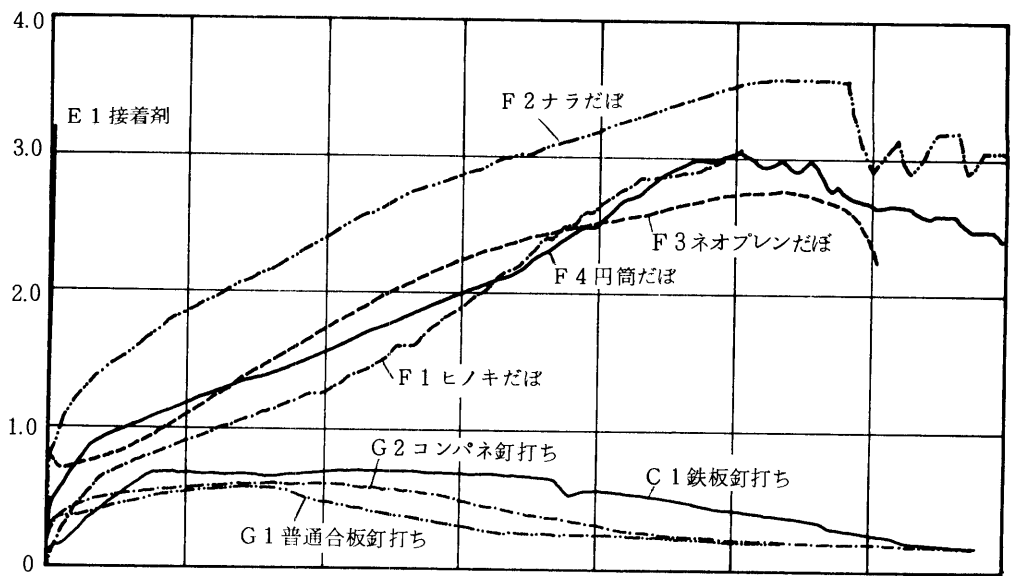
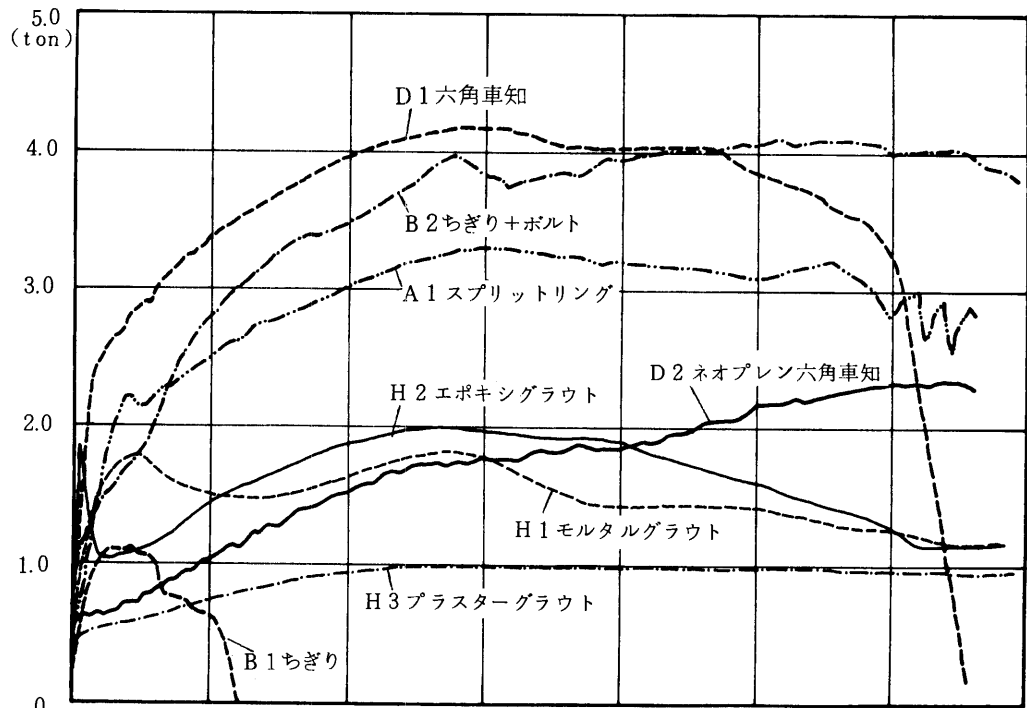


図2.2 荷重—変位曲線 (I 1 以外母材スギ)

### 2-1-5 開き止めの影響

2-1の実験では、試験体の両側の材が加力に従って開くのを防ぐために、試験体下部に開き止めのボルトを用いた。材の断面が長さに対して大きなプロポーションのため影響はないと予想されたが、これらの影響を確認するための実験を行った。試験体は、開き止めを全く付けないもの(A)、下部にのみ付けたもの(B)、上部にのみ付けたもの(C)、上下に付けたもの(D)、の4種類である。母材にはスギとヒノキを用いた。合計8体である。部材相互の積層方法は図2.3に示すような側面からの釘打ちである。

実験の結果を図2.5に示した。変形が非常に大きくなり、釘が両側の材を押し広げようになると多少影響が見られる。しかし、図で分かるように、スギとヒノキによる強度の差はあるが、本構法で問題となる微小変形の範囲では剛性・強度にほとんど影響はないと見てよい。

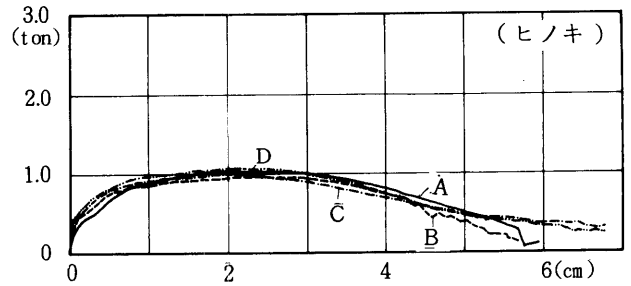
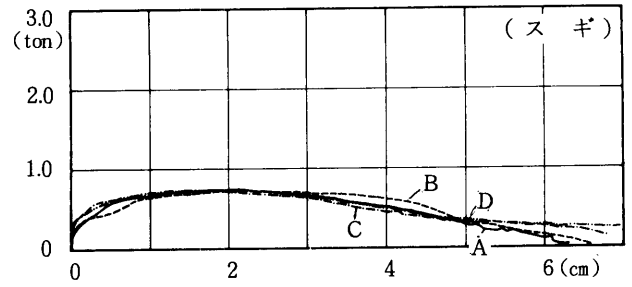


図2.5 荷重—変位曲線

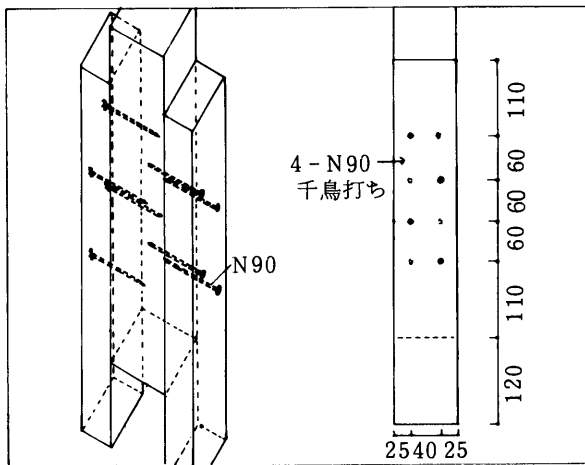


図2.3 試験体

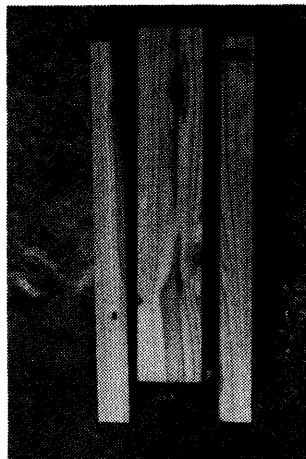


写真2.3 開き止めなしA, スギ

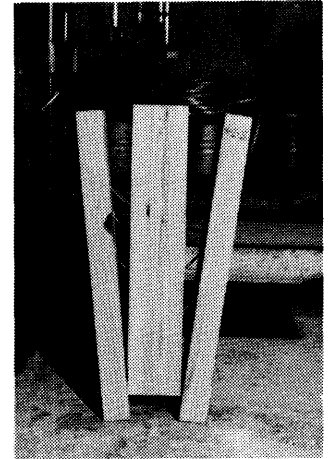


写真2.4 下部開き止めB, スギ

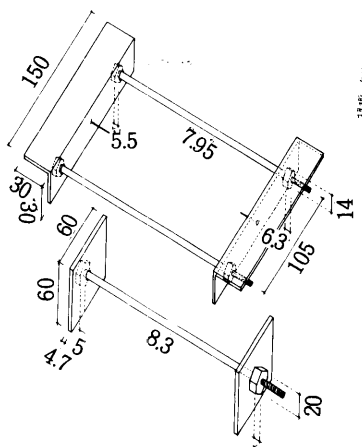


図2.4 開き止めの詳細

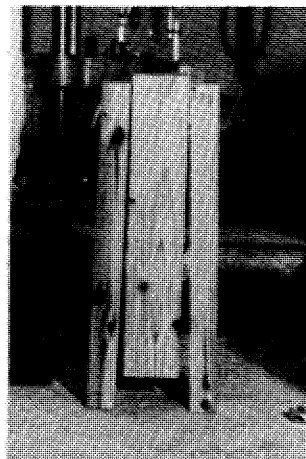


写真2.5 上部開き止めC, スギ

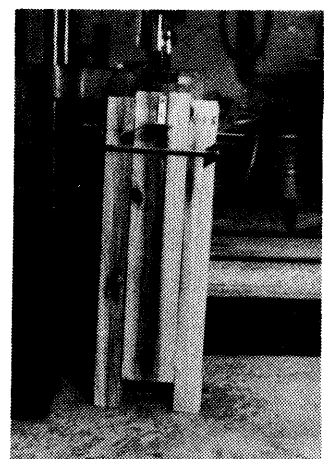


写真2.6 上下開き止めD, スギ

## 2-2 偏平六角車知による積層方法の剪断実験

2-1の実験で六角車知が比較的良い性能を示すことが分かった。そこで、原則的に偏平六角車知を格子梁の積層方法として採用することとした。本項は、六角車知について更に検討を加える意味で、その材質、繊維方向が積層部分の剛性・せん断力に及ぼす影響を見るための実験結果を述べたものである。また、前回の実験以後、新たに提案された積層方法のせん断実験結果も併せて報告する。

### 2-2-1 試験体とその製作

母材は原則的にスギとした。車知の材質は、アビトン、ナラ、ヒノキとし、それぞれ繊維方向の異なる3種、合計9体の試験体を製作した。

また、補足の実験として、車知をプレキャストコンクリート及び鋼管としたものを製作した。また、ボルト締め効果を知るためにボルトのみの試験体も製作した。

### 2-2-2 実験方法

加力方法・測定方法は、前回の実験と同じである。

### 2-2-3 実験結果

最大耐力と剛性の一覧を表2.2に示した。ここで、実験結果は、2.1と同様に2面せん断のため、表2.2では耐力・剛性を1/2とした。

車知の繊維方向が母材と直交して木口が見えているものでは、はじめずれが大きくなるに従って車知が崩れ、それから徐々にボルトが効きだす。車知は、せん断の端部から順にめり込んでおり、徐々に進行するという破壊パターンである。また、繊維方向が母材に直交し木口が見えないものは、繊維がせん断面と直交しているために、前の例のように車知が徐々に切れることはないが、めり込みで材が丸く変形してくる。変形が大きくなるとボルトが効くのは他の試験体と同様である。

これに比べ、繊維方向が母材と同じ方向のものが、剛性・最大耐力に最も優れていた。特に剛性の高さがきわだっている。ただし、変形が非常に大きくなると脆性的な破壊を示す。

荷重-変形(P- $\delta$ )曲線を描いてみると、材質は違っても繊維方向が同じものは非常に良く似た形をしていることが分かった。また、同じ車知ならば、母材にスギよりも硬いヒノキを用いた方が剛性は大きい。このように、この種の接合は、車知材と母材双方の強度の関係で決まることが示された。

その他の構法では、まず、ボルトのみの場合でもかなりの強度を示し、特に靱性が高いことが分かった。他の構法でもボルトと併用しているものは、靱性はボルトによっているものが多いと考えられる。

モルタルブロックは剛性も高く、かなりの靱性も示した。ただし、ねばりの部分はボルトによる可能性が高い。また、車知の重量が大きくなるのが欠点である。

また、鋼管は強度・靱性も比較的あるが、変形が大きくなると鋼管の穴がボルトを切断してしまうことが分かった。

なお、前の実験に比べて車知の製作精度が良かった。精度が悪いと、P- $\delta$ 曲線の初期の立上りが遅れる、すなわち、強度が上がらないうちに変形が進むことが分かっている。また、車知の加工は、木口が側面に見えるものが最も容易であった。

表2.2 最大耐力と剛性

試験体	母材	車知	最大荷重 (ton)	初期剛性 (ton/cm)
2B-1-S	スギ	アビトン	3.60	0.86
2B-2-S	スギ	アビトン	>5.00	15.4
2B-3-S	スギ	アビトン	4.73	2.7
2C-1-S	スギ	ナラ	4.34	0.99
2C-2-S	スギ	ナラ	>5.00	17.5
2C-3-S	スギ	ナラ	4.91	1.71
2D-1-S	スギ	ヒノキ	3.73	3.1
2D-2-S	スギ	ヒノキ	>5.00	9.4
2D-3-S	スギ	ヒノキ	3.98	3.9
2A-1-S①	スギ	なし	2.35	1.99
②	スギ	なし	2.56	1.42
2B-1-S	スギ	アビトン	3.60	0.60
2B-1-H	ヒノキ	アビトン	3.07	0.45
2E-1-S	スギ	モルタル	>5.00	19.0
2E-1-H	ヒノキ	モルタル	4.54	15.8
2F-1-S	スギ	鋼管	3.10	5.6

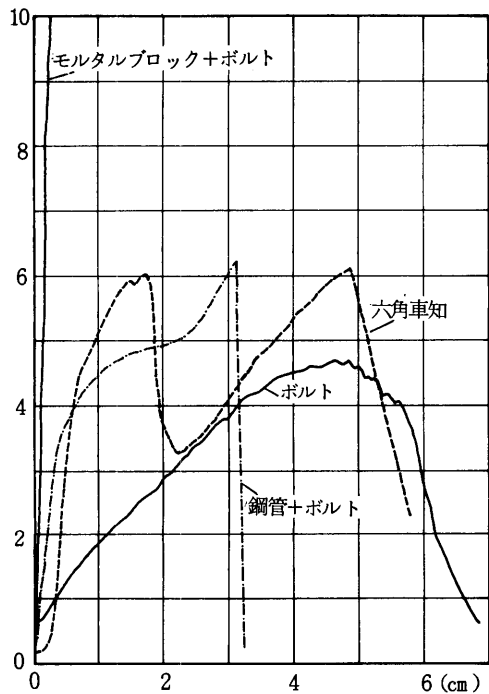
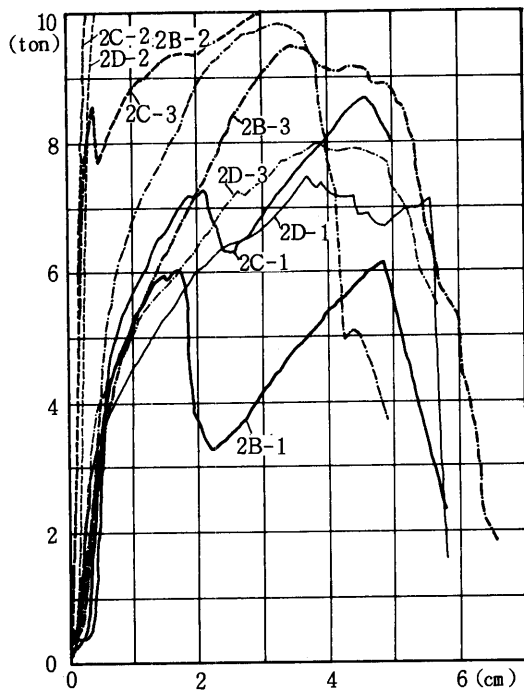


図2.6 荷重—変位曲線（母材スギ）

### 3章 積層梁の曲げ実験

#### 3-1 試験体とその製作

これまでのせん断実験とは異なり、実際の部材を用いた積層単一梁の曲げ実験を行った。母材はスギ(90×90×1710mm)で、車知材はアピトンとヒノキの2種類である。車知の断面は図3.1に示すように、せん断実験に用いたものと同じである。また、その繊維方向は、せん断実験時に最も性能の優れていた母材と平行方向とした。車知を貫通するボルトもせん断実験と同じ直径8mmである。

また、単純梁の試験体とすると、積層部材の切れ目が荷重点の真下にあるもの（上側切れ型）とそうでないもの（下側切れ型）の2種類があり、それぞれを用意した。合計4体である。1本の梁には、長さ1710mmの基本部材12本、車知36個、ボルト12本を使用した。

なお、全長5,400mmで組み立てるのに要した時間は1人で約20分であった。また、今回の車知は精度が悪く、欠き込みに対してゆるめのものが多かった。

#### 3-2 実験方法

実験は東京大学工学部11号館・地下実験室の変位制御型試験機を用いた。

ロードセルを介して梁の中央に荷重を加え、その時の支点、はり中央及びその中間点の変位を梁の両側で測定した。これより梁の撓みと荷重の関係を調べた。

加力は、原則的に中央の撓みが5mmを最初のサイクルとし、これを $\sqrt{2}$ 倍ずつ大きくして行く、片押しの繰り返し加力である。

#### 3-3 実験結果

結果をまとめると次のようになる。

繰り返し荷重時のP- $\delta$ 曲線の包絡線には上下逆にしたことによる違いが見られる。すなわち、加力点の部材が切れているもの（上側切れ型）は、降伏点が低く、かつ、第2勾配が凹になって徐々に耐力を増して行く。一方、加力点の部材がつながっているもの（下側切れ型）は、その逆で、初期剛性も高い。格子梁としてはこちらの方が望ましい。

また、アピトンとヒノキを比べると、いずれのタイプでもアピトンの方が大きな剛性を示している。

なお、本実験では、初期には梁が全断面一様に変形するのに対して、変形が大きくなると荷重点直下に変形が集中して、折れ曲がるようになることが分かった。従って、破壊パターンも、曲率が大きくなるとともに積層材に割れが入って破壊が進んで行く。この破壊性状はせん断実験のときには見られなかったもので、最終的な破壊はせん断実験とは異なることが分かった。

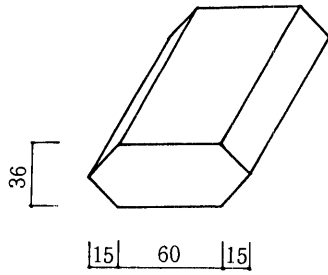


図3.1 車知の寸法

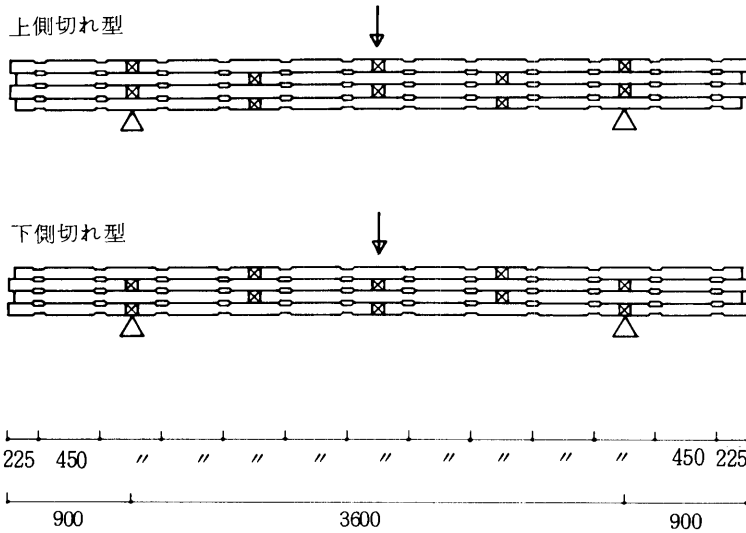


図3.2 試験体寸法

実験結果を表3.1に示した。中央部の撓みが2~4 mmになると一度降伏する。ヒノキ (H-2) では、初期の曲げ剛性は約 $7.0 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ であった。また、降伏後の曲げ剛性は $1.0 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ で、初期曲げ剛性の約7分の1にあたる。

同じ断面形状をもつ一木 (いちぼく) の梁の曲げ剛性はスギのヤング係数を $7.5 \times 10^4 \text{kg}/\text{cm}^2$ とすると $2.6 \times 10^9 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ である。すなわち、本実験の試験体は一木物に対して、降伏後のそれをとると1/22程度の剛性だが、初期剛性では1/3.5である。この関係を図3.3に示した。ここで、実験の結果は包絡線で示した。ちなみに、構成材をばらのままで4本使ったときの曲げ剛性は $1.6 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ である。図で分かるように床梁の撓みの実用範囲である0~2 cmの範囲では、本構法は、ばらのまま4本重ねたものより大きな剛性を示すと言える。

また、例えばスパンが $3.6 \times 3.6 \text{m}$ で、格子でなく0.9mピッチに平行に梁を入れる場合を想定して、1本の梁に加わる荷重Wを

$$W = (130 + 30 + 15) \times 3.6 \times 0.9 = 567 \text{kg}$$

と仮定すると、中央部の撓みをスパンの1/300、1.2cmに抑えるには、曲げ剛性EIが

$$5 \cdot W \cdot l^3 / 384 \cdot \delta = 2.87 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$$

以上でなければならないことになる。これとH-2を比

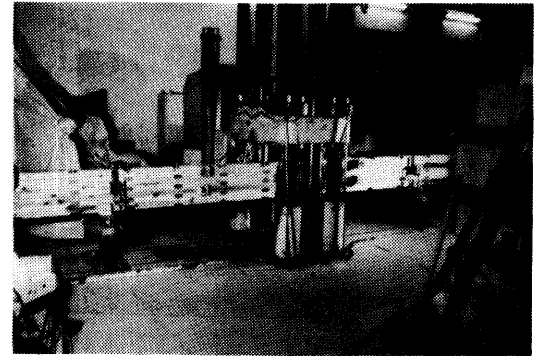


写真3.1 加力装置

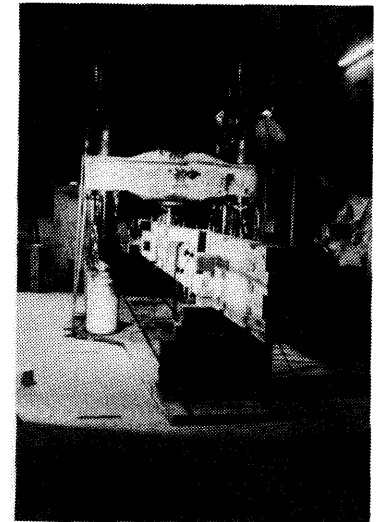


写真3.2 加力装置

表3.1 実験結果

	初期剛性 ( $10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ )	降伏変位 (mm)	降伏後の剛性 ( $10^8 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ )
A-1 (アピトン)	4.03	2.01	1.31
A-2 (アピトン)	4.72	3.85	1.26
H-1 (ヒノキ)	3.81	1.30	1.13
H-2 (ヒノキ)	7.18	2.31	0.98

(1 : 上側切れ 2 : 下側切れ)

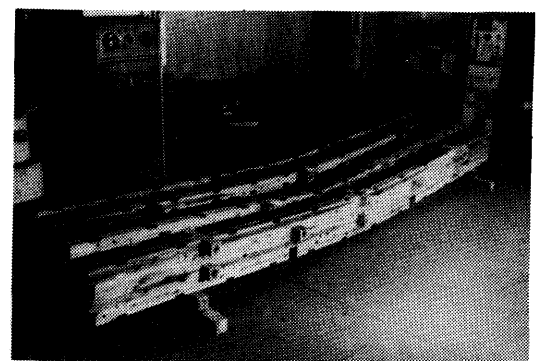


写真3.3 荷重と撓みの関係



べると、中央の撓みが7.5mm程度まではH-2の方が剛性は高い。従って、格子でなく平行に置いただけでは撓みを1/300を以下に抑えることはできないであろう。従って梁を格子に組むことによる効果は期待できる。

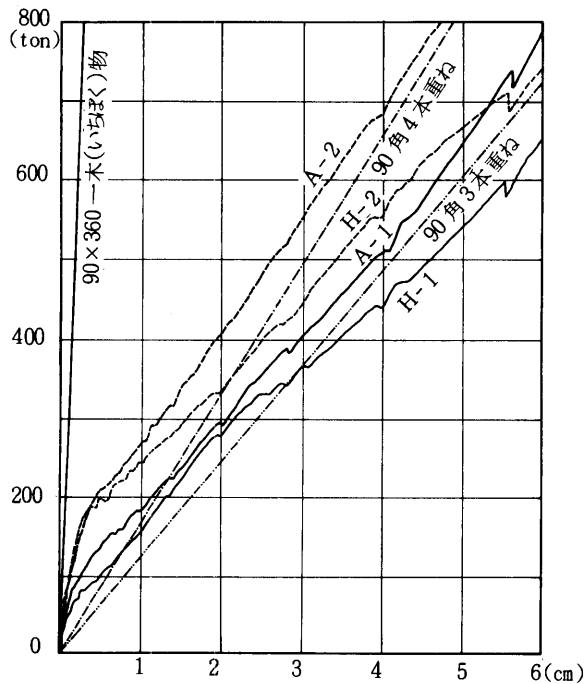


図3.3 荷重と撓みの関係

## 4章 積層格子梁の撓み実験

### 4-1 試験体とその製作

本実験は、積層梁の実験を受けて、これを実大の格子に組み立てた場合の強度性状、特に撓みの大きさを測定するものである。また、同時に試験体の製作時に作業の難易度、施工性についてのデータをうることができた。

格子梁に用いた材料は積層梁実験と同じで、積層母材がスギ(90×90×1710mm)、車知はヒノキでその大きさ及び繊維方向は積層梁実験と同じである。また、ボルトも同様である。

なお、格子梁に用いた積層母材が120本、車知が360個、ボルト120本であったが、これを組み立てるのに1人で約5時間を要した。ただし、これは梁を実験のための治具の上に組み立てたため、床に直接置いて2人ないし3人で作業を行えば2時間程度で組み立てられると考えられる。

### 4-2 実験方法

実験は東京大学工学部総合試験所・大型構造物実験室で行った。写真4.1のような治具を用いて、ロードセルを付けた油圧ジャッキにより加力して、荷重とそのときの各点の変位を測定した。加力は、荷重点直下で5mmまで、次に1cm撓むまでの2サイクル、片押しの繰り返し加力である。

Aシリーズの実験では8畳間の四隅に柱を立てることを想定し、支点は4点である。加力は1点の集中荷重であるが、支点に対しての位置関係が網羅できるように異なる5箇所とした。これらを図4.1に示す。

Bシリーズでは8畳間の四隅の柱にそれぞれ半間の壁が取り付くことを想定して、図4.2に示したように支点を8箇所とした。ただし、これらは浮きに対しては拘束できないので、加力場所によっては浮き上がっている支点もある。加力点は原則的にAと同様であるが、実験の都合で若干変更した。

なお、A及びBの一連の実験では同一の試験体を繰り返し使用するために、変形は荷重点直下で1cmにとどめた。

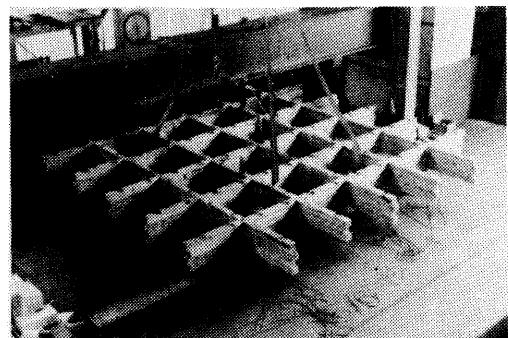


写真4.1 試験体全景

また、A、Bの実験の後、支点を四隅4点として、荷重点を中央として大変形を加えた(実験C)。更にその後、一度中央をクレーンで吊り、残留変形を取り除き、積層格子梁下面に厚さ3mmの天井仕上用の薄い合板を釘で打ち付け加力を行い、天井板の影響を調べた(実験D)。

#### 4-3 実験結果

A、Bの実験では荷重点直下の最大撓みが1cmになるように加力した。このとき荷重とその後荷重を0に戻した時の残留変形率、及び荷重600kgの時の荷重点の撓みを表4.1に示す。

Aシリーズの実験では、荷重点3以外では同じ荷重でほぼ同じ撓みを示している。残留変形率も、荷重点3以外では、ほぼ実験の進行とともに増加している。この理由を明らかにすることはできなかった。

なお、本構法の床格子梁の自重は約30~35kg/m<sup>2</sup>であるが、実験A-1で1cm撓ませたときの荷重850kgは、住宅用床設計荷重を175kg/m<sup>2</sup>とすると約5m<sup>2</sup>分にあたる。

Bシリーズの実験では、荷重点5の値が特異である。A-5と同じ所を荷重点としているが、支点間の距離が短くなっているため、剛性的には有利なはずであるにもかかわらず、A-5よりも柔らかいという結果である。これは、今回の実験で使用した試験体は1体しかなく、実験はA-1から順に行っているため、実験が進むたびに試験

体にゆれが生じ剛性が小さくなったためと考えられる。

なお、今回の実験では支点の浮き上がりを拘束せずに行っているため、Bシリーズでは上下方向も拘束した場合には、今回の実験値よりも撓みが小さくなると考えられる。

実験Cでは、4点支持で中央の点に6cmまで変形を加えた。このときの荷重は約6tonであった。また、実験Dでは積層格子梁下面に天井板を張って加力したが、剛性が、およそ10%高くなっている。(表4.1)

表4.1 荷重点の荷重、撓み、残留変形率

荷重点	荷重点の撓み1cmのときの荷重(kg)	荷重600kgのときの荷重点の撓み(mm)	1cmサイクルの残留変形率(%)
A-1	850	6.64	26.5
A-2	845	6.21	27.5
A-3	592	10.19	24.2
A-4	858	6.35	30.0
A-5	870	6.69	32.0
B-1	1225	4.85	20.8
B-2	1358	3.85	21.8
B-3	1133	4.19	26.6
B-4	1299	3.41	31.9
B-5	793	7.87	15.4
C	924	6.32	29.3
D	970	5.95	16.1



写真4.2 加力装置

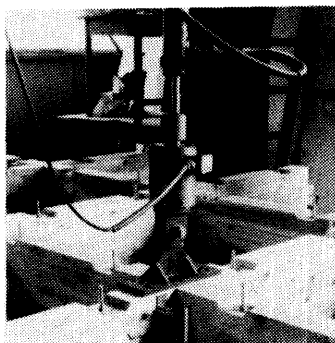


写真4.3 加力点詳細

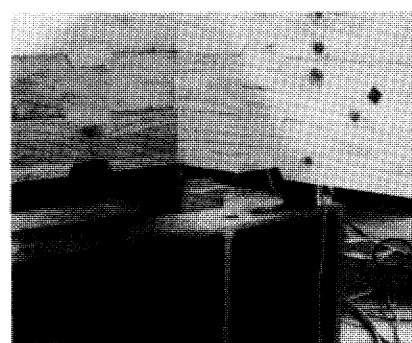


写真4.4 支点詳細

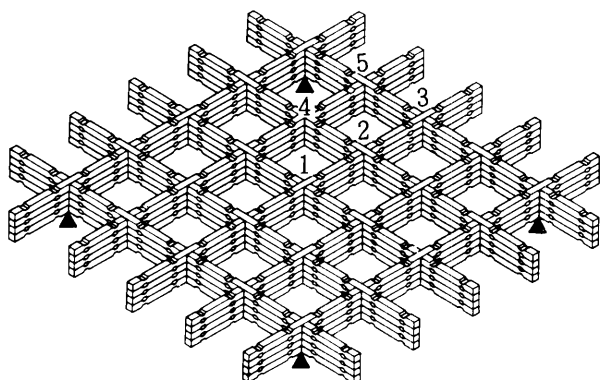


図4.1 Aシリーズ支点及び荷重点位置

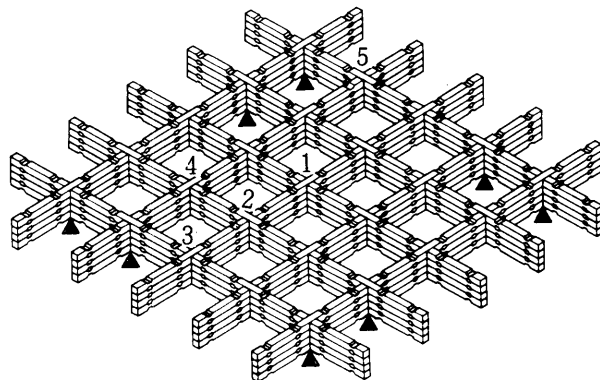


図4.2 Bシリーズ支点及び荷重点位置

## 5章 数値解析

実験と並行して、積層梁及び積層格子梁のモデルを設定して、シミュレーションを実施した。

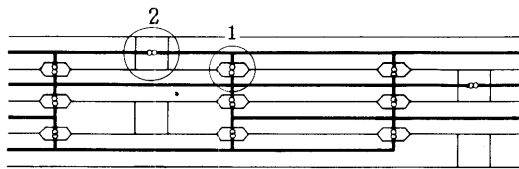
その結果、せん断実験の結果を積層梁に適用するモデルは必ずしも、うまく適合しないが、積層梁の実験結果を格子梁に当てはめるモデルについては、適用の可能性があることが確認された。前者についても、パラメータを適当に与えることによって、実際の構造の挙動をかなりよくシミュレートできるが、この場合のパラメータの値と実験値とは異なっており、この点の説明は今後の課題である。

### 5-1 積層梁の単純曲げ剛性の評価

積層方式のせん断剛性を仮定し、積層梁の曲げ剛性の評価を試みた。計算は3章の実験の「下側切れ型」をモデル化して行った。

適用したモデルは図5.1に示すように、各木材を線材に置き代えるものであるが、材軸方向の伸縮に対する剛性はヤング率 ( $7.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ) で表した。従って、上下層の距離として中心線間距離を代入した。車知部分は、積層母材同士の接合部とみなし、接点には回転、材軸方向、及び材軸直角方向の三つの剛性を指定する。今回の計算では、図5.1に示すように、材軸方向のみ数値を変化させ、回転剛性にはゼロを、材軸直角方向の剛性には十分に大きな値を代入した。

これに、せん断実験で車知がヒノキの実験 (2 D-2 -S) 結果を代入すべきであるが、実験では10ton までの加力で降伏に至っていない。そこで、計算結果が梁の曲げ



	ジョイント1	ジョイント2
回転剛性	0	0
材軸方向 (ton/cm)	初期剛性 64 降伏点 0.005 cm 第2 勾配 0.05	十分に大きい値を代入
材軸直角 方向	十分に大きい値を代入	十分に大きい値を代入

図5.1 積層梁モデル

実験の結果にほぼ一致するようなパラメータを求めた。

図5.2のグラフの太実線は、梁の実験 H-2 の P- $\delta$  曲線の包絡線を描いたもの、細実線はモデルに初期せん断剛性64ton/cm, 第2 勾配0.05ton/cm, 降伏点は、ずれ0.005 cm という条件を与えて計算した結果である。なお、参考までに、一点鎖線は梁の構成材と同じ断面 (90×90mm) をもつスギの一本もの (長さ3,600mm) を三本重ねたもの、そして二点鎖線は二本重ねた場合の荷重と撓みの関係を示したものである。

前述のように、車知の繊維方向と母材の方向を一致させたものは、せん断実験では破壊に至っていないので一概には比較できないが、ちなみに実験の初期剛性は、ヒノキが9.4ton/cm で、精度のばらつきを考慮しても5~30 ton/cm 程度と考えられる。

計算で、変形の大きいところまで一致させるのは困難である。3章でも述べたように、実験では、加力の比較的初期の段階から材に割れが入ってくる。こうした材の割れは解析では追跡できないので、解析は変形の小さな範囲に限られることになろう。変形の小さい範囲に限れば、今回のモデルでもシミュレートするのは可能だと思われる。ただし、そのためには剛性をかなり高く見積らねばならず、現時点では実験から導かれる値ではシミュレートできない。このように大きく異なることになった理由の一つは、積層梁の実験では母材が割れて変形が進んで行き、破壊モードの違いによると考えられるが、それ以上は明らかでない。

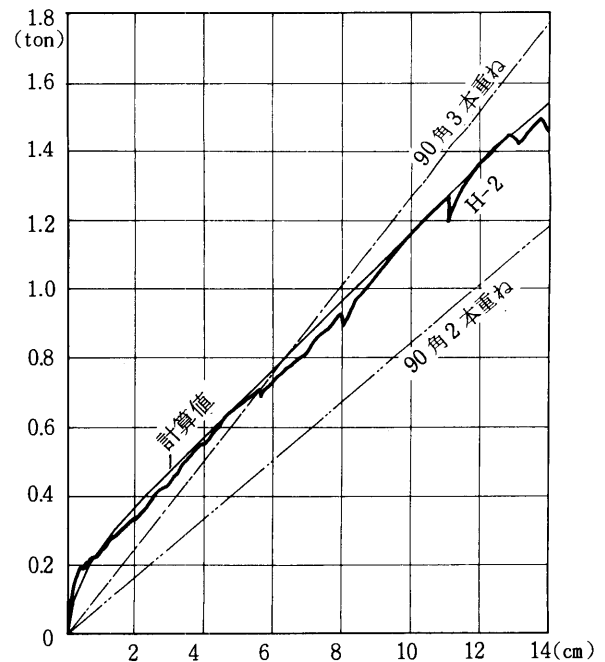


図5.2 計算による荷重と撓みの関係

## 5-2 積層格子梁の撓みの評価

格子梁の撓みを評価するためのモデルは以下のものである。まず格子でない積層梁の曲げ剛性を仮定する。更にこの積層梁を一体の物として、上記の曲げ剛性を有する線材に置き換え、その交点を剛接合とする平面格子に組んで格子梁モデルとするものである。材の曲げに対する荷重と変形の関係は線形とした。このモデルを用いて、東京大学大型計算機センターの構造解析プログラムライブラリーISAS IIによって数値解析を行った。

積層梁の実験値(H-2)は、初期曲げ剛性が $7.18 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ で、第2勾配が $0.98 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ であったが、本プログラムは線形なのでそのまま剛性を代入するわけには行かない。そこで、床の実用範囲を中央部撓み2 cm程度までと考え、撓みが2 cmのときのセカントモジュラスで剛性を求めると $1.6 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ である。これを代入すると、撓みは実験値よりも大きくなる。そこで次に、5-1と同様に、実験結果にできるだけ一致するように、試行錯誤でパラメータを求めた。

その結果、曲げ剛性として $3.5 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ の値を用いると、A-1での撓みの値とかなり一致することが分かった。この値は積層梁のセカントモジュラスによる剛性の約2.2倍である。

表5.1は、集中荷重で0.6ton加えたときの荷重点の撓みを、実験値と上記の剛性( $3.5 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ )を用いた計算値を比較したものである。計算値と実験値の比は、4点支持(実験Aシリーズに対応)では、0.9~1.2の範囲に納まっているのに対して、8点支持の場合(実験Bシリーズに対応)には、0.5~0.9と小さい値になっている。この原因の一つには、実験の繰り返しによる試験体の剛性の低下が考えられる。

ところで、4章でも触れたように、今回の実験では8点を支持したときの支持点の浮き上がりを拘束していない。しかし、実際の場合には、例えば床は柱に緊結されることになるので、当然この部分での浮き上がりは拘束される。そこで、Bシリーズと同じ荷重条件で、浮き上がりを拘束した場合の撓みの量を計算したのがB'である。この計算によれば、8点を支持すれば、かなり撓みを小さく抑えられることが分かった。

また、住宅の床荷重は、 $175 \sim 190 \text{ kg/m}^2$ 程度と考えられるが、これを今回の格子梁の各交点の集中荷重に換算すると約150kgである。図5.3は、格子の各節点に同時に150kgの荷重を加えたときの、数値解析の結果を図示したものである。このときの中央の撓みは4点支持の場合には1.95cmで、8点支持では0.74cmであった。

以上のように、積層梁の実験データを約2.2倍して代入すれば、かなりよく一致することが分かった。ここで代入した剛性は撓み2 cmのセカントモジュラスであり、これより撓みの小さい範囲では剛性が高いことを考慮す

ると、このモデルを改良することにより、格子梁の変形をかなり精度良くシミュレートできるものと考えられる。

表5.1 荷重点の撓み

荷重条件	荷重600kgのときの荷重点の撓み(mm)	計算値(mm)	計算値/実験値
A-1	6.64	6.95	1.046
A-2	6.21	7.30	1.177
A-3	10.19	12.60	1.236
A-4	6.35	6.19	0.974
A-5	6.69	7.27	1.086
B-1	4.85	4.67	0.962
B-2	3.85	3.61	0.938
B-3	4.19	4.12	0.983
B-4	3.41	2.72	0.798
B-5	7.87	4.26	0.540
B'-1		4.67	
B'-2		3.36	
B'-3		2.48	
B'-4		2.35	
B'-5		3.20	

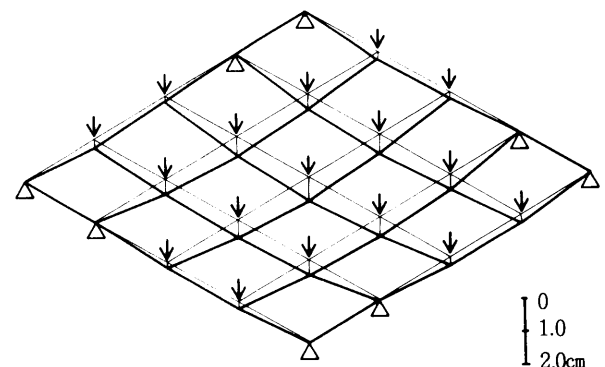
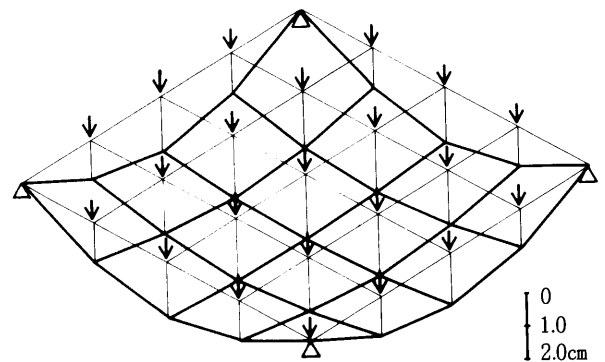


図5.3 格子梁の変形

## 6章 まとめ

### 6-1 実験と解析のまとめ

せん断実験より、六角車知とボルトを併用するものが、強度あるいは現場での施工上優れていることが分かった。また、車知の繊維方向は積層材と同じとするのが剛性も高く、好ましいことが分かった。これによる単純梁、格子梁の実験により、上下層の柱位置にずれが生じないようなものについては実現性があることが示された。一方、解析ではこれらを忠実にシミュレーションすることはできなかったが、実験結果に合わせるためにはせん断実験や、単純梁実験のデータをどのように評価すれば良いかを示すことができた。

### 6-2 小径材を利用した積層格子梁の可能性

在来木造構法の研究は、伝統的な構法に注目した構法調査、あるいは施工の合理化の面から捉えられることが多かった。本研究は必ずしも合理化を目指したものではないが、本提案が実現した場合には、部材の規格化とそれによる製作の省力化、現場作業の合理化、施工精度の向上が期待される。

また、格子梁とは言え、大スパン構造を目指すものではない。水平構面にこのシステムを用いて、住宅程度のスパンをカバーすることをねらっている。本研究では、特に軸組の構法を特定していないが、平面プランが水平構面に制約を受けることなく、かつ、その改変が容易なシステムを意図したものである。そのためには水平的にX、Y方向に勝ち負けのない水平構面をつくる必要があった。在来木造住宅は、軸組をはじめ構法の変化が進んでいるが、床組や小屋組については改良がほとんど見られない。本研究はこの点についても新しい提案と言える。

また、間伐材の利用方法は各研究機関で検討がなされている、本研究の小径木材の利用もその一つの提案と言えよう。

### 6-3 今後の研究課題

積層梁の上下の層を緊結する方法については、少なくとも今回の実験の範囲では六角車知にボルトを併用する方法が優れていることが分かった。また、積層梁、積層格子梁の実験により、実大での強度、剛性はもとより、施工性等のデータが蓄積された。

現在までの研究で、住宅程度の規模の建物への応用の可能性は、おおむね確認されたと言って良からう。

一方、研究の過程で新たな課題も分かってきた。例えば、格子梁に2 m以下の小径材を用いればコストの低減が見込めるのに対して、車知にナラ材を用いると車知のコストの方が高くなってしまうこと。また、ボルトを併用した場合にはこれを締めるための施工手間が大きくな

る等である。今後、車知材に何を用い、どのように取り付けるかについて、一層の検討が必要である。

また、現在のままでは、まだ床剛性が不十分で改良の余地がある。これは荷重の考え方や全体システムとの関連で考えなければならない。例えば、この格子梁を支える柱（または壁）をどの程度の間隔で配置すれば良いのか、そのルールを明らかにしなければならない。また、建物として考えた場合には、柱や壁をはじめとする他の部位との納まり、増改築のプロセスの検討などの課題が残っている。

### 《おわりに》

そもそも本研究は、在来木造住宅の小屋組が軸組と独立しており、それによってプランが自由に創れ、かつ変更が可能になっていることに注目したものである。これを何とか別のシステムにより創れないかと考えた結果、本研究のような格子梁のアイデアが生まれた。

研究を進めてみると、組立ての発想は面白いものであったが、それを現場で一体化し、かつ剛性を確保するのは容易でないことが分かった。在来のシステムがうまくできていることを改めて知らされることになった。しかし、今年度の研究で、本構法も実現の可能性があることがおおむね確認できた。今後も引き続き、実現に向けて研究を進める予定である。

### 〈研究組織〉

(研究代表者)

内田祥哉 明治大学工学部教授・工博

(委員)

山本公也 明治大学工学部教授・工博

坂本 功 東京大学工学部助教授・工博

伊藤邦明 伊藤邦明都市建築研究所

代表取締役・工博

入之内 瑛 都市梱包工房代表取締役

藤井 毅 農林水産省林業試験場

集成加工研究室室長・農博

林 知行 農林水産省林業試験場

集成加工研究室研究員・農博

松留慎一郎 東京大学工学部助手・工博

大橋好光 東京大学工学部助手・工博

(研究協力者)

東京大学工学部建築学科・坂本研究室

安達文男 浦江真人 山下伸夫

千歳久嘉 中津雅美

東京理科大学工学部建築学科

河合直人 (杉山研究室助手・工博)

三井木材工業(株)開発部

森 和雄 (商品開発研究所・副主任研究員)