

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研究（2）（梗概）

内田 祥哉
大橋 好光

1章. 研究の概要

1-1 研究の目的

本研究は昨年度の同じ課題名の研究に続くものである。その研究目的は次のようである。

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、桁端部には柱がなければならない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。本研究の目指す構法は、小径の木材を重ねた合成梁で格子状の骨組（格子梁）を造り、これを2階床組、屋根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構造システムを実現しようとするものである。写真1-1に模型写真を示した。

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段程度積層するが、当面間伐材から得られる断面を想定して90×90mmで、材質はスギとした。この際、木材を図1-1及び写真1-2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。

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、昨年度の研究成果は「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)」として財団法人新住宅普及会・住宅建築研究所によりまとめられた。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 昨年までの研究成果

昨年はまず、積層した梁が一体となる構法の検討から始めた。積層した材に曲げが加わると、各上下の積層材間にせん断を伝えるような工夫がないと、格子は梁としての機能を満足しない。このせん断力を円滑に伝達する構法を見つけたことから始めた。この点について、接

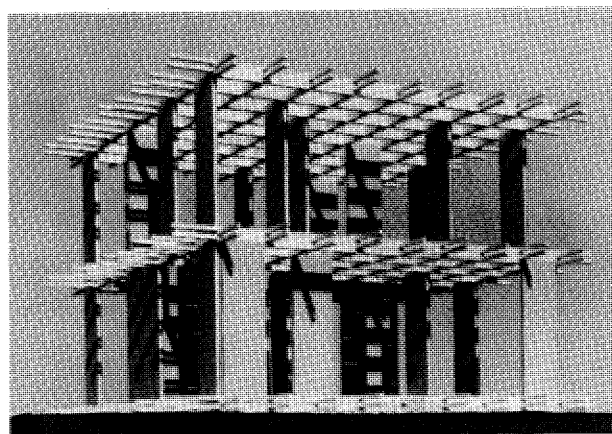


写真1.1 架構模型

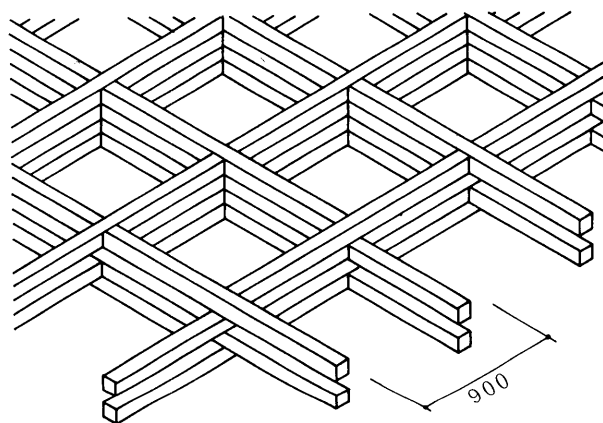


図1.1 アイソメ

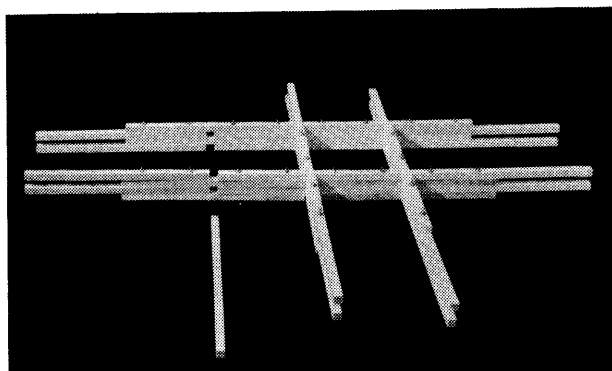


写真1.2 格子梁の模型

着剤、ジベル、車知などの中から六角車知にボルトを併用した積層材が剛性及び靱性を兼ね備えていることが分かった。次に、このヒノキの六角車知とスギ材の積層材による梁（積層梁）を製作し、その曲げ試験を行った。その結果、 $1.5 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ 程度の曲げ剛性（EI）など、梁としての基本的な曲げ性状を把握した。また、8 畳間相当の格子梁を製作して、鉛直加力試験を行い格子梁としての撓みを測定した。

また、これらの実験と並行して、コンピュータによる数値解析を行い、実験結果の検討及び実際の建物への適用を検討した。その結果、上下階の柱を一致させれば、一般の住宅程度の建物では強度的には実現可能であることが分かった。

1-3 今年度の研究経過

研究は、昨年度に引き続き委員会を組織して月に一回程度の会合をもちながら進めた。今年度は、まず実大に近いものを組み立てることを第一の目標とした。これまでの加力実験等でその実現の可能性がほぼ確かめられているので、これを実大のスケールで撓み等を検証すること、及び加工・組立ての作業性を確認する意味でも実大の組立てを行うこととした。

ところで、委員会では、床としての剛性の不足も懸念されたので、接着剤による格子梁の剛性も確認したいという意見が強く、これを積層梁で検討することとした。また、昨年の積層梁実験の際の試験体は、加工精度が悪かったので、このデータを補正しておくことも必要と思われた。そこで、ヒノキの六角車知に併用するボルトの直径を 8mm 及び 12mm、また、それぞれに接合材を併用したものとそうでないものの計 4 体について積層梁曲げ実験を行った。その結果、予想以上に加工精度の影響は大きく、昨年と同じ条件のもので約 2 倍も剛性があること、更に車知部分だけの接着剤使用でも、使用しないものの 2 倍の剛性が得られることが分かった。

実大の組立て実験では、都合で格子材をヒノキに、モジュールを 1m に変更して 8 畳間相当の 2 階建分の格子を組み上げることにした。

1 層は柱及び筋かいの在来構法的軸組で、また 2 層は 2×4 構法的な壁式構法とした。これらより、加工性・施工性のデータを収集した。

また、木村俊彦氏の作成した格子梁解析プログラムを用いて、載荷実験の結果の検討及び一般プランに適用した場合のシュミレーションを行った。

2 章. 積層梁の曲げ試験

2-1 試験体

昨年度までの研究で、格子梁の実現性はほぼ確認されたが、上下階で柱位置のずれたプランに適用するために

は曲げ剛性がやや不足することが指摘された。そこで、車知に接着剤を併用したものについて実験で確かめることにした。これは、これまでの委員会でも何度か提案されたものである。図 2-1 に示すように車知の部分に接着剤を付け、ボルト締め後に硬化させ、接着剤の効果を確かめた。従って接着剤は車知部分のみで、積層材間には接着剤を用いていない。この接着剤を付けることは、格子梁の改築を不可能にしてしまう点で、研究の目指す構法と方針を異にするが、接着剤の効果を確認のため実施したものである。

なお、前年度まではボルトを直径 8mm としているが、これを 12mm とした場合の相違も併せて検討した。

試験体番号は接着剤付きを G、接着剤なしを NG とし、ボルト直径が 8mm、12mm をそれぞれ 1、2 とし、例えば G-1、NG-1 と表示する。母材スギ(90×90×1710)で、車知はヒノキである。断面寸法はいずれも前年と同じである。

また、格子材の配置は、中央加力点の上側に継ぎ目があるタイプと下側にあるタイプがあるが、今回はすべて上側に継ぎ目があるタイプで行っている。これは、昨年度の実験から、こちらの方が強度の小さいことが分かっているためである。すなわち、実験値としては弱い方、すなわち、安全側にできると考えられる。

2-2 試験方法

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。

図 2-2 に示すように、梁両端を支持して、ロードセルを介して梁の中央に荷重を加えた。その時の支点、梁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 $\sqrt{2}$ 倍ずつ大きくしていく、片押しの繰り返し加力である。

2-3 実験結果

実験結果の一覧を表 2-1 に示した。ここで、剛性は本構法の実用範囲である 2cm（スパンの 1/180 に当たる）撓んだ時の荷重から求めた。

接着剤を付けた G-2 (12φ) の剛性は接着剤なしの NG-1 (8φ)、NG-2 (12φ) に比べ、それぞれ 1.88 倍、2.23 倍に剛性が上がっている。接着剤の効果はやはり著しいことが明らかになった。ただし、図 2-4 に示されるように接着剤付きの方の荷重変形曲線の包絡線は凸になっているのに対して、接着剤なしは凹になっているために、2cm を越えての剛性には大きな違いは見られない。

変形が進んで破壊に至る撓みの大きさは、接着剤付きでは両者とも 4cm であるが、接着剤なしではボルト 8φ

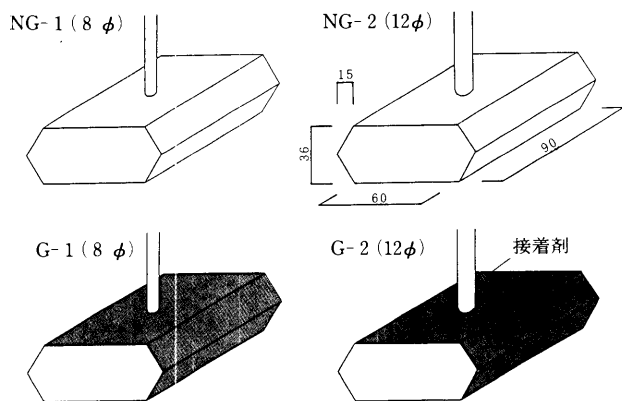


図 2-1 車知の寸法

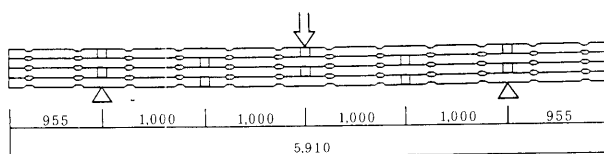


図 2-2 試験体寸法

が 4 cm 程度なのに対し、ボルト 12φ では 8 cm を越えている。この理由は明らかでないが、いずれも中央部の撓みが 4 cm 程度までは梁に重大な破壊が生じないことが分かる。ただし、これは中央集中荷重実験であり、等分布荷重ではこれよりも靱性が大きいと予想される。

また図 2-4 では、詳細な履歴は省略したが、接着剤の有無により、残留変形の大きさが異なっている。接着剤付きでは撓みを 30 mm 程度まで加えてもその残留変形が、2～3 mm にとどまっているのに対して、接着剤なしでは 10 mm 程度の残留撓みが認められる。ただし、木造の場合これらの短期荷重による残留は、除荷後の時間の経過とともに、小さくなることが分かっている。

ボルト径の影響について、接着剤付きでは 12φ の方が、剛性、最大耐久力ともに大きくなっているのに対して、接着剤なしでは逆に 8φ の方が大きくなっている。これはむしろ、ボルト径の影響は認められないと言ってよかろう。ボルトの穴径は車知、積層材ともに、8φ ボルトでは 12mm、12φ に対しては 15mm である。実験で撓みが 3～4 cm までの範囲では、ボルトがせん断で利きだすのには至らないと予想され、先のような実験結果になったものと考えられる。なお、図 2-4 には昨年の積層実験の結果も併せて示している。本年度実験の NG-1 と昨年度の H-1 は、基本的に全く同じ実験であるのに、結果は大きく異なっている。これは昨年の試験体では車知が、梁の欠き込みより小さいものが多かったのに比べ、今年はほとんどがきつくできていたためと考えられる。

以上のことから本構法では車知の精度がいかに重要であるかが改めて指摘される結果と言えよう。

表 2-1 各撓みにおける荷重(kg)と 2 cm 撓み時の剛性

撓み (mm)	NG-1	G-1	NG-2	G-2
2	90	151	95	172
4	149	306	150	336
6	205	448	193	504
8	235	552	237	647
10	304	663	292	749
15	410	822	395	994
20	550	1,035	532	1,188
30	902	1,395	801	1,529
40	1,272	—	1,055	1,782
剛性 ($\times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$)	1.67	3.14	1.62	3.61

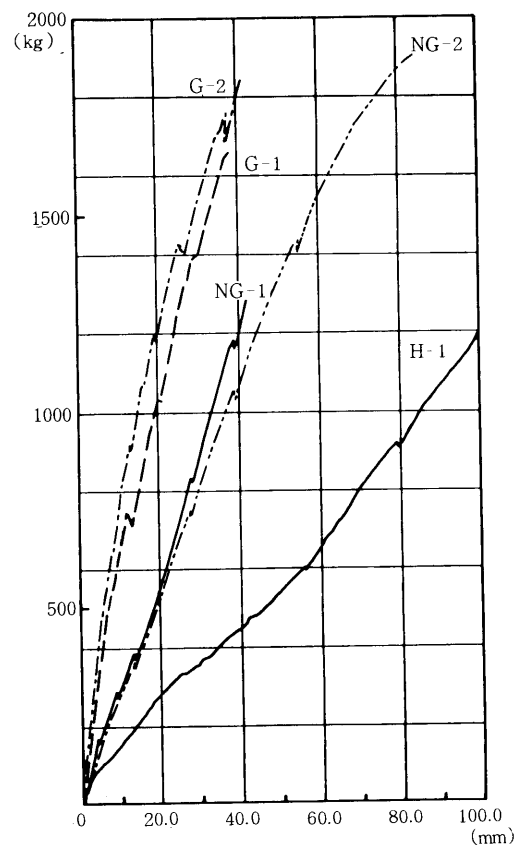


図 2-4 NG, N の荷重—撓み曲線

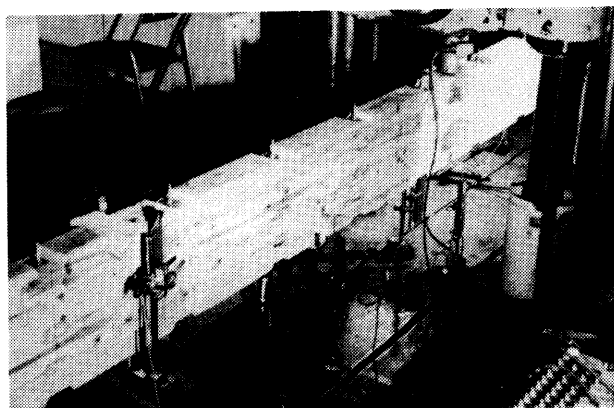


写真 2-4 加力風景

3章. 実大組立て実験

3-1 試験体

積層格子梁の強度上の実現性はほぼ確かめられたので、加工・組立てを行い、施工性に関する実験を実施した。実験は東京木材サービスセンターの協力により、同センター敷地内で行った。試験体は実大に近いもので、かつ、予算内に納まる最大のものを目指した。その結果、8畳間相当を2階建分とした。

また、在来構法の木造住宅の場合、1階床組は^{つか}大引きを束立てで支えるのが一般的であるが、本実験ではこれも格子梁とした方が構法的に明確であることから格子梁とした。また、基礎は試行実験であることから、排水升を捨て型枠とする独立基礎とした。軸組及び壁については、2×4構法的なものが本構法には適していると考えられるが、今回は在来構法的軸組の施工性を確認する意味で、1階を柱、筋かいとし、2階を2×4構法に近い壁式構法とした。

小屋組については、今回は格子梁までとした。これは、

桁位置に格子梁を設ければ、これを基準に上に在来の小屋組を構成することは比較的容易であると考えられるためである。なお、格子梁のモジュールは、従来90cmとして実験を行ってきたが、今回は1mモジュールとした。

図3-1～図3-4に試験体の立面及び平面を示した。また、各部材の仕様を図3-5～図3-7に示した。

1階柱の断面は、一般には105×105mm以上となるが、本構法の格子材が90×90mmであることから、今回は90×90mmとした。ただし、実用化の際には、この寸法では法的に柱の径が不足してしまうことも予想されるので、ディテール上の工夫が必要となろう。なお、柱と上下の格子材との接合部は筋かい金物（Zマーク）とした。

2階は、プラットフォーム状に構成されてから、桷組壁の上に格子材を載せるものである。パネルと床の取合いは、床合板勝ちのディテールとした。パネルの上下は格子材に釘打ち止めである。

なお、試験体組立て中の強風時を考慮して、今回は、小屋組の格子梁には合板を打たないこととした。

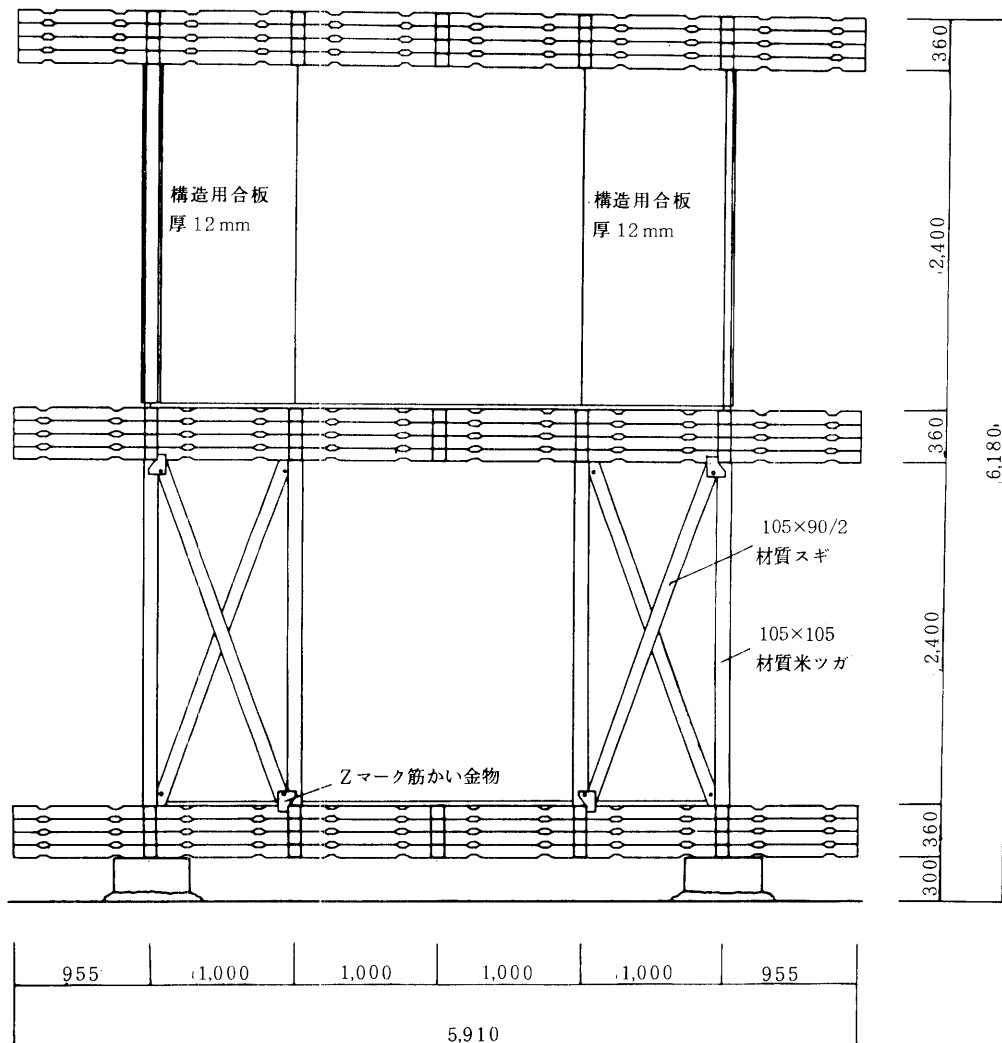


図3-1 立面図

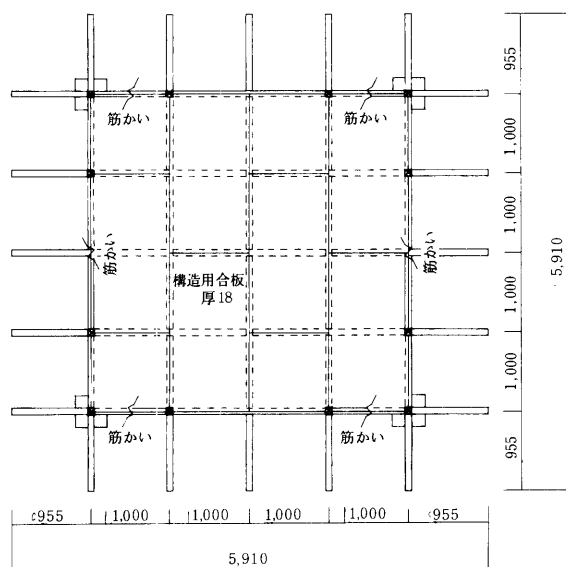


図 3-2 1 階平面図

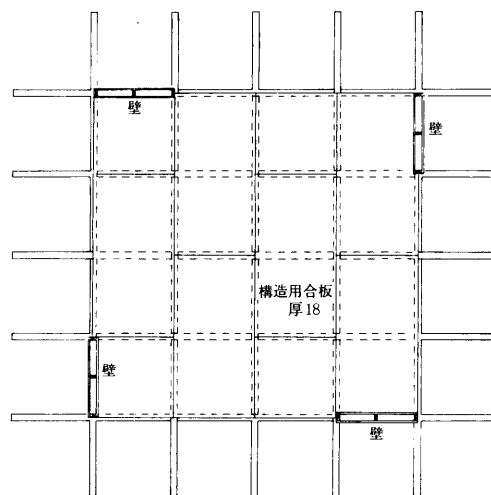


图 3-3 2 階平面図

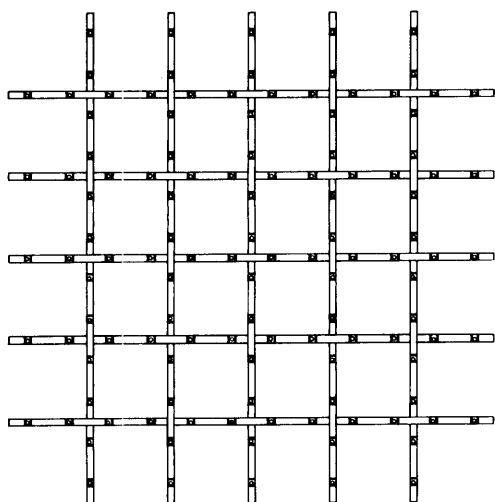


图 3-4 屋檐伏

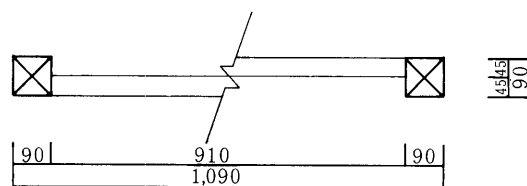


図 3-5 1 階筋違い部分

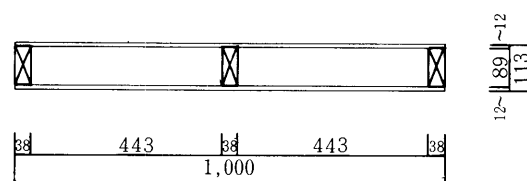


図3-6 2階壁パネル断面詳細

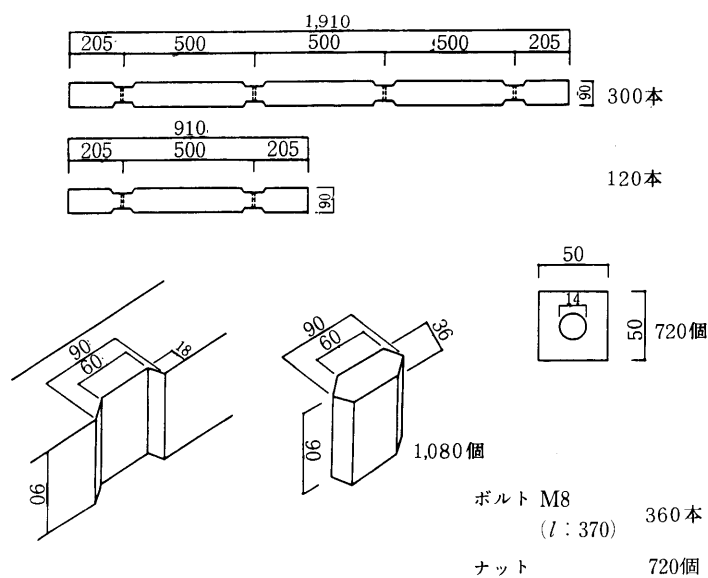


図 3-7 格子梁の部品図 (3 層分)

3-2 格子梁の製作

3-2-1 試験体の製作と加工機械

今回の8畳間の3層分の積層材は、90×90×1910mm材が380本、90×90×910mm材が140本でこれに対する溝加工数が計2880カ所、ボルト穴加工数が1440カ所である。また、これに用いる六角車知は1080個である。梁は、長さが異なるものの、同じ形状でその加工箇所が多いということから、明らかに機械による繰り返し加工が適している。当初は、木造住宅の軸組材の加工を行うプレカット工場での製作も検討したが、結局、岐阜県加茂郡白川町の木工加工業者（株）トーホーで製作することとした。また、材はスギの間伐材を想定しているが、今回は入手しやすいということで、地元の東濃のヒノキ材を使用した。

格子梁の製作工程は以下のとおりである。

1. 原木から断面荒木取り
2. 自然乾燥（2週間）
3. 除湿乾燥による人工乾燥（1週間）
4. 自然乾燥（1週間）
5. 長さ、荒木取り
6. 溝加工
7. ボルト穴加工
8. 仕上げ

また、六角車知の製作工程は以下のとおりである。

- 1～5の工程は上記と同じ
6. 斜め切断
7. 仕上げ

材の含水率は20%以下に指定した。原木から荒木取りした段階で、2週間の自然乾燥と、湿度と温度をコントロールする除湿乾燥による人工乾燥を行い、その後、再び、自然乾燥を1週間行うことにより、20%の含水率を満足したとのことである。すなわち、延べ1カ月間の乾燥期間が必要ということになる。なお、最初から背割りを入れると乾燥しやすく、小口割れも防げると言われるが、今回は背割りは入れていない。

積層材の溝加工は、木工用モルダーに特注の刃物をセッティングして加工している。従って、1工程で加工は可能になっている。ボルト穴は、ボルト穴機にて加工を行った。これも、1箇所1工程である。

六角車知は、厚さ36mm、幅90mmの材を、長さ90mmに切断した後に、昇降盤を必要の角度にセッティングして斜めに4回、材の位置を変えながら、丸鋸で切断している。従って荒木取り後に、4工程の切断が必要となる。

表3-1 使用機械

- ① 丸ノコ盤
- ② 乾燥室
- ③ クロスカットソー
- ④ 木工用モルダー

- ⑤ ボルト穴機
- ⑥ 昇降盤(傾斜盤付き丸ノコ盤)

3-2-2 格子梁の加工工数

格子梁の加工工数を表3-2に表示した。今回の格子梁の製作に、60時間かかっている。1日8時間働くとする、格子梁の溝加工は、木工用ルーターを使って7.5人日ということになる。格子梁の全加工時間は73時間で、約9人日であった。六角車知は、仕上げを加えると、計55時間もかかっている。1人日を8人時間とすると約7人日もかかっており、格子梁自体の加工工数も9人日と少なくないが、六角車知の加工に7人日は多いと言える。

今回の加工総時間は、128時間で16人日かかっており乾燥期間の1カ月や段取り等を考慮すると、発注から納期まで最低2カ月は必要と思われる。

表3-2 格子梁の加工工数

項 目	格 子	車 知
荒木取り	12時間（96秒/本）	13時間（40秒/個）
加 工	39時間（45秒/本）	8時間（24秒/個）
仕 上 げ	9時間（72秒/本）	34時間（107秒/個）
ボルト穴	13時間（30秒/カ所）	
合 計	73時間	55時間

3-2-3 格子梁の加工性について

今回の試験体の原価を見ると、992,000円のうち333,600円が加工費となっている。この加工費のうち大部分は人件費であり、加工数をいかに減らすかが問題である。

今回と同じように、一般に普及している木工用モルダーを使うとすると、溝角度が45度になると30%程度能率を上げることができる。更に、14回もの手による刃物研磨を、自動研磨機にかけることができる。

また、軸組材のプレカットラインに多く配置されている自動仕口加工盤を使用すると、1箇所の溝加工は約20秒であるが、位置合わせ、クランプ、材移動などを含めると実質約60秒となり、木工用モルダーと大同小異である。

将来的には、ログハウスの仕口用に最近製作された組手加工機の応用が有望と考えられる。これは、1箇所の溝加工時間は約5秒、材移動等のその他の時間も含めても実質20秒で可能となり、1/2～1/3の加工工数となる。格子梁に対する刃物の回転軸が、他の加工機械が垂直であるのに対して、平行で刃物の軸移動速度が1桁早い（0～6 m/sec）からである。この加工機械を平行に配置して、4カ所の溝を1度に削ることも考えられる。しかも刃物の摩耗度が低いため、1000回程度の使用に耐えることができる。溝の加工は需要がまとまりさえすれば、効

率よく製作することは可能であると考えられる。

3-3 組立て及び解体の手順

当初の検討では格子梁の組立ては、地上で行って、これをクレーンで持ち上げるのが最も効率的であると予想された。しかし、日本の建築事情を考慮すると、建物敷地内に格子梁を組み立てる余地のない場合がほとんどであることや、大型の機械を使用しないという本構法の目指す施工方法を考慮して、2階床や小屋梁もその材の使用場所で組み立てることとした。

また、床面全面に足場を組み上げることも避けることで施工計画が考えられた。その結果、8畳間相当の周囲に格子を受ける材をめぐらし、これを基準に内外に格子を延ばして行くことにした。また、中央1カ所にはサポートを設けることとした。

以下に組立て及び、解体の手順を示す。

【基礎の打設】

排水用の升を捨て型枠とした独立基礎。まず、基礎の位置を定め、升をセットする。升の上端のレベル調整をして、コンクリートを打設する。全ネジのアンカーボルトは格子交点の外側になるように配置する。このアンカーボルトは1カ所につき1本で、その支点において最下層の格子梁が通っている方（勝っている方）の外側に取り付け。

【1階床格子梁の組立て】

1階床は、地盤からのレベル差が少ないために比較的組立ても容易であった。格子を載せる仮フレームを外側に回し、1つの隅から格子を積み始める。仮フレームは、中央部を3cm程度開けておき、ボルトは積み上げてから、挿入することとした。

格子材を積み上げて並べていくと、反対側で1cmほど長くなってしまった。これは、叩いて入れるほかはなく、連続して大きな平面になるとこの誤差は大きくなる可能性がある。

【ボルトの挿入、締めつけ】

8φのボルトに対し、ボルト穴は車知格子材には12φを開けておいたが、ボルトの入らないものがいくつかできた。車知、格子材のボルト穴の位置精度が悪いため、機械化を進めればこの誤差は小さくできると思われる。

ボルト本締めの前に梁を揃えるのに、かなりの時間を要した。梁は積んだだけでは向きが不揃いで、両側から叩いて平行に合わせなければならない。これは、車知の精度により、なかなか合わない所も見られた。

なお、ボルト締めはラチェットによったが、反対側が回転して締まらないことがあり、固定が必要である。また、基礎幅が大きいと、その直上に最初のボルト穴がかかってしまい締めにくいことも分かった。

1階床は、組立てには十分注意したが、締め付けや、仮



写真 3.1

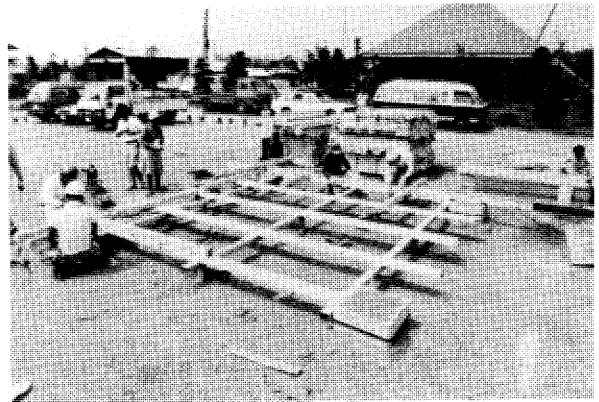


写真 3.2



写真 3.3



写真 3.4

枠を外した時にいくらか撓んでしまった。4辺の中央部で平均約2cm程度撓んでいる。

【1階軸組の組立て】

1階軸組みは、柱、筋かいの在来構法である。まず、柱下部のほぞ穴を掘る。ほぞは、一般の間柱の場合と同じ短ほぞである。今回は、まず機械加工を試みたが、結局は手加工になった。機械の重量が大きく、格子梁に固定するのがうまくいかなかったためである。柱を立ててみて、これを仮筋かいで止める。この上で2階床、格子梁を組み立てることになる。

【2階格子梁の組立て】

2階床も1階と同様に、格子受けの仮枠を付けることにした。また、格子積層作業のために中間の高さに足場板を設けた。中央部には、仮枠を止める支柱を配したが、念のため1階床下にも仮の束を設けた。

2階床格子は、積み上げるのにも格子間に、頭を出さなくてはならず、やはり1階に比べ作業性が落ちる。多少ユニットにして載せる方法もあり得ると思われる。特に外周に突出している半間分を下から取り付けるのに苦労した。

積み上げ自体は習熟効果もあってかなりスムーズであったが、梁の平行を整えるのには1階同様かなりの時間を要した。

2階格子を作った後に筋かいを入れる。金物は在来構法用の金融公庫仕様のZ金物である。なお、2階格子梁は撓みに対しても注意して組み立てたので、撓みを1cm以下に抑えることができた。



写真 3.5

【2階壁の製作】

2階壁は壁式構法である。壁パネルを半パネルの状態に事前に地上で組み立てておき、これを上に運んだ。ところが壁を組み立ててみると床面の撓みに従って、傾いてしまうことになり、「さげふり」でこれを測定して、片側に「スペーサー」を用いて補正した。なお、2階の作業時には、風が強いとパネルを立てるのが難しいことが分かった。

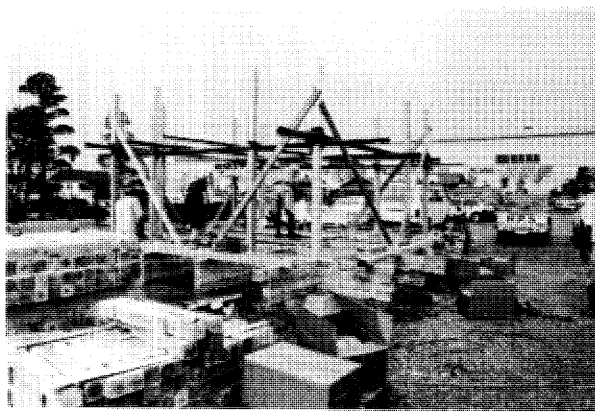


写真 3.6

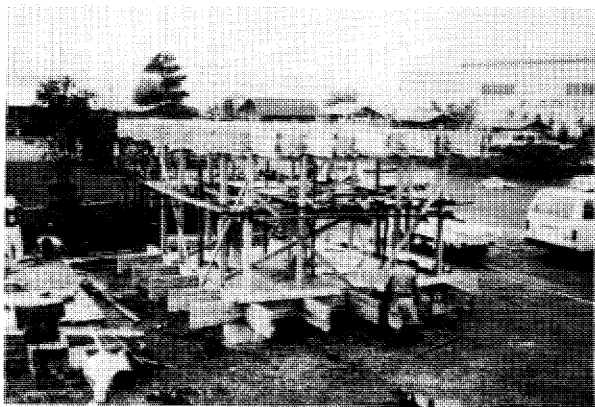


写真 3.7

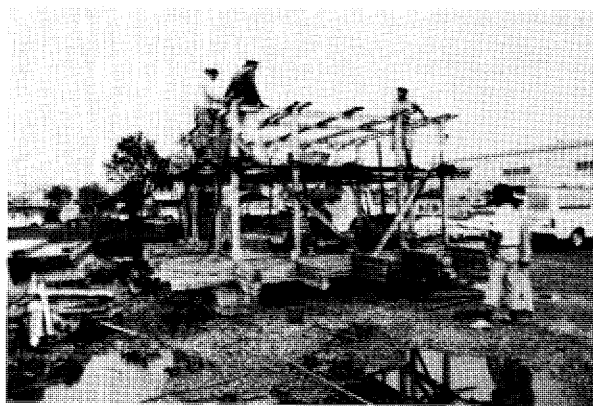


写真 3.8

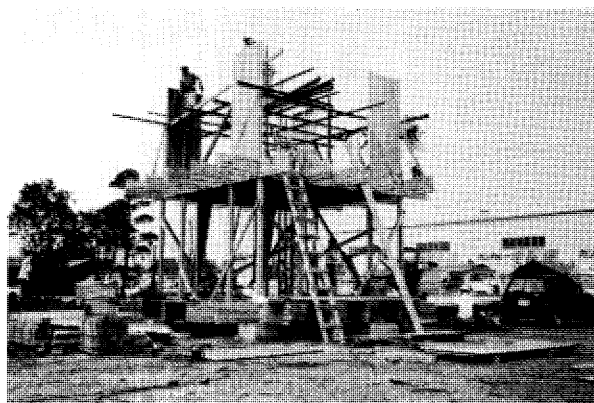


写真 3.9

【小屋格子梁】

小屋格子梁は、2階床の場合と同様にして小屋格子梁を受ける仮枠を設け、その中に人手用の足場を取り付けた。また、2階の中央に支柱を残して、小屋格子を組み立てた。

小屋格子梁の組立ては基本的には2階と同様である。ボルト本締め後に、壁パネルを格子に釘打ち、固定する。次に、壁パネルのもう1枚の合板を打ち付け、足場を解体して終了である。

【解体の手順】

解体は組立ての場合とは異なって、クレーン車を使うことにした。これは、クレーン車を用いた場合の施工性についても、検討上のデータを得るためである。

まず、使用したクレーン車は、格子自体は約1.5 tonのため5 ton用で間に合うが、今回はリース会社の都合で10 ton用であった。ワイヤーを4隅に降ろし、格子に掛け、ワイヤーの遊びがなくなるまで張っておく。一方、大工が2層壁パネルの内側の合板をはがし、次に2層壁パネルの上部と小屋格子を止めている釘を抜く。こうして、格子梁が載っているだけの状態にしておいて、クレーンで吊り上げるのである。地上には格子梁を受ける台をセットしておき、その上で格子を解体する。これは直接地上に降ろすとボルトを緩めたり、抜いたりする作業が困難なためである。今回の試験体は仕上げ材等が施していないため、作業はきわめてスムーズで、3層部分は30分程度で降ろすことができた。地上での解体も予想以上に容易であった。

2階床格子梁も同様にして行ったが、2階床の場合、1階軸組が柱、筋かいのため、筋かい金物の釘が多数打ち込まれており、これを抜く作業に多少手間がかかった。それ以外は3層同様、スムーズに進んだ。

結局、時間的には基礎の解体を除いて、躯体の解体は半日で完了した。

【組立て・解体のまとめ】

実大模型の組立てでは、大量の部材の製作と施工性のデータが得られた。部材の加工製作は、現在の加工機械の応用で、かなり安価に製作できると考えられる。一方、現場での組立ては、その精度にも問題が残った。在来構法の軸組はこれを先に組み立てることによって、フレームの寸法が確定するのに対して、格子梁はその長さが積み重ねてみなければ定まらないという欠点がある。ウッドタッチ面での誤差が集積されるためである。これは上下方向についても言える。

また、積み重ね自体にも問題がないわけではない。基本的に、積層梁はブロック積みと同じであるから、組み上がるまではサポートを必要とする。一方向をあらかじめ、組み立てておくような工夫が必要である。

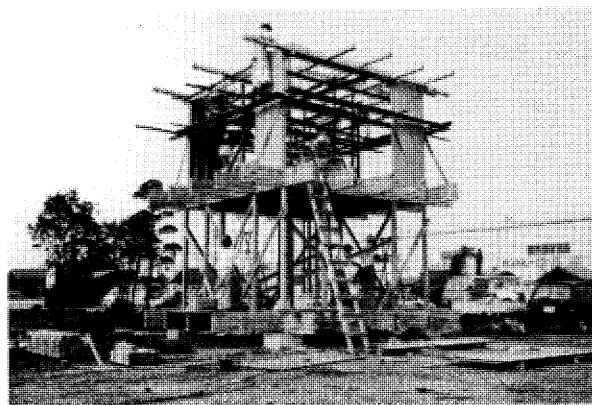


写真 3.10

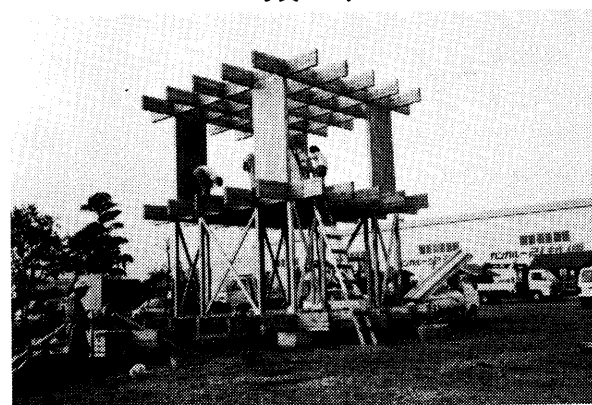


写真 3.11

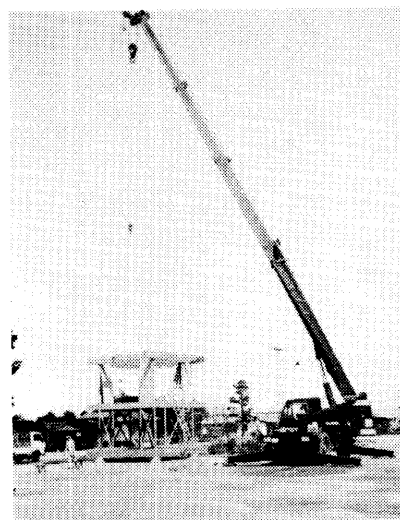


写真 3.12



写真 3.13

4 章. 鉛直加力試験

4-1 実大における水張り実験

4-1-1 試験方法

組み立てた実大模型について、2階及び1階の鉛直方向の撓み実験を実施した。加力は、固定荷重・積載荷重を想定して、床格子梁の上に水を張って荷重とすることとした。写真4-1に示すように、足場板を外枠にしてシートでプール状に水を張ることにした。従って、この場合、中央部分は撓みに従って深くなり、荷重も大きくなる。

水深が約5, 10, 15, 20cmの時点で、各点の撓みを測定した。実験は1階、次に2階と、都合2回行った。1階は主に外周を水系により床の撓みを直読した。2階は水深を測ることで、撓みを求めた。

4-1-2 試験結果及び考察

1階載荷時の1階格子梁の撓みを図4-1に示した。撓みは初期には、比例的に増しているのに対して、水深20cmになると、4隅より半間内側の点の撓みの増加はわずかである。この4隅より半間内側の交点には柱が立っており、2階格子梁と結ばれている。水深が大きくなって、荷重が増してこの時点から2階梁も荷重を分担し始めたためと考えられる。これ以前には、格子や軸組のガタ等により、1階格子だけが水を支えていたものと考えられる。

また、撓みは20cm、すなわち200 kg/m²時に中央部で約15mmでスパンのほぼ1/240に相当する。

今回の試験体は、力学的に、2階に載荷しても1階にも応力は伝達される。また逆も同様である。なお、2階の水深による撓みの測定は、目視によったため、誤差が大きく省略する。

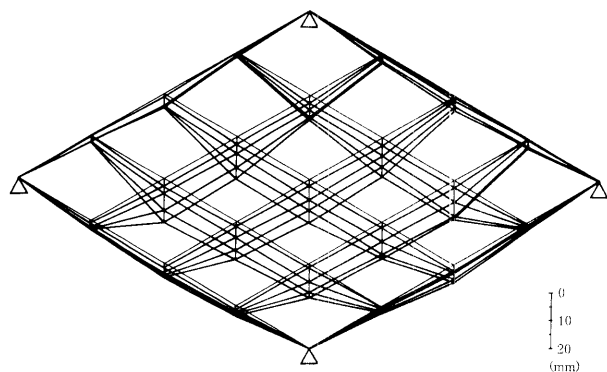


図4-1 1階の撓み (5, 10, 15, 20cm)

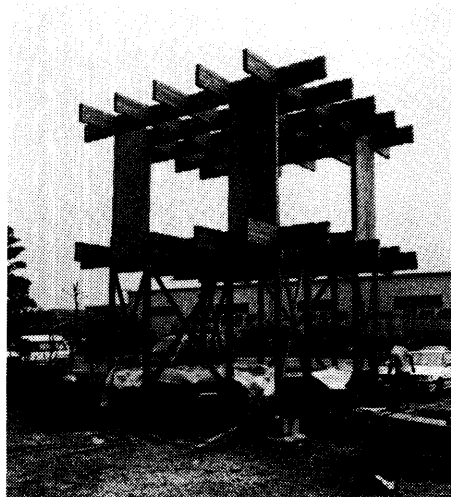


写真4-1 鉛直加力試験

4-2 格子梁による撓み試験

4-2-1 試験方法

4-1では実大模型の試験体を用いて鉛直加力したが、上下各層の格子梁の縁辺が柱でつながっているために、相互の影響を受け立体架構としての撓みの測定になっている。単独の格子梁としての撓みは測定することはできなかった。

そこで4-2では、一層分の格子梁で各節点の撓みを測定することにした。実験は、明治大学工学部4号館屋上で行い、試験体は4-1で用いた格子梁を再度組み立てて使用した。

格子梁を隅角部4点で支持し、加力は図4-2に示すように5種のパターンで行った。各々のパターンで隅角部支点を除く各格子材の上に学生19人を載せ、その体重によって鉛直方向の荷重とした。図4-2の太線で表した線上に人を載せた、すなわち加力点である。計測は各節点に下から当てた電気式の変位計により撓みを計測、記録した。なお、Aの実験で、各節点に荷重がかかるようにするには21人必要であるが、やむを得ず19人で行うことにした。他の荷重条件では19人が、ほぼ等分布荷重になるよう格子梁に載せた。なお、体重の合計は1113.5kgであった。A以外では、この合計1113.5kgが線上に等分布で荷重を加えるものとした。

4-2-2 試験結果及び考察

実験結果を図4-2に示した。各パターンの最大撓み量はA 8.88mm, B 12.4mm, C 12.44mm, D 14.62mm, E 14.72mmで、C以外はいずれも中央であった。Cは縁辺中央の撓みが最大であった。また、実験終了から30分後に残留変形を測定したが、その値を原点として積載荷重時の撓みから差し引いた撓み量の増分は、A 2.96mm(載荷時の測定値の約33%), B 6.72mm(約54%), C 8.67mm

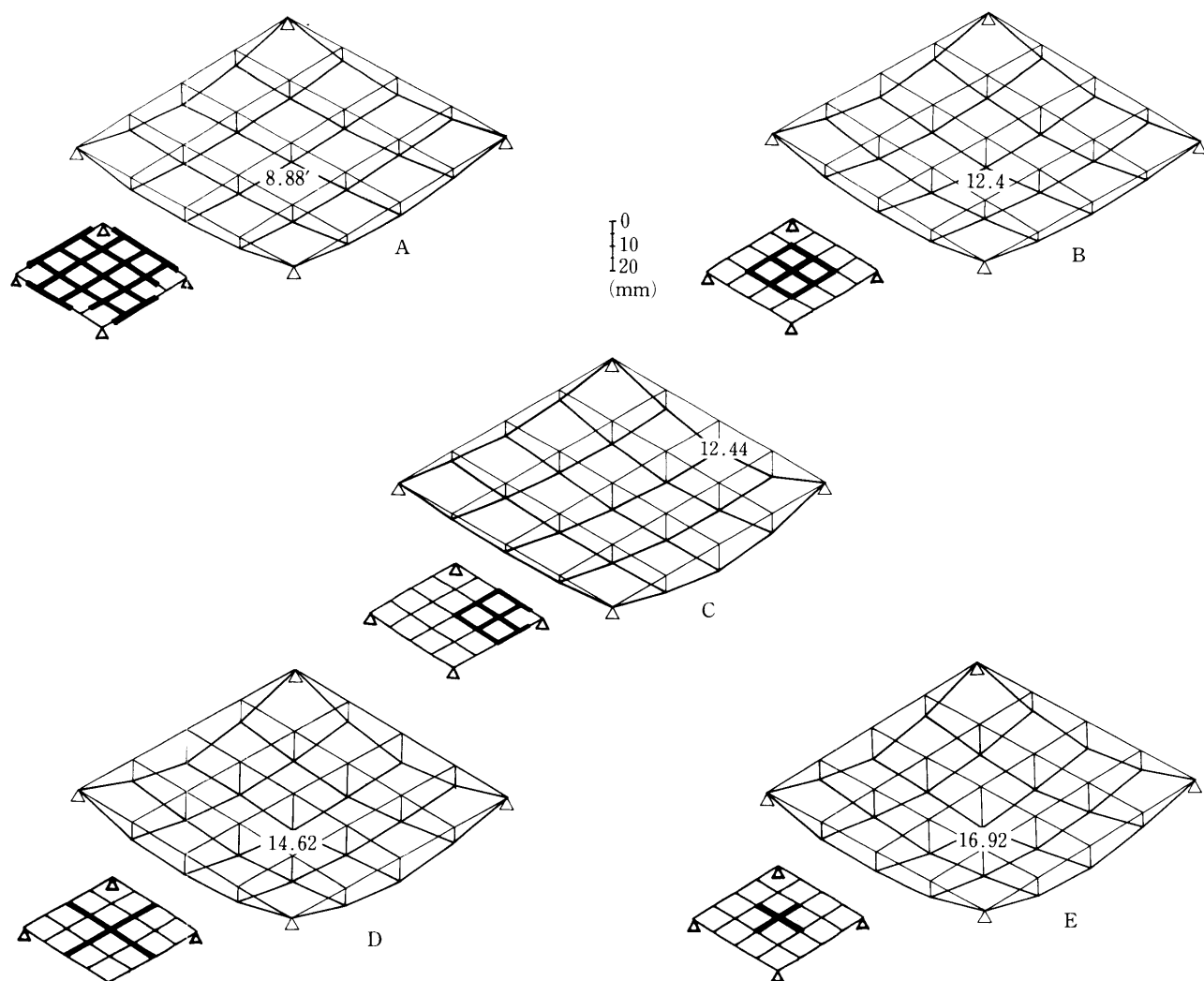


図4-2 実験結果

(約69%), D 8.94mm (約61%), E 9.82mm (約67%)である。各パターンは単純に比較できないが、測定値の50～70%程度が残留変形をもとにした実質的な撓みと考えることができる。

5章. 格子梁のたわみに関する解析

5-1 解析の方法

ここで使用したプログラムは、木村俊彦が開発したもので、任意節点に柱（支点）のある格子梁（無梁版）の設計に適用するものである。プログラムは、入力データ作成 (GRID-FIGC)、変位応力解析 (GRID-FIG2) 及び、解析結果の検討 (GRID-FIGE) の3つから成る。

第2ステップの変位応力解析は格子梁(または無梁版)を解析する階差方程式を応用している。そのため1節点1未知数のみで解析される。連立方程式の解析には、三角分解法(コレスキー法)を採用している。なお、階差方程式の解の誤差は正解に比して5～15%くらいになりうるので、結果を設計に用いる時は、その幅以上の安全率を考慮する必要がある。

5-2 実験結果の評価

4-2に示した実験の実測値と同様の荷重パターンをモデルとして計算値を求めた。まず、積層梁実験の剛性(NG-1: $1.67 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$)を適用してみたが、表5-1に示すごとく大きくずれてしまうことが分かった。そこで、計算値が実験結果の値に近くなるような曲げ剛性を5通りの荷重パターンについて求めたところ、図5-1のようになった。中央集中荷重では単体梁の曲げ試験の接着剤ありのボルト8φの剛性とほぼ同一の曲げ剛性($3.14 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$)を示し、中央4マス分と支点より4マス分の等分布荷重の場合においては、剛性が更に増すことが分かった。また、各節点に等分布荷重をかけたパターンでは高い初期剛性を示した。このように等分布荷重に近いものほど、等価剛性が高く、集中荷重に対しては低いことが分かる。

以上のように、実験時の格子梁には接着剤を付けていないのに、いずれのパターンでもG-1、すなわち接着剤を付けたものと同等以上の値を示した。これは、単体の積層梁の実験結果で示されたように、撓みの非線形性によるものと考えられる。このことから、本プログラム

のような線形範囲だけを扱うプログラムでは、すべての荷重条件、荷重の大小にわたって、予想することができない。条件を絞ることが必要と考えられる。また、この計算のために用いたデータは4-2の実験の測定値そのまま、残留変形を考慮した値は使用していない。仮に残留変形を考慮した値で計算したとすると、剛性は更に向上するはずである。なお、この値を用いた計算は省略した。

なお、今回の実験では4つの縁辺のうちの1つが計算値よりもかなり大きく撓んでいる。ここは、ボルトの締め方が足りなかったと考えられ、やはり施工の精度が撓み量に決定的な影響をもっていると言える。

木製格子梁を一般プランに適用するには、ほぼ等分布荷重で考えればよいので、以上の結果から、このプログラムに代入する剛性は積層梁の曲げ実験から得られた剛性よりもかなり大きい値でよいであろう。車知や施工の精度さえ良ければ、十分実用できると言える。ただし、集中荷重時の剛性が小さいのは、上下階の柱位置がずれた場合などを考慮すると問題は残る。

表5.1 実験値と計算値の比較

	A	B	C	D	E
実験値(mm)	8.88	12.40	11.48	14.62	16.92
計算値(mm)	25.2	31.7	27.2	31.2	37.2
比率	2.83	2.56	2.37	2.14	2.19

EI ($\times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$)

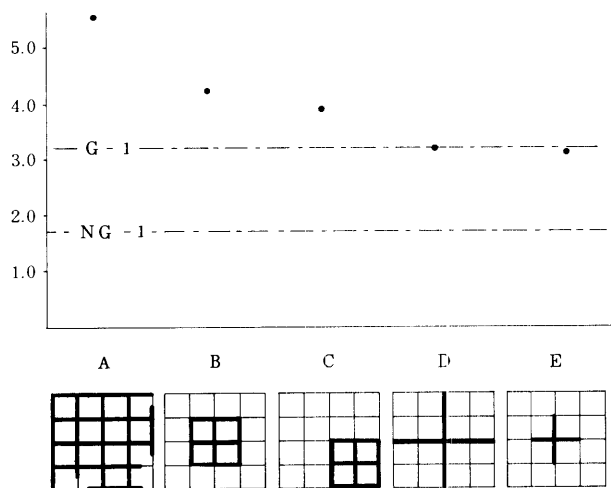


図5-1 実験値に一致する曲げ剛性

5-3 一般プランへの適用

格子梁の実現性を確かめるには、一般プランに格子梁を適用して、格子梁の撓みを求めた。建物は、雑誌に載っている木造建築から適宜抽出した。部分2階建のものもあるが1階平面を用いた。すなわち、これと同一平面の2階床の撓みを計算したことになる。荷重は250 kg/m² (各節点に202.5 kg) である。

解析には、木村俊彦の格子梁解析プログラムを用いた。

曲げ剛性 EI は、 1.67×10^8 、 3.5×10^8 及び $5.0 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ の3つである。 1.67×10^8 は、積層梁試験で接着剤なしの場合の剛性、 3.5×10^8 は昨年度のコンピューター解析で格子の実験値に近い値になる剛性として求めた値で、今年度の接着剤付きの剛性にほぼ近い。また、 5.0×10^8 は今年度の格子梁実験で等分布荷重の時の撓みに合わせた時の剛性値を丸めたものである。これを計算に用いる時には例えば 3.5×10^8 の場合、断面2次モーメント I は、スギのヤング係数(長期)を37.5 t/m² とすると9333 cm⁴ となる。この格子梁の断面は9 cm角を4層に積層しているために、9×36 cmのムクの梁材に置き換えて計算することはできない。そこで、幅を9 cmに固定して断面2次モーメント9333 cm⁴ より相当断面を求め、これより断面係数 Z は807.4 cm³、断面積 A は209 cm²、ねじれ剛性 I₀ を1049 cm⁴ を計算して入力する。他も同様である。

一般プランに適用させるため0.9 mを1スパンとして、縦×横のスパン数においてルールを導いてみた。図5-2に適用例を示した。ここで EI= $1.67 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ を a、 3.5×10^8 を b、 5.0×10^8 を c として図示した。なお、c の図には参考までに0.5 cmの撓みの線を記入してある。

このうち実際にどの程度撓むかは一概には言えない。前述のように荷重パターンにより推定との誤差があるからである。しかし、5-2で述べたように、等分布荷重とすれば、かなり曲げ剛性を高く見積ることができ、 $3.5 \sim 5.0 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ の間にあると言えよう。

5-4 柱配置のルール

一般プランに適用して撓みを求めた結果を部屋の大きさごとにまとめると次のようになる。数字は、格子のスパン数である(1:90 cm)。「中央」は建物の中央部に位置した場合で、「隅角」は建物の角にこの部屋が位置した場合である。

表5-2 スパンと最大撓み (cm)

	a (1.67×10^8)		b (3.5×10^8)		c (5.0×10^8)	
スパン数	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角
3×x (<1.0)	—	—	1.0<	—	0.5<	—
4×4	<2.0	(<1.0)	<1.0	<1.0	0.5<	<0.5
4×5	—	<1.5	—	1.0<	—	(<0.5)
4×6	<2.0	<2.0	<1.0	<1.0	<0.5	<0.5
4×7	—	<2.0	—	<1.0	—	<0.5
4×8	<2.0	<2.0	<1.5	<1.0	<1.0	<0.5
5×5	—	<4.0	—	<2.0	—	(<1.0)

(X<はX以上、<YはY未満を表す。()は例外を含んでいる。)

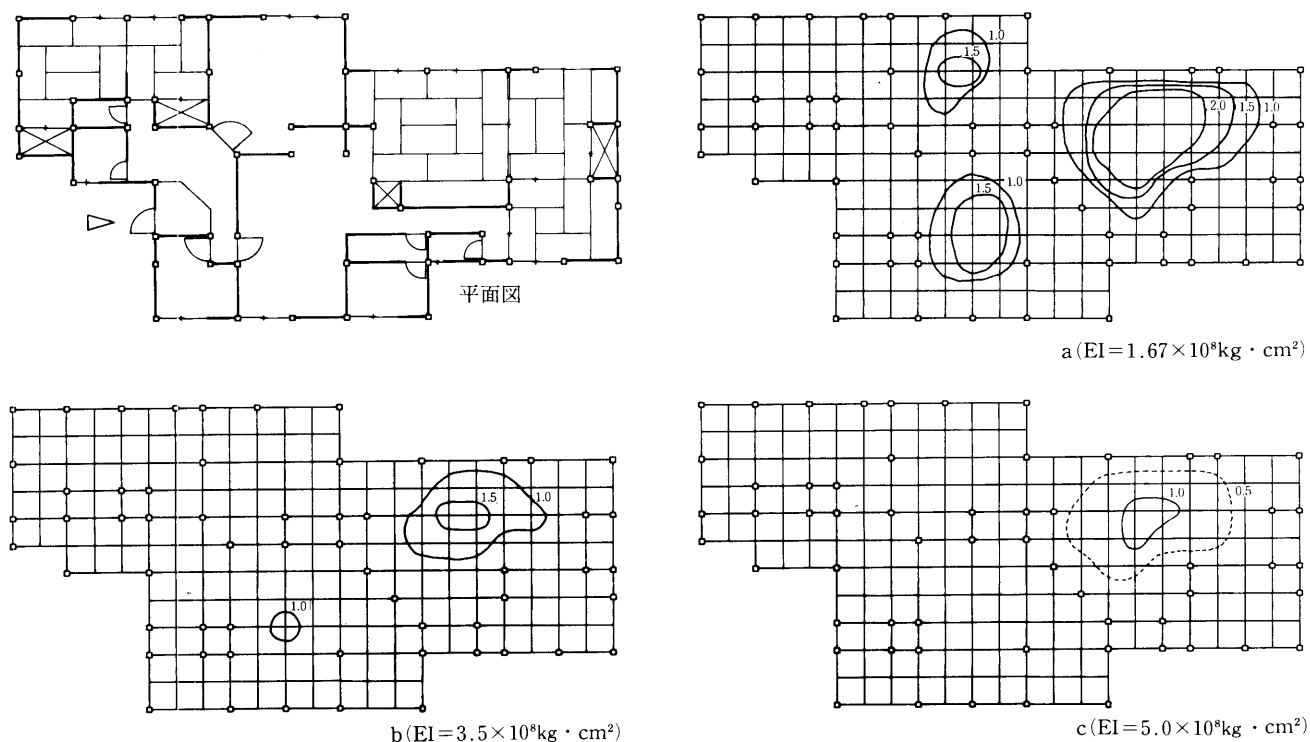


図5-2 一般的プランの適用例 (数値は撓み: cm)

6章. まとめ

6-1 実験と解析のまとめ

昨年度の研究で、各種だば材の基本的な性能及び格子梁の撓み性状を把握することができたので、本年度はとにかく実大で架構を製作してみることを最重点とした。従って、積層梁の曲げ試験や格子梁の撓み試験は、架構の組立て実験を補足する意味で行ったものである。

まず、積層梁の曲げ試験は、ボルトの直径及び接着剤の効果を調べた。ボルトの直径は8mmと12mmを試験したが、その結果本構法の実用範囲での撓みでは、ボルトの直径の影響はほとんどないことが分かった。すなわち、8mmで十分であることが分かった。また、接着剤はこれを併用することにより、剛性が約2倍になることが示された。ただし、昨年度の同条件の実験結果と比較してみると、本年度の積層梁の剛性は約2倍も大きいことが示された。

次に、実大模型の組立て実験を行った。東京江東区潮見の東京木材サービスセンター内の敷地に、格子3層、2階建の実大架構を組み上げ、施工性のデータを得た。

また、組み上げた架構を用いて鉛直加力による撓み試験を行った。その結果、縁辺は上下階の柱により拘束されているので、中央部に撓みが集中して見られることが分かった。そこで、1度解体した部材を用いて一層分を再度組み立て、撓み試験を行った。この実験は、人間を荷重相当として測定したが、支点間を結ぶ周囲の撓みが

大きく、中央部の格子材の撓みは比較的小さいことが分かった。

5章では、木村俊彦の作成した格子梁解析プログラムを用いて、積層梁のデータを適用して解析した結果、等分布荷重状態の場合の格子梁の撓みでは、条件を設定すればシミュレートすることができることが示された。また、この結果をもとに一般の住宅のプランにこの格子梁の適用を試みた。その結果、通常の積載荷重程度であれば、2間程度のスパンでは、撓みを2cm程度に抑えることができることが分かった。

6-2 積層格子梁の可能性と今後の研究課題

小径材の木材を交互に積み重ね、また水平方向にも勝ち負けを交互にすると、格子状の積層梁ができる。この構法は、現在の軸組木造住宅に照らしてみるといくつかの長所が期待できた。

① まず、こうすることによって、平面プランが水平構面に制約を受けることなく、かつ、その改変が容易な建築システムが可能になること。

② 部材の規格化とそれによる製作の省力化、現場作業の合理化が期待できること。

③ 木材需給の点でも、今後大量に生産されるであろう国産小径材の利用方法の一つとなりうること。

④ 日本で大量に植林されているスギやヒノキといった柱材用の木材を構架材として利用できること。

さて、この構法の実現性はいかに積層材を一体化する

かにかかっている。現在想定している構法では、小径材を4段重ねることとしているが、最終的に3段が一体化された程度の剛性が確保できれば実現性は高い。もちろん、接着剤を用いれば、一体化は可能であろうが、改築を考えれば、接着剤の使用は避けたいところである。

研究では、この積層材の一体化に「車知」と「ボルト」を用いることとして、解体も可能なメカニズムとした。この一体化と解体可能とは相反するものである。特に、木材のようなめり込み強度の小さい材料を用いる場合には、困難が予想される。また、小部材の繰り返しで、ジョイントの多さも全体の剛性にとっては、決定的と言える。六角車知とボルト締めを併用することによって、平屋の小屋組、あるいは積載荷重を支える程度の床構面は、実現可能であることが確認された。しかし、2階建以上で柱位置を自由に設定するためには、なお一層の剛性を高めなければならない。ウッドタッチをボルトで補強する現在の構法では限界がある。現段階では、部分的にでも接着剤を使用することは避けられないであろう。接着剤を使用して、なおかつ、改築可能な構法はあり得ないであろうか。

2年間の研究で、撓みに対する剛性ではほぼ実現可能であることが確かめられたが、それは製作精度に大きく依存していること。組立てについては、1個ずつ積んでいくのでは足場や手間がかかってしまい、先組み鉄筋のように、ある程度の寸法であらかじめ組んでおく工夫が求められることが分った。また、柱や壁小屋など、他の建物の部位との納まり、増改築の構法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。

木構造で、本構法のような接合箇所の多い架構の初期剛性を高めるのは容易でない。接着剤を使用しないとすれば、ある程度の撓みは覚悟しなければならない。むしろこの構成は引張り応力の生じる箇所が適しているかもしれない。例えば、平屋建の屋根に用いるなどの利用は検討に値する。

数値解析は、うまくシミュレーションできたとは言いがたい。やはり、弾性範囲だけでは木造を解析することはできないようである。

最後に、わずかな研究費の中でほとんどボランティアで協力して下さった多くの方々に感謝致します。

〈研究組織〉

主査	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
	大橋 好光	東京大学工学部助手・工博 (幹事)
	松留慎一郎	東京大学工学部助手・工博
	望月 一郎	小堀住研(株) 中央研究所所長
協力	安達 文男	東京大学工学部建築学科 坂本研究室・技官
	山本 龍彦	明治大学工学部建築学科 内田研究室・学生
	宮腰 利夫	同 学生
	益田 勝明	同 大学院生
	小倉 修二	同 学生
	愛宕 弘幸	同 学生
	高橋 清泰	同 学生
	関谷 浩史	同 学生
	木村 俊彦	木村俊彦構造研究事務所・所長
	征矢 隆	㈲日本住宅・木材センター総務部長
	野田頭勝広	東京木材サービスセンター 所長補佐
	太田 忠男	大鹿振興(株) 研究技術部次長
	太田 俊昭	同 係長
〈研究費〉		2,500,000円