

木材強度・木質構造研究会  
木質構造研究の現状と今後の課題

1986年10月2日  
東京 木材会館

研究の現状と課題

材料・接合 (林業試験場) 小松幸平  
構造体構成要素 (林業試験場) 神谷文夫

問題提起と総合討論

建築構造学の立場から (東大工学部) 坂本功  
設計者の立場から (伊藤邦明都市  
・建築研究所) 伊藤邦明

総合討論

司会 (林業試験場) 平嶋義彦

## 木質構造研究の現状と今後の課題

### I 材料・接合に関する研究の現状と今後の課題

農林水産省 林業試験場 木材利用部 構造性能研究室  
小松幸平

#### 1. はじめに

表題のように大きなテーマが木材強度・木質構造研究会のテーマとして選ばれたことは異例のことであり、その背景について思い当たるところを初めに少し触れてみたい。

木材学会が林学会から独立して30年以上経つ今日、木材強度の研究が目指すべき目標は何であるか？、我々木材強度研究者は木質構造の研究に対してどのような役割を演じられるのか？、といった自問が少なからぬ研究者の心の中にあるように思える。

幸いにも、現在、木構造は一種のブームであり、雑誌等で、木材・木構造が取り上げられる機会も多くなってきた。このような時世にあって、木材強度・木質構造の研究がどのような現状にあり、今後、どのような面で木質構造と関わっていけるのかを、建築の専門家を交え、志を共にする研究者の集りにおいて、議論し、確認し合うことは大切なことであると考えらる。

1984年5月、ニュージーランド(NZ)オークランド市で、'84 Pacific Timber Engineering Conference という木材強度と木構造に関する国際会議が開催された。この大会は、NZ Timber Design Society という小さなグループが企画・主催したのであるが、NZ中の木構造関係者200名以上、国外から90名以上の研究者が参加し、会議は大成功であった。我が国からは今回、話題提供および司会を担当することになった林業試験場の3人、ならびに坂本先生が出席され、杉山先生がゲストスピーカーとして招待された。我が国と材料事情が違うとはいえ、木構造がごく平然と、確かな技術的裏付けの下に、しかも他を圧倒する迫力で建てられている現状を目のあたりにしたあのカルチャーショックが、今回の研究会の企画に少なからぬ影響を及ぼしていることは確かである。

また、84' P T E C に先立つて、1983年10月、アメリカのミルウォーキーにおいて、Structural Wood Research と名打った研究会が開かれた。この研究会では北米を中心とする木材強度、木質構造の研究の現状と今後の課題について広範囲な検討がなされた。今回の研究会は、その会議を雛形として企画されたものである。

#### 2. 材料

##### 2.1 構造設計に関連したトピックス

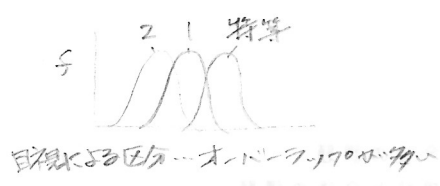
##### 2.1.1 ストレスグレーディング(応力等級区分)

天然材料である木材は材質の変動が大きいため、その材質特性に応じて何種類かの等級に区分し、目的に合わせて使用していくことが合理的である。特に、構造用に使用される製材については、最終要求性能である「強さ」と、「剛性」に応じて応力等級区分されるべきである。しかしこれまで、構造設計を要求されるような木構造の発展が見られなかったこともあって、我が国の実情は必ずしもそうはなっていない。

現在、我が国の代表的グレーディングルールである「製材の日本農林規格(最新版:昭和56年農林水産省告示第406号)」いわゆるJASでは、おもに材面の欠点等に基づいて構造用製材を2等、1等、特等の3つの等級に区分している。許容応力度については、一応想定はしているものの(注:特等は1等の4/3, 1等は施行令の値、2等は考慮せず)、公的には規定はされていない。これに対して、建築基準法施行令(第89条)では、木材の許容応力度を樹種ごとに規定しているが、等級について言及はしていない。

諸外国の規格では、等級ごとに許容応力度が決められているのが当たり前であり、設計者は要求性能

一応JAS等級でうらましている。



に応じて合理的な材料選択が可能となる。我が国でもこのような応力等級と許容応力度の連動した統一規格の制定が望まれる。

応力等級に関する最近の我が国での研究例を、筆者の知る範囲で、「文献」に示す。現在のJAS等級区分がどの程度応力等級区分法として利用可能かという例を図-1 a), b)に示す。

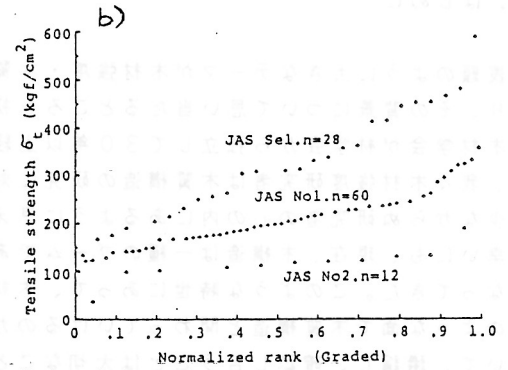
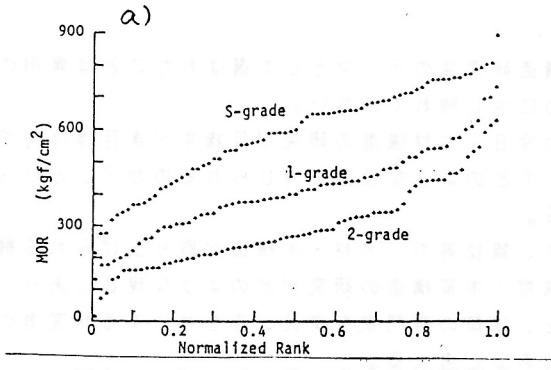


図1-a) ベイツガ正角の曲げ試験 [1]

図1-b) エゾマツ板材の引張試験 [2]

図から明らかなように、JASによる等級と強度の大小は妥当な対応関係を示しており、JASによる応力等級区分が一定のレベルで行なわれていることを示唆している。ただし、許容応力度の決定において重要となるのはランクの5%ile付近の値であり、許容応力度の決定のためには、後述するイングレートテストのように、低品質側に着目した材質試験が今後必要であろう。

一方、JASのような視覚的等級区分では、ある程度の等級区分は行なえるが、等級間でオーバーラップする部分ができる等の不十分な面もあり、これを補う、もしくは、これに代わる手法として1950年代の後半から機械的等級区分の研究が北米、イギリス、オーストラリアを中心に盛んとなった。その方法には幾つかあるが、主に強度とヤング係数との高い相関性を利用して、ヤング係数から強度、ひいては許容応力度を推定するものが一般的である [20]。我が国でも機械的等級区分に関する研究が集成材ラミナの分野で進められており、視覚的等級区分に比べ、バラツキの少ない等級区分ができることが示されている [11, 12, 13]。なお、製材品については、主として曲げ強度とヤング係数の関係が実大材について求められており [4]、MOEで等級区分した場合、標準偏差が小さくなって、等級の統計的下限值が目視による場合よりも高くなることが明らかにされている [9]。

2. 1. 2 許容応力度・材料強度・強度の統計的下限值

建築構造設計の実務においては、建築基準法施行令第89条に規定されている許容応力度が使われるが、「許容応力度」の意味する所を理解するためには、建築学会編木構造設計規準・同解説における許容応力度の定義が参考となる。それによると、例えば普通構造材の繊維方向許容応力度は次式で算定される。

$$s f = 0 F \times 2/3 \times \alpha \quad (\text{短期}) \dots\dots\dots 1)$$

$$L f = \beta \times s f \quad (\text{長期}) \dots\dots\dots 2)$$

ここで、

0 F : 無欠点小試験体の強度分布における下限品質。かつては平均値の3/4を探っていたが、最近では4/5を探るようである。また、諸外国の例に習って、強度を弱い順にランク付けした場合の5%ile値を統計的下限值として代用する場合もある。

2/3 : 曲げ、圧縮の場合は比例限度を、引張、せん断の場合は単に2/3を意味する。

α : 欠点による低減係数。応力の種類によって異なる。

β : 長期と短期の比 (= 1/2)

曲げ許容応力度 = 引張許容応力度 (無欠欠小試験体)  
> > (実材)

欠点を含む実大材の場合、 $0.05 F \times \alpha$  すなわち、グループとしての下限品質を、まとめて、 $F_{0.05}$  と表わせば、欠点を含む実大材の許容応力度は；

$$s f = F_{0.05} \times (2/3) \quad (\text{短期}) \dots\dots\dots 3)$$
$$L f = F_{0.05} \times (1/3) \quad (\text{長期}) \dots\dots\dots 4)$$

となる。

一方、建築基準法施行令第95条では、「材料強度」なる指標を定めているが、その値は建築基準法施行令第89条で定められた木材の長期許容応力度の3倍である。仮に、この比率が建築学会が定めた許容応力度にも適用できるものと仮定すれば、5)式となる。

JAS1級でも 5%ile  
値でみると約10%の  
outにはる。

$$F = [\text{材料強度}] \div 3 \times L f = F_{0.05} \dots\dots\dots 5)$$

つまり、最近学会発表等でよく使われる「材料強度」という指標は、大ざっぱな目安として、諸外国で使われている統計的下限值 5%ile値  $F_{0.05}$  に相当するものと考えることができる。ところで、「材料強度」なる指標の使い途であるが、鋼材などの例[14]から類推すれば、大地震を想定した材料の終局耐力のチェックに使われるのが本筋であろうと考えられる。しかし、木構造の場合、そのような2次設計は今の所要求されていないので、現状では、ある樹種グループが最低限有すべき強度の参考値という意味合いが強いようである。

### 2.1.3 保証荷重(ブルーロード)試験

最近注目されている概念に保証荷重(ブルーロード)試験というものがある。諸外国での実施例からみて、この試験は、以下の2つに分けて考えたほうが誤解が少ないように思われる。

- (1) 視覚的もしくは機械的に等級区分された材料が、適切な許容応力度を有しているかどうかをチェックするため、統計的下限值付近の応力を与えて低品質側の強度分布を調べる試験。
- (2) ある材料が特定の用途に使用できるかどうかをチェックするため、あるいは基本的材質のよく分かっていない未利用樹種を構造用にする際、実際の使用条件に近い荷重(応力)を与え、破損しなかった材料については負荷した荷重(応力)に耐えることを保証する試験。

(1)は、Madsen教授が提唱した”In-Grade Test” [15, 16, 17]において、視覚的に等級区分されたディメンションランバーの低品質側強度分布を調べるため用いられて有名になったもので、北米では機械的に等級区分された製材(MSR)の品質管理(QC)用にこの保証荷重試験が組込まれている[18]。

一方、(2)は、フィンガージョイント材のように、破壊的手段以外に品質を評価することが困難な材料について、少なくとも保証荷重レベルまでの耐力を保証するために行なわれる試験である。保証荷重試験というのは、構造安全性の面からは有益であるが、「商品」の数パーセントが確実に破壊するため、材料供給側にとってはメリットを積極的に評価しにくいという反面がある。したがって、経済的側面を留意しつつ、保証荷重試験において与えるべき荷重レベルをどう考えるかが、保証荷重によるダメージの問題[15, 19]と絡んで、大変重要な問題となってくる。

### 2.1.4 今後の課題

- 1. 等級区分と許容応力度の一体となった統一規格の制定
- 2. マイクロプロセッサを活用した廉価で、軽量で、我が国の実情にあったストレスグレーディングマシンの開発
- 3. 低品質側に着目した全国規模的なイン・グレードテストの実施(1.に関連して)
- 4. 保証荷重試験の必要性和そのメリット、デメリットに関する総合的検討

グレーディング ランクはろ着落でよい。  
むしろグレーディングの信頼性を高めることが必要。

水分(含水率)の問題かぬけています

時代によって基礎材質の異なる木材が市場に出てくる。  
産地

<材料：構造設計に関連したトピックス>

- [ 1 ] 中井 孝、海老原 徹、田中 俊成：“在来構法構造用製材の応力等級区分（1）ベイツガ正角の等級と曲げ強度”，第34回木材学会発表要旨集、p. 285、1984
- [ 2 ] 中井 孝：“構造用製材の実大縦引張強度（1）市販エゾマツ板材（1by6）の実大引張試験”、日本建築学会大会学術講梗概集、pp. 2675-2676、1984
- [ 3 ] 中井 孝：“構造用製材の実大縦引張強度（3）欧州アカマツ平割材の縦引張り試験”、日本建築学会大会学術講梗概集、pp. 1261-1262、1986
- [ 4 ] 中井 孝：“国産造林木の材質—スギ正角材の実大曲げ強度—”、木材工業、Vol. 39-11、pp. 42-46、1984
- [ 5 ] 中井 孝、海老原 徹：“在来構法構造用製材の応力等級区分（3）スギ平角の実大曲げ試験”，第35回木材学会発表要旨集、p. 88、1985
- [ 6 ] 丸山 則義、有馬 孝礼：“国産造林木の応力等級に関する研究”、日本建築学会大会学術講梗概集、pp. 2047-2048、1982
- [ 7 ] 丸山 則義、有馬 孝礼：“国産造林木の応力等級に関する研究（I I）”、日本建築学会大会学術講梗概集、pp. 2223-2224、1983
- [ 8 ] 飯島 泰男：“シベリア産カラマツ材の強度性能に関する研究”：富山県木材試験場研究報告、No. 1、1983
- [ 9 ] 飯島 泰男、中谷 浩：“実大構造用材の強度（I I I）”，第35回木材学会発表要旨集、p. 87 1985
- [ 10 ] 飯島 泰男：“構造用製材の曲げ強さ予測法について”、日本建築学会大会学術講梗概集、pp. 1265-1266、1986
- [ 11 ] 倉田 久敬、山本 宏、工藤 修、長原 芳男：“エゾマツ208D材の強度性能（2）—機械的強度等級区分のころみ—”，第26回木材学会発表要旨集、p. 114、1976
- [ 12 ] 藤井 毅：“集成材のストレスグレーディングシステム（1），（2）”、木材工業、Vol. 35-1 & 35-2、pp. 8-14 & pp. 15-20、1980
- [ 13 ] 倉田 久敬、山本 宏、長原 芳男、高橋 政治、川口 信隆：“道産針葉樹による枠組壁工法構造用製材の強度性能”，林産試研報、第67号、pp. 4-33、1978
- [ 14 ] 日本建築学会編：“地震荷重と建築構造の耐震性”，1976
- [ 15 ] Madsen, B. : "In-Grade Testing Degree of Damage Due To Proof Loading of Lumber in Bending" Structural Research Series, Report No.17, U.B.C, 1976
- [ 16 ] Madsen, B. Nielsen, P.C. : "In-Grade Testing. Accuracy and Confidence Computer Simulation" Structural Research Series, Report No.21, U.B.C, 1978
- [ 17 ] Madsen, B. : "In-Grade Testing- Problem Analysis ", F.P.J. Vol.28, No.4, pp.42-50, 1978
- [ 18 ] Western Wood Products Association: "Machine Stress - Rated Western Lumber. Products Specification and Procedure Certification and Quality Control , C/QC Procedures 102.86,
- [ 19 ] (財)日本住宅・木材技術センター：“性能標準・木質材料のグレーディング”技術開発推進事業報告書、1986
- [ 20 ] (財)日本住宅・木材技術センター：“性能標準・縦接合（内容はグレーディング）”技術開発推進事業報告書、1985

## 2. 2 材料科学に関連したトピックス

### 2. 2. 1 強度に及ぼす節の影響

木材の強度に及ぼす節の影響は、古くから研究されている [1]。畑山の最近の研究 [2] によれば、節を単なる断面欠損として扱うこれまでの考え方 [1, 3] は、時として危険側の推定を与え、むしろ、節の周辺の繊維傾斜の分布に着目した強度推定法がより正確に実大材の強度を推定し得ることが示されている [2]。畑山の方法は、まず節周辺の繊維傾斜分布を実験式で表現する。次に、節周辺の木材を仮定の薄層に分割し、各層のヤング率をハンキンソン式で求め、仮定したひずみ分布より各層の応力を求めた後、その総和から実大有節材の耐力を求めるものである。

平嶋は [4] は畑山の方法を有節ベニヤの強度推定に応用し、荷重-ひずみの非線形関係も含めて、理論と実験がよく合うことを示している。Goodman & Bodig [5] は節周辺の繊維傾斜分布を流体力学的相似で近似し、最終的には3次元有限要素法で有節材の引張強度を解析する数学モデルを提唱している。Bier [6] は、基本的には節周辺の繊維傾斜分布に着目しているが、繊維走行が節を中心とする同心円の接線方向に分布していると仮定して、5プライ構造用合板の剛性と強度を推定する数学モデルを提案している。

一方、飯島 [7] は、節を等価なクラックとにおいて線形弾性破壊力学 (Linear Elastic Fracture Mechanics) を適用する Pearson [8], Boatright & Grareet [9] らの考え方を採用して、エッジノット材の曲げ強度に及ぼす節の影響を計算している。それによると、等価クラック理論は現行の ASTM による断面欠損評価式 [10] に比べ、より実験値に近い強度推定を行なえるようである。

### 2. 2. 2 強度に及ぼす切り欠きの影響

木構造設計規準では、引張側に切り欠きを有する木材の曲げ強度の算定は、切り欠き部の正味断面係数  $Z_0$  の45%を取るように規定している [11]。これに対して、切り欠きを応力集中源と考え、切り欠き底の応力特異性に着目した平井の研究 [12] によれば、引張側に深さ  $d$  の切り欠きを有する木材梁の最大モーメント  $M_c$  は次式で計算される

$$M_c = \tau A / (d^{0.45} + 0.17d^{0.10}) \dots\dots\dots 6)$$

ここで、

- $\tau$  : ブロックせん断試験で得られるせん断強度
- $A$  : 試験体寸法等に関係する係数
- $d$  : 切り欠き深さ

このように、モーメントを受ける切り欠き底の破壊の基準値として、ブロックせん断試験で得られるせん断強度を用いることに関しては、ブロックせん断試験に関する大草 [13] の応力解析の結果からも十分合理的であると考えられる。

なお、オーストラリアの木構造設計規準である SAA Timber Structures Code [14] では、図2のような切り欠きを有する木材梁の設計式として、切り欠き底の応力特異性を考慮し、ブロックせん断試験で得られるせん断強度を基準値とする式-6) に類似した設計式を採用している。

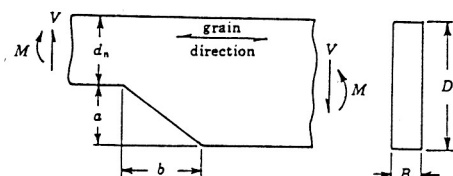


図2 切り欠き梁の形状 (AS 1720 [14])

### 2. 2. 3 今後の課題

1. 欠点（節、繊維傾斜、割れ）を有する木材の強度性状を表現し得る数学モデルの設定
2. 材料常数等のパラメーターの分布を考慮に入れた数学モデルによるコンピューターシミュレーションと実験的検証
3. 線形弾性破壊力学の実際的応用（例：オーストラリア規格等）

#### <材料科学的研究>

- [ 1 ] 森 徹：“木材の曲げ破壊係数に及ぼす節の影響に関する研究”，日本建築学会論文報告集、No. 13, pp. 8-16, 1939
- [ 2 ] 畑山磯男：“有節材の強度推定に関する研究”，林業試験場研究報告、No. 326, pp. 69-167, 1984
- [ 3 ] たとえば、Forset Products Laboratory, U.S. Dep. of Agr.: Wood handbook, p. 6-4, 1974
- [ 4 ] 平嶋義彦、Parker, J.R.; Bier, H.：“合板強度推定モデルと実験による検証”，第35回日本木材学会大会研究発表要旨集、p. 100, 1985
- [ 5 ] Goodman, J.R.; Bodig, J.：“Mathematical Model of the Tension Behavior of Wood with Knots and Cross Grain”，First International Conference on Wood Fracture, pp. 53-61, 1978
- [ 6 ] Bier, H.：“Radiata pine plywood: A theoretical prediction of the bending properties of structural plywood”，FRI Bulletin No. 54, FRI, NZ, 1983
- [ 7 ] 飯島 泰男：“シベリア産カラマツ材の強度性能に関する研究”，富山県木材試験場研究報告、No. 1, 1983
- [ 8 ] Pearson, R.G.：“Application of Fracture Mechanics to the Study of the Tensile Strength of Structural Lumber”，Holzforschung, Bd. 28, pp. 11-19, 1974
- [ 9 ] Boatright, S.W.J.; Garrett, G.G.：“The Effect of Knots on the Fracture Strength of Wood (I and II)”，Holzforschung, Bd. 33, pp. 68-77, 1979
- [ 10 ] ASTM D-245：“Standard Methods for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber”，1974
- [ 11 ] 日本建築学会：“5 部材の設計”，木構造設計規準・同解説、丸善、1973
- [ 12 ] 平井卓郎：“切り欠きを持つ木材梁の曲げ剛性と耐力”，北海道大学農学部演習林研究報告、第37巻 pp. 759-788, 1980
- [ 13 ] 大草克巳：“木材のせん断に関する弾塑性論および破壊力学的研究（第3報）椅子型（JIS）せん断試験体の応力特異性とエネルギー解放率”，鹿児島大学農学部学術報告、第30号、pp. 201-215, 1980
- [ 14 ] Standards Association of Australia: AS 1720, “Draft Australian Standard for Rules for Use of Timber in Structures known as SAA Timber Structures Code, 1983

## 2.3 構造用集成材

### 2.3.1 大断面集成材の規格

我が国の集成材工業は1950年代に誕生し、現在企業数約200社、生産量約30万 $m^3$ といわれているが、その大半は断面が10.5cm角程度の造作・構造用柱の生産が中心である[1]。したがって、集成材に関するJAS、製造基準等も、これら我が国固有の需要にあった内容となっている。しかし、最近我が国でも僅かながら大断面構造用集成材の需要が高まりつつあり、民間、学会を通じて大断面集成材を対象とした、JAS、製造基準の制定、ならびに学会規準の改定作業が進められている。今回制定されようとしている大断面集成材のJASで目新しい点は、ロジポールパイン、ボンデローサパインといった、米国产樹種が針葉樹B-2グループに入ること、集成材の曲げ試験結果の算定に「寸法調整係数」が導入されること、そして、外層用ラミナに対して曲げ強度試験を課すこと等であろう。現時点で詳しいことは分からないが、その他については集成材の日本農林規格(農林水産省告示第566号、1982年)における構造用集成材の規格をほぼ踏襲するようである[2]。

### 2.3.2 大断面集成材の曲げ性能に及ぼす寸法効果

集成材の曲げ性能は、一般的には、ラミナの力学的性質、節の位置と大きさ、そしてラミナの断面内配置が分かれば、力学的に等価な曲げ剛性並びに断面係数を計算することによって、ほぼ推定可能であると言われている[3]。しかし、実際には、断面が大きくなると、見掛けの強度が低下する、いわゆる「寸法効果」と言われる現象が見られる。この原因については、現時点では2つの理由が考えられる。1つは、Bohannan[4]が最初に提唱したように、断面が大きくなると欠点が含まれる確率も大きくなり、集成材としての破壊確率も高くなるというもので、今回制定されるJASでもこの説に基づいて誘導される式(7)が「寸法調整係数 C」の算定の基礎となっている。

$$C = (30/H)^{1/9} \dots\dots\dots 7)$$

H: 梁せい (cm)

しかしながら、集成材はラミナの性能と要求性能に応じた人為的なラミナ配置が可能である。また、積層数が増えると逆に欠点の分散効果もあるので、上述した理由だけで「寸法効果」の総てを説明するのは難しい。いま1つ考えられる理由は、梁せいが増すと最外層ラミナの応力分布が純粋引っ張りに近くなって、引張破壊の可能性が大きくなるのではないかと考えるものである[1, 5, 6]。この仮説の根底には、欠点を有する実大材の場合、その引張強度は曲げ強度の0.5から0.7程度しかないという最近の実験データがある。特に、フィンガージョイント(FJ)で縦接合したラミナを引張側最外層に配置した大断面集成材の曲げ性能はFJラミナの引っ張り性能に支配されることは実験的にも明白であり[5, 6, 22]、式(8)はその考えに基づいて大断面集成材の曲げ強度(MoR)を推定した式である[1, 5, 6]

$$MoR = Ft [n / (r - 1 + n)]$$

or

$$= Fb [nr / (1 - r + nr)] \dots\dots\dots 8)$$

ただし、Fb : ラミナの曲げ強度 Ft : ラミナの引張強度  $r = Ft / Fb$  n : 積層数

図3は式(8)の適合性を実験結果との対比で示したもので、梁せいが大きくなると、大断面集成材のMoRはラミナ単独の引張強度に収束していく傾向が分かる。なお、この仮説は考え方が単純で実用的ではあるが、内層ラミナの材質が極端に悪い場合は危険側の推定を与える可能性もあり、その場合はヤング係数の断面内分布を考慮する必要がある。

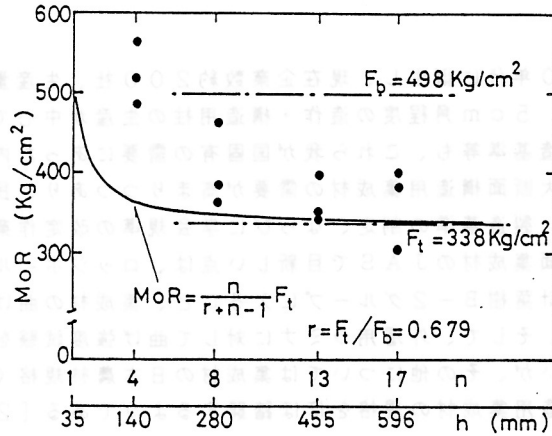


図3 FJラミナを引張側最外層に有する集成梁の曲げ強度と積層数（梁せい）の関係

2.3.3 集成材の断面設計への確立論の応用

上述したように、集成材の曲げ性能は、ラミナの力学的性質、欠点の位置と大きさ、そしてラミナの断面内配置等からほぼ推定可能である。しかし、いずれのパラメーターもある種のバラツキを有するもので、それらを確率変数と見なして集成材の曲げ性能を推定しようとする試みが見られる。倉田 [7] は、ストレスグレーディングマシンで測定されたラミナのヤング係数を正規分布に従う確率変数と見なし、沢田の提案する集成材のMoR推定法 [3, 7] を介して、集成材のMoRとMoEの下限信頼限界を算定する方法を提案した。この研究は幾つか考えられる集成材の断面設計法の中の1つとして発表されたもので、基本的思想は、目下我が国で大いに注目されているPBDM (Probabilistic Beam Design Method) と同じであると考えられる。PBDMに関して筆者の知るところは、他に、中村 [8] , Foschi & Barrett [9] , Bender et al [10] の研究のみで、肝心のWeyerhaeuser社の研究は現時点では公表されていない。

2.3.4 集成材の耐火性能

大断面集成材の耐火性能に関するこれまでの研究を文献 [11~21] に示す。それらによると、大断面集成材は、火災時にあっても表面に形成される炭化層の遮熱力によって内部が保護されるため、燃焼あるいは、耐力低下の進行（炭化速度の平均は0.6mm/分）は比較的穏やかであると言われている [20]。そのため、大断面集成材による架構が火災にあった場合、集成材は可燃物量としては大きいですが、最後まで焼け残り、火事の激しさに寄与する度合いは非常に少ない [12]。

火災が生じた際、集成材はどのくらいの時間許容荷重を保持できるかという問題は、実際的に重要な問題である。この時間、すなわち、安全燃焼時間はImaizumi [11] によって初めて解析されたもので、式(9)で算定される。

$$t = (1 - d / D) (D / 2 \beta) \dots \dots \dots (9)$$

ただし、 $\beta$ は炭化速度、 $D$ は火災前の梁せい、 $d$ は火災後の梁せいである。ここで、 $d / D$ は梁の幅 $B$ とせい $D$ の比 $B / D$ および、火災後と火災前の集成材の強度の比 $\alpha = f / F$ からなる3次方程式を満たす実根である [14]。実際上の問題としては、 $\alpha$ の値が不確定で、その仮定次第でかなり危険側の時間（安全燃焼時間としては、長時間側）を推定する場合がある。この問題に対して、 $\alpha$ の値を確率変数と見なし、モンテカルロシミュレーションによって安全燃焼時間を推定しようという試みがBenderら [10] によって最近発表された。彼らの手法は、上述したPBDMの考え方を集成材の耐火性能の解析に導入したもので、注目される。

一方、集成材の耐火性能に関する研究は、最近では接合部の耐火性能の方にも力点が置かれている。  
 図4は中村らによる、集成材継ぎ手の載荷加熱実験[18, 19, 21]の結果の一例を示す。試験体は、湾曲集成材による3ヒンジアーチの継ぎ手として最も一般的に用いられている通しボルトによる鋼板添え板継ぎで、厚さ20mmの埋め木の存在によって、30分加熱後のたわみは埋め木のない場合のその1/3に収まっていることが分かる。

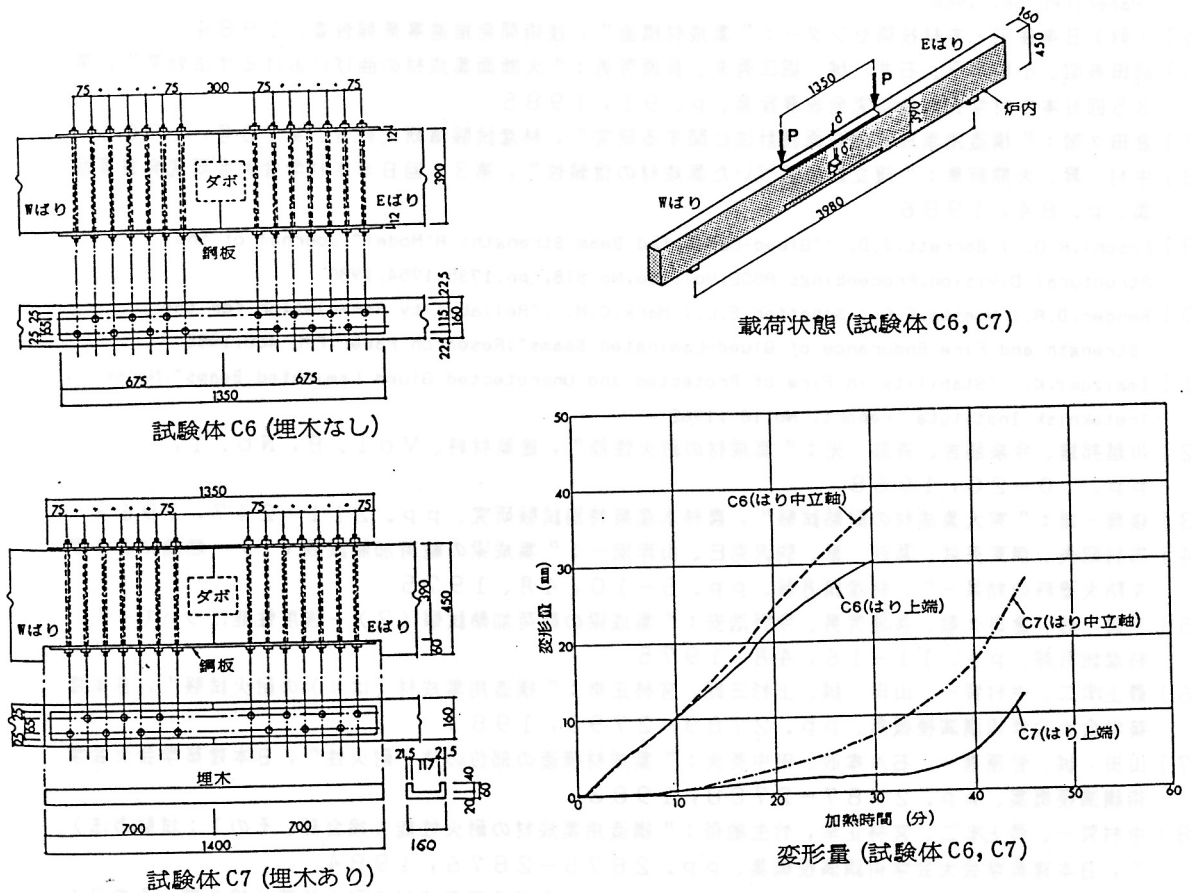


図4 集成材継ぎ手の載荷加熱試験（中村[21]より）

### 2.3.5 今後の課題

1. ラミナのヤング率、フィンガージョイント、節、繊維傾斜等の存在と、それらのバラツキを考慮に入れた集成材力学モデルの設定と、強度性能のシュミレーション
2. ラミナの保証荷重試験の必要性和そのメリット、デメリットに関する総合的検討
3. 高温下での材料特性の把握と集成材の燃焼モデル（有限要素法等）の設定
4. 集成材の燃焼モデルによる耐火性能のシュミレーション

<構造用集成材>

- [ 1 ] (財)日本住宅・木材技術センター：“集成材構造”，技術開発推進事業報告書、1985
- [ 2 ] 大断面集成材の日本農林規格設定等に関する調査報告書、1985(草案)
- [ 3 ] 杉山英男：“8 集成材”，建築構造学大系22「木構造」(彰国社)，1971
- [ 4 ] Bohannon, B.：“Effect of Size on Bending Strength of Wood Members”, U.S. Forest Service Research Paper, FPL 56, 1966
- [ 5 ] (財)日本住宅・木材技術センター：“集成材構造”，技術開発推進事業報告書、1984
- [ 6 ] 前田典昭、小松幸平、石井 誠、堀江秀夫、長原芳男：“大断面集成材の曲げにおける寸法効果”，第35回日本木材学会大会研究発表要旨集、p. 91, 1985
- [ 7 ] 倉田久敬：“構造用集成材の断面設計法に関する研究”，林産試験場研究報告、第70号、1981
- [ 8 ] 中村 昇、大熊幹章：“確立論に基づいた集成材の信頼性”，第36回日本木材学会大会研究発表要旨集、p. 84, 1986
- [ 9 ] Foschi, R.D. ; Barrett, J.D.：“Glued-Laminated Beam Strength: A Model”, Journal of the Structural Division, Proceedings ASCE, Vol.106, No. ST8, pp.1735-1754, 1980
- [ 10 ] Bender, D.A. ; Woeste, F.E. ; Schaffer, E.L. ; Marx, C.M.：“Reliability Formulation for the Strength and Fire Endurance of Glued-Laminated Beams”; Research Paper, FPL 460, 1985
- [ 11 ] Imaizumi, K.：“Stability in Fire of Protected and Unprotected Glued Laminated Beams”, Norsk Treteknisk Institute report, No.18, 1962
- [ 12 ] 川越邦雄、今泉勝吉、斉藤 光：“集成材の耐火性能”，建築材料、Vol. 8, No. 1, pp. 10-20, 1968
- [ 13 ] 後藤一雄：“実大集成材の耐熱試験”，農林水産業特別試験研究、pp. 211-247, 1969
- [ 14 ] 布村昭夫、伊東英武、葛西 章、駒沢克巳、山岸宏一：“集成材の載荷加熱試験(1) - 燃焼におよぼす防火塗料の効果 -”，林産試月報、pp. 5-10, 4月、1975
- [ 15 ] 工藤 修、倉田久敬、長原芳男、今野浩安：“集成材の載荷加熱試験(2) - 強度性能について -”，林産試月報、pp. 11-16, 4月、1975
- [ 16 ] 最上宏二、中村賢一、山田 誠、上杉三朗、宮林正幸：“構造用集成材(はり)の耐火試験”，日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2789-2790, 1983
- [ 17 ] 山田 誠、菅原進一、石川孝政、田中英夫：“集成材構造の部位の防・耐火性”，日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2787-2788, 1983
- [ 18 ] 中村賢一、最上宏二、宮林正幸、竹生敏俗：“構造用集成材の耐火性能(接合部、その1:試験方法)”，日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2875-2876, 1984
- [ 19 ] 中村賢一、最上宏二、上杉三朗、宮林正幸、竹生敏俗：“構造用集成材の耐火性能(接合部、その2:試験結果)”，日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2877-2878, 1984
- [ 20 ] 中村賢一、最上宏二、宮林正幸、竹生敏俗：“構造用集成材の耐火性能(第4報)”，日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 631-632, 1985
- [ 21 ] 日本建築学会・木構造分科会：“建築家は大規模木造建築に挑戦を”，昭和60年度木構造部門パネルディスカッション資料、p. 11, 1985
- [ 22 ] 丸山 則義、有馬孝礼：“フィンガージョイントにより縦接合された構造用集成材の曲げ性能”，日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2683-2684, 1984

# 問題提起 - 建築構造学の立場から (不負構造研究の現状と今後の課題)

東大 工学部 坂本 功

## 1. 建築構造における木材・木質構造

### 1) 構造材料としての木材

鋼材との比較

建築構造材としては鋼材の方がすぐれている。

ねばりがある, Creepがある, 変位が安定している. 変位をコントロールできる.

### 2) 構造設計体系と木質構造

木材の安全性と信頼する研究のうらづけが不充分.

要求性能としての荷重・外力の把握, 長期・短期, 保有力, 変形制限

## 2. 日本における木質構造

### 1) 自然的条件

地震・台風, 多雨・多湿

日本における最大の問題は強烈な地震力.

大きな水平耐力の要求, 耐久性の確保 (備不充分)

### 2) 社会的条件

高密度人口, 都市集中化

不燃化の要請

### 3) 歴史的条件

木造建築の伝統

理論的計算がなくとも建っている歴史的

長期が足かせの工学的扱いとの整合

最近初め

### 4) 木材のおかれた立場

国産材・外材, 鋼材との価格競争

### 5) 木質構造のおかれた立場

大規模木造の実績・研究の乏しさ

大構造

最近の大規模

→ 間市, 彦根村

設計シンド=0.2

(自重の1.2倍に耐える)

建築的におかれた

デザインでなく

では受け入れ

られない.

安全の保障が必要.

研究が進んでいない.

木構造の

木構造の技術

レベルはまだ低い.

→ "木構造は甘やかしている."

## 3. 構造性能各論

### 1) 素材としての木材

ばらつきの評価とコントロール, クリープの扱い

### 2) 2次加工材 (集成材・合板...)

規格の整備, 各種処理木材・複合材・組立材の実用化

### 3) 接合部

鉄鋼・コンクリートに比べて木構造は接合部の種類が多い.

正負繰返しに対する挙動 (ductility, degrading, energy 吸収)

各種接合方法

### 4) 接着接合

信頼性・耐久性, 現場接着

## 4. 生産・流通

木造建物

3000m<sup>2</sup>以下

全体13m、軒高9m以下)で概ね、

500m<sup>2</sup>以上は構造計算の必要あり。

木構造設計基準法の  
3章3条

耐久性・経年変化を含めた総合的な「グレード」(指針)を示して欲しい。  
枝葉腐  
諸性質

集材の信頼性確保のための工場認定制度をつくらねば

# 木 構 造 の 課 題

—木造建築再興のために—

坂 本 功\*

## はじめに

木造建築に復活のきざしが見えてきた。これは喜ばしいことである。しかし、手離して喜んでいくわけにはゆかない。この復活を着実なものにするためには、解決すべき課題が山積している。ここでは、木造建築の構造上の問題に限って、いくつかの問題点を考えてみたい。

### 1. 木造住宅の構造設計法の高度化

木造の在来構法住宅に関しては、構造的な規定が比較的ゆるやかである。第一、建前はともかく、実際には構造計算をしなくてよい。その背景には、在来構法が、日本の伝統的な木造建築の流れを汲むものであり、常識的に作れば、構造的に大過ないからである。もっとも、耐震性に関しては、耐力壁を所定量設けることが要求されている。しかしそれとて、力学的な構造計算を行う必要はなく、面積と長さの計算だけでできるようになっている。

このような、構造的検討に対する特殊な扱いは、木質系プレハブ住宅と枠組壁工法（ツーバイフォー）住宅にも及んでいる。このことは、これらの新しく開発された、あるいは外国から導入された構法の構造設計に、自由度と制約を与えている。

まず、自由度の方の側面としては、架構全体としての構造計算一応力計算と断面算定一をせずすませうること、地震力・風圧力の水平力に対する検討が、在来構法と同じく、壁量計算でよいこと、等が挙げられる。このことは、複雑な架構を許し、ひいては、平面計画の自由度をもたらしている。

しかし構造計算ぬきということは、木質系の構造と、他の構造の客観的な構造成能の比較を試み

るとか、あるいは異種の構造と組み合わせさせた構造（いわゆる混構造）の開発を企図するとかすると、早速再検討されなければならない。経験的な知恵は貴重であるし、壁量計算という方法は便法として優れている。ただ、それらに甘えて、力学的な検討をおろそかにしていると、かえって将来の発展をはばむ足枷になるおそれがある。

つまりここで、自由度と思っていたものが、制約に変わることになる。もっとわかりやすい例を挙げれば、耐力壁線間の距離の規定と、それで囲まれた面積の規定である。ちなみに、木質系プレハブ住宅（工業化住宅）では、前者は8m以下、後者は40m<sup>2</sup>以下となっている。この値がどのような根拠で、どのような経過で決められたか、未だ確認していない。とにかくこの規定のおかげで、これを満たささえすれば、水平構面の力学的な検討をしなくてよい。しかし逆に、もし、この規定を越えて広い空間を求めようとするれば、いかなる力学的検討が必要か、というところで行きづまってしまう。もともとの8m、40m<sup>2</sup>という数値の根拠が明らかであれば、それを基に検討すればよい。しかし、それがわからなければ先に進みようがない。これが、例えば木質系のプレハブ住宅にとって、大きな制約でないはずがない。

何がなんでも、構造力学に基づいた計算で割り

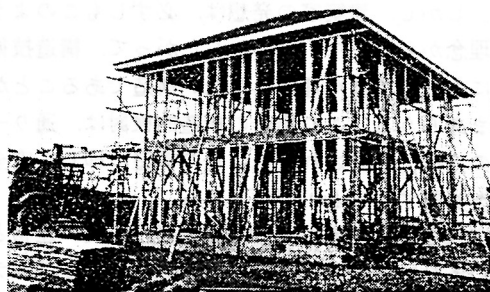


写真-1 木造軸組の水平加力実験（浜松市一条工務店）

\* 東京大学工学部建築学科

切ってしまうということは賢明でない。経験的に培われてきた常識は、計算だけに解消できない貴重な意味を持っているものである。しかし、力学的に解明できるものはやはり力学的に問いつめるべきである。そうすることによって、木構造全体にとって、本当の意味での設計の自由度が得られるであろう。

## 2. 大規模木造建築の力学的研究

ことさらに大規模木造と題しなければならないのは残念なことである。しかし、木造といえば住宅しかないというほどに、ここ二、三十年來のすたれようは甚だしかった。しかし日本でも、ようやく大規模な木造建築復活の機運が感じられるようになった。いくつかの比較的大きな木造建築がすでに実現している。

学校の講堂は、昔はすべて木造といってもよかった。戦時中は新興木構造として、格納庫のような大架構が木造で建てられている。社寺建築のような伝統的な建築は別にしても、近代科学にあるいは建築構造学に立脚した大規模な木造建築が、過去にすでにあったわけである。

では、このような大規模な木造建築の復活にあたって、構造に関するどんな問題があるだろうか。

まず第一に気がつくことは、最近建てられた大規模木造建築の設計者が、建築家であり、その建物はデザイン本位といってもよいことである。これは、かつての講堂の多くや格納庫が、構造技術を優先する形で設計されていたのと趣きが違っている。

建築構造の参考書によると、構造は単純明快であることを旨とする、とある。これはいくら強調してもしすぎることはない重要な設計理念である。しかし、建築家の発想は、必ずしもこのような理念からは出ていない。したがって、構造技術者にとって素直に理解しがたい構造であることがままありうる。この場合の構造的検討は、通り一遍の方法では許されない。その構造に即して安全性を検討することが要求される。

構造原理に忠実に従った建物だけが良い建物とはいえない。構造に構造の論理があるように、デザインにはデザインの主張があるはずである。筆

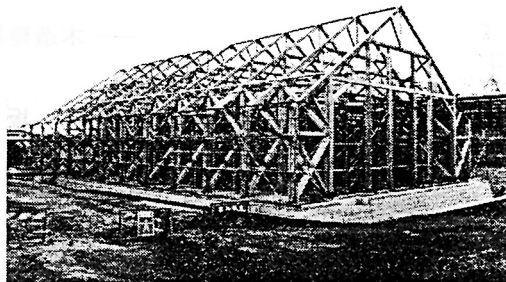


写真-2 建方中の木造大架構（豊進学園東野高等学校体育館）

者は、最近の大規模木造建築に、構造の論理になじまない点があることを感じながらも、これらの建物を木造で建てることに挑んだ建築家に、敬意を表したいと思う。そして同時に、このような建物の構造を担当する技術者に、建築家の創造力に対抗しうるだけの技術的能力を発揮することと、安全性を確認するのに必要な労力を費やすことを期待したい。

次に、先に 1. で述べたように、木造は構造力学的な検討に関して、特別扱いされることに甘えてきたという過去がある。しかし、大規模化に伴って、必然的に構造計算が要求されるようになると、当然、鉄骨造や鉄筋コンクリート造と同じレベルの検討が必要になってくる。現在日本で、このような検討を行いうるだけの構造設計方法が整備されているだろうか。建てられるあてのなかったものが研究されるはずもなかった。ブランクの影響は想像以上に大きい。

設計方法は、またしても、諸外国の研究成果や規準類の借物になるのだろうか。あるいは、新興木構造を推進した先学の古典的名著をひもとくべきか。それらを踏台にして、新しい設計体系を作ることが強く求められている。

さて第三に、設計・研究の両面で木構造が空白であった間に、超高層建築の出現と、地震応答の研究の進展があった。そして、鉄筋コンクリート造、鉄骨造ともに、通常の建物（超高層でないという意味）に対しても、新耐震設計法という弾塑性性状を考慮した設計法が適用されている。木造建築も除外されているわけではないが、実質的には旧来の方法が許されている。木構造に関しては、弾塑性応答とその基礎となるデータの研究成

果は皆無に等しい。そしてこればかりは、日本ほど地震力の厳しくない諸外国の情報に期待するわけにはゆかない。

木造が、鉄筋コンクリート造や鉄骨造に互して、同等の構造安全性を確保していると自信を持っていうためには、今後相当の研究の積重ねが必要である。

### 3. 新構法開発の条件

建物の用途を住宅と限り、構造材料として木またはその二次製品を用いることにすれば、画期的な新しい構法を開発することは、なかなか困難である。在来構法以外で、ここ二、三十年の間に市民権を得た構法は、木質系パネル式プレハブ構法と枠組壁工法の二つだけである。

最近になって、丸太組構法（校倉構法と呼ばれることもある）が木質系の仲間として一般的に建てられるようになった。内外の情勢を強く受けているというその経緯や、長方形断面の製材を用いても丸太組と呼ぶその命名については、ここでは省略する。そして一般論として、国内で独自に開発されたものであれ、外国の構法を導入したものであれ、日本でひとつの構法として成立しうするための構造に関する条件を考えてみよう。

ひとつは、日本の自然条件に関して、建物に加わる地震力や風圧力がきわめて大きい、ということである。そのうちでも、新耐震設計法で要求されている耐震性を満たすためには、耐力・剛性・靱性の三拍子がそろっていることが要求される。このことは、新耐震以前のように、設計震度 0.2 に対して許容応力度（許容耐力）以下に収まればよい、というのに比べて、格段に高い要求性能である。

この高い性能を満足させるために、その構造そのものが十分優れていることは当然必要であるが、なおその上に、その構造性能が、解析や実験によって、定量的に証明されなければならない。開発にあたっては、モノそのものの開発と、その性能の確認作業の両方が必要である。

構法成立のためのもうひとつの条件は、その構造によって支えられた建物が、ひとつの建物として整合性をもっていなければならない、ということである。

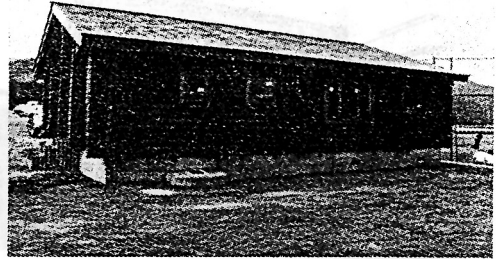


写真-3 現代の校倉構法（北海校倉）

丸太組構法に関して、ひとつの例をあげてみよう。この構法は、水平力に対する変形性能がきわめて高い。したがって、構造自体としては、耐力は必ずしも高くなくても、変形性能を発揮することによって耐震性を満たすことができる。単に建物が崩壊しなければよいというのであれば、これで十分である。

しかし、丸太組構法にしても、丸太組だけで建物ができているわけではなく、普通は内装材や設備配管等があるはずである。その場合、これらのいわゆる非構造部材は、丸太組の壁に生じる変形（層間変位）に追従しなければならない。このような配慮は、すべての部材に対して払われなければならない。しかも、設計上だけでなく、施工上もその配慮が徹底しなければならない。

このように、新しい構法の開発にあたっては、単に構造の開発にとどまらず、建物全体として整合性のあるものを創り出すことが必要である。

### 4. 新しい材料と規格

木構造を木質構造と呼ぶことが提案された背景のひとつとして、材料の多様化があげられる。伝統的な木造建築では、むくの木材のみを用いていたのに対して、合板、集成材を始めとする二次加工による木質構造材料が広く使われるようになってきている。最近の話題としては、LVL の構造的な利用の可否であろう。

このように、人為的な加工が施された材料を、一品生産ではなく、大量生産して市場に流通する構造材とするためには、その形状寸法や品質について一定の規格が必要である。国内には、日本工業規格（JIS）や日本農林規格（JAS）があり、

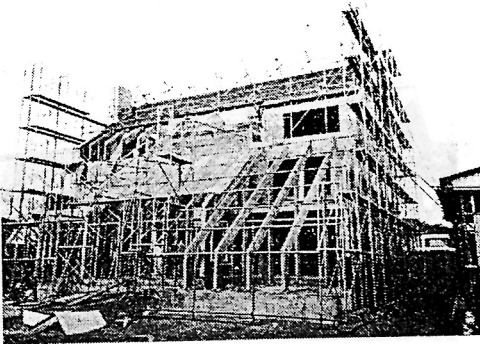


写真-4 LVL による架構

(アメリカ合衆国木構造デモンストレーションプロジェクト)

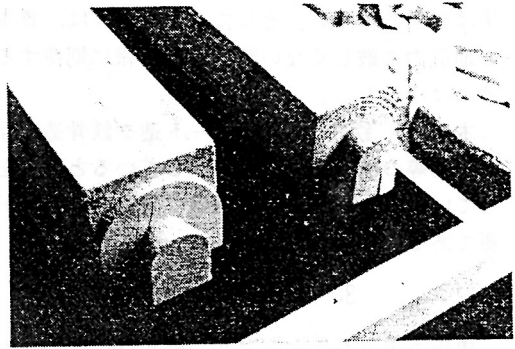


写真-5 建築現場のプレカット材(仙台市)

国際的には ISO がある。木材関係では、内外の団体が作った規格もある。

このような規格の果たす役割がきわめて大きいことは、改めて述べるまでもないであろう。ここではこの功績に対して、罪の側面について考えてみたい。

規格を決めるということは、そのモノを限定してしまうことである。構造材として使うためには、基本的な形や寸法とともに、品質の最低限度が決まっていることが必要であろう。このような限定はやむを得ない。そして、この品質を規定するために、多くの場合、性能試験法とその結果の評価法が決められている。ここで問題なのは、試験法なり評価法なりが決められたとたん、その材料の生産において、本来要求されているはずの性能そのものを満たすことよりも、性能試験に合格することの方が目標になってしまう。これでは本末転倒である。

さらに悪いことには、新しい材料によっては、種々の長所をもちながら、規格の性能試験にまじまじに、市場が開けないことになり、したがって、その開発意欲が著しくそがれることがありうる。まして、どの規格にもあてはまらないような材料は、せっきく開発しても、規格がないためになかなか受け入れられない、ということになってしまう。

構造材には、非常に厳しい品質が要求されてしかるべきであるから、その規格がきわめて重要であることは論を俟たない。しかし、規格の内容によっては、新しい材料の開発にとってマイナスの面があることに、十分留意しなければならない。

規格は両刃の剣である。

## 5. プレカットのもつ可能性

「プレカット」ということばは、本来は広い意味を持っていたはずであるが、現在木造の建物に関してプレカットといえは、木材を工場で機械により刻むことを指すようになってきている。もっと狭い意味では、在来構法による住宅用の部材として、伝統的な継手・仕口をもつものの刻みを、機械で行うことをプレカットと呼んでいる。

職人全般にわたって、質量ともに衰退の一途をたどっているのは、すでによく知られた事実である。大工も例外ではない。したがって、木材の加工が、大工の手刻みから、機械によるプレカットに移行してゆくことは、必然性を持っている。

ところで、このプレカットについて、全く相反する評価を聞いたことがある。いわく、プレカット材で建てた軸組は、ピタッと収まって、仮筋かいなどなくてもまっすぐ立っている、と。またいわく、プレカット材を使うと、柱の通りがそろわず、手直しするのに往生する、と。そのほか人によって、賛否両論まちまちである。

もちろん、一口にプレカットといっても、その程度、特に加工精度は、工場や機械によって大きな差があるに違いないし、それぞれの人の立場によって、プレカットによる利害が異なるであろう。したがって、さまざまな評価があるのは当然といえは当然である。

そこで疑問は、プレカットの本当の利点は何かということである。もちろん、生産者側には、経済性に立脚した生産の論理があつて、プレカットによるコストダウンといった利点があるはずであ

る。では他方、プレカット材で作られた住宅そのものが、品質的に、あるいは価格の面で、ユーザーにとって優れているということがいえるのだろうか。

ここでいささかお門違いであるが、ひとつの例を挙げることを許して頂きたい。それは、カメラのシャッターである。十数年前、それまでの機械的な制御機構をもつシャッターに対して、電氣的に露出を調節するシャッターが現われた。そしてそのキャッチフレーズが意味するところは、ローソク一本だけの明るさのところでも写真がとれる、ということだった。確かに電気式シャッターは、スローに強い。しかし、そんな条件下で写真をとることはめったになく、ユーザーにとっては、そのような性能は、ほとんど無用の長物であった。つまり、電気シャッターであることそのものが良いことだ、といっているにすぎないようなものであった。ちょうど、プレカットすることそのものがよいことだというふうに。

このように、電気シャッターの場合、少なくとも、モノそのものとして、機械式のシャッターと比較して、格段に優れているものではなかった。それがついているカメラが安価であるわけでもなかった。

しかし、その後のエレクトロニクスの著しい発展をうけて、この電気式シャッターも改良されて電子的に制御されるようになり、多様にプログラムされた露出を可能にしている。また、多くのカメラを安価に供給することに貢献しているといえる。電気シャッターは、最初こそ格別の利点があったわけではないが、その後多くの利点を生み出すもとなつたわけである。

その点、プレカットはどうであろうか。現時点での利点は何か。そして、仮に今すぐこれといった優れた点がないとしても、将来どんな利点をもたらさうのだろうか。プレカットに対して批判的であるつもりはない。しかし、ただ単に、プレカットしたからといってそのこと自体が良いというのは、作る側の論理でしかない。プレカットすることによって、より良いものができる、あるいは価格が(コストではなくプライスが)安くなる、という形で、ユーザーの利益になることを期待したい。

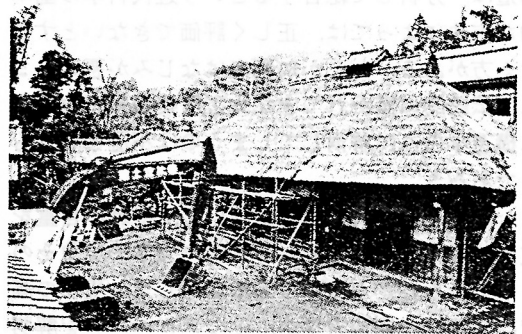


写真-6 伝統的民家の耐力実験(茨城県八郷町高橋家)

## 6. 伝統的木造建築の構造的再評価

日本の伝統的木造建築は、構造的な規模によって、およそ二つに分類できる。大きい方は社寺建築、小さい方は数寄屋あるいは民家である。

社寺建築のように大きなものは、大材の入手という観点からみても、簡単に建てられるものではない。建てかえる際に、鉄筋コンクリートが用いられるのは、ごくあたりまえになっている。とはいっても、未だ木造で再建されているものも少なくない。

このように、社寺を木造で建てる場合でも、現在では法的な手続きが必要である。しかし、この種の建物は、構造力学的な検討がなされているわけではないので、設計者と行政担当者との間に何がしかのやりとりがあることは、想像に難くない。少なくとも、無条件に認められているとは思われない。

他方、数寄屋や民家の構造を、現代の住宅の構造として採用しようとしても、現実には、耐力壁をもたないという理由で、行政的に門前払いをくってしまう。

現在の木造住宅のように、筋かいを設けることによって、その耐震性を高めるという発想は、力学でいうトラスの原理から出たものであるが、社寺建築や民家のように、断面の大きい部材で構成されている反面、剛性の低い節点をもつ構造は、力学的な原理が明快でない。明快でないことは、先にも述べたように、構造学の好むところではない。したがって、この種の構造が建築構造学に冷遇されたのは、ゆえあることである。

このような伝統的な、あるいは歴史的な建物の

構造は、分析して総合するという近代科学の基本的な方法によっては、正しく評価できないとする考え方がある。たしかに両者はなじみが悪い。また、伝統的に築かれてきた大工棟梁の知恵を、単に構造学のみで解消してしまうのは不遜というものであろう。

しかし、伝統的な建物とはいえ、それが自重を支え地震に耐えるメカニズムは、力学的現象そのものであることも確かである。そして、現在の高度に発達した構造力学が、そのメカニズムを解明できないはずがない。逆に、構造力学以外に、その構造安全性を研究する有力な方法があるだろうか。筆者はまず、伝統的建築を、現代の構造学の方法で解明することを提案したい。

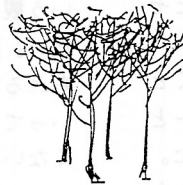
もちろん、構造学が提供するものは、入力（荷重等）に対する出力（応答変位、破壊状態等）で

ある。その出力、すなわち結果に対する価値判断はまた別の問題である。この段階では、個々人の考え方や立場によって、意見が異なるのは当然である。

### む す び

本誌編集委員会から、木構造について日頃考えていることを、比較的自由に書く機会を与えて頂いたのに甘えて、いくつかの話題を拾って私見を述べた。したがって、体系的な内容でもなく、また有益な知識を提供することもできなかったことをおわびしたい。ささやかな文ではあるが、木造建築の再興のために、少しでも役に立てば、幸いである。

(1986. 4. 22 受理)



## 協会のうごき

### — 事業関係 —

#### ● 製材木工部会、木材加工機械工具部会

4月3日 静岡大学教養学部会場にて両部会総会を開催、昭和60年度事業経過及び決算承認の件、昭和61年度事業計画及び予算案承認の件、役員改選の件（製材木工部会）についてそれぞれ審議し、承認可決された。製材木工部会の部会長には農林水産省林業試験場西村勝美氏が選出された。また総会終了後引き続き標記両部会、日本木材切削研究会、(社)全国木工機械工業会技術委員会共催で、講演会「木材および木質材料のウォータージェット加工」を開催した（木材工業4月号参照）。

#### ● 保存部会

4月3日 静岡大学教養学部会場にて、標記部会、日本木材学会生物劣化研究会、(社)日本木材保存協会共催で講演会「ナミダタケ被害とその防除」を開催した（木材工業4月号参照）。

#### ● 床板部会

4月16日 本協会会議室にてフローリング JAS ワ

ーキンググループにより JAS の検討を行った。

#### ● 第31回木材加工技術賞受賞者選考委員会

4月24日 林業試験場第5輪講室にて、第31回木材加工技術賞受賞者選考委員会を開催、受賞候補3件について選考審議した。

### — 編集関係 —

#### ● 第457回編集委員会

4月11日 本協会会議室にて開催、5月号の経過報告、6月～8月号までの計画について審議した。

### — 新会員氏名 —

5月号掲載以降、新しく下記の方々が入会された。

(注)：(本)本部 (北)北海道支部 (中)中部支部

#### 通常会員

(本) 武藤克彦 ダイワゴルフ (株) 高橋雅充

清水建設 (株) 東京木工場

(北) ソーラー技研工業 (株)

(中) 伊藤一成 白竹木材 (株)

金物のサビは建物全体の耐久性を下げる。 接合部の劣化。  
歴史的建物の調査から金物以外(木材等)の方法による接合を考案。

3. 接合 どの位の耐久性を要するのかわかるのか、よって金物等接合部の設計が異なる。

3.1 接合の種類

杉山教授の著書によれば、接合部は被接合部材の相互角度により「継手」と「仕口」に分類される。「継手」は部材の材軸方向に接合して一材にする効果をねらったもので、「仕口」は互いに斜交または直交する部材を接合して節点を構成することをねらったものである[1]。ここでは、文章展開の便宜上、接合の種類を(a)接着剤を用いた接合、(b)金物による接合2種に大別する。

3.2 接着剤を用いた接合

接着剤をもちいた接合は、初期剛性の高いことが最大の特徴で、多くの場合、終局耐力も大きい。しかし、被接合材同士を接合している媒体が極めて薄い面であって、破壊性状が脆性的で粘りに乏しい点が大きな欠点である。したがって、接着層を多数含むことのできる、合板、LVL、集成材といった構造部材の製造には使われるが、一部の例外を除き、構造部材同士の接合には殆ど使われない。

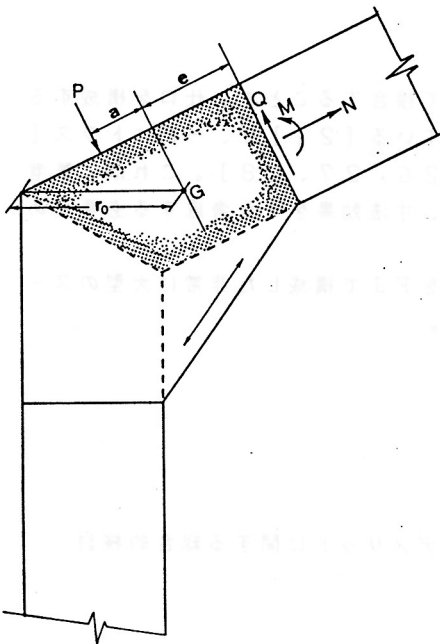
3.2.1 合板ガセット接着接合

合板ガセット接着接合は、おもにトラス節点[2, 3, 4, 5]もしくは、木質系山型・門型ラーメン[6, 7, 8, 9]において、剛節点を構成するのに利用される。接合部の強度をチェックする場合は、部材やガセット板の強度チェックのほか、接着層の強度チェックも必要である。図5に示す合板ガセット接着接合による山形ラーメンの場合、接着層に作用するせん断応力  $\tau_R$  は合板ガセットのローリングシアア許容応力度  $f_r$  に対して実用的には次式でチェックする[2]。

$$\tau_R \leq f_r \quad \dots\dots\dots 10)$$

ただし、

$$\tau_R = \{ \tau_N \} + \{ \tau_r \} + \{ \tau_{QP} \}$$



- $\tau_N = N / (n A_g)$  : 軸力からの寄与
- $\tau_r = M r_{0} / (n I_p)$  : モーメントからの寄与
- $\tau_{QP} = (Q + P) / (n A_g)$  : せん断力からの寄与
- $M_r = M + Q e + a P$
- $I_p$  = 接着層剛心に関する断面2次極モーメント
- $n$  = 接着層の数
- $A_g$  = 接着層の面積
- $r_0$  = 剛心から最も遠い位置までの距離
- { } = 応力成分をベクトル的に加算することを意味する

合板ガセット接着接合に関する最近の研究[10]によれば、ガセットをトラス部材の間に挟み込んだ形式が材料効率の面で優れていると言われている。また、3次元有限要素法によるガセット板の応力解析例も見られる[11]。

図5 合板ガセット接着接合によるラーメン軒肩接合部

### 3. 2. 2 交差重ね合わせ接着接合

交差重ね合わせ接着接合は、図6に示すように部材と部材を交差するように重ね合わせて接着し、一種の「仕口」を構成するものである。また、やり方によっては「仕口」と同時に部材の方も積層接着できる興味ある接合法である。この接合法は、我が国では、LVL用単板を利用した住宅構造部材[12]や、窓枠の分野[13]で一部で実用化されているが、大断面集成材の梁と柱の接合への利用は未だ研究段階である[14, 15, 16, 17]。

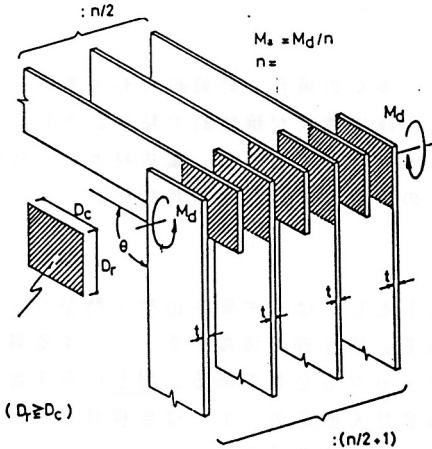


図6 交差重ね合わせ接着による梁-柱の接合

交差重ね合わせ接着接合の1つのバージョンとして、弦材と腹材をすべて交差重ね合わせ接着したラチス梁が開発された[18, 19, 20]。この梁を実際の建物に使用するにあたっては、製造現場で設計荷重に相当する保証荷重試験を行なって、製品の品質を保証した。

この種の接着接合部の強度は、実用的には最大応力説に従う式(1)でチェックするのが妥当であろう[17]。その場合は  $f_r$  として、素材もしくは、集成材の許容せん断応力度の1/3をとる。

一方、接合部の破壊形が破壊力学におけるMode-IIIに類似していることより、破壊力学を応用して接合部の強度を推定することもできる[14, 15]。我が国でこの接合法を大断面集成材の梁と柱の接合へ利用していくには、地震荷重や長期荷重に対する安全性と湿度変化に対する接着層の耐久性に関する裏付けデータが必要であろう。

### 3. 2. 3 フィンガージョイント(FJ)を利用した仕口

FJは普通材軸方向と平行に接合するものであるが、角度をつけて接合することで、仕口を構成することもできる。この仕口は実用的には、椅子の仕口として応用されている[21]が、一部にトラス[22, 23]、や骨組仕口への応用研究も見られる[24, 25, 26, 27, 28]。これは、筆者の個人的な感想であるが、FJ仕口の大断面材への応用に関しては、寸法効果を十分考慮する必要がある。

なお、報告[29]によれば、屋根を覆うトラスのすべての節点をFJで構成した非常に大型のスーパーマーケットが、アメリカのオレゴン州に建てられたそうである。

### 3. 2. 4 今後の課題

1. 接着耐力にまつわる不安感を解消する方策の検討
2. 接着接合の耐震性能に関する研究
3. 接着接合の強度解析への各種力学的手法の効果的応用
4. 接着接合部に対する保証荷重試験の必要性和そのメリット、デメリットに関する総合的検討

<接合：接着>

- [ 1 ] 杉山英男：“10 接合部”，建築構造学大系22「木構造」、(彰国社)，1971
- [ 2 ] Suddarth, S.K.:“The Design of Glued Joints for Wood Trusses and Frames”, Research Bulletin No.727, Purdue University, 1961
- [ 3 ] 藤井 毅：“合板ガセット接着法に関する研究”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 29 pp. 223-297, 1971
- [ 4 ] 宮島 寛、藤井 毅、安岡徳三：“合板ガセット接着法による実大木造フィンクトラスの剛性および強度”，日本木材学会道支部講演集、Vol. 1, pp. 43-46, 1968
- [ 5 ] Kufner, M.:“Stabwerktrager mit geleiteten Knotenpunkten (Structural Frameworks with Glued Nodes)”, Holz als Roh-und Werkstoff, Vol.39, pp.51-62, 1981
- [ 6 ] 宮島 寛、松本弘毅：“テーパー部材をもつ木造ラーメンの剛性と強度、第2報 三こう節山形ラーメン”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 29, pp. 99-119, 1972
- [ 7 ] 宮島 寛：“ ”テーパー部材をもつ木造ラーメンの剛性と強度、第3報 二こう節山形ラーメン”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 29, pp. 299-326, 1972
- [ 8 ] 伊東勝彦、丸山 武、宮野 博：“合板ガセット接着法による木造山形ラーメンの剛性と強度”，林産試験場研究報告、No. 65, 1976
- [ 9 ] 高宮庄一、皆川保生、神谷文夫：“単板積層材の木構造への適用に関する研究 第3報(合板ガセットによる門形架構の実大実験)”，日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 2001-2002, 1977
- [10] 佐々木康寿、三浦 誠、竹村富男：“合板ガセットを用いた軸材接合部の強度”，木材学会誌、Vol. 32, pp. 234-241, 1986
- [11] Epple, A.:“UNTERSUCHUNGEN UBER EINFLUSSE AUF DIE SPANNUNGSVERTEILUNG IN AUFGELEIMTEN HOLZLASCHEN UND HOLZERNEN KNOTENPLATTEN”, DISSERTATION zur Erlangung des Doktorgrades des Fachbereichs Biologie der Universität Hamburg, 1983
- [12] 都築一雄：“単板構成による構造用積層材”，WOODMIC, Vol. 4, No. 3, p. 40, 1986
- [13] 飯田信男、久保武司：“林産試験開発木製サッシの実用化”，ウッドイエジ、第338通巻、pp. 1-7, 1985
- [14] Komatsu, K.:“Application of Fracture Mechanics to the Strength of Cross-Lapped Glued Timber Joints”, FRI Bulletin, No.61, 1984
- [15] Komatsu, K.:“Effect of Member Thickness and Number of Gluelines on the Strength and Design of Cross-Lapped Glued Timber Joints ”, FRI Bulletin, No.62, 1984
- [16] 小松幸平：“集成材剛節骨組構造のための交差重ね合わせ接着接合の強度設計(第1報)，-接着層の応力分布を純ねじりモーメントを受ける平行四辺形断面棒の応力分布と同等と見なした場合の接合部の強度設計方法-”，林産試月報、No. 401, pp. 1-9, 1985
- [17] 小松幸平：“集成材剛節骨組構造のための交差重ね合わせ接着接合の強度設計(第2報)，-接着層のねじり応力がねじりの中心からの距離に比例すると仮定した場合の接合部の強度設計方法-”，林産試月報、No. 402, pp. 11-19, 1985
- [18] 小松幸平、前田典昭、長原芳男、北村維朗、小久保貞夫、高道正和：“カラマツ接着ラチス梁の小樽博サブテーマ館への利用”，日本木材学会道支部講演集、Vol. 16, pp. 25-29, 1984
- [19] 小松幸平、前田典昭、長原芳男、北村維朗：“カラマツ接着ラチス梁を使った小樽博展示館の構造設計”，林産試月報、No. 403, pp. 10-21, 1985
- [20] 前田典昭、小松幸平、長原芳男、北村維朗：“カラマツ接着ラチス梁の曲げ性能”，林産試月報、No. 413, pp. 7-13, 1986
- [21] 渡辺 昇、関谷 武：“ミニフィンガー接合法の家具への応用”，日本木材学会道支部講演集、Vol. 9, pp. 71-75, 1977
- [22] Pincus, G.; Cottrell, E.F.; Richards, D.B.:“Rigid Roof Trusses With Glued-Finger Corners”，FPJ, Vol.16, No.2, pp.37-42, 1966
- [23] Hoyle, R.J.Jr.; Strickler, M.D.; Adams, R.D.:“A Finger Joint Connected(FJC) Wood Truss System FPJ, Vol.23, No.8, pp.17-26, 1973
- [24] 生田晴家、宮島 寛：“木造骨組仕口へのフィンガージョイント工法の適用”，日本木材学会道支部講演集、Vol. 9, pp. 76-79, 1977
- [25] 宮島 寛、佐藤武司：“コーナージョイントとしてのだぼ、ほぞおよびフィンガージョイント工法の接合性能の比較”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 34, pp. 275-286, 1977
- [26] 石井 誠、宮島 寛：“各種仕口に関する基礎的研究 第1報 引張性能について”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 39, pp. 223-236, 1982
- [27] 石井 誠、宮島 寛：“各種仕口に関する基礎的研究 第2報 曲げ性能について”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 40, pp. 581-596, 1983
- [28] 生田晴家：“木造骨組仕口への120度にフィンガージョイントされた木造骨組仕口の性能”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 41, pp. 301-312, 1984
- [29] 平嶋義彦：“フィンガジョイントを用いた建築構造”，木工機械、No. 120, pp. 9-11, 1983

3. 3 金物による接合

3. 3. 1 釘

<釘の許容耐力>

釘の荷重-すべり関係は力のかかりはじめから非線形であり、いわゆる比例限度に相当する部分がないため、許容耐力を決定するのは容易ではない。北米では、釘のすべりが0.38mmの時の荷重を許容耐力としているが、我が国の木構造設計規準・同解説では釘のすべりが10mmの時の荷重を基に許容耐力を定めている[1]。一方、建設省総合プロジェクト[2]によって提案された方式では、最大荷重の3/8、または、1mm変位時の荷重の3/4のどちらか小さい方を許容耐力としている。

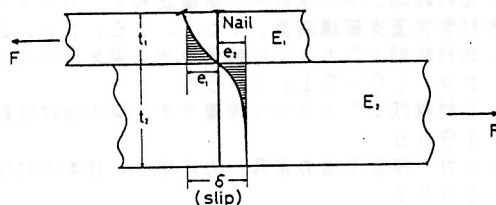
<釘の一面せん断理論：線形解析>

釘に関する理論的研究は、1951年原田[3]によって始められた。彼は材中での釘のめり込み量  $e$  は釘の面圧応力  $\sigma$  に比例し、木材のヤング係数  $E$  に反比例すると仮定し、木材を弾性床、釘を弾性梁に見立て、「弾性床上の梁の理論」を適用して、木材中の釘の変形と反力を解析した。つづいて、1955年同じ仮定の下で、Kuenzi[4]が原田と同じ解析を発表した。原田の理論は、25年後に澤田によって再検討され[5, 6, 7]、現在の我々が知るところとなった。一方、Kuenziの理論も16年後にWilkinson[8, 9]によって近似化され、釘の初期すべり係数  $K_s$  を求める理論として、世界的な評価を得た。原田の仮定は次式で表わされる：

$$e = \alpha \sigma / E = \sigma / k \quad \dots\dots\dots /1)$$

$$k = E / \alpha \quad \dots\dots\dots /2)$$

式-1)の比例係数  $\alpha$  は、「面圧凹み係数」と呼ばれ[3]、釘の変形の大きさを左右するもので、釘の線形解析において重要な係数である。また、式-2)の  $k$  は床係数 (bearing constant) と呼ばれ[8, 9]、場合によっては  $\alpha$  と  $E$  を使うより合理的である。釘の面圧実験を行ない、 $\alpha$  もしくは  $k$  を求めることによって、任意境界条件の釘接合部の初期すべり係数  $K_s$  を算出することができる[10, 11, 12]。図7にその一例を示す。



弾性床理論による釘の変形曲線

$$K_s = \frac{4E_1 I_1 \mu_1^2}{(1+\omega^2)(\coth \mu_1 t_1 + \omega \coth \mu_2 t_2)}$$

ここに  $E_1 I_1$  = 使用釘の曲げ剛性;  $\mu_1 = (E_1 d / 4\alpha_1 E_2 I_1)^{1/4}$ ;  $\mu_2 = (E_2 d / 4\alpha_2 E_1 I_1)^{1/4}$ ;  $E_1$  = 側材のヤング係数;  $E_2$  = 主材のヤング係数;  $\alpha_1$  = 側材の面圧定数;  $\alpha_2$  = 主材の面圧定数;  $d$  = 釘径;  $t_1$  = 側材厚;  $t_2$  = 主材への打ち込み深さ;  $\omega = \mu_1 / \mu_2$

図7 木材一面せん断接合における釘の初期すべり係数  $K_s$  の算定 (松尾[11]より)

<釘の理論的短期許容耐力>

上述した弾性床理論によって、釘の最大面圧応力を計算できる。澤田はこの最大面圧応力が木材の圧縮強度に達した時点をもって、釘の理論的短期許容耐力と定義した[7]。木構造設計規準による釘の短期許容耐力は釘径の1.8乗に比例するのに対し、澤田の定義した理論的短期許容耐力は釘径の1.75乗に比例し、両者はほぼ一致する。

### ＜釘の理論的最大の耐力＞

釘の理論的最大の耐力に関する研究では、木材ならびに釘を完全「剛-塑性」物体と見なし、降伏するまでは完全剛、降伏後は完全塑性状態を仮定して、力のつりあい条件のみから釘の最大の耐力を求める。Larsen [13]によると、この種の理論は1941年 Johansen によって先鞭がつけられたという。木構造設計規準・同解説 [1]によれば、その後、Moller (1951), Meyer (1957)、我が国では、坪井、矢代 [14]らが同種の説を独自に展開した。また、最近では、Larsen [15]が Johansen の理論をさらに発展させている。この種の理論によって理論的最大の耐力を計算するためには、木材の側圧縮強度を実験によって求める必要がある。なお、木構造設計規準・同解説 [1]では、便宜的に木材の縦圧縮強度を用いて釘の理論的最大の耐力を計算している。

### ＜釘の非線形解析＞

釘の荷重-すべりの非線形関係を表現するため、これまでさまざまな経験式が提案され、実際に利用されてきた。表1はそれらをまとめたものである。

表1 釘の荷重-すべりの非線形関係を表現するための経験式

式の型	提案者(使用者)と文献番号
$B$	
$P = A s$	平嶋 [16], 林ら [17]
$P = (P_0 + K_f s) [1 - \exp(-K_s s / P_0)]$	Foschi [18]
$P = A \log(1 + B s)$	McLain [20], 松尾 [11] *
$P = \frac{a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + a_4 s^4}{1 + a_5 s + a_6 s^2 + a_7 s^3}$	辻野 [21]
$P = A s^{1/4} + B s^{1/2} + C \frac{s}{1 + s}$	Thurston & Flack [22]
$P = B [1 - \exp(-A s / B)]$	小泉 & 上田 [23]

ただし、P: 荷重、s: すべり、A, B, C, 等は実験常数。( \*  $P = A \ln s + B$  )

これらの、非線形荷重-すべり関係式を用いることによって、釘打ち部材や構造物の挙動を比較的正確に解析することができる。それらの多くは、壁、床等の解析として本研究会の第2部「構造構成要素」の分野で紹介されるので、ここでは、釘の一面せん断挙動に関する非線形解析例について述べる。

Foschiは釘の面圧試験で得られる荷重-めり込み関係を表1に示す3パラメーターexp関数で表現し、釘を弾塑性梁とした有限要素モデルを開発し、鋼板-グルーラムリベット-木材 [18]、および合板-普通釘-木材 [19]の系において、非線形解析を行なった。Smith [24]は釘の面圧試験で得られる荷重-めり込み関係を多数の折れ線で近似し、釘を弾塑性梁とし、大変形時の引き抜きの影響、摩擦の影響、木材のせん断変形の影響も含めた有限要素モデルを開発し、木材同士を釘打ち接合した場合についてシュミレーション計算を行なっている。

### 3.3.2 ボルト

#### <ボルトの許容耐力>

釘打ち接合と異なり、ボルト接合の荷重-すべり曲線には見掛け上の比例限度が見られる〔25, 26〕。木構造設計規準〔1〕では比例限度荷重をもってボルト接合の短期許容耐力とし、変形に対する規定はない。これは、ボルト接合自体、施工に伴う初期ガタが避けられず、変形が重要視される箇所には使われないと考えられているためである。ボルト接合の大きな特徴は、荷重の作用方向によって、荷重-変形関係が変化し、許容耐力もそれにともなって変化することにある。現行規準では、直角仕口の耐力は平行継手の75%となっている。

#### <ボルトの変形状態に関する理論的研究>

ボルトの木材中での変形挙動は、基本的には釘と同じと考えられる。そこで、原田の「弾性床理論」がボルトの変形解析にも適用されている。平井、澤田〔27, 28〕は、木材ならびに鋼板を側材とするボルトの2面せん断挙動を弾性床理論で解析し、比例限度に及ぼすボルト形状や、面圧凹み係数の影響を調べた。また、平井は〔29, 30〕弾性床理論を段階的線形理論に拡張し、鋼板添え板を有する集成材の非線形挙動を解析し実験結果との良い対応を得ている。辻野、平井〔31〕は、木材中で変形するボルトの剛性マトリックスを弾性床理論から導き、段階的線形理論を適用して、〔29〕と同じ試験体の挙動を有限要素法で解析し、実験結果との良い対応を得ている。

#### <ボルト接合部の理論的降伏耐力>

安村〔32, 33〕によれば、ボルト接合の荷重-変形曲線には、図8に示す様な、幾つかの特性を示す点が存在する。この内、最大耐力は、試験体の大きさ、ボルトの端あきや、へりあきといった別の因子が大きく影響するため、その理論的推定は閉じた形では困難であろう。いっぽう、降伏点耐力については、木材の側圧縮強度とボルトの塑性曲げ強度を既知とすれば、釘の理論的的最大耐力計算式がそのまま適用できる。安村〔32〕は、Larsen〔15〕の式を鋼板添え板接合、ならびに鋼板挿入接合の場合にも適用し、集成材ボルト接合部の降伏耐力が理論的に正しく推定できることを示した。

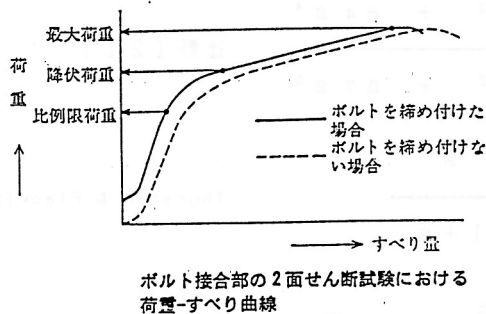


図8 ボルト接合の荷重-変形曲線（安村〔52〕より）

#### <ボルト接合部の耐力に影響を及ぼす諸因子>

ボルト接合部の耐力に影響を及ぼす因子は数多い〔33, 34, 35, 36, 37, 38〕。なかでも木材の繊維方向と荷重作用方向のなす角度、および、ボルトと木材自由端との距離（端あき、へりあき）が、実際の設計において考慮されるべき重要な因子である。これらの影響については、繊維直交方向の試験で割れを伴うか伴わないかで結論がやや違って来る。まず繊維直交方向の耐力試験の方法を十分検討する必要がある。割れを伴わない場合は、現行の規定でほぼ十分のようであるが、割れを伴う場合は、繊維直交方向の耐力をより厳しく査定する必要がある〔36〕。なお、アメリカの設計マニュアル〔39, 40〕では、このような場合は、ボルトの耐力という概念を用いず、有効せん断面積を厳しく算定し、木材側のせん断許容応力度で接合部を設計する。

### 3.3.3 コネクター

最近、我が国ではコネクター（ジベル）が再び注目されつつある。現在、その耐力が実験で確認され、一部で使われているコネクターは図9に示すシアプレートとスプリットリングの2種類である。コネクターの利点はボルト単体にくらべて耐力が大きいことであるが、反面、木材側の加工に手間が掛かることと、コネクター間隔、端あき、へりあき、断面欠損等の制限条件で接合部の設計が厳しくなる面もある。コネクターの許容耐力については、現在改定作業中の木構造設計規準で新しく規定されるはずである。コネクターの耐力については、神谷ら[41, 42]が発表している。なお、シアプレートをを用いた剛節骨組構造に関する研究[43]，集成材実大接合部の非線形解析[44]，集成材実大継手の実験[45, 46]等も報告されている。

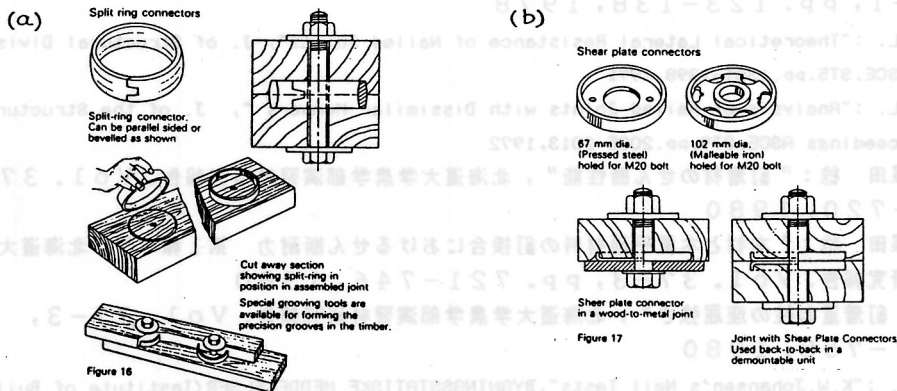


図9 スプリットリング(a)と シアプレートコネクター(b) (TRADA [53])

### 3.3.4 ラグボルト、打ち込みボルト

ラグボルトは、現場での施工能率が非常に高いため、集成材の添え板継ぎ手、接合金物の留め付けに多用されるようになってきた。ラグボルトの耐力については、佐藤らの実験があり[47, 48]、その結果を柱一梁接合試験体に適用した報告[49, 50]もある。また、許容耐力については、現在改定作業中の木構造設計規準で新しく規定されるはずである。

打ち込みボルトはボルトの胴の部分だけを使うもので、鉄のダボと考えるとよい。その利点は、ボルトのような初期ガタがなく、剛性が高いこと。材表面に金属部分が露出しないので耐火性能の面で有利であること等であろう。しかし、その、力学的特性に関する我が国での実験結果が少ない[51]ため、今後は、実験データの集積に努めるべきであろう。

### 3.3.5 今後の課題

1. 接合金物の非線形荷重-変形関係を適切に表現し得る経験式の設定。たとえば、McLainの式(表1参照)は、アメリカの設計基準の一部で推奨されている[20]。
2. 接合金物の基本的性能を試験するための統一規格の制定。たとえば、オーストラリア規格では、接合金物を図10に示す4つのカテゴリーに分類して、それぞれ標準的な試験方法と結果のとりまとめ方法を規定している。
3. ボルト、コネクター接合に関する北米式設計方法の検討
4. ボルト、コネクター使用に伴う断面欠損の影響に関する研究
5. 多数の接合金物を使った場合の応力分布に関する研究

<接合：金物>

- [1] 日本建築学会：“6. 接合部の設計”，木構造設計規準・同解説、丸善、1973
- [2] (財)国土開発技術研究センター：“第5章 くぎ接合部の構造耐力と試験方法”，昭和50年度総合技術開発プロジェクト 小規模住宅の新施工法の開発，pp. 97-108，1976
- [3] 原田正道：“木船の縦強度”，東大生産技術研究所報告、Vol. 2, No. 3, 1951
- [4] Kuenzi, E.W.：“Theoretical design of a nailed or bolted joint under lateral load”，U.S. Forest Products Laboratory, Report No.1951, Madison, FPL, 1955
- [5] 澤田 稔：“2層釘着梁の曲げ剛性と強度”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 33-1, pp. 139-166, 1976
- [6] 澤田 稔：“釘着材の許容せん断耐力について”，日本木材学会北海道支部講演集、第8号、pp. 33-35, 1976
- [7] 澤田 稔, 山田順治：“木造釘着組立梁の腹材有効剛比”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 35-1, pp. 123-138, 1978
- [8] Wilkinson, T.L.：“Theoretical Lateral Resistance of Nailed Joints”，J. of Structural Division, Proceedings ASCE, ST5, pp.1381-1398, 1971
- [9] Wilkinson, T.L.：“Analysis of Nailed Joints with Dissimilar Members”，J. of the Structural Division, Proceedings ASCE, ST9, pp.2005-2013, 1972
- [10] 中谷 浩, 澤田 稔：“釘着材のせん断性能”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 37-3 pp. 687-720, 1980
- [11] 松尾 博, 澤田 稔：“木材と木質平面材料の釘接合におけるせん断耐力 第1報”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 37-3, pp. 721-746, 1980
- [12] 澤田 稔：“釘着重ね柱の座屈強さ”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 37-3, pp. 747-758, 1980
- [13] Larsen, H.J.：“K.W.Johansen's Nail Tests”，BYGNINGSSTATISKE MEDDELELSER (Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University Centre, Denmark), Vol.48, No.1, 1977
- [14] 坪井善勝, 矢代秀雄：“くぎ接合の耐力に関する実験報告”，日本建築学会関東支部第24回研究発表会、1958
- [15] Larsen, H.J.：“The Yield Load of Bolted and Nailed Joints”，Proceedings of the IUFRO-5 Conference : Pretoria, pp.646-654, 1973
- [16] 平嶋義彦：“釘打ち面材張り耐力壁のせん断変形式の誘導”，日本木材学会誌、Vol. 27, pp. 141-143, 1981
- [17] 林 龍一, 松尾勝央, 高柳寛司, 剣持 潔：“建築用構成材および構造部分の性能の研究 (第1報) 木材釘打ち接合部の耐力”，製品科学研究所研究報告、No. 87, pp. 1-18, 1979
- [18] Foschi, R.D.：“Load-Slip Characteristics of Nails”，Wood Science, Vol.7, pp.69-76, 1974
- [19] Foschi, R.D.; Bonac, T.：“Load-Slip Characteristics for Connections with Common Nails”，Wood Science, Vol.9, pp.118-123, 1976
- [20] McLain, T.E.：“Mechanical Fastening of Structural Wood Members - Design and Research Status in Structural Wood Research, edited by Itani, R.Y. and Faherty, K.F., p.40, 1983
- [21] 辻野哲司：“有限要素法による釘着片面パネルの曲げ解析”，日本木材学会誌、Vol. 31, pp. 896-902, 1985
- [22] Thurston, S.J.; Flack, P.F.：“Monotonic and Cyclic Testing of Timber Connections Using Nailed Steel Side Plates”，Ministry of Works and Development, Report No.5-79/4, Central Laboratories NZ, 1979
- [23] 小泉章夫, 上田恒司：“2層釘着梁の曲げ変形と耐力”，北海道大学農学部演習林研究報告、Vol. 41-1, pp. 261-300, 1984
- [24] Smith, I.：“Analysis of Mechanical Timber Joints with Dowel Type Connectors Subjected to Short Term Lateral Loading - By Finite Element Approximation”，Timber Research and Development Association, Research Report 2/82, GB, 1982
- [25] 久田俊彦, 杉山英男, 松野外史：“ボルト接合の耐力に関する実験的研究”，日本建築学会論文報告集

- 第60号、pp. 469-472, 1958
- [26] 安村 基、中村 昇、杉山英男：“集成材ボルト接合部の強度性状に関する実験と理論”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 2213-2214, 1983
- [27] 平井卓郎、澤田 稔：“Nominal Bearing Stresses of Bolted Wood-Joints at Apparent Proportional-Limits”，日本木材学会誌、Vol. 28, pp. 543-547, 1982
- [28] 平井卓郎、澤田 稔：“Linear Load-Slip Relationship of Bolted Joints of Glued-Laminated Lumber”，日本木材学会誌、Vol. 28, pp. 609-613, 1982
- [29] 平井卓郎：“Nonlinear Load-Slip Relationship of Bolted Wood-Joints with Steel Side-Members II”，日本木材学会誌、Vol. 29, pp. 839-844, 1983
- [30] 平井卓郎：“Nonlinear Load-Slip Relationship of Bolted Wood-Joints with Steel Side-Members III”，日本木材学会誌、Vol. 31, pp. 165-170, 1985
- [31] 辻野哲司、平井卓郎：“鋼板側材を用いたボルト接合部の非線形荷重-すべり関係（第1報）”，日本木材学会誌、Vol. 29, pp. 839-844, 1983
- [32] 安村 基、フリップ・クリュピレ：“重木構造における接合部の耐力（第1報）-集成材ボルト接合部の2面せん断試験-”，木材工業、Vol. 38-6, pp. 10-16, 1983
- [33] 平井卓郎、澤田 稔：“木材のボルト接合せん断耐力に及ぼす端部寸法影響-荷重が材軸方向に作用する場合-”，日本木材学会誌、Vol. 28, pp. 137-142, 1982
- [34] 平井卓郎、澤田 稔：“側材に鋼板を用いたボルト接合部のせん断耐力-荷重が材軸方向に作用する場合-”，日本木材学会誌、Vol. 28, pp. 685-694, 1982
- [35] 平井卓郎、澤田 稔：“側材に木材を用いたボルト接合部のせん断耐力-荷重が材軸方向に作用する場合-”，日本木材学会誌、Vol. 28, pp. 695-698, 1982
- [36] 平井卓郎：“木材のボルト接合せん断耐力に及ぼす端部寸法影響-荷重が材軸に対して垂直方向に作用する場合-”，日本木材学会誌、Vol. 29, pp. 118-122, 1983
- [37] 杉山英男、安村 基、奥富真一：“せん断を受ける集成材ボルト接合部の耐力”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 2685-2686, 1984
- [38] 安村 基、坂井英明：“集成材ボルト接合部における終局性状”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1249-1250, 1986
- [39] National Forest Products Association: "National Design Specification for Wood Construction" pp. 11-12, 1982
- [40] American Institute of Timber Construction: "Timber Construction Manual", Third Edition, pp. 6-413 -- 6-437, 1985
- [41] 神谷文夫、大平 章：“スプリットリング、シアプレートを用いた集成材接合部の耐力”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 2689-2690, 1984
- [42] (財)日本住宅・木材技術センター：“集成材構造”，技術開発推進事業報告書、1984
- [43] 小松幸平、長原芳男、前田典昭、北村維朗、堀江和美：“挿入型鋼板ガセットとシアプレートコネクターを用いた集成材軒肩接合部の許容応力度設計と接合部の実大実験”，林産試月報、No. 409, pp. 1-22, 1986
- [44] 小松幸平：“挿入型鋼板ガセットとシアプレートボルト締め構法による集成材軒肩接合部実大試験体の非線形半剛節解析”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1299-1300, 1985
- [45] 太田道彦 ほか7名：“構造用集成材の継手に関する実験的研究（その1. せん断継手について）”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 2215-2216, 1983
- [46] 太田道彦 ほか7名：“構造用集成材の継手に関する実験的研究（その2. 曲げ継手について）”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 2217-2218, 1983
- [47] 佐藤雅俊、宮村雅史、葉多修司、森 和雄：“ラグボルトの強度特性（I） 曲げボルトとしての耐力の評価”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 2691-2692, 1984
- [48] 佐藤雅俊、宮村雅史、葉多修司、森 和雄：“ラグボルトの強度特性（II） 引き抜き耐力の評価”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 2693-2694, 1984
- [49] 佐藤雅俊、宮村雅史、葉多修司、森 和雄：“集成材構造柱梁接合部の耐力に関する研究”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1301-1302, 1985
- [50] 佐藤雅俊、宮村雅史、森 和雄、葉多修司：“集成材構造柱梁接合部の耐力に関する研究（II）”

日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1251-1252, 1986

- [51] 葉多修司、森 和雄、佐藤雅俊：“集成材打ち込み鋼棒接合部の強度性状に関する実験的研究”，日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1253-1254, 1986
- [52] 木質構造研究会編：“ティンバーエンジニアリング読本”，p. 159, 1985
- [53] TRADA：“Mechanical fasteners for structural timberwork”，TRADA Wood Information, Section 2/3, Sheet 9, 1985
- [54] Standards Association of Australia：“Method for the Determination of Basic Working Loads for Metal Fasteners for Timber”，AS 1649-1974

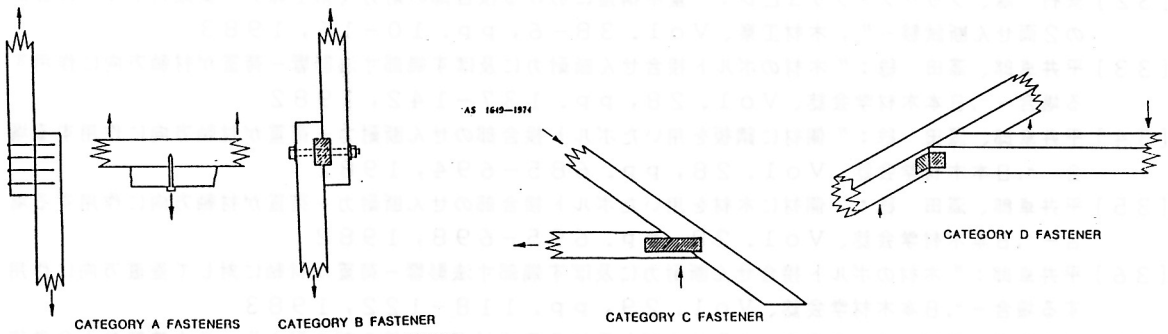


図10 オーストラリア規格 [54] による接合金物試験法の分類

諸外国の研究の大部分は鉛直荷重のみであり、水平荷重については少ない。

### I I 構造体構成要素

林業試験場 神谷文夫

はじめに

戦後、他構造に押されればなしであった木構造も、多くの研究を背景にその構造安全性についての市民権を得て、かつて公認されなかった材料や構造システムの認可が得られるようになってきた。

しかしながら、木構造をとりまく事情は大きく変遷を続けており、特に低質化する木材資源と高度化する建築に対する要求性能には技術で応えるしか術がなく、木材強度や木構造の研究にたいする期待は大きいと思われる。

これまでの日本の木構造の研究は、住宅を中心として行われてきたが、これからの研究は木構造の限界に挑戦するところであり、住宅以外の構造に対して、これまでの設計法がそのまま使えるとは限らない。その意味で、戦前の中・大規模構造の建築が間断なく続いている諸外国での研究等をおおいに参考にしていく必要があるように思われる。

そうしたことから、これから紹介する研究には、積極的に外国のものを含めた。

#### (1) 複合梁

##### (1) - 1 トラス

トラスは短材を接合して長いスパンを架け渡すことができ、諸外国では住宅および住宅以外の中・大規模構造の梁として多く用いられている。我国に於ても戦前から使用され、

枠組壁工法住宅ではその導入当初から、合板ガセットやネイルプレートによる屋根トラスが利用されてきた。ネイルプレートを用いた床トラスは今年初めて建設大臣の認定を受けたが、良質な梁材の不足とともに今後その需要はますます増大するものと思われる。

トラスの構造上の特徴は、軸力で抵抗するところから木材断面の利用に無駄がないことが挙げられる。これを換言すれば強度的に遊んでいる断面がなく、また、構造形式としては部材の1微小部分の破壊が系全体の破壊につながるシリーズシステムに近いので、安全性の面から高い精度の解析が要求される。

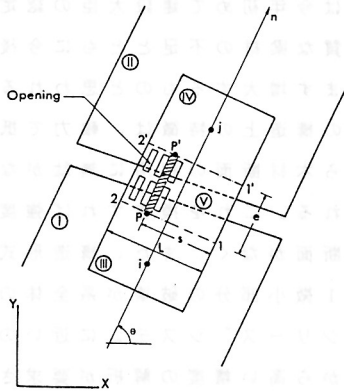
一般にトラスの安全率は、構成材料(部材および接合部)の安全率より低くなる。このため、北米などでは強度の信頼性の高いMSRランバーが用いられており、また、下弦材はフィンガージョイント材でない場合も含めてブルフローディングを行うことが検討されている。

#### 解析レベル

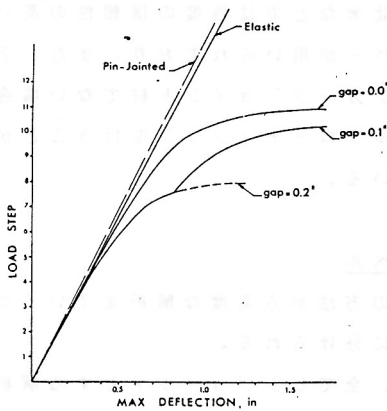
戦前の方法から高度な解析までいくつかのレベルに分けられる。

1. 全てピンジョイントとする解析... 静定構造なので机上の計算が可能。
2. 通し部材を考慮したFEMの線形解析... 日本での設計レベル。
3. さらに接合部をスプリング(回転モーメント、軸力、剪断力)とした線形解析... Suddarthが開発したPPSAプログラム(/)が有名。
4. 接合部のスプリングや材料の非線形性を考慮した解析。
5. さらに、接合部のギャップ、木材のめり込み、力の偏心による接合部の回転、プレートの座屈などを考慮し

た解析... Foschi (2)。



ギャップ  
と座屈



ギャップ  
の影響

図一 1 Foschi の解析。

トラスの解析については次の事が云われている。

1. 解析のレベルがインプットデータ（材料や接合部の情報）のレベルを追い越した。
2. 住宅構造では、トビックスがトラス単体からそれを用いた床や屋根の解析に移りつつある。（前述5の解析は屋根の解析プログラムのサブルーチンである）

実験

大きいトラスでは McMartin(3)、Keenan(4)の実験がある。スパン21mのトラス45体、スパン12mのトラス30体が破壊され、スパンが長くなると材料のVolume効果で強度が低下することが指摘された。

日本の実験では後藤(5)、宮島(6)、藤井(7)、金谷(8)、佐野(9)、伊藤(10)、小松(11)、堀江(12)、神谷(13)など多数があり、計算値と実験値とが良く一致することなどが示された。

また、長期的な性能では、Suddarthらによるクリープ試験、含水率のCyclic試験が7年にわたって行われており、その結果が近々発表される予定になっている。

これからのトビックス

1. 構造信頼性解析

強度変動の大きい木材を用いるトラスでは、スパンに比例して安全率が大きく低下する。特に、住宅以外の構造への利用を考えると信頼性解析が必要になろう。そのためには、インプットデータである材料と接合部の情報が不可欠であり、グレーディングメンバーとの連携プレーが望まれる（Appendixを参照）。

2. 長期性能試験

我国の気候は外国のそれと異なるため、独自の実験を計画する必要がある。

3. 設計マニュアルの整備

高度な解析のレベルと設計レベルとのギャップを埋める必要がある。近似計算法の開発、形状による強度低下や接合部の変形による剛性低下を簡単に求める方法の開発などが望まれる。また、複雑な接合部設計が自動的に行えるソフトの開発も必要であろう（釘打ち合板

ガセットトラスの例として前田ら(14)のものがある)。

### (1) - 2 ボックスビーム、Iビーム

#### 解析

ボックスビーム、Iビームの研究は剪断たわみを考慮した Newlin(15)の解析などでほぼ確立したと考えられる。アメリカでは A P A の設計規準や製造規定(16)があり、日本の木構造設計規準にもそれが載せられている。

日本の研究では、宮島(17)、後藤(18)、高見(19)、平嶋(20)、海老原(21)、徳田(22)、定方(23)のものがあり、実験値と理論値が良く一致することなどが報告されている。

解析上の一つのポイントとしてはウェブの座屈があり、平嶋の研究(20)は A P A の設計式を一步掘り進めたものとして注目される。

#### N Z のボックスビーム

N Z では、最近長さ 4.4 m の合板ボックスビームを用いた展示場が設計された。フランジには集成材が用いられ、4' × 8' の合板がウェブとして縦使いされている。ボックスビームの開発当初の目的は材料の節約にあったが、N Z のボックスビームは集成材の能力を越えるもので、ボックスビームの今後の一つの方向を示唆するものと思われる。

#### トラスジョイスト社の I ビーム

アメリカのトラスジョイスト社ではフランジに L V L、ウェブに合板または O S B を用いた I ビームなどが大量生産されており、住宅および中・大規模木構造の梁材として供給されている。強度上の問題点は、バラツキの大きい木質材料を用いて如何にバラツキの小

さな梁材を製造するかという点にあり、超音波を用いた L V L ラミナのソーティング、最終製品の抜き取り破壊試験などが行われている。製品強度のバラツキは主としてウェブ部材の強度のバラツキに依存することで、ウェブ部材の品質管理と強度保証などが今後の課題となる。

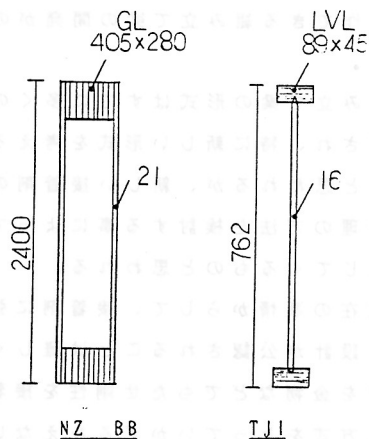


図-2 N Z の Box Beam と T J I

#### 今後の問題点

今後の問題点を探ると、一つには N Z のような大きな梁の場合の寸法効果がある。特に、縦継ぎラミナを用いる集成材のフランジは引張応力を受けるが、大断面集成材の引張強度については研究が乏しいので材料メンバーとの連携プレーが必要であろう。また、ウェブの座屈については平嶋(20)の指摘にあるように十分な研究がなされていないので、特に大型のボックスビームを対象とした研究が望まれる。

さらに、釘を用いた現場接着や釘打ちだけによる製造方法も可能性を含めて再検討する必要がある。この場合、特に長期的な性能がポイントになると考えられる。

(1) - 3 現場で組み立てる複合梁

短・小径化する木材の資源事情によって、今後梁材の供給力はますます減少して行くものと考えられる。木造住宅の大部分を占める在来工法は原則的に現場工法であり、現場で製作できる組み立て梁の開発がのぞまれている。

組み立て梁の形式はすでに多くのアイデアがだされ、特に新しい形式を考えることは難しいと思われるが、新しい接着剤の利用や製造管理の方法を検討する事によって、可能性が生じてくるものと思われる。

現在の事情からして、接着剤に強度を期待する設計が公認されることは難しく、当面は強度を金物などでもたせ剛性を接着剤でもたせる方式をとっていかざるをえないであろう。

したがって、精密な解析がポイントとなる研究テーマではないが、将来の木構造にかかわる非常に重要な技術開発課題の一つとしてとりあげたい。

つぎに、最近実験された組み立て梁を示す。

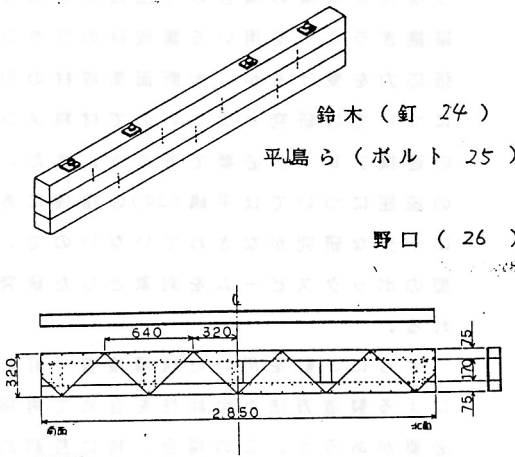


図-3 重ね梁と透かし梁

(2) 床、屋根 (鉛直荷重)

鉛直荷重は構造体が日常的に受ける荷重であり、それに対する性能は居住者が確実に感じる構造性能である。これまでの研究は主として床を対象に行われてきたが、ここで行われた解析は屋根にも応用できるものである。

構造的効果

面材を張った枠組壁工法の床の解析は、図-4に示すように梁(根太)単体→梁要素→床全体の順で発展してきた。

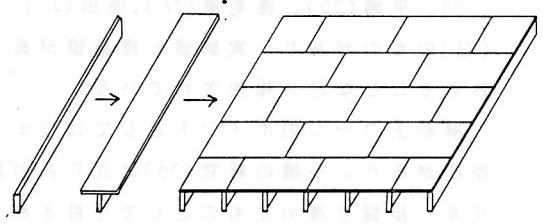


図-4 解析の歴史的順序

いま、床全体の強度的性質をみると次の2つの構造的効果が存在する。

1. 面材がフランジとして働く(Composite action)
2. 両側の根太は全面が支持されており、面材が連続梁として働く(Lateral load distribution)

これらの効果は、すでに次のように構造設計にも部分的にとり入れられている。

1. の効果 - 根太剛性をアップ(日・米)。日本は25%(枠組壁工法、接着剤併用)
2. の効果 - 根太強度を15%アップ(米)

1) Composite action

床の場合、面材の shear lag と partial

composite action (層間すべりをともなう場合)に分けられる。

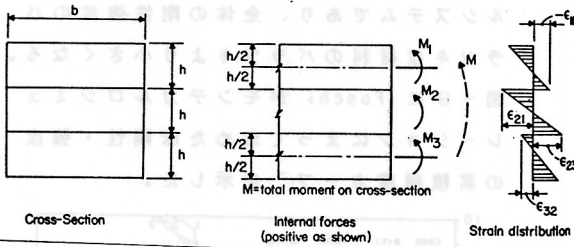
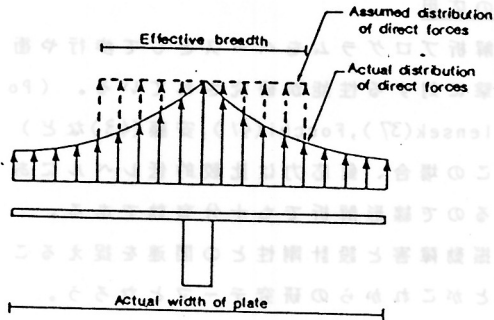


図-5 Shear lag と Partial Composite action

shear lag は Newmark(27) が微分方程式の解を誘導し、Amana と Booth(28)がこれを partial composite action と組み合わせて、その後の研究のベースとなった。日本でも平島(29)、菊池(30)などの研究がある。

リブ上のフランジ応力を同じとしエネルギー的に等価な等分布応力の幅(有効幅)を考えると釘着梁として解析する事ができる。

釘着梁の partial composite action については Goodman(31)、菱田ら(32)が微分方程式の解を与えた。なお、解析に必要な釘接合部の荷重-変形関係をインプットデータとせず解析の中に含めた沢田ら(33)の研究は、将来の構造設計の一つの方向を示すものと考

えられる。

Goodman(31) は梁の長さ方向に分布する釘応力の平均値に対してスリップ係数を変化させ、非線形の解を出した。これは、微分方程式をベースにしているため理論的には難点があるが、最初の非線形解として注目される。

梁上の釘1本毎の非線形性を扱った解は、差分法を用いた Tremblayら(34)のもの、釘点毎の釣り合い式を求めて連立に解いた神谷(35)のものがあるが、現在ではFEMを用いる方法(辻野(36)その他)が主流になっている。

## 2) Lateral load distribution

床の剛性と強度は、床要素のそれよりはるかに高い。これは加わった荷重が根太の支点だけでなく、面材を介して全面を支持された側根太にも流れるからである。

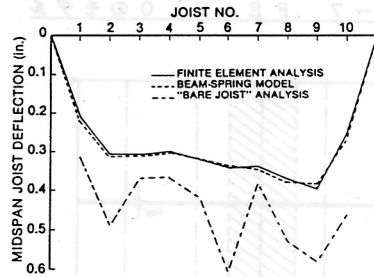


図-6 床根太のたわみ分布 (McCutcheon)

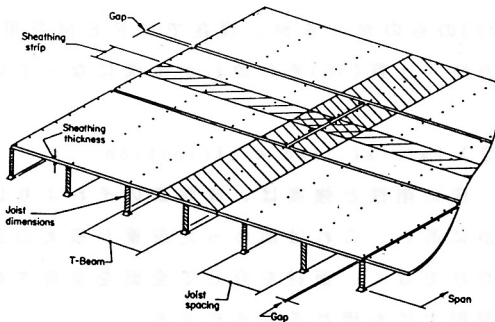
## 床の解析

これまで発表された床の解析プログラムとモデルを表-1、図-7、8に挙げる。

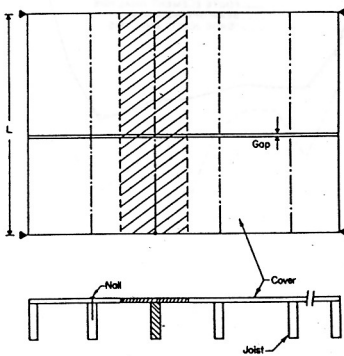
表一 床の解析プログラムと特徴

プログラ名	文献	Shear lag	Partial composite action	Nonlinear	Gap of sheathing
-	Polensek (37)	x	△	x	x
-	Venderbilt(38)	△	○	x	x
FEAFLO	Thompsonら(39)	△	○	x	○
NONFLO	Wheatら (40)	△	○	○	○
FAP	Foschi (41)	○	○	○	○
-	McCuehon (42)	△	△	x	○

○:考慮  
 △:別計算でファクターを求めてインプットする  
 x:考慮せず



図一七 FEAFLOのモデル



図一八 FAPのモデル

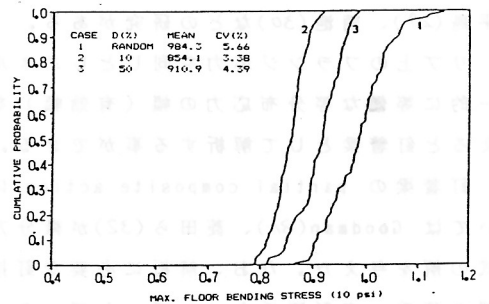
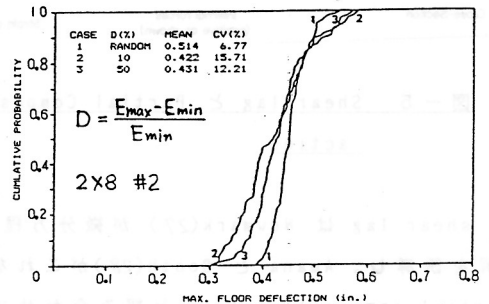
面材の力伝達効果は面材の継ぎ目(gap of sheathing)の影響を受けるので、大部分のプログラムではこれが考慮されている。

考慮した因子の多いことではFAPが最右翼にある。すなわち、根太の回転、根太の横方向のたわみ、応力に応じた有効幅の扱い(他のプログラムは仮定した有効幅をインプッ

トする方式)などである。

解析の応用

1. 解析プログラムをベースとして歩行や衝撃に対する性能が研究されている。(Polensek(37), Foschi(41), 安藤(43)など) この場合、釘応力は比較的低レベルにあるので線形解析でも十分有効である。振動障害と設計剛性との関連を捉えることがこれからの研究テーマとなる。
2. 床を構成する材料はバラツキがあり、それが応力分布や全体の剛性に影響を与える。しかしながら、床は構造的に平行システムであり、全体の剛性強度のバラツキは材料のバラツキより小さくなる。図一九に Foschi がモンテカルロシミュレーションによって求めた床剛性・強度の累積頻度カーブを示した。



図一九 床のたわみ・最大曲げ応力度の出現頻度(Foschi)

## その他の問題点

1. 非線形解析においては釘の変形方向が不定であるため多くの仮定を設定している。仮定による誤差を少なくしたより精度の高い解析が望まれる。
2. 高度な解析プログラムと設計式のギャップを埋めること。McCutcheonのプログラムはシンプルでありながらFEAFLOと同程度の解析精度をもっている。このような簡便な計算方法を検討することが望まれる。
3. 歩行や衝撃によるたわみや振動に対する要求性能を明確にすること。生理学的なアプローチが必要と思われる。

## 屋根の解析

床の場合と違って強度の予測が重要なテーマとなる。トラス単体はシリーズシステムであるが、屋根が構成されたときシリーズ/パラレルの混合システムとなる。現在FPLとFORINTECの共同研究プロジェクトが走っている。

### (3) 耐力壁、床（水平荷重）

## 実験的研究

面材の剪断強度をもって水平力に抵抗する耐力壁や床の構造システムは、木構造の中で大きな地位を占めつつあるが、その原動力になったのは多くの実験的研究である。

アメリカではAPAの実験など(44)をベースにして許容耐力が与えられ、中・大規模木構造の設計の一つのよりどころとなっており、日本ではプレハブ住宅の開発→枠組み工法の導入→在来工法の改良の流れの中で常

に最も重要なテーマとして研究が行われてきた。この間の日本での実験の量は相当なもので、耐力壁の静的な加力による試験法・評価法などが確立されてきた( )。

日本での床の静加力実験は、建研(45)、林業試験場(46)、武蔵工大(佐野47)などで行われた。床の工法は、在来、枠組み壁、プレハブなどで、試験体の最大寸法は10.92m x 3.64mである。実験で得られた強度は設計値に対して安全か否かで評価することができるが、剛性については評価基準がなく、これまでに公認された床の剛性が一つの判断基準になっている。なお、在来工法の床(製材板張り)については、他工法の床よりはるかに剛性・強度が劣るので、問題が残されている。

## 解析

解析は実績を後追いつる形で発展してきた。TuomiとMcCutcheon(48)の面材張耐力壁の解析は、釘の変形方向を仮定した線形理論であるが、その後の研究の引き金となった。平嶋(49)はTuomiらの式を近似的に非線形に拡張し、McCutcheon(50), Easleyら(51), 坂本(52), 安村(53), 神谷(54)は釘の変形方向の仮定によらない非線形解析を行った。

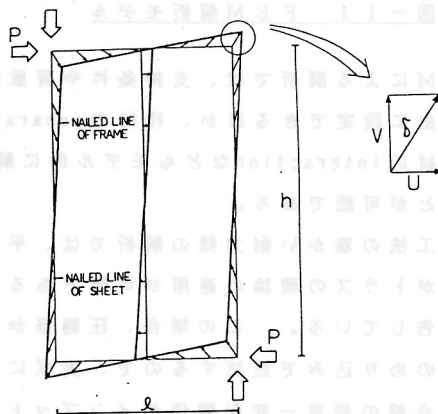


図-10 FEMによらない解析の変形仮定

以上の解析では、純粋な剪断力を受ける幾何学的に対称な耐力壁であることが要求され、また、枠材の曲げ変形などは無視されているが、より一般的な解析としてFEMによるものが発表されている(野口(55)、Itaniら(56)、Easleyら(57)、Gupta(57)、秦(58)など)。

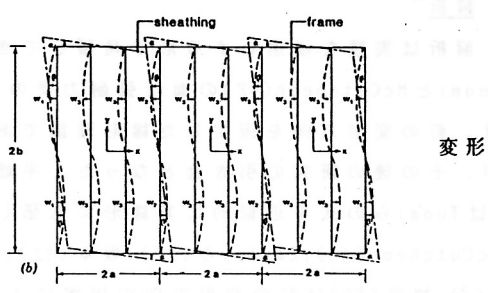
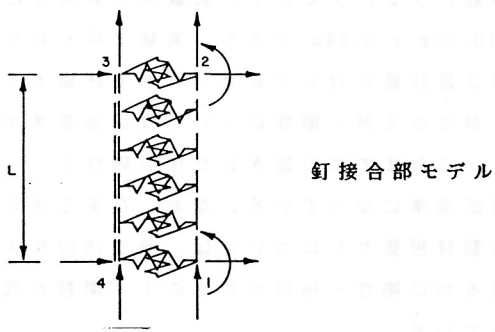


図-11 FEM解析モデル

FEMによる解析では、支持条件や荷重条件を自由に設定できるほか、枠材のseparation、面材のinteractionなどもモデル的に解析することが可能である。

在来工法の筋かい耐力壁の解析では、平島ら(59)がトラスの理論の適用が可能であることを報告している。この場合、圧縮筋かいは端部のめり込みで抵抗するので、実状にあった接合部の荷重-変形関係がインプットデータとして必要である。

ダイアフラム単体と構造体との関係

単体の解析は一応のレベルに達していると考えられるが、単体と構造体との関係は依然”古くて新しい問題”である。杉山ら(60)が耐力壁と建物について行った実験では、タイロッド方式による耐力壁の性能から建物の耐力を推定した場合、変形が小さいときは過小評価、大変形になると過大評価となることが報告されている。

また、床については、先ほど述べたように剛性に対する要求性能が明確でなく、耐力壁を含めてこれからのダイアフラムの研究は、構造体の研究と連動させて行う必要がある。

仕上げ材の効果

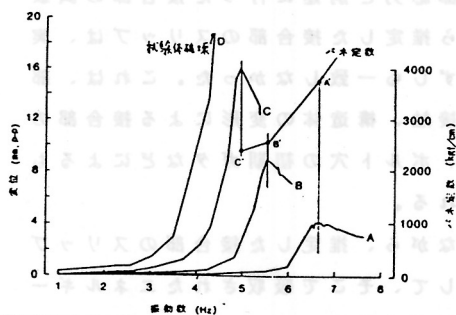
モルタルなどの仕上げが施された場合、その剪断剛性・強度はかなり増加することが知られている(61)。現在、仕上げ材の効果は余力として扱われているが、振動問題などを検討するとき正確な剛性などを知る必要があるので、その効果を仕上げの種類毎に定量的に把握することが望まれる。

振動問題(水平方向)

耐力壁の地震波による振動実験は、支持条件と荷重条件をrealisticにすることが難しいので、一部の例外(ワシントン州立大学の実験)を除いてあまり行われていない。建材試験センターや林試では正弦波を用いた振動実験が行われ、繰り返し回数と振幅による固有周期や減衰性の変化が調べられた(62,63)。

コンピューターを用いた解析は、東大の坂本研やワシントン州立大学などでおこなわれている。木造耐力壁は荷重履歴による影響が大きく、これをどのように扱うかが解析の一つのポイントとなろう。

床の振動については、最近林業試験場で実験が行われ(64,65)、平嶋らは静的な床剛性から固有周期の予測が可能であること、非線形の剛性のために振幅に応じて固有周期が変わることなどを報告している。



図一 1 2 床の変位と共振周波数

#### 実用設計へのアプローチ

多くの解析結果を利用して、より合理的な設計法の開発を行うことが望まれる。

特に、現在ダイヤフラムの利用が認められていない集成材構造では、住宅などのように仕様を固定化することが難しいので、応力に応じたダイヤフラムの設計法や接合部の計算法を開発する事が必要であろう。

開口部については、耐力壁では小壁の効果余力としても安全性に問題はないが、床や屋根の場合は局部的な剛性と強度の低下となるので、その補強法を検討する事が必要であろう。

#### (4) 単位骨組み

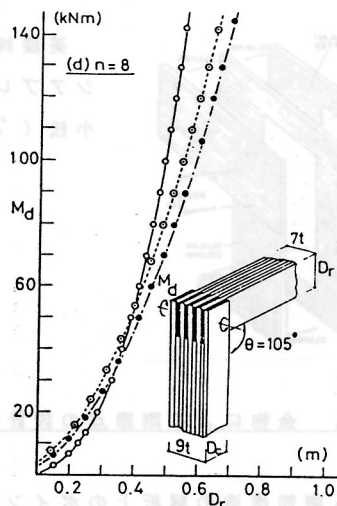
#### 集成材アーチ

2 こう節、3 こう節の集成材アーチの実大実験はこれ迄に数多く行われ(66)、実験値と計算値とが良く一致することが報告されて

いる。しかしながら、実験されたアーチには梁の部分に通常施される継ぎ手がなく、こうした継ぎ手は完全な剛にはならないことが指摘されているので(67)、継ぎ手を持つアーチの実験を行う必要があるであろう。

#### ラップジョイントによる剛節構造

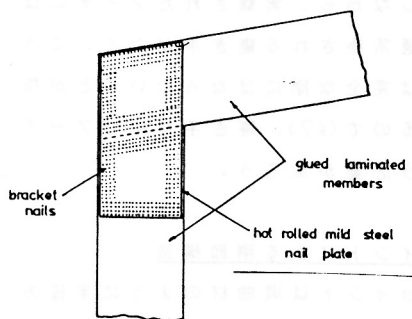
ラップジョイントは湾曲材のように半径方向応力で破壊することがなく、接合強度も高い。破壊力学にもとづく小松の研究(68)があり、幅はぎの技術が確立すれば大断面の集成材構造も可能であると思われる。



図一 1 3 ホラップジョイントの強度

#### 金物による剛節構造

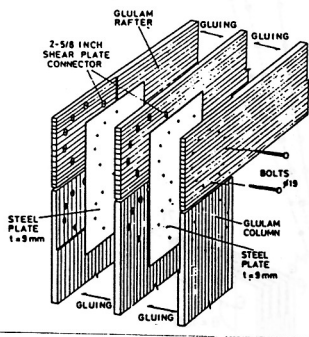
湾曲部を剛節点とするラーメン構造は用途が限定される。地震のないヨーロッパでは通直材を金物で接合したラーメン構造が設計されてきたが、地震国であるNZや日本でもこうした構造が相ついで設計された。金物を用いた節点は半剛節となるが、接合部内の応力と変形を正しく捉えられればラーメンの解析は可能であり、集成材構造の可能性を拓けるものとして注目される。



N Z の  
Nail on Plate  
(69)

ンで従来のアーチ構造には見られない高い剛性を示した。しかしながら、接合部の数多くそのスリップの影響が剛性にあらわれるので、設計に際してはこの点を考慮することが必要である。接合部のスリップを無視して求めた接合部応力と別途に行った接合部の試験結果とから推定した接合部のスリップは、実験値と必ずしも一致しなかった。これは、部材端部の接触、構造体の変形による接合部の強制変形、ボルト穴の初期ガタなどによるものと思われる。

しかしながら、推定した接合部のスリップをもとにして、そこで吸収されたエネルギーをもとめ仮想仕事法でスリップによる付加たわみを計算した結果、実験値と良く一致した。



美深林務署  
シアプレート  
小松(70)

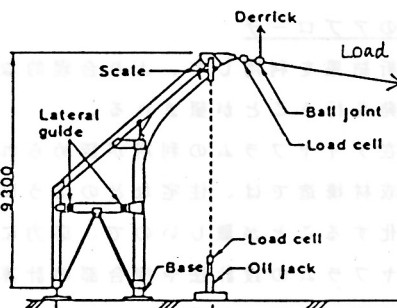
図一14 金物による剛節点の設計例

金物による剛節構造の解析上のポイントは接合部の応力解析につけるが、接合部応力としてM, N, Qの3つが作用するので、非線形で解く場合、高度のテクニックが必要である(71)。

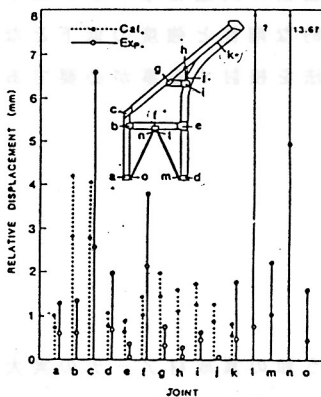
ラーメン以外の構造

木造ラーメン構造では高い水平剛性を確保するために大きな断面が必要になる。三井木材工業(株)は新しい構造形式の試みとしてトラス形式の骨組を開発し、その実験が林業試験場で行なわれた(72)。

この骨組の設計荷重時の変形は1/256ラジア



加力方法



接合部の  
変形

図一15 トラス型骨組みの加力試験

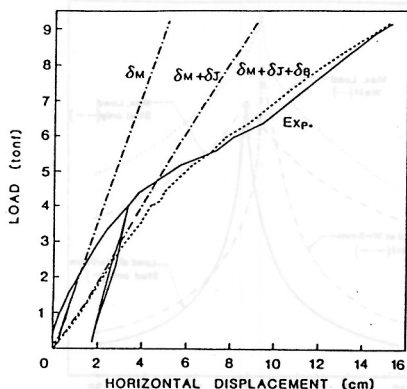


図-15 (続き) 頂部の変形

$\delta_M$  = ピンジョイント仮定の変位

$\delta_J$  = joint slip の付加変位

$\delta_B$  = joint座屈の付加変位

住・木センターの開発プロジェクトでは、製材と釘打ち合板ガセットによる、また、集成材とボルトによるトラス型ラーメンの畜舎が設計され実験が行われた(73)。いずれも計算どりの剛性と強度があり、畜舎以外への応用が期待される。

また、北林産試で開発されたホールコンストラクション (PTハウス 74) の構造システムは、NZ などでは住宅に用いられているもので、日本でも検討する余地がある。

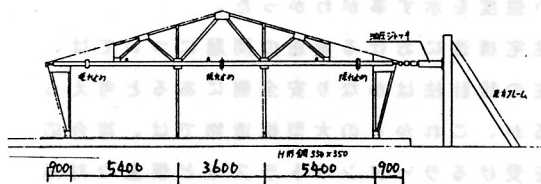


図-16 心持製材を用いた釘打ち合板ガセットによるトラスラーメン骨組み

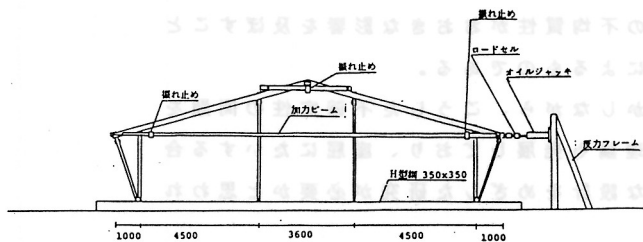


図-17 集成材を用いたトラスラーメン骨組み

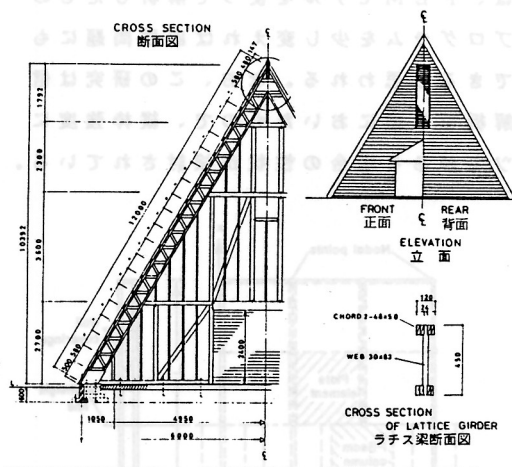


図-18 接着トラスを用いた骨組み (75)

(5) 構造部材、構造要素の座屈

構成部材、構造要素の座屈

座屈は古くからの問題であるが、実用設計の面では殆ど進歩していないといわれている(76)。

柱の圧縮力に対する設計では、昔ながらの”両端が単純支持された柱-梁”理論が用いられている。複合部材であっても柱の部分だけを取り出し、複合効果を見捨てて設計されているのが現状である。その理由は、座屈現象そのものが複雑であるのにくわえて、実際

の荷重条件、支持条件が明確でなく、また、材料の不均質性がおおきな影響を及ぼすことなどによるものである。

しかしながら、こうした不確定性の問題を扱う理論も発展しており、座屈にたいする合理的な設計をめざした研究が必要かと思われる。

曲げと圧縮力を同時に受ける面材張耐力壁やパネルの性状が Polensek(77), 菊池(78), 安藤ら(79)によって研究された。Polensekの研究は、FEMモデルを使って解析したもので、プログラムを少し変えれば座屈問題にも適用できると思われる。なお、この研究は信頼性解析を念頭においたもので、縦枠強度にバラツキがある場合の性状が検討されている。

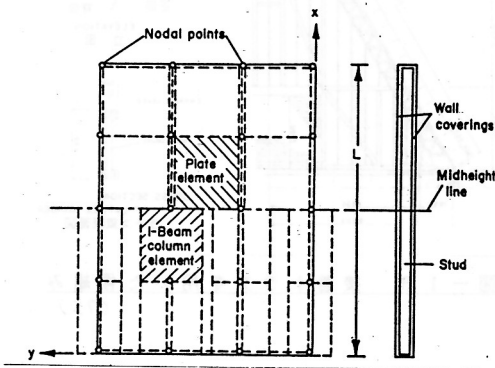


図-19 Polensek の壁の圧縮曲げモデル

神谷(80)は、Composite action を考慮した面材張耐力壁モデルの解析(線形、非線形)を行った。支持方法はピンとし、荷重の偏心量をかえた数値実験を行った結果、同じ偏心量の条件では縦枠だけの場合と比べて壁の耐力の方が高いとの知見を得ている。

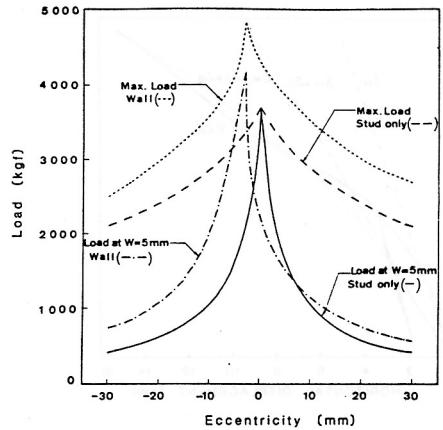


図-20 Composite action による耐力壁座屈強度の上昇

釘打ち重ね柱の解析が、RassamとGoodman(81), Malhotra(82), 沢田(83)、工藤(84)、辻野(85)らによって行われている。釘のようなすべりをともなう接合法でも、座屈に対してはかなり効果的であることが示めされた。

鈴木(86)は、実条件で支持した枠組壁工法のコーナー部分の圧縮試験を行った。それによると、直交する2面に合板を張った場合座屈は生じず、合板が無い場合でも個々の柱のEIの合計から計算した座屈荷重よりはるかに高い強度を示す事がわかった。

住宅構造における座屈の問題については、現在の設計法はかなり安全側にあると考えられるが、これからの大型構造物では、複合応力を受けるラーメンやトラスなど慎重な対処が必要になる場面がでてこよう。ボックスビームのフランジについては既に述べた。

なお、大規模建築の一つの様式であるドームは、曲面を構成することによって主として

軸力で荷重に抵抗する構造形式である。ドームの構成要素は、軸材料だけによるシンプルなものから面材の協力効果を期待するパネル、キーピードームのようなトラス/パネルが複合した複雑なものまである。こうした構造では実大実験を行うことは難しいので、模型実験や、構成要素の解析、実験が中心となる。

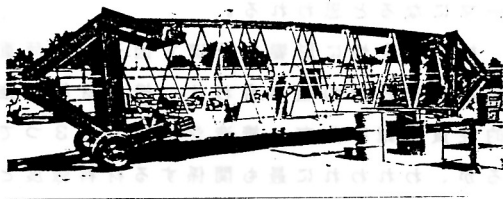


図-21 LVL flange と steel pipe latticeからなる Kibbie Dome element の座屈試験 (87)

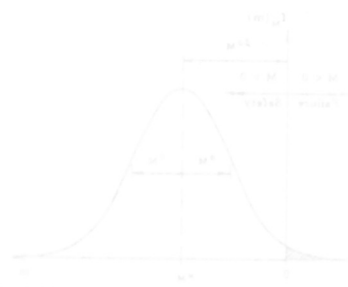


図-22 座屈試験結果 (87)

APPENDIX - 1

構造システムの違いによる強度の変化

構造安全性を従来の確定的な方法ではなく、統計と確率の知識を用いて評価する構造信頼性理論は、最近急速な発展をみせ、建築設計にも取り入れられるようになってきた。この理論は、構造強度と荷重を不確定性のものとしてとらえ、破壊（あるいは定められた損傷）確率を求めることで安全性を評価するもので、既に北米やヨーロッパなどでは、プリミティブな形で Building Code などにもとりいれられている。

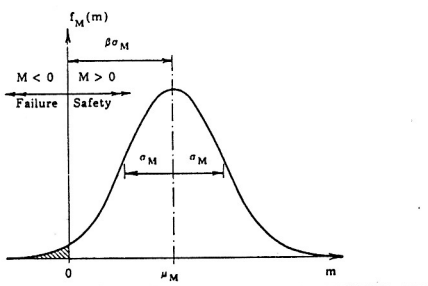
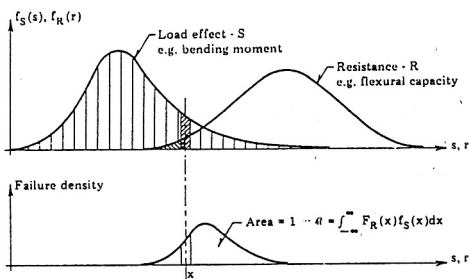


図 - A 1 構造信頼性の概念図

いま、 $M = R - S$  の値を考えると、 $M < 0$  で構造物は破壊する。 $M$ は偏差，

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

をもつ分布関数である。上図のような  $\beta$  を定義すると、 $\beta$  は安全性を示す指標となり、安全性指標 (Reliability Index) と称せられる。

木構造においても集成材の梁をはじめ、トラスや床の剛性・強度について解析が行われようとしており( )、今後の大きな研究テーマになるとと思われる。

構造安全性に影響を及ぼす因子は、荷重の確率分布とその組み合わせ、構成材料の強度的性質の確率分布、構造システムの3つであるが、われわれに最も関係する材料強度と構造システムが安全性に与える影響について概説する。

構造システムをモデル化すると、トラスなどのように1つの部材の破壊が構造全体の破壊にいたるシリーズシステムと、床やラーメンなどの不静定構造のように1つの部材の破壊が全体の破壊に必ずしも結びつかないパラルシステムとに分けられる。

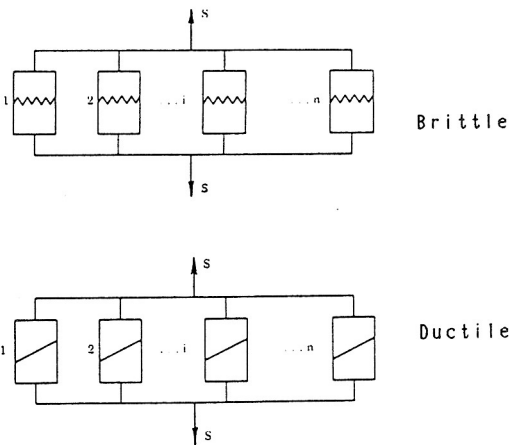


図 - A 2 Parallel Structural System

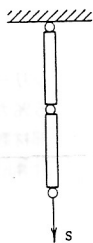


図 - A 2 (続き)

Series Structural System  
Brittle or Ductile

いま、使用部材の強度が平均  $379 \text{ kg/cm}^2$ 、変動係数  $23.43\%$  (USA Hem-Fir 2X4 1.5 E-1650f の実験データ) の正規分布に従うとする。この製材の 5%ile 値は  $233 \text{ kg/cm}^2$ 、安全率  $2.1$  で除した値は  $111 \text{ kg/cm}^2$  となり許容応力度  $116 \text{ kg/cm}^2$  ( $1650 \text{ psi}$ ) をほぼ満足している。

荷重継続時間 1 day に対する許容応力度は  $154 \text{ kg/cm}^2$  で、許容応力度に相当する荷重がかかったときのこの材料の破壊確率、 $P_f$  は、正規分布の確率密度から、 $0.56\%$  となる。

2本の部材から構成されている次の3つのシステムについて、破壊確率、 $P_f$  を求める。ただし荷重は  $154 \text{ kg/cm}^2$ 、確定値 ( $\sigma_s = 0$ ) とし、強度に対する volume 効果などは考えない。また、2本の部材の強度に関連はないものとする。

### 1. シリーズシステム

$$P_f = 1 - P_s = 1 - P(R_1 > S) \times P(R_2 > S) \\ = 0.0112 \quad \dots \quad 1.12\%$$

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) = 2.28$$

### 2. パラレルシステム (ductile)

$$S = 2 \times 154 = 308, \quad \bar{R} = \bar{R}_1 + \bar{R}_2 = 758 \\ \sigma_m^2 = \sigma_R^2 + \sigma_s^2 = 2 \times (379 \times 0.2343)^2 \\ = 15770$$

$$\beta = \frac{\bar{R} - S}{\sigma_m} = \frac{758 - 308}{\sqrt{15770}} = 3.58$$

$$P_f = \Phi(\beta) = 0.00017 \quad \dots \quad 0.017\%$$

### 3. パラレルシステム (brittle)

$$S = 2 \times 154 = 308$$

$$P_f = 1 - P_s = 1 - P(R_1 > S/2 \text{ and } R_2 > S/2) \\ - P(R_1 < S/2 \text{ and } R_2 > S) \\ - P(R_1 > S \text{ and } R_2 < S/2) \\ = 1 - A - B - C$$

$$A = (1 - P(R_1 < S/2)) \\ \times (1 - P(R_2 < S/2)) = 0.9888$$

B, C : まず、 $P(R_1 > S)$  ( $= P(R_2 > S)$ ) を求める。

$$\beta = \frac{\bar{R}_1 - S}{\sigma_{R_1}} = \frac{379 - 308}{0.2343 \times 379} = 0.80$$

$$P(R_2 > S) = \Phi(\beta) = 0.212$$

$$B, C = P(R_1 < S/2) \times P(R_2 > S)$$

$$= 0.0056 \times 0.212 = 0.00119$$

よって、

$$P_f = 1 - 0.9888 - 2 \times 0.001187 \\ = 0.0088 \quad \dots \quad 0.88\%$$

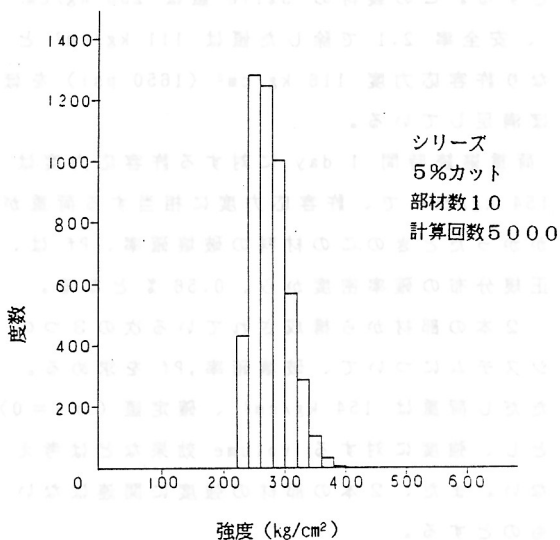
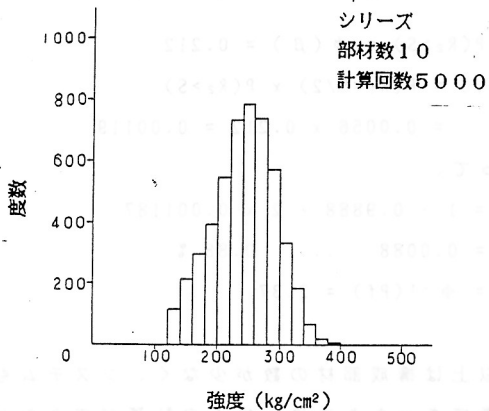
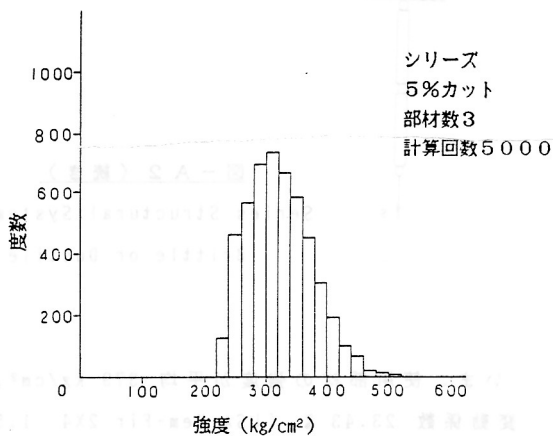
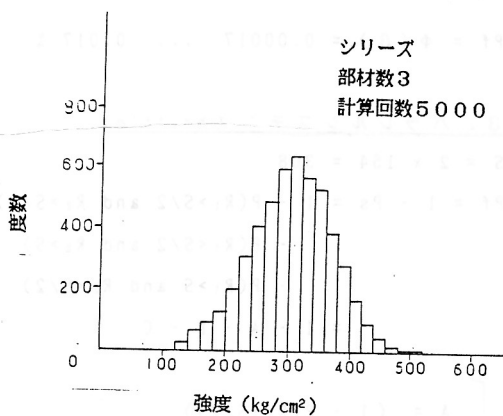
$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) = 2.37$$

以上は構成部材の数が少なく、システムも簡単であったために、机上の計算ができたが、実際の構造物は多数の部材や接合部からなり、システムもパラレルとシリーズの混合体となるので、簡単には計算できない。

しかしながら、モンテカルロシミュレーションの手法(乱数をもとに構成材料の個々の強度などを定め、解析理論を用いて構造体強度を計算し、これを多数回くりかえす)を用いれば、構造体の強度や剛性の確率分布を求めることができる。

この方法で求めた 部材数 = 3, 10 のと

きの強度分布を図一A3にしめす。



図一A3 モンテカルロシミュレーション  
で求めたシステムの強度分布

このように、シリーズシステムでは部材数が増えるにつれて強度が下がり、バラレルシステムでは逆に強度が上昇する。いま、システムの破壊確率が部材の破壊確率 0.56% と同じになるときの荷重(部材1本あたり)をもとめると表一A1のようになる。

同表には、proof loading の方法で 5%ile

以下の強度をもつ材料が除かれた場合の値を併記した。この場合、システムの破壊確率 0.56% とすると、 $n = 10$  のシリーズシステムであっても許容応力度の 1.44 倍までかけることができる。

以上は信頼性の高いMSRランバーの場合であるが、つぎに視覚等級区分製材で日本の

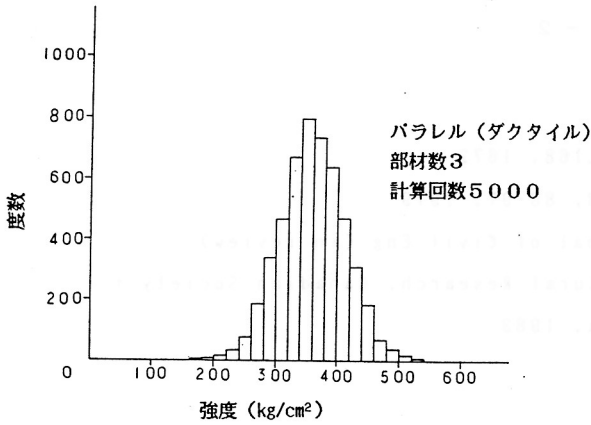
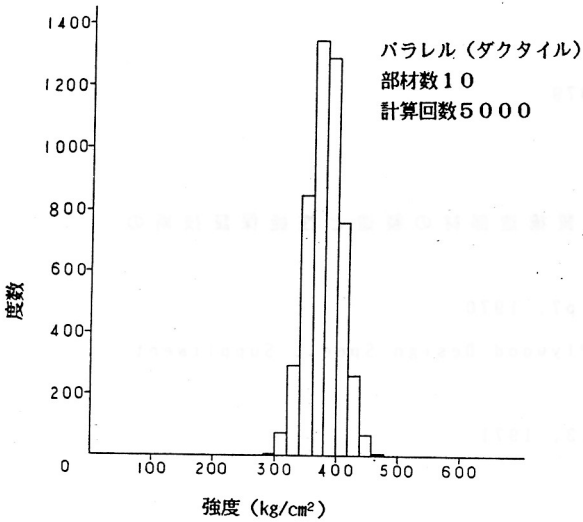


表-A1 破壊確率0.56%の荷重 (部材1本当り kg/cm²) カッコ内は比率

システム	材料	n=1	n=2	n=3	n=10
シリーズ	1	154 (1)	149 (0.97)	141 (0.92)	125 (0.81)
シリーズ	2	233 (1.51)	227 (1.47)	224 (1.45)	221 (1.44)
バラレル	1	154 (1)	221 (1.44)	226 (1.47)	286 (1.86)

材料1: 平均 379kg/cm², 変動係数 23.43%, 正規分布  
 材料2: 材料1より強度 5%ile 値以下の材料を除いたもの



この材料の樹種グループを SI (D Fir-L) とすると、短期許容応力度は 240 kg/cm² で、許容応力度に対する破壊確率は 54% となる。この材料からなるシリーズシステムの破壊確率は、表-A2 に示すように非常に高い。

この原因の一つは、曲げと引っ張りの許容応力度を等しくしているためである。そこていま、引張許容応力度を曲げの 0.55 倍、132 kg/cm² とすると、材料の破壊確率は 3.0% となる。この場合のシリーズシステムの破壊確率を表-A2 に併記したが、5.9%(n=2) - 26.3%(n=10) と、なお高い値を示している。

北米における同樹種グループの引張許容応力度 (1 day) は 98 kg/cm² で、材料の破壊確率は 0.66% , シリーズシステムの破壊確率は表-A2 のように 1.32%(n=2) - 6.41%(n=10) となるが、n=10 の値はまだ高い。

図-A3 (続き)

許容応力度を用いた場合について計算する。

中井の実験によれば、オウシュウアカマツ 2X4 材の引張強度は、平均 238 kg/cm², 標準偏差 56.4 kg/cm² である。正規分布を仮定した場合の 5%ile 値は 145 kg/cm² で、順位法による値 147 kg/cm² とほぼ同じである。

表-A2 オウシュウアカマツを用いたシリーズシステムの破壊確率 (%)

引っ張り許容応力度	n=1	n=2	n=3	n=5	n=10
$f_b = 240 \text{ kg/cm}^2$	46.0	78.8	90.3	97.9	99.96
$= 0.55 \times f_b = 132 \text{ kg/cm}^2$	3.0	5.9	8.7	14.1	26.3
$= 98 \text{ kg/cm}^2$ (USA, 1day)	0.7	1.3	2.0	3.3	6.4

## A P P E N D I X - 2

引用文献

1. Suddarth, S.K., FPL Research Paper, FPL168, 1672
2. Foschi, R.O., FPRS Proceedings, P-79-28, 88-97, 1979
3. McMartin, K.C., et al., Canadian Journal of Civil Eng (in review)
4. Keenan, J., et al., Proceedings, Structural Research, Canadian Society for Civil Engineering, Ottawa, Canada, 1983
5. 後藤一雄、建築学会論文集、31, 1944
6. 宮島寛、材料、20(218), 1971
7. 藤井毅、北大演習林研報、26(1), 1968
8. 金谷紀行、未発表資料
9. 佐野弘、建大58年、2253-2254
10. 伊藤勝彦ほか、林産試月報、347, 1980
11. 小松幸平ほか、林産試月報、7月、8月、1979
12. 堀江秀夫ほか、建大60年、1275-1276
13. 神谷文夫ほか 建大61年、1201-1202
14. 前田典昭、北林産試、講習会テキスト、木質構造部材の製造と性能保証技術の開発、1986
15. Newlin, J.A., FPL Report, No.R, 1220, p7, 1970
16. APA, Plywood Fabrication Spec. 1974, Plywood Design Spec., Supplement #2, 1974
17. 宮島寛、木材学会北海道支部講演集、10-13, 1971
18. 後藤一雄、建築学会論文集、11-21, 1973
19. 高見勇、木材誌、7, 101-106, 1961
20. 平嶋義彦、林試研報、1294, 195-219, 1977 その他
21. 海老原徹、木材誌、28(4), 1982
22. 徳田迪夫ほか、建大60年、1269-1270
23. 定方啓ほか、建大57年、2063-2064, 建大58年、2249-2250
24. 鈴木秀三、建大60年、1273-1274
25. 平嶋義彦、木材学会大会、1986
26. 野口弘行、低コスト肉用牛畜舎設計基準策定事業構造試験報告書(統)、住木センター、1979
27. Newmark, N.M., et al., Proceedings, Society for Experimental Stress Analysis, 19(1), 1951
28. Amana, E.J., et al., Journal of the Institute of Wood Science, 4(2), 1967

29. 平嶋義彦、林試研報、225, 1973
30. 菊池重昭、建大57年, 2065-2066, 建大58年, 2247-2248
31. Goodman, J.R., Wood Science, 1(3), 1969
32. 菱田一郎ほか、造船協会論文集、104, 1959
33. 沢田稔ほか、北大演習林研究報告、35(1), 1978
34. Tremblay, G.A., et al., Wood Science, 9(1), 1976
35. 神谷文夫、林試研報、329, 1984
36. 辻野哲司、木材誌、31(11), 1985
37. Polensek, A., FPJ, 21(12), 1971
38. Venderbilt, M.D., et al., ASCE, 100(ST1), 1974
39. Thompson, E.G., et al., ASCE, 101(ST12), 1975
40. Wheat, D.L., et al., Structural Research Report, No.26, CSU, 1980
41. Foschi, R.O., ASCE, 108(ST7), 1982
42. McCucheon, W.J., FPL Research Paper, 449, 1984
43. 安藤直人、木材工業、41(7), 1986
44. APA, Laboratory Report 106, 138
45. 建設省、小規模住宅の新施工法の開発、1976
46. 平嶋義彦、鴛海四郎、木材工業、32(396-398), 32(552-554), 36(67-70), 1977, 1981
47. 佐野弘、建大55年, 1995-1996
48. Tuomi, L.R., et al., ASCE, 104(ST7), 1978
49. 平嶋義彦、木材誌、27, 1981
50. McCutcheon, W.J., ASCE, Journal of the Structural Division, 111(2), 1985
51. Easley, J.Y., et al., ASCE, 108(ST11), 1982
52. 坂本功、建大54年, 1797-1798
53. 安村基ほか、建大56年, 2253-2254
54. 神谷文夫、建築学会論文報告集、309, 1981
55. 野口弘行、建大54年 (1793-1794), 建大55年 ( )
56. Itani, R.Y., et al., ASCE, Journal of the Structural Division, 110(9), 1984
57. Gupta, A., ASCE, Journal of the Structural Division, 111(8), 1986
58. 秦正徳、木材学会大会、1986
59. 平嶋義彦ほか、木材誌、27(12), 1981
60. 杉山英男ほか、建築学会論文報告集、247(1976), 248(1976), 261(1977), 269(1978), 271(1978)
61. 平嶋義彦ほか、建大年

62. 林業試験場、未発表
63. 川島謙一ほか、建大56年(2245-2246), 建大57年(2091-2092)
64. 神谷文夫ほか、建大59年, 2669-2670
65. 平嶋義彦ほか、木材学会大会、1986
66. Appendix-3 を参照
67. 太田道彦ほか、建大58年, 2215-2218
68. 小松幸平、Proceedings, PTEC, 1984
69. Lowe, P.G., The Newzealand Journal of Timber Construction, December 1985, 11-18
70. 小松幸平ほか、林産試月報、409, 1986
71. 小松幸平、建大60年(1299-1230), 建大61年(1255-1256)
72. 神谷文夫ほか、建大61年, 2255-2256
73. 住木センター、低コスト肉用牛畜舎設計基準策定事業 構造試験報告書、1984
74. 森泉周ほか、木材学会北海道支部講演集、13, 1981
75. 小松幸平ほか、林産試月報、40, 1985
76. Johnston, B.G., ASCE, Journal of the Structural Division, 109(9), 1982
77. Polensek, A., ASCE, 102(ST7), 1976
78. 菊池重昭、建大59年(2671-2672), 建大60年(1255-1256), 建大61年(1191-1192)
79. 安藤直人ほか、木材誌、27(10), 1981
80. 神谷文夫、建大61年, 1193-1194
81. Rassam, H.Y., et al., Wood Science 2(4), 1970
82. Malhotra, S.K., et al., Wood Science, 9(4), 1977
83. 沢田稔、北大演習林研究報告、37(3), 1980
84. 工藤修、林産試月報、400(5), 1985
85. 辻野哲司、木材学会北海道支部講演集、17, 1985
86. 鈴木周三ほか、建大60年, 1265-1266
87. Nelson, S.A., ASCE. Preprint 2800, Annual Convention and Exposition, 1976

註：建大は建築学会大会学術講演梗概集（構造系）を、木材学会大会は同大会研究発表要旨集を示す。

混合構造を考へてある。

{ RC造とW造  
S造とW造