

平成元年度農林水産省補助事業  
日本住宅・木材技術センター事業

# 技術開発推進事業報告書

## 集成材構造

平成2年3月

財団法人 日本住宅・木材技術センター

## 平成元年度 集成材構造委員会 の 委員名簿

	氏 名	所 属
委員長	有馬 孝禮	東京大学農学部林産学科助教授
委 員	太田 正光	東京大学農学部林産学科助教授
〃	中村 昇	東京大学農学部林産学科
〃	丸山 則義	静岡大学農学部森林資源科学科
〃	稲山 正弘	東京大学工学部建築学科
〃	安村 基	建築研究所第三研究部耐風研究室主任研究員
〃	神谷 文夫	森林総合研究所木材利用部構造性能研究室長
〃	林 知行	森林総合研究所木材利用部集成加工研究室主任研究官
〃	川元 紀雄	森林総合研究所木材利用部接合研究室
〃	田代 貞	川島建設合資会社
〃	伊東 洋路	丸七住研工業（株）
〃	飯村 豊	三井木材工業（株）
幹 事	春川 真一	林野庁林産課住宅木材技術専門官
事務局	倉田 久敬	(財)日本住宅・木材技術センター試験研究部長
〃	鴛海 四郎	(財)日本住宅・木材技術センター主任研究員

# 第 I 編 スギ集成材の手引書 (案)

## 目 次

第 1 章 序	1
1.1 はじめに	1
1.2 スギの種類と分布	3
1.3 スギの資源状況	5
1.4 スギの木材としての特徴	6
第 2 章 スギ材の性能	9
2.1 スギ実大材の強度特性	9
2.2 スギに関する強度等級区分	10
2.3 MOE vs MOR におけるスギの特異性	12
2.4 収集データから試算されたスギの許容応力度	13
2.5 スギの地域特性	14
第 3 章 スギ集成材の製造	16
3.1 スギラミナの特 性	16
3.2 スギラミナの基 準	19
3.3 縦つぎラミナ	20
3.4 ラミナの組 合せ	21
3.5 他樹種、他材料の組 合せ	22
3.6 積層接着	24
第 4 章 スギ集成材の性能	25
4.1 曲げ性能	25
4.2 許容応力度とヤング係数	27
4.3 せん断強度	30
4.4 メリコミ	33
第 5 章 スギ集成材の接合と強度特性	39
5.1 鋼板挿入式ドリフトピソ(ボルト)接合の繊維平行方向の強度特性	39
5.2 鋼板挿入式ドリフトピソ接合の繊維直交方向の強度特性	43
第 6 章 スギ集成材を用いた建築物の設計・施工	47
6.1 スギ集成材の施工性、加工性	47
6.2 建築物の保守管理と防 腐処理・塗装	48

## 第1章 序

### 1.1 はじめに

スギは日本における代表的な造林木であり、その研究も古くより行なわれており、育成や材質に関する林業関係の報告は極めて多岐に亘っている。すなわち、スギが植林された理由には我が国の気象、地形条件からくる成長の良さなどの供給する林業側と、材質として素直で、それに適した明確な用途あるという利用する側の予測される受け皿があった。したがって、その使い方や取り扱い方に一定のルールの中で、材質の良さを求め、製材木取りなども最大の価値を生むような工夫がなされてきた。とくに在来構法を対象とした建築用材では化粧等級と適切な木取りが木材の価値を定めていた。したがって、スギの在来構法部材を対象としたときには化粧価値を増すためのスギの林木の生育とその材質がむしろ課題の中心で、新たな開発研究という色彩は少なかったし、強度等級区分とか、建築構造物としての加工などの課題は成り立ち難かった。しかしながら、外国産とくに北米針葉樹の大量供給による量と質のまとまり、価格競争などから建築資材として、また、合板に代表される木質材料あるいは無機質材料に製材板が取って替わられる場面がみられるようになった。スギの用途に関する試みが大きくとらえられるようになってきた。スギの需要拡大のための試みは間伐材からはじまり、中目材などに展開してきているが、現在スギ全般の問題として取り上げられねばならない状況にある。

スギ集成材構造については農業用建築物、大規模構造物などは行政的な配慮をバックに技術的な蓄積が行われた。しかしながら、既存の木材工業がある一定以上の量産を前提とした原料木材のなかの一つとしてスギをみたとき、あるいは一般の市場という面からみると心もとない状況にあると指摘されることも多い。設計、技術の改良、改善だけの問題ではなく、さらに集荷、流通、情報を含めた体系化あるいは新たな構築が要求されていよう。

したがって、スギという特殊な樹種を対象にするハードな実験研究と並んで、それを取り巻くソフトなコンセプトづくりが必要となっているといえよう。すなわち、外国産材との競争、木造率の低下、在来構法の危機感が、伐期を迎える国産材の需要拡大、林業や地域の活性化への動きを煽り、さらに地球規模での環境保護、保全における造林木の代表であるスギやカラマツなどの役割などに関する研究が今後必要となってくるであろう。

そのときに既存のデータをもとにスギによる集成材構造をマニュアル的に整理整備しておくこときわめて重要と考えられる。後に述べるようにスギは加工の上からみるといくつ



かの課題をもっている。そして技術的な解決や改良にむけて多くの努力がなされていることは本書をみていただければ十分ご理解いただけるであろうが、また、利用拡大、需要拡大などの障害は加工に係る技術的な未解決な部分によるところもあるが、同時に必ずしもそこに問題がある訳ではないという面も理解できるであろう。

本年度はその骨子を検討し、現状に対応したスギの適正利用と需要開発のハードとソフトの方法を考える基礎とすることとした。

## 1・2 スギの種類と分布

スギの分布は、天然林を主体に見れば北は青森県から南は屋久島まで及んでいる<sup>2)</sup>。しかし、個々の分布が真に天然林であるか否かについては、それだけで1冊の学術書ができるほど議論百出のところであり、現在では、天然のものと人工的なものとの区別がかなり曖昧となっているようである<sup>2)</sup>。

日本のスギを語る場合、「何々スギ」というように、地域に根ざした特有の品種名を頭につけてスギの分布や、地域特性を論ずることが多い。育種学の定義によれば、スギには現在二通りの「品種」が認められている<sup>2)</sup>。

一つは、地域性品種と呼ばれ、「その地域の気候条件や土地条件による自然淘汰作用によって天然に成立したもので、(中略)、共通の遺伝的特性を有している....」と説明されている<sup>2)</sup>。地域性品種で呼ばれている。比較的有名なスギとしては、秋田スギ(秋田県)、熊スギ(長野県)、立山スギ(富山県)、吉野スギ(奈良、三重、和歌山県)、魚梁瀬(ヤナセ)スギ(高知県)、屋久スギ(鹿児島県)等がある。

もう一つは、栽培品種(人為品種)と呼ばれるもので、「人間の干渉、すなわち育成林業の結果として成立した品種で、(中略)、複数個体あるいは、単一個体から挿し木によって増殖した分生個体群....」と説明されている<sup>2)</sup>。栽培品種で最近よく名前のあるスギとしては、ボカスギ(富山県)、白スギ(俗に北山スギ:京都市)綾スギ(福岡県)、ヤブクグリ(大分県、熊本県)、オビアカ(俗に肥スギ:宮崎県)等がある。

### 地 域 性 品 種 (///// 印)

- |                    |                   |
|--------------------|-------------------|
| 1. アジガサウスギ(鱒ガ沢杉)   | 13. ハンバラスギ(半原杉)   |
| 2. オオシュクスギ(鶯宿杉)    | 14. イトシロスギ(石徹白杉)  |
| 3. アキタスギ(秋田杉)      | 15. ムマイスギ(六厩杉)    |
| 4. トウドウスギ(桃洞杉)     | 16. アシュウスギ(芦生杉)   |
| 5. チョウカイクラスギ(鳥海群杉) | 17. シソウスギ(宍粟杉)    |
| 6. ヤマノウチスギ(山の内杉)   | 18. オキノヤマスギ(沖の山杉) |
| 7. マキノサキスギ(牧の崎杉)   | 19. エンドウスギ(遠藤杉)   |
| 8. ホンナスギ(本名杉)      | 20. ハチロウスギ(八郎杉)   |
| 9. ムラスギ(群杉)        | 21. ヨシノスギ(吉野杉)    |
| 10. クマスギ(熊杉)       | 22. ヤナセスギ(魚梁瀬杉)   |
| 11. タテヤマスギ(立山杉)    | 23. ヤクスギ(屋久杉)     |
| 12. ハクサンスギ(白山杉)    |                   |

栽培品種 (○印)

- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| (1) サンプスギ (山武杉)     | (16) イトシロスギ (石徹白杉)  |
| (2) 福田孫多のクローン品種     | (17) ニュウカワスギ (丹生川杉) |
| (3) ムラスギ (群杉)       | (18) タネスギ (田根杉)     |
| (4) クマスギ (熊杉)       | (19) シロスギ (白杉)      |
| (5) ボカスギ            | (20) シバハラ (芝原)      |
| (6) リュウワスギ (了輪杉)    | (21) トミススギ (富栖杉)    |
| (7) ベッシュスギ (別所杉)    | (22) オキノヤマスギ (沖の山杉) |
| (8) マスヤマスギ (増山杉)    | (23) エンドウスギ (遠藤杉)   |
| (9) カワイダニスギ (河合谷杉)  | (24) タナミスギ (田浪杉)    |
| (10) カネミダニスギ (金見谷杉) | (25) ハチロウスギ (八郎杉)   |
| (11) タテイシスギ (立石杉)   | (26) イチキスギ (市木杉)    |
| (12) ミズミスギ (水海杉)    | (27) オキスギ (隠岐杉)     |
| (13) ヘコサンスギ (部子山杉)  | (28) アヤスギ           |
| (14) ハッタスギ (八田杉)    | (29) ホンスギ           |
| (15) イチナミスギ (市波杉)   | (30) ヤブクグリ          |
|                     | (31) メアサ            |

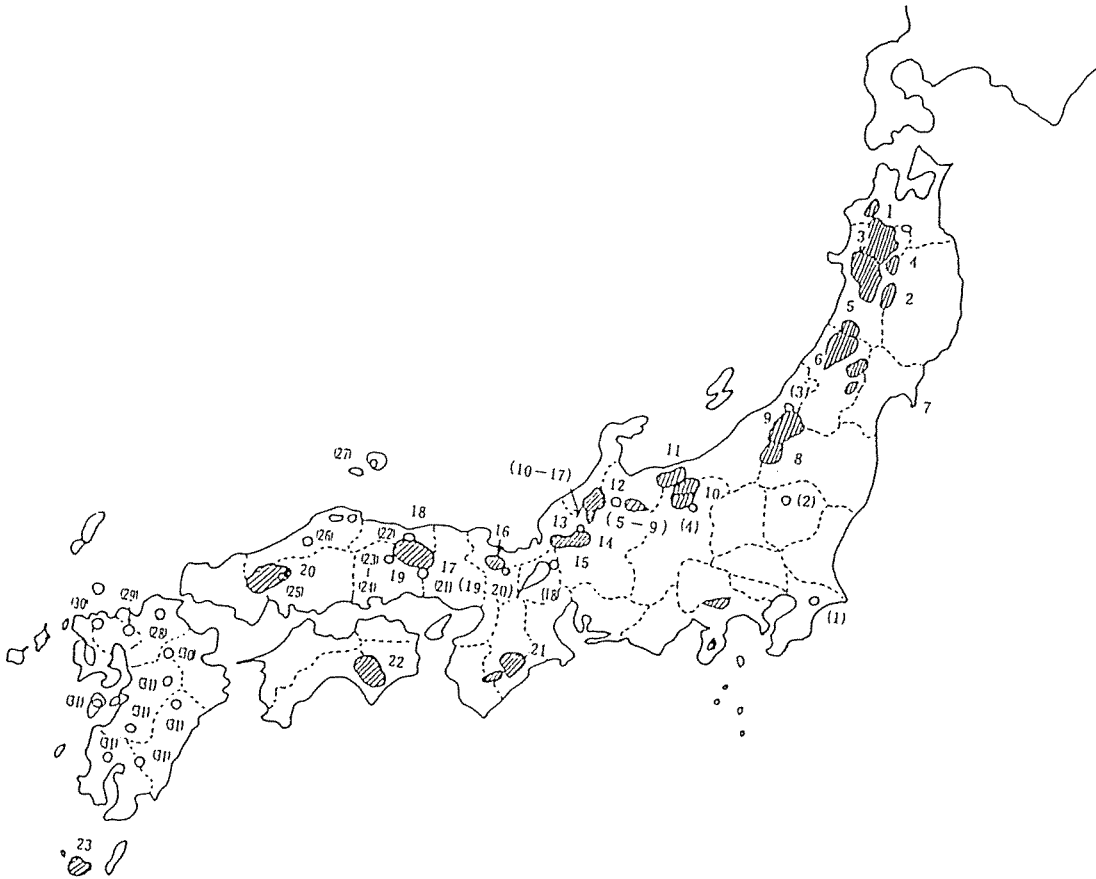


図1 スギ天然分布と地域性品種・栽培品種の分布<sup>2)</sup>

### 1. 3 スギの資源状況

図1<sup>2)</sup>は日本のスギの天然分布と地域性品種・栽培品種の分布を示す。現在、スギの天然林自然保護の面から保存すべき貴重な存在であり<sup>3)</sup>、資源として期待できるのは人工植栽されたギである。スギ人工林の蓄積は昭和59年度の時点で、約7億3千万 $m^3$ で、そこから年間約800万 $m^3$ 程度（全蓄積量の約1%強）の素材が生産されている<sup>4)、5)、6)</sup>。この数字は国産針葉樹生産量（約2000万 $m^3$ ）の40%を占め、樹種別素材生産量としてはトップである<sup>4)、6)</sup>。

しかし、蓄積量の齢級別分布を見ると、図2のように5～7齢級（25年生～35年生）の比較的若いスギが蓄積の中心を占めている。これらの若いスギから生産される丸太は直径30cm以下の中丸太が多く、用途、価格、品質等の面でベイツガを中心とした輸入外材ともろに競合することになる<sup>7)</sup>。このためスギ中丸太を生産主体としている林業地は、現在苦しい戦いを余儀なくされている<sup>7)</sup>。

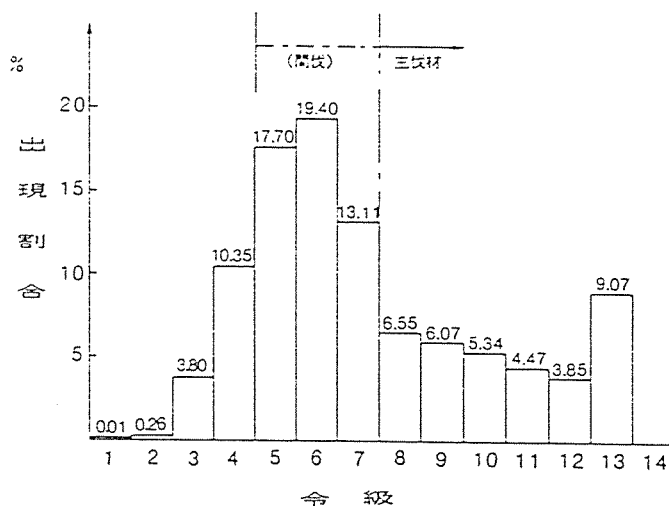


図2 スギ人工林の齢級別蓄積量  
(昭和59年3月31日現在)<sup>4)</sup>

#### 1. 4 スギの木材としての特徴

スギの一般的な特徴として、樹幹が極めて通直、かつ完満（上下の太さの差が少ない）で、枝が自然に枯れ落ちる性質が強く枝下が長いため、木材として利用できる有効部分が大きく、極めて利用しやすい木材だと言われている<sup>2)・3)</sup>。

スギは日本を代表する木材であるため、スギの材質に関する研究は極めて数多い。既往の研究<sup>8)・14)</sup>では、スギの年輪幅、晩材率、容積密度数、成熟材・未成熟材、樹冠材・枝下材、マイクロフィブリル傾角、仮道（導）管長等の材質特性の樹幹内分布、並びに、それらの地域、品種別の差異、特異性についての非常に詳細な調査結果が報告されている。スギの強度性能に関する報告も数多い。しかし、大部分は強度性能を数ある材質特性の1つとして調べたという立場に立っており、材質の樹幹内分布から実大材の強度を推定しようとした研究例は、筆者の知る限り、皆無である。

このような状況の中で、最近発表された中谷らの報告<sup>15)</sup>では、スギ（ボカスギ）の樹幹内ヤング係数の分布（1cm×1cm×16cmの無欠点小試験体の3点曲げ試験で得られた値）を基に、丸太のヤング係数の樹高方向の分布が計算されている。樹幹内のヤング係数の分布を図3に、また樹幹内での曲げ強度の分布を図4に示す。

図3から、供試したスギの場合、樹高が高くなる程、少ない年数でヤング係数は一定の高い値（成熟材のヤング係数）に達する傾向が明白である。また、図4から、無欠点部分の曲げ強さは樹高が高くなるにつれて、一定の高い値（恐らく成熟材の値）に近づく傾向を示している。

図5は、図3の年輪数とヤング係数の相関を基に、樹幹のヤング係数（丸太のヤング係数）を力学的な計算によって求めた結果である。図5における、25年生の場合を見ると、丸太のヤング係数は、根元及び梢端部で低く、その中間で安定した値をとる傾向が示されている。

これらの結果は富山県のボカスギにおける限られたサンプルについての結果であるため、一般論を展開することは危険であるが、いわゆる1番玉と、末木から採れる心持ち材の強度性能は低く、2番玉、3番玉辺りから採れる製材は安定しているという製材に関する世間の風評を大体裏付ける結果が示されており、非常に興味深い。

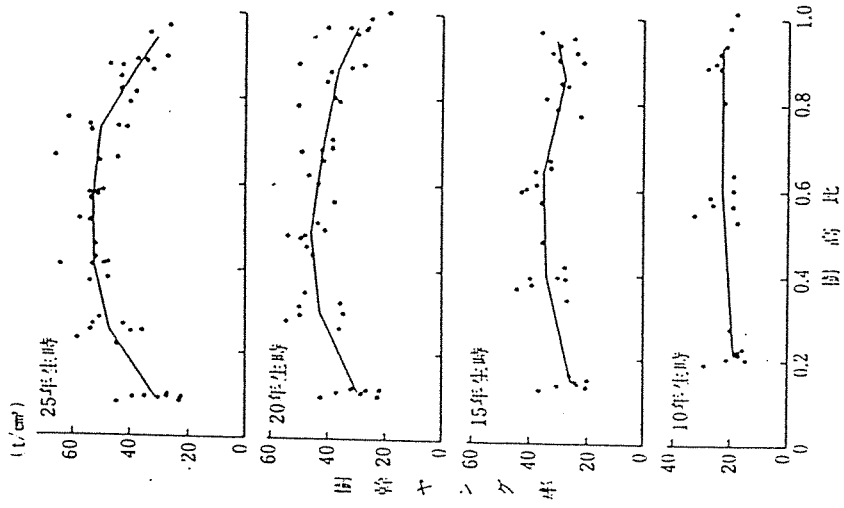


図5 樹幹ヤング係数 (丸太のヤング係数) の高さ方向分布<sup>15)</sup>

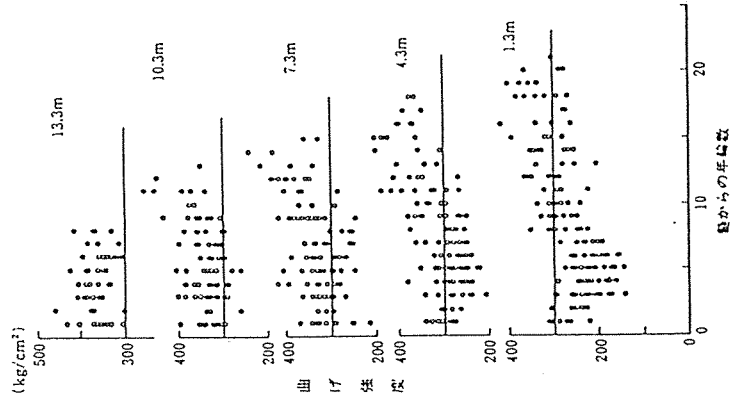


図4 曲げ強度の樹幹内分布<sup>15)</sup>

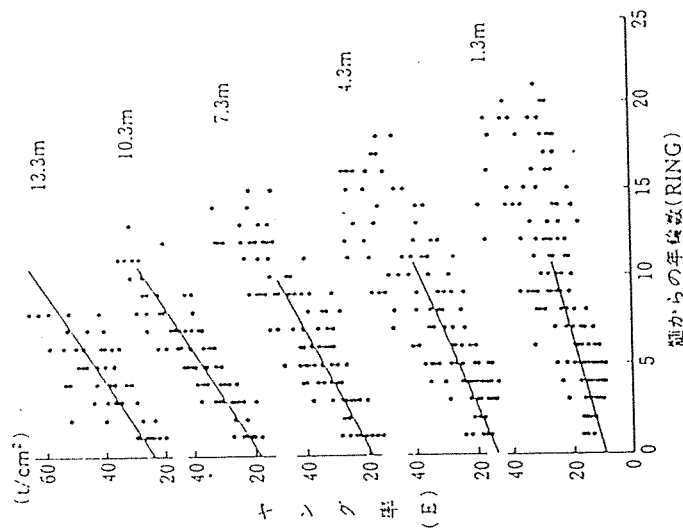


図3 樹幹内におけるヤング係数の分布<sup>15)</sup>

[文献 : I. 序]

- 1) 満久崇麿: "木のはなし"、思文閣出版、1983.
- 2) 坂口勝美 (監修) "新版スギのすべて"、全国林業改良普及協会、1983.
- 3) 平井信二: "木の事典"、第一集、6、かなえ書房、1980.
- 4) 林野庁計画課・経営企画課: 森林資源現況、昭和61年2月
- 5) 林野庁監修: 木材需給と木材工業の現況、昭和62年版
- 6) 農林水産省統計情報部: 昭和61年木材需給報告書、昭和62年12月
- 7) 西村勝美: 私信  
~~~~~ 材質的研究: 例えば ~~~~~
- 8) 平井信二: "林木の重量生長に関する研究(第3報) 茨城県大子産スギ"、東大演習林報告、39、219-234、1951.
- 9) 平井信二: "同上(第4報) 千葉県演習林産スギ"、東大演習林報告、45、203-220、1953.
- 10) 矢沢亀吉、深沢和三: "中部地方における人工植栽スギ材の生長状況と理学的性質との関係、(第3報) 容積密度数、生材比重及び絶乾比重について"、岐阜大学農学部研究報告、8、75-83、1957.
- 11) 加納 孟、枝松信之、蕪木自輔: "製材用原木としてのスギ造林木の品質(第1報) 釜淵産材の節"、林業試験場研究報告、第112号、49-114、1959.
- 12) 深沢和三: "スギ樹幹ないの材質変動に関する研究 -産地を異にする林木樹幹の未成熟材などの区分とその材質特徴-"、岐阜大農研報、25、47-128、1967.
- 13) 渡辺治人、堤 壽一、小島敬吾: "未成熟材に関する研究(第1報) スギ樹幹についての実験"、木材学会誌、9(6)、225-230、1963.
- 14) 渡辺治人、堤 壽一、松本 島、太田貞明: "未成熟材に関する研究(第2報) スギ樹幹内の比圧縮強度と比圧縮ヤング率の分布"、木材学会誌、10(4)、125-130、1964.
- 15) 中谷 浩、嘉戸昭夫、長谷川益夫、相浦英春、飯島泰男: "林木の冠雪害に関する樹木力学的研究(第3報) 強度的性質の樹幹内分布"、富山県林業技術センター研究報告、第1号、25-33、1988.

## 第2章 スギ材の性能

### 2.1 スギ実大材の強度特性

日本木材学会の木材強度・木質構造研究会では、1987年度の研究会活動の一環として、全国の21研究機関で実験された実大木材の強度データを取りまとめ、「構造用木材－強度データの収集と分析」と題して資料集<sup>1)</sup>を発行した。

その中で収録されたデータは主に曲げ試験のデータで、その数は在来木造用の柱材を中心として総数4548体に上り、その内、スギが2287体と約半数を占めた。これは、上述したように、現在日本の林業がスギを中心に動いていることを反映したものである。

資料集<sup>1)</sup>のデータに関しては、①実験の目的が各研究機関で異なっている、②サンプリングの方法が一定でない、③試験体数がまちまちである、④樹種が偏っている、⑤試験方法が一様でない等の問題点が指摘されている。

しかし、少なくともスギに関しては、データ数、網羅されている地域数等からみて、現在の日本のスギの強度特性を論ずるのに、現状では他に類を見ない資料であろうと判断される。

表1 スギ実大材の曲げ強度データのまとめ<sup>1)</sup>

| 梁せいによる材種                              | H 1 |       |       | H 2  |       |      | H 3 |       |      |
|---------------------------------------|-----|-------|-------|------|-------|------|-----|-------|------|
|                                       | n   | Mean  | CV    | n    | Mean  | CV   | n   | Mean  | CV   |
| 材幅 B(mm)                              | 936 | 68.8  | 16.5  | 1163 | 102.7 | 8.3  | 188 | 118.5 | 3.9  |
| 梁せい H(mm)                             | 936 | 66.2  | 16.4  | 1163 | 103.7 | 10.5 | 188 | 240.0 | 19.2 |
| 含水率 MC(%)                             | 936 | 18.9  | 101.4 | 1163 | 21.3  | 12.2 | 188 | 30.7  | 65.8 |
| 比重 $r_{15}$                           | 827 | 0.410 | 9.8   | 1163 | 0.406 | 11.8 | 188 | 0.424 | 8.2  |
| 平均年輪幅 ARW(mm)                         | 740 | 5.01  | 34.0  | 1090 | 4.96  | 34.6 | 188 | 3.43  | 27.9 |
| 繊維走行の傾斜 GRN(mm/m)                     | 0   |       |       | 488  | 18.8  | 77.9 | 0   |       |      |
| 最大節径比 $K_{max}$ (%)                   | 393 | 18.2  | 55.7  | 845  | 22.2  | 26.6 | 0   |       |      |
| 最大集中節径比 $C_{max}$ (%)                 | 384 | 37.0  | 43.2  | 906  | 37.0  | 31.7 | 0   |       |      |
| 曲げヤング係数 MOE(tonf/cm <sup>2</sup> )    | 936 | 59.2  | 32.4  | 1163 | 70.3  | 31.4 | 188 | 82.5  | 21.9 |
| 曲げ比例限度応力 $S_0$ (Kgf/cm <sup>2</sup> ) | 676 | 247.5 | 31.8  | 974  | 240.6 | 26.9 | 188 | 275.6 | 23.7 |
| 曲げ破壊係数 MOR(Kgf/cm <sup>2</sup> )      | 936 | 416.1 | 21.5  | 1163 | 409.6 | 21.4 | 188 | 380.9 | 19.0 |

n: データ数、 Mean: 平均値、 CV: 変動係数



## 2. 2 スギに関する強度等級区分

飯島は資料集<sup>1)</sup>の重回帰分析の結果、視覚的等級区分法の判定因子として、比重 ( $r_{15}$ )、最大節径比 ( $K_{max}$ )、集中節径比 ( $C_{max}$ ) を、機械的等級区分法の説明変数としてヤング係数 (MOE) を考え、表2のような等級区分の限界値を提案している。

表2 収集データに基づいて強度等級区分を行う場合の区分因子並びに限界値の提案<sup>3)</sup>

| 視覚的等級区分 |      |      |    |           |    |    |           |    |    |
|---------|------|------|----|-----------|----|----|-----------|----|----|
| 区分因子    | 比 重  |      |    | 最大節径比 (%) |    |    | 集中節径比 (%) |    |    |
| 等 級     | 特等   | 1等   | 2等 | 特等        | 1等 | 2等 | 特等        | 1等 | 2等 |
| 樹 I     | 0.60 | 0.55 | -  |           |    |    |           |    |    |
| 種 II    | 0.50 | 0.45 | -  | 30        | 40 | 70 | 40        | 60 | 80 |
| 群 III   | 0.40 | 0.35 | -  |           |    |    |           |    |    |

| 機械的等級区分 |                                    |      |      |      |      |      |
|---------|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 区分因子    | ヤング係数 (MOE × kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |
| 等 級     | E150                               | E130 | E110 | E090 | E070 | E050 |
| 樹 I     |                                    |      |      |      |      |      |
| 種 II    | 140                                | 120  | 100  | 80   | 60   | 40   |
| 群 III   |                                    |      |      |      |      |      |

ただし、  
 I : ベイマツ、ソ連カラマツ  
 II : ヒノキ、カラマツ、ベイツガ、アカマツ  
 III : スギ、エゾマツ、トドマツ

表2の提案値は次のように決定された。

樹種群 : 建築学会「木構造計算規準(案)」の樹種群に、今回収集された比重分布を考慮する  
 節 : 現行 J A S (製材の日本農林規格) の値  
 比重 : 収集データの平均値を特等、0.05引いた値を1等とする  
 MOE : 収集データを鑑みて20000Kgf/cm<sup>2</sup>刻みとする

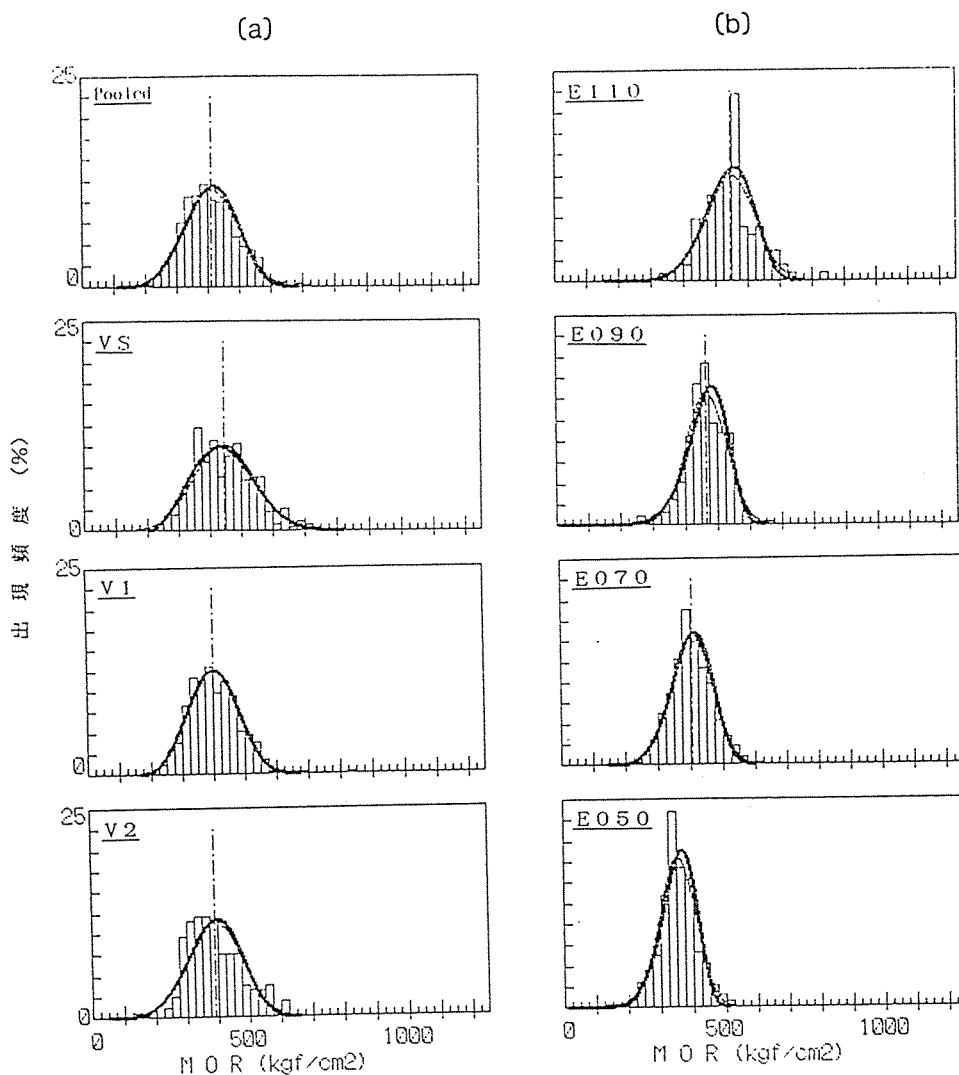


図6 - (a)、(b) スギの曲げ破壊係数 (MOR) に関する等級区分の結果<sup>1)</sup>  
 (a) : 視覚的等級区分 (b) : 機械的等級区分

図6 - (a) に表2の視覚的区分因子に基づいて、コンピューターによって、3つの等級に区分されたスギの曲げ破壊係数 (MOR) のヒストグラム<sup>1)</sup>を示す。ここで、一番上の pooled とは全てのデータを混みでまとめたもの、以下VSが特等、V1が1等、V2が2等を意味する。

一方、図6 - (b) は、同じスギのデータを曲げヤング係数 (MOE) によって4つの等級に区分した場合の等級別MORヒストグラムを示す。

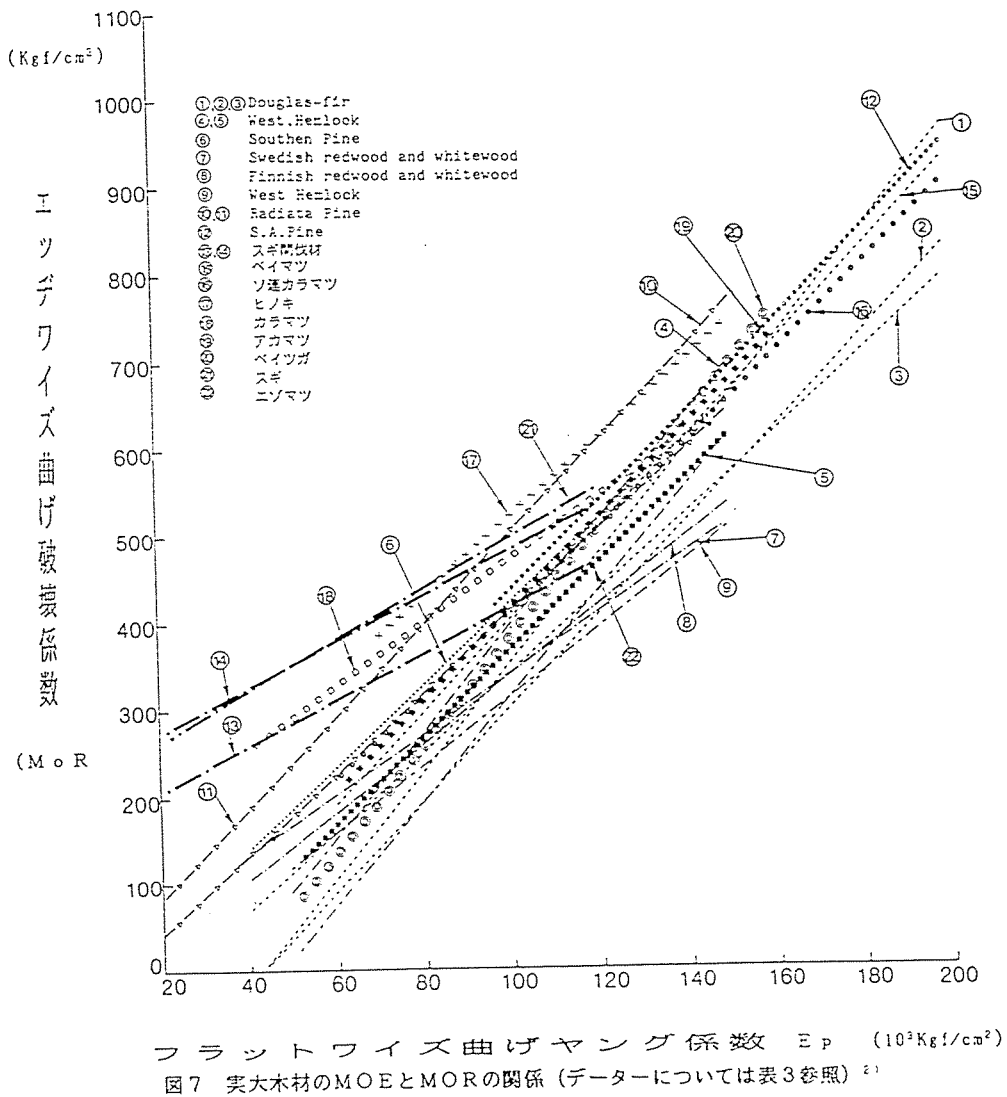
視覚的区分因子で区分された場合 (図6 - a)、特等と1等の区別は辛うじて可能であるが、1等と2等の区別は殆どできないことが分かる。スギの場合、節が等級区分の区分因子として、余り有効ではないことが明かである。ここでは、データは示さないが、スギ以外の樹種 (カラマツ、ベイマツ、ヒノキ等) では、節に基づく強度等級区分はある程度有効であり、スギ、特に心持ちスギの場合、節の強度に及ぼす影響が例外的に少ないと言えよう。

一方、図6 - (b) においては、4つの等級におけるMORの分布はかなり明確に区別されており、ヤング係数でスギを強度等級区分することがかなり有効な方法であることを示唆している。

### 2. 3 MOE vs MORにおけるスギの特異性

ヤング係数 (MOE) が木材の強度を推定するのに最も適した指標らしいということは、世界中で確認されていることであり、既存の資料集においてもその事実は確認されている。しかし、MOEとMORの相関関係については、樹種特性があるのかないのか、いまだにはっきりしない。

図7<sup>2)</sup>は、今回の資料集<sup>1)</sup>のデータも含めて、これまでに世界各国で発表された実大材のエッジワイズMORとフラットワイズMOEの相関関係を一括して図示したものである。限られた資料数ではあるが、どうも心持ちのスギだけは他の木材と異なる相関関係にあるように思える。この点については、佐々木ら<sup>11)</sup>もスギ心持ち材のMORとMOEの関係の特異性を認めている。



## 2. 4 収集データから試算されたスギの許容応力度

表4に今回の収集データに基づいて試算されたスギの曲げ許容応力度、建築基準法施行令第89条に規定された許容応力度、及び、日本建築学会編集の木構造計算基準（案）で規定された許容応力度を示す。

表4 スギの曲げ許容応力度の試算値と基準（規準）等における許容応力度の比較（いずれも長期の値）

|   | (A) 資料集 <sup>1)</sup> のデータによる試算値 |      |      |      | (B)     |      |      |      | (C) 日本建築学会 <sup>12)</sup> |       |            |  |
|---|----------------------------------|------|------|------|---------|------|------|------|---------------------------|-------|------------|--|
|   | 視覚的等級区分                          |      |      |      | 機械的等級区分 |      |      |      | 建築基準法                     |       | 木構造計算規準（案） |  |
|   | 特等                               | 1等   | 2等   | 混み   | E110    | E090 | E070 | E050 | 施行令第89条                   | 上級構造材 | 普通構造材      |  |
| ① | 99                               | 91   | 91   | 92   | 141     | 115  | 99   | 85   | 75                        | 95    | 75         |  |
| ② | 1.32                             | 1.21 | 1.21 | 1.23 | 1.88    | 1.53 | 1.32 | 1.13 | 1.00                      | 1.27  | 1.00       |  |

①単位：(Kgf/cm<sup>2</sup>)      ②（B）を1とした場合の比

表4は非常に興味深い結果を示している。すなわち、

1)収集されたスギの曲げ強度データに基づいて試算された許容応力度の値はいずれも現行の施行令第89条で規定されている許容応力度を上回っている。

2)節、比重に基づいた視覚的等級区分によって等級付けされた場合、特等と1等、2等との差は歴然としているが、1等と2等の差はない。

3)ヤング係数に基づく強度等級区分法はスギの許容応力度向上に極めて有効に作用することを示している。例えば、MOE = 110000Kgf/cm<sup>2</sup>の等級では、施行令の1.88倍もの許容応力度が期待できる。また、最も低いクラスのMOE = 50000Kgf/cm<sup>2</sup>の等級でも1.13倍の値が期待できる。

なお、建築基準法施行令第89条の文章には、「木材の繊維方向の許容応力度は、強度試験の結果に基づき定める場合のほか、次の表の数値によらなければならない。」と記されており、強度試験の結果を尊重する姿勢を示している。

## 2. 5 スギの地域特性

スギの強度性能には品種間に微妙な特徴があるようで、例えば、同じ場所で、ほぼ同じ条件で植栽された36品種のスギの曲げ強度実験を行った佐々木ら<sup>1)</sup>は、荷重-たわみ曲線に品種間の特徴が存在する可能性を示唆している。

この品種間の基本的な特性の違いに加えて、気候風土、植栽条件、施業・育林方法等の影響が複雑に重なり合って、スギ特有の地域特性が形成されるものと想像される。

今回の資料集<sup>1)</sup>のデータ解析においても、地域、産地によってスギ実大材の強度特性がかなり異なるということが明かとなった。その一例をH2の材種（大部分10.5cm正角材）について図8に示す。

スギのヤング係数（MOE）の分布は、図8の下の方で示す通り、A（MOE = 55tonf/cm<sup>2</sup>）、B（MOE = 75tonf/cm<sup>2</sup>）、C（MOE = 95tonf/cm<sup>2</sup>）の3つのグループに分かれる。

一方、曲げ破壊係数（MOR）の方は、図8の中央の方で示すように、ヤング係数の場合ほど違いは明確ではないが、おおよそ3つのグループに分かれる傾向が伺える。これは、MOEとMORの回帰直線における「傾き」がスギの場合やや小さいという関係（図7）からもうなずける。

図8の最上段に示す比重の場合が最も複雑で、MOE、MORのようなグループ化はやや困難である。

どの地方のスギがどのグループに属するかということはここでは問題にしない。しかし、地域ごとのデータの分布図を描いて、図8のようにMOE分布の山が明白に分かれるのはスギだけであり、ヤング係数が地域特性の強い日本のスギの客観的品質指標として使えそうな可能性が感じられる。

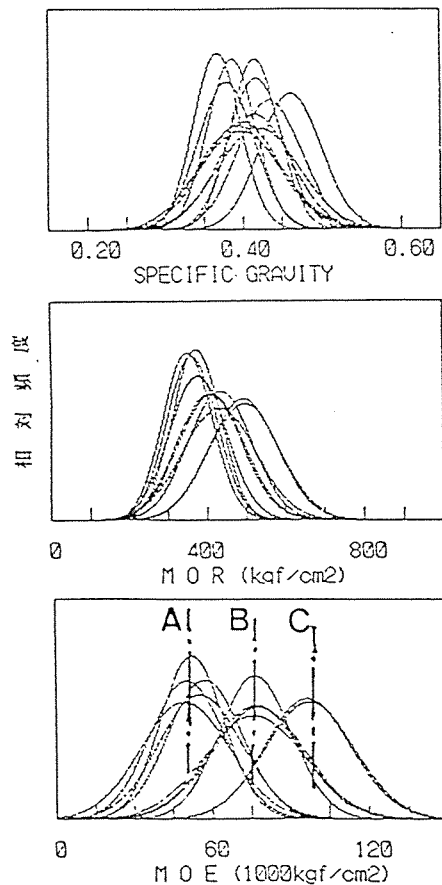


図8 スギの比重、MOR、MOEの地域特性<sup>1)</sup>

[文献 : II. 材料強度的特性]

- 1) 木材強度・木質構造研究会 : "構造用木材－強度データの収集と分析"、日本木材学会、1988.
- 2) 小松幸平 (分担執筆) : "木材等の強度等級区分法の開発"、建設省新木造総プロ昭和62年度報告書、1988.
- 3) G. B. Walford : "Current knowledge of the in-grade bending strength of New Zealand radiata pine", FRI Bulletin No.15, Forest Research Institute, NZ Forest Service, 1982.  
(なお、ASTM D2915-84では、式の代わりに表でi%値を与えている)
- 4) R. J. Hoyle : "Background to Machine Stress Grading", Forest Products Journal, Vol.18, No.3, 87-97, 1968.
- 5) W. T. Curry and J. R. Tory : "The Relation Between the Modulus of Rupture (Ultimate Bending Stress) and Modulus of Elasticity of Timber", CP30/76, Building Research Establishment, Princes Risborough Laboratory, 1976.
- 6) H. Bier and M. J. Collins : "Bending Properties of 100x50mm Structural Timber from A 28-Year-Old Stand of New Zealand Radiata Pine", Paper presented to meeting of IUFRO Group S5.02., Xalapa, Mexico, Dec. 1984.
- 7) G. B. Walford : "Comparison of the Tensile and Bending Strengths of 100x50mm Radiata Pine", FRI Bulletin No.21, Forest Research Institute, N.Z. Forest Service, May, 1982.
- 8) G. W. Vinopal : "Determination of the Combined Influence of Density and Knots on the Mechanical Properties of Full-Size Structural Timber", Paper presented at the meeting of Subject Group S5.02 of IUFRO Division 5 held in Oxford, England, April 1980.
- 9) 中井 孝、田中俊成 : "間伐材等小径木の強度性能－曲げ剛性と曲げ破壊係数"、木材工業、39(5)、29-35, 1984.
- 10) 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品質と強度性能"、林産試験場研究報告、第67号、4-33、1978.
- 11) 佐々木 光、角谷和夫、瀧野真二郎 : "スギ36品種の力学的性質"、木材研究・資料、京都大学木材研究所、1983.
- 12) 日本建築学会 : "木構造計算規準(案)"、建築雑誌、102(1266)、1987.

### 第3章 スギ集成材の製造

#### 3・1、スギラミナの特性

集成材はラミナが積層接着された製品であるから、集成材としての特性はラミナ自身の強度特性とその配置によって決定される。いかえれば、ラミナの品質とその配置をコントロールすることが、集成材の品質管理上最も重要なポイントとなる。

ラミナは製材品の一種ではあるが、その強度特性は一般的な製材品とは少し異なっている。まず、その形態は厚さに対して幅の大きな板状であり、使われる方向はフラットワイズが一般的である。材質的にはすべて乾燥されており、乾燥による割れやねじれ等は少ない。また大きな節や目切れなどの欠点は除去され、健全部同士がフィンガージョイントやスカーフジョイントによって縦つぎされる。

このような特徴をもつラミナの強度特性については、過去に色々と研究・調査が行なわれてきた。スギについては比較的多くのデータが得られているものの、地域や品種による特性のバラツキが大きいいため、統一的なデータとして提示する事はなかなか困難である。

ラミナの最も基本的な強度特性である曲げヤング係数と曲げ強度の関係を産地毎に示したものが図1～図7である。これらのデータは森林総合研究所集成加工研究室のデータベースから取り出したものであり、いずれも厚さ20mm、幅120mm程度のラミナについての試験結果である。ただし、産地とはいってもサンプルを得たのがその県であるというだけであって、このデータがその県のスギラミナの特性を代表しているわけではない。また、ラミナはなるべく広い範囲の曲げヤング係数をもったサンプルから選び出されているので、曲げヤング係数と曲げ強度、それぞれの標準偏差は実際よりも多少大きなものになっていると思われる。

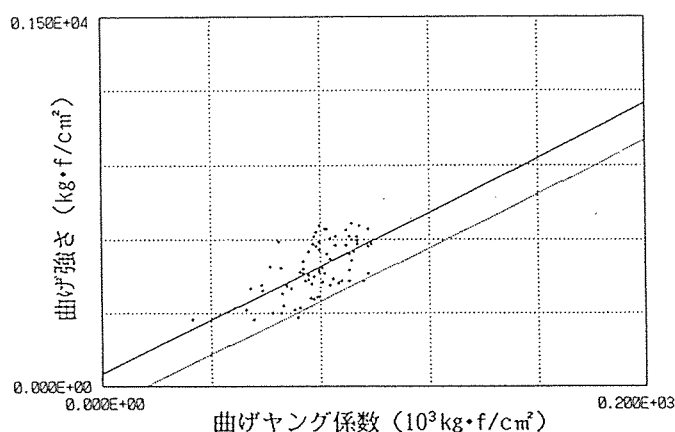


図1、ラミナの強度性能（岐阜県産）

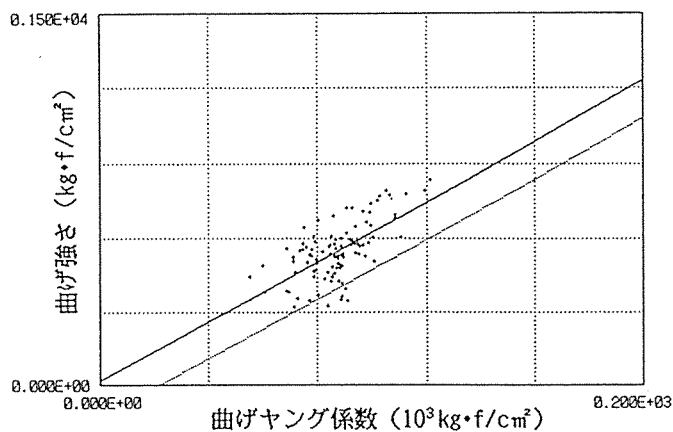


図 2、ラミナの強度性能（栃木県産）

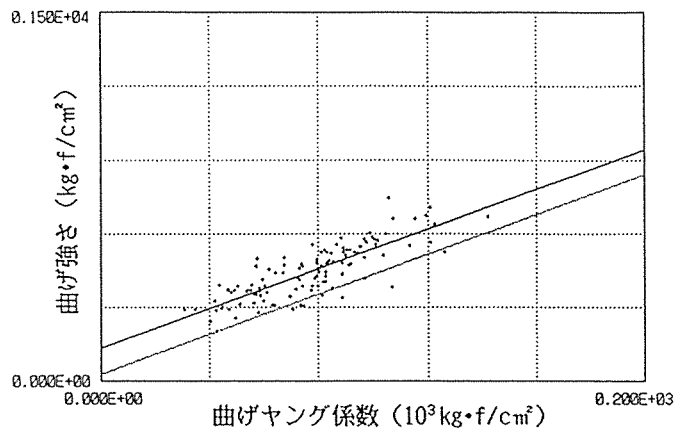


図 3、ラミナの強度性能（茨城県産）

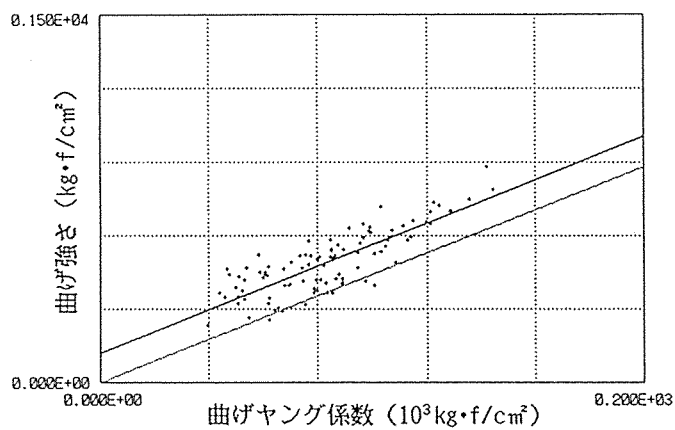


図 4、ラミナの強度性能（三重県産）

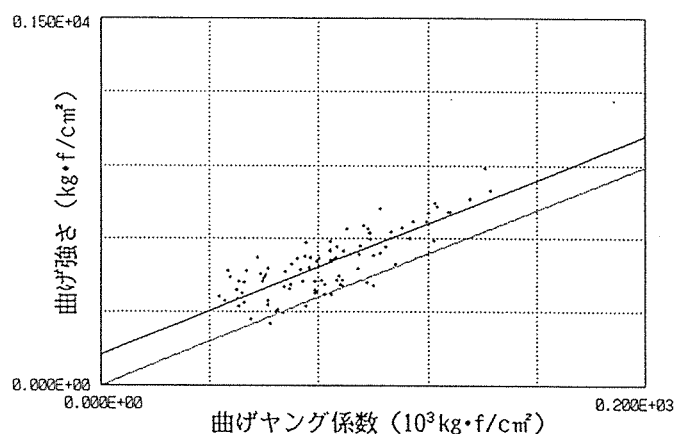


図 5、ラミナの強度性能（福井県産）

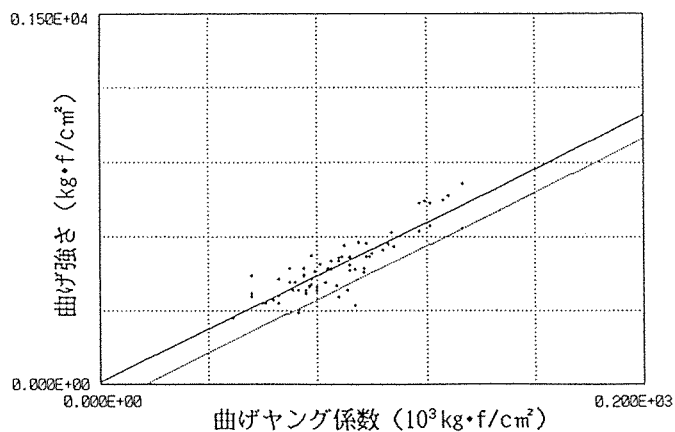


図 6、ラミナの強度性能（奈良県産）

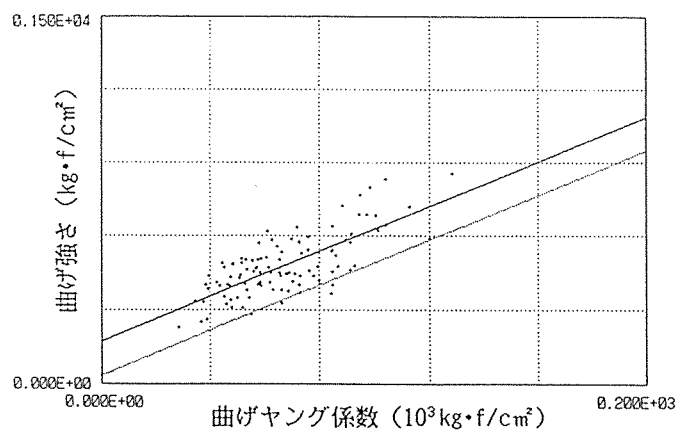


図 7、ラミナの強度性能（熊本県産）



これらのデータを見てみると、いずれも産地によって平均値などは異なるものの、ほぼ同一の回帰直線上にまとめられることがわかる。そこでこれらのデータをすべてまとめ、一本の回帰直線として表わしたものが図8である。参考として他樹種（アカマツ、エゾマツ、トドマツ、ベイツガ、ベイマツ、ソ連カラマツ、ラジアタパインのデータを統合したもの）のそれを図9に示す。両図を比較すると明らかなように、スギラミナの強度特性で他の樹種と最も傾向が異なるのは、この回帰直線の傾きが小さいことである。また、Y軸の切片もプラスである。

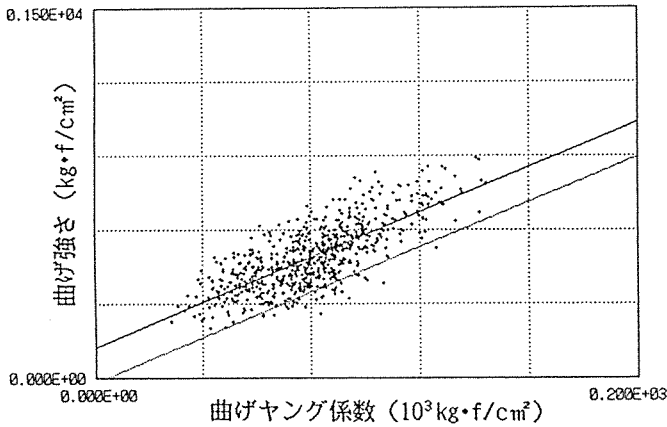


図8、ラミナの強度性能（日本全国）

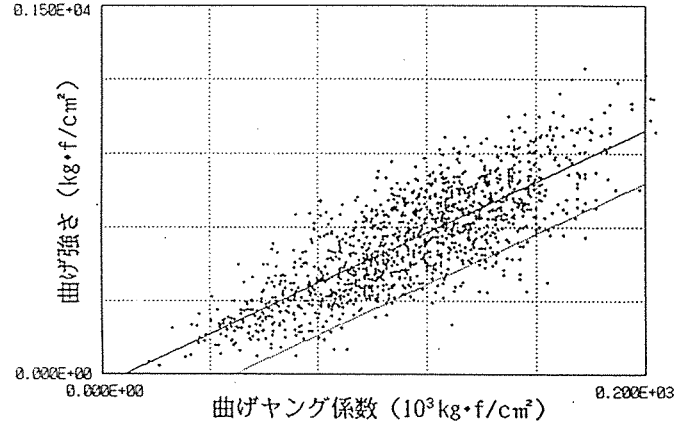


図9、ラミナの強度性能（他樹種）

なぜ、スギがこのような特性を示すのかは、今もって定説はないが、実用的にみた場合、ヤング係数を高めても他樹種ほど曲げ強度の向上が期待できないことには留意する必要があるだろう。

スギラミナの強度特性で他の樹種と異なるのは、曲げヤング係数と曲げ強度の関係の他に、集中節径比と曲げ強度低減率が異なることがあげられる。図10にこの関係を示す。この図はラミナの各15cm区間内に存在する節径の合計のラミナ幅に対する比率（集中節径比）と無節部分の曲げ強度に対する有節部分の曲げ強度の比率（曲げ強度比）との関係を示したものである。アカマツのように大きな節が出る場合には低減率が大きいですが、スギでは小さな節がたくさん出ることが多いので、集中節径比が大きくても比較的強度は高くなり、低減率が低くなる。

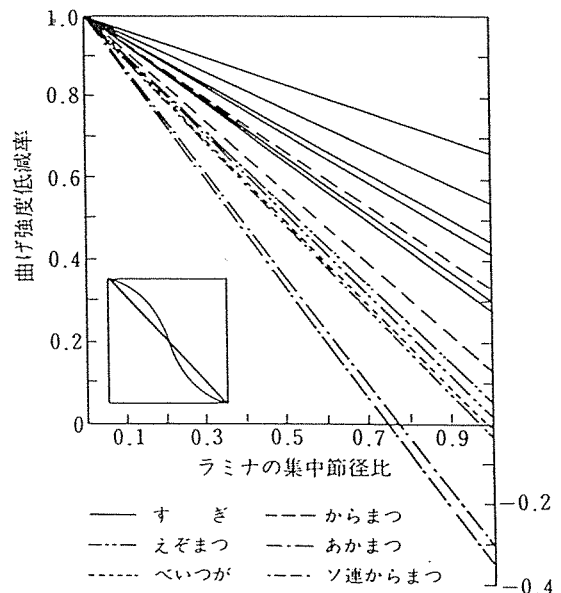


図10、集中節径比と曲げ強度低減率

縦つぎされないスギラミナの引張強度についてはほとんどデータが得られていない。次の図 1 1 に示すのは栃木県産スギラミナの引張強度と曲げヤング係数の関係である。節がなくかつヤング係数が高いものでは非常に高い強度が得られることもあるが、平均値では曲げ強度の 60% 程度である。曲げ強度に比べれば曲げヤング係数と引張強度の相関は低い。図 1 2 は同じく引張強度と集中節径比の関係である。比較的高い相関が得られている。

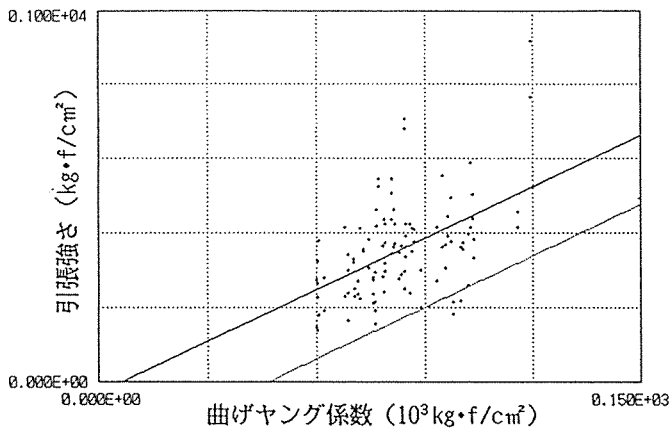


図 1 1、ラミナの曲げヤング係数—引張強さ  
(栃木県産)

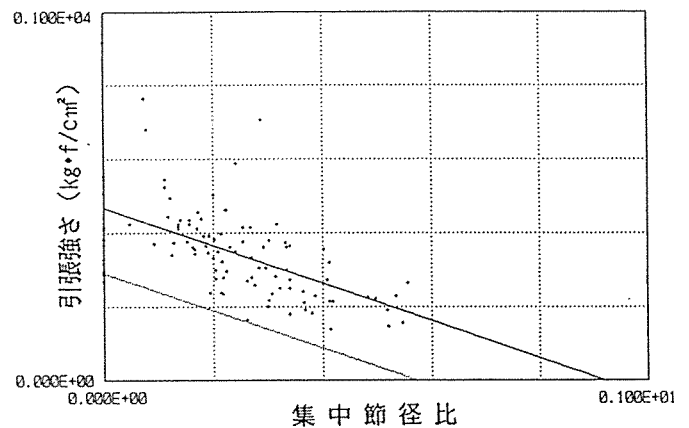


図 1 2、ラミナの集中節径比—引張強さ  
(栃木県産)

### 3・2、スギラミナの基準

ラミナについての基準は、構造用集成材および構造用大断面集成材の日本農林規格 (JAS) に定められている。また、日本木材加工技術協会の「構造用大断面集成材の製造基準」にも規定がある。これらの中からスギラミナに関係した部分を抜粋すると次のようになる。

- ①、樹種群 針葉樹 B-2 (針葉樹では最も下位)
- ②、等級

|       | (1等)     | 2等     | 3等     | 4等    |
|-------|----------|--------|--------|-------|
| 集中節径比 | (1/8)以下  | 1/4以下  | 1/3以下  | 1/2以下 |
| 繊維傾斜角 | (1/16)以下 | 1/14以下 | 1/12以下 | 1/8以下 |

### ③、ラミナの適合基準

| 曲げヤング係数 ( $10^3 \text{Kgf/cm}^2$ ) |    |    | 曲げ強さ ( $\text{Kgf/cm}^2$ ) |     |     |
|------------------------------------|----|----|----------------------------|-----|-----|
| 1等                                 | 2等 | 3等 | 1等                         | 2等  | 3等  |
| 95                                 | 85 | 75 | 460                        | 390 | 320 |

#### 3・3、縦つぎラミナ

「構造用大断面集成材の製造基準」では、フィンガージョイントされた縦つぎラミナであっても、縦つぎのないラミナと同等の性能が要求される。縦つぎの有効率（縦つぎの強度／無欠点材の強度）は1より小さく、0.5～0.8程度となるのが普通である。

縦つぎラミナの強度を考える時に忘れてならないのが、縦つぎの強度特性は刃物の形態や加工技術によって大きく左右されるということである。同じ材料・加工機械を用いたとしても、その工場の状態によって得られる結果は大いに異なることもある。当然のことながら、材料のロットが異なれば得られる製品の特性も変化してしまうであろう。

縦つぎされたスギラミナの強度特性については、いくつかの報告が見られるが、このような理由のため、なかなか普遍的な結果は得難いものとなっている。

このような問題を解決するための1手段として考えられているのが、ブルーローディングである。全ての材料についてブルーローディングを行なうことにより、少なくともあるレベルまでの荷重に対しては安全であることを保証し得ることになる。

図13はブルーローディングされたスギ縦つぎラミナの曲げヤング係数－曲げ強度相関図である。同じく図14はブルーローディングされたスギ縦つぎラミナの曲げヤング係数－引張強度相関図である。これらは、日本住宅木材技術センターで行なわれた試験結果である。両者ともにあまり相関が高くなく、曲げヤング係数から縦つぎラミナの強度を推定することの困難さがよく現われている。

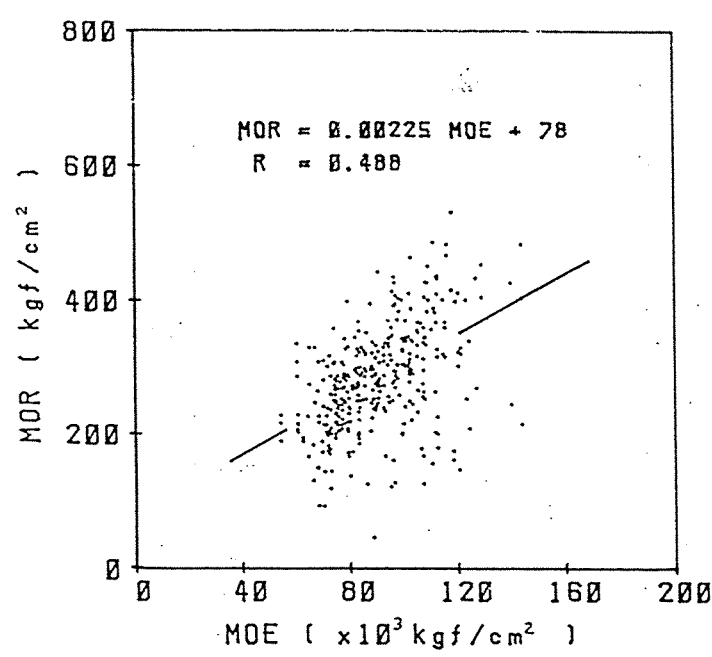
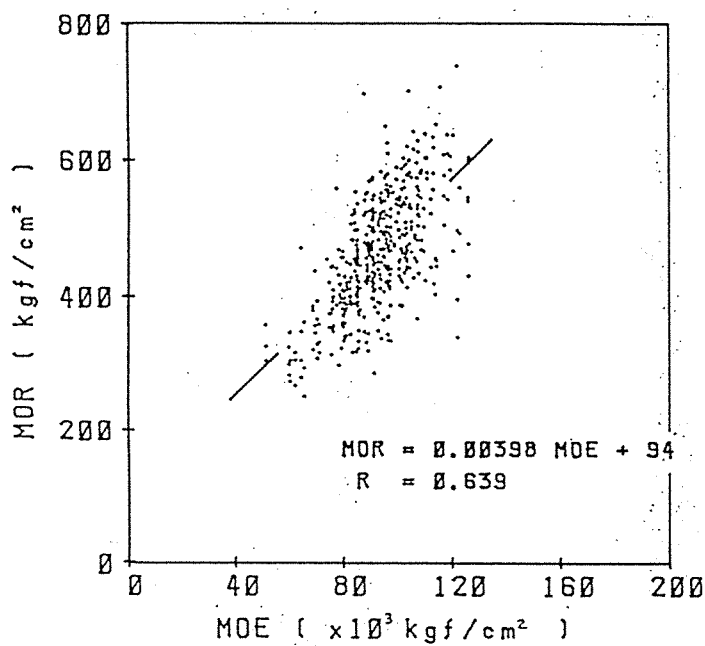


図13、縦つぎラミナの曲げヤング係数—曲げ強さ 図14、縦つぎラミナの曲げヤング係数—引張強さ

3・4、ラミナの組合せ

一般に集成材の製造においては、低品質のラミナは断面の内層に、高品質のラミナは外層に配置される。集成材の梁が曲げを受けるとき、外層側により大きな曲げ応力が発生するので、この様な配置にする事は力学的に合理性がある。また、高品質なラミナほど節の出現が低いので、見栄えが良くなるという利点もある。

「構造用大断面集成材の製造基準」では、ラミナの等級構成を次のように規定している。

ラミナの等級構成

| ラミナの構成 | 特級   | 1級   | 2級   |
|--------|------|------|------|
| 外層     | 1等   | 2等以上 | 3等以上 |
| 中間層    | 3等以上 | 3等以上 | 4等以上 |
| 内層     | 4等以上 | 4等以上 | 4等以上 |
| 中間層    | 3等以上 | 3等以上 | 4等以上 |
| 外層     | 1等   | 2等以上 | 3等以上 |

注：外層とは、両最外層から内側へせいの1/8を越える部分までをいい、内層とは両外層からせいの1/4以上離れた内側の部分をいう。また、中間層とは、外層と内層に挟まれた部分をいう。

スギの場合特別に注意する様な点はないが、地域によっては適合基準に達しないようなラミナしか得られない場合や、得られてもあまり経済的でないような場合になることがあるので、製造にあたっては購入すべきラミナあるいは原木の選定に留意すべきである。

### 3・5、他樹種、他材料との組合せ

さきに述べたように、スギラミナは最も強度性能の低い針葉樹B-2類に区分されており、他の樹種に比べ強度利用面で不利な立場にある。しかしながら、ヤング係数や曲げ強度の低さについては、集成材の断面を大きくすることによって強度特性の不利な点のある程度までカバーすることはできる。例えば、梁せいを大きく取れば、曲げ剛性を向上し得る。今、ヤング係数が80トンのスギラミナを用いて、ヤング係数が120トンのベイマツラミナを用いた集成材と同じだけの曲げ剛性を持つ集成材を製造するためには、単純に計算して15%程度大きな梁せいにすればよい。もちろん、使用する材料の体積が増加するので、コスト面における経済性低下の問題は存在する。

一方、断面の増加だけでは解決できない問題もある。めりこみに対する抵抗力（部分圧縮特性）などは集成材の表面付近の強度特性が問題であり、梁せいや断面量の増加では解決できない。梁受け金物のようなものを使用することを考える場合、部分圧縮特性の低い材では木材との接触部分の大きなもの、すなわちより大きな接合金物を使用して特性の低さを補償せざるを得ない。

上に挙げたスギ集成材の2つの問題点、すなわち低いヤング係数と低いめりこみ抵抗力を解決するための方法として、最外層ラミナに強度特性の高い樹種のラミナやバラツキの少ないLVLを用いることが考えられる。最外層にヤング係数の高いラミナがあれば、内層にスギラミナが使用されていても集成材全体としてのヤング係数は高くなるし、めり込みに対する抵抗力も大幅に改善されることが予想される。また、大断面集成材であれば引張側最外層にLVLを使用することによる曲げ強度の向上も期待できる。

図15は外層にヒノキ、内層にスギを用いた8プライの複合集成材の実験例である。スギラミナのみを用いた場合よりもMOE、MORともに向上が見られる。

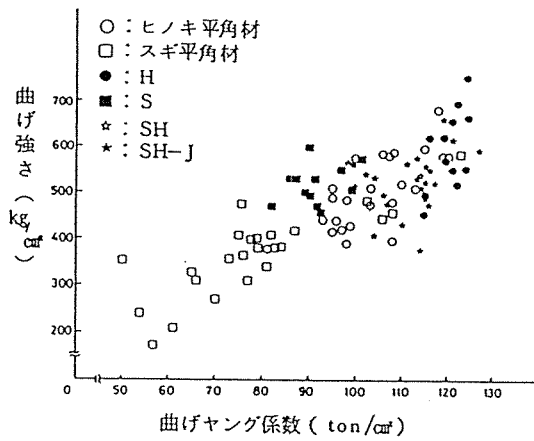


図15、ヒノキとスギの複合集成材の強度試験結果

図16は外層にベイマツLVLあるいはカラマツ、内層にスギを用いた5プライの複合集成材の実験例である。MORは向上しないが、MOEは大幅に向上している。ただし、複合集成材ではせん断変形が大きくなるので、MOEの値は計算上で求められる値よりは低い傾向にある。

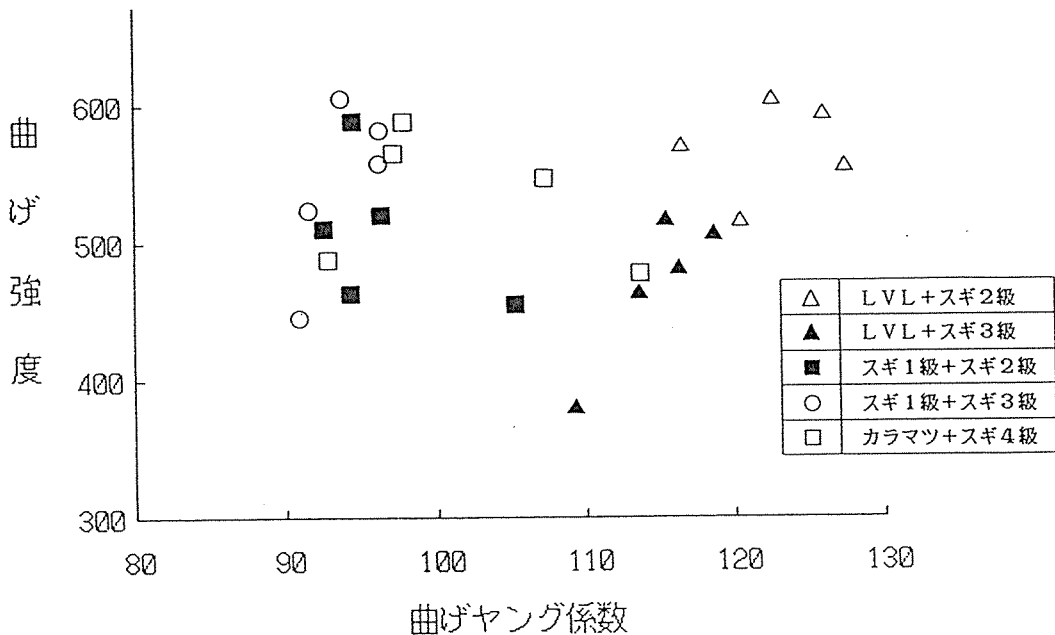


図16、LVLあるいはカラマツとスギの複合集成材の曲げ試験結果

次の表は部分圧縮試験を行ない複合集成材のめり込みに対する抵抗力を比較したものである。ただし、試験体の断面は高さ10cm、幅4.5cm、長さ50cm、加圧面は4.5X6.0 cmである。外層にLVLやカラマツを用いると、5mm変形時の荷重及び比例限荷重が50%近く向上することがわかる。

## 複合集成材のめり込み性能

| 樹種      | 5 mm変形時の荷重<br>(kg·f) | 比例限荷重<br>(kg·f) |
|---------|----------------------|-----------------|
| スギ+スギ   | 1643 (12.2%)         | 826 (16.4%)     |
| LVL+スギ  | 2360 (10.8%)         | 1278 (13.5%)    |
| カラマツ+スギ | 2324 (13.5%)         | 1321 (19.2%)    |

### 3・6 積層接着

スギの接着については、「構造用大断面集成材の製造規準」に規定されているような点の他に、特別注意を必要とするような点はないように思われる。一般的に言ってスギは比重が低いため煮沸繰返しなどによって生じる変形や内部応力の発生が少なく、はく離は他の樹種に比べて低い。

スギ集成材の接着せん断強さ及び木部破断率の適合規準はそれぞれ55 kgf/cm<sup>2</sup>及び60%である。

## 第 4 章 スギ集成材の性能

### 4・1 曲げ性能

図 17 に木構造計算基準に引用されている構造用集成材の曲げ試験結果を示す。試験体はラミナ厚さ 20-25mm、積層数 5-10層、幅 100-200mm である。図中の白抜きは集中節径比によって、黒塗り記号は曲げヤング係数によって等級区分されたラミナを用いて製造されたもので、3-10の試験体の平均値である。2桁の数字は集成材の等級区分を表わしており、図中の階段状の実線は、曲げヤング係数の場合には木構造計算基準のヤング係数を示し、曲げ強度の場合には長期許容応力の 3 倍に相当する。また、点線は長期許容応力の 4 倍に相当する。なお、階段の上段が特級、中段が 1 級、下段が 2 級に対応している。



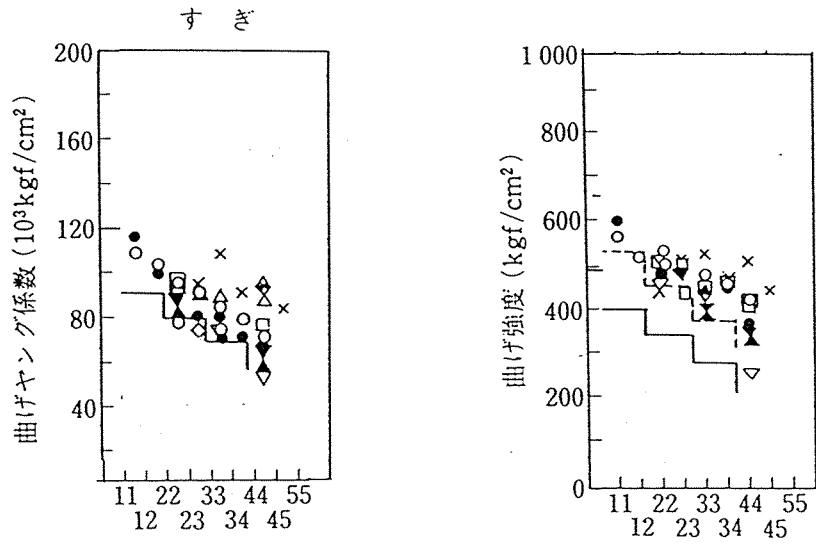


図17、構造用スギ集成材の曲げ試験結果

図17は断面の小さい構造用集成材のデータであるが、スギ大断面構造用集成材についての試験結果もいくつか見られる。図18～19に結果を示す。

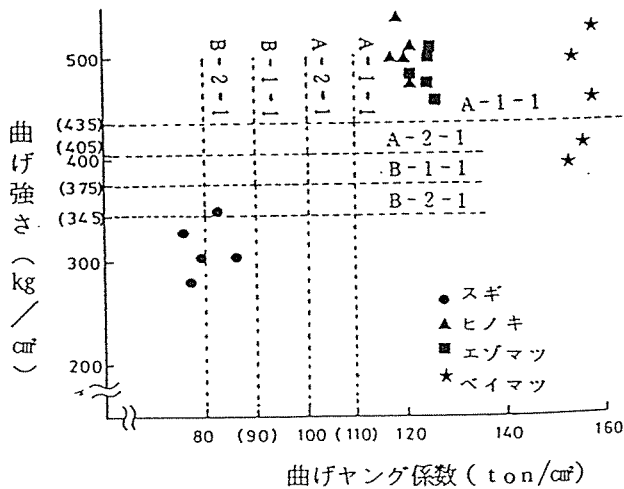


図18、構造用大断面スギ集成材の曲げ試験結果 (奈良林試)

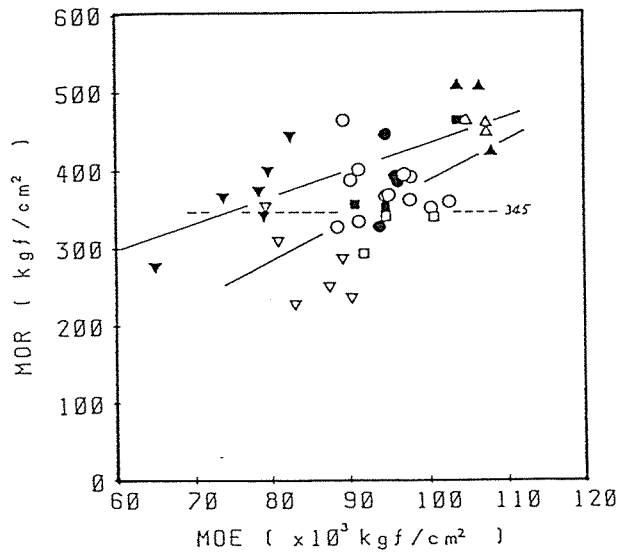


図19、構造用大断面スギ集成材の曲げ試験結果 (静岡県)

△▲：A社 □■：B社 ▼▽：C社  
○●：静岡県産  
白抜き：引張側外層ラミナのフィンガー  
ジョイントが純曲げ区間にあるも

#### 4・2、許容応力度とヤング係数

木構造計算基準では、スギ集成材の許容応力度とヤング係数は次のように定められている。

繊維方向の許容応力度 (単位:kg・f/cm<sup>2</sup>)

| 等級 | 長期許容応力度 |         |              |              |              |              | 短期許容<br>応力度<br>s f |
|----|---------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
|    | $L f_c$ | $L f_t$ | $L f_{bx-x}$ | $L f_{by-y}$ | $L f_{sx-x}$ | $L f_{sy-y}$ |                    |
| 特級 | 90      | 85      | 135          | 110          | 9            | 8.0          | 長期許容<br>応力度の<br>2倍 |
| 1級 | 80      | 75      | 115          | 95           | 9            | 8.0          |                    |
| 2級 | 70      | 65      | 95           | 85           | 9            | 8.0          |                    |

繊維に直角の方向の許容応力度 (単位:kg・f/cm<sup>2</sup>)

| 長期許容応力度                |                       |                 | 短期許容<br>応力<br>度    |
|------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| 許容めり込み応力度              |                       | 許容圧縮<br>応力<br>度 |                    |
| (イ)<br>材中間におけ<br>るめり込み | (ロ)<br>材端における<br>めり込み | (ハ)<br>全面圧縮     | 長期許容<br>応力<br>度の2倍 |
| 20                     | 16                    | 7.5             |                    |

繊維方向のヤング係数

(単位:  $10^3 \text{ kg} \cdot \text{f} / \text{cm}^2$ )

| 等級 | $E_{//x-x}$ | $E_{//y-y}$ |
|----|-------------|-------------|
| 特級 | 90          | 80          |
| 1級 | 80          | 75          |
| 2級 | 70          | 70          |

ラミナの組合せの節で述べたように、一般に集成材では低品質のラミナが断面の内層に、高品質のラミナが外層に配置される。これは、曲げを受ける場合についての考慮であるが、圧縮材あるいは引張材として用いる場合は、同じ等級で構成されるほうが都合のよいことが多い。

この様に同等級ラミナで構成された集成材の場合には、繊維方向の許容応力度やヤング係数の増加が認められる。

上の2表と同じく木構造計算基準に示された同等級ラミナで構成された構造用集成材の許容応力度と繊維方向のヤング係数を次に示す。

同等級ラミナで構成された構造用集成材の許容応力度 (単位:  $\text{kg} \cdot \text{f} / \text{cm}^2$ )

| 等級 | 長期許容応力度 |         |              |              |              |              | 短期許容<br>応力度<br>$s f$ |
|----|---------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|
|    | $L f_c$ | $L f_t$ | $L f_{bx-x}$ | $L f_{by-y}$ | $L f_{sx-x}$ | $L f_{sy-y}$ |                      |
| 特級 | 115     | 110     | 140          | 140          | 9            | 8.0          | 長期許容<br>応力度の<br>2倍   |
| 1級 | 95      | 90      | 120          | 120          | 9            | 8.0          |                      |
| 2級 | 80      | 75      | 100          | 100          | 9            | 8.0          |                      |

同等級ラミナで構成された  
 構造用集成材の繊維方向のヤング係数  
 (単位:  $10^3 \text{ kg} \cdot \text{f} / \text{cm}^2$ )

| 等級 | $E_{//x-x}$ | $E_{//y-y}$ |
|----|-------------|-------------|
| 特級 | 100         | 100         |
| 1級 | 90          | 90          |
| 2級 | 80          | 80          |

引用文献

- 1) 日本建築学会: 木構造計算基準・同解説、丸善、(1988)
- 2) 日本農林規格: 集成材の日本農林規格、合板検査会、(1986)
- 3) 日本農林規格: 構造用大断面集成材の日本農林規格、合板検査会、(1987)
- 4) 日本木材加工技術協会: 構造用大断面集成材の製造基準、(1987)
- 5) 日本住宅木材技術センター: 木造化推進標準設計施工マニュアル作成等事業報告書(3)「木造化技術開発」、(1987)
- 6) 森林総合研究所集成加工研究室: 集成材ラミナのデータベース、未発表
- 7) 江口 篤: スギとヒノキを混用した集成材の強度性能、奈良県林試研報、17、(1987)
- 8) 静岡県集成材工業会: 静岡県産スギを用いた構造用大断面集成材の製造とその強度性能、昭和61年度国産針葉樹多目的利用促進事業報告書、(1986)
- 9) 江口 篤、他2名: フィンガージョイントの接合効率と構造用大断面集成材の強度性能、奈良県林試研報、18、(1988)

#### 4.3 せん断強度

図 1 は無欠点小型試験片をもちいて JIS 椅子型試験（断面  $3 \times 3$  cm）によって求めた 36 品種のスギ間伐材の試験結果である [ 1 ]。比重とせん断強度とは比較的よい相関性をもっている。参考のために、これらのせん断強度を曲げ強度と比較したものを表 1 に示す [ 1 ]。

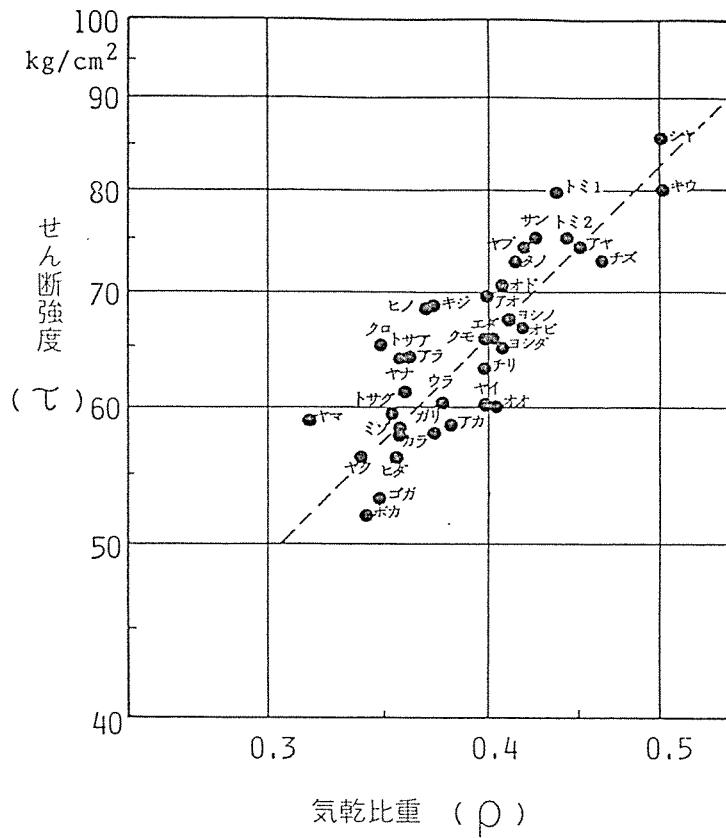


図1 気乾、無欠点小試験片で求めた比重とせん断強度の関係（各測点は4個の平均）[1]

表1 JIS 曲げ及びせん断試験結果 (表の値は試験数4の平均値, 含水率は平均15.5%)

| 品 種     | 比 重    | 曲げ破壊<br>係数(kg/cm <sup>2</sup> ) | 曲げヤング<br>係数(10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ破壊**<br>エネルギー(kg·cm) | せん断強度<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|--------|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| アオ      | 0.403  | 513                             | 62.0                                             | 1.94                   | 69.8                           |
| アカ      | 0.383  | 505                             | 60.9                                             | 1.98                   | 59.0                           |
| アヤ      | 0.450  | 493                             | 37.7                                             | 3.54                   | 74.3                           |
| アラ      | 0.360  | 478                             | 51.3                                             | 2.07                   | 64.5                           |
| ウラ      | 0.378  | 430                             | 51.7                                             | 1.69                   | 60.5                           |
| エダ      | 0.403  | 536                             | 61.7                                             | 2.16                   | 66.0                           |
| オオ      | 0.405  | 560                             | 68.8                                             | 2.46                   | 60.3                           |
| オド      | 0.408  | 523                             | 63.5                                             | 1.90                   | 70.8                           |
| オビ      | 0.418  | 521                             | 51.2                                             | 3.25                   | 67.0                           |
| カラ      | 0.357  | 508                             | 52.8                                             | 2.31                   | 57.8                           |
| ガリ      | 0.375  | 589                             | 55.3                                             | 2.12                   | 58.0                           |
| キウ      | 0.500  | 698                             | 78.6                                             | 3.34                   | 80.3                           |
| キジ      | 0.375  | 477                             | 54.2                                             | 1.86                   | 68.8                           |
| クモ      | 0.400  | 523                             | 46.2                                             | 2.14                   | 65.8                           |
| クロ      | 0.348  | 435                             | 48.6                                             | 2.06                   | 65.3                           |
| ゴガ      | 0.348  | 435                             | 52.5                                             | 1.74                   | 53.0                           |
| サン      | 0.427  | 621                             | 67.8                                             | 2.68                   | 75.0                           |
| シヤ      | 0.500  | 590                             | 56.2                                             | 3.52                   | 85.8                           |
| タノ      | 0.415  | 545                             | 51.3                                             | 2.46                   | 73.5                           |
| チズ      | 0.463  | 667                             | 71.7                                             | 2.99                   | 73.5                           |
| チリ      | 0.398  | 564                             | 72.8                                             | 1.88                   | 63.3                           |
| トサア     | 0.358  | 481                             | 53.0                                             | 2.20                   | 64.0                           |
| トサグ     | 0.353  | 483                             | 51.0                                             | 2.25                   | 59.8                           |
| トミ1     | 0.438  | 461                             | 29.3                                             | 3.00                   | 79.8                           |
| トミ2     | 0.443  | 476                             | 34.2                                             | 3.03                   | 75.0                           |
| ヒダ      | 0.355  | 465                             | 49.7                                             | 2.19                   | 56.3                           |
| ヒノ      | 0.373  | 474                             | 52.7                                             | 1.84                   | 68.3                           |
| ボカ      | 0.343  | 404                             | 31.8                                             | 2.45                   | 52.0                           |
| ミゾ      | 0.358  | 463                             | 54.2                                             | 1.28                   | 58.5                           |
| ヤイ      | 0.400  | 570                             | 65.9                                             | 2.05                   | 60.3                           |
| ヤク      | 0.340  | 467                             | 55.8                                             | 1.71                   | 56.3                           |
| ヤナ      | 0.360  | 483                             | 43.5                                             | 2.16                   | 61.3                           |
| ヤブ      | 0.420  | 483                             | 37.4                                             | 3.02                   | 74.0                           |
| ヤマ      | 0.318  | 493                             | 44.8                                             | 1.58                   | 59.3                           |
| ヨシダ     | 0.408  | 498                             | 42.9                                             | 3.39                   | 65.0                           |
| ヨシノ     | 0.413  | 547                             | 64.3                                             | 1.99                   | 67.5                           |
| 平均値     | 0.394  | 512                             | 53.5                                             | 2.34                   | 65.8                           |
| 標準偏差    | 0.0431 | 63.9                            | 11.6                                             | 0.594                  | 8.02                           |
| 変動係数(%) | 10.9   | 12.5                            | 21.7                                             | 25.4                   | 12.2                           |

\* 表1参照      \*\* 2×2×28(スパン)cmの試験片に中央集中荷重を与えた場合の最大荷重に達するまでに消費するエネルギー

#### 4.4 メリコミ

##### 4.4.1 横部分圧縮

図2は、材幅30mmおよび18mm、材せい100mmのスギ材を用いて、長さ50mmの鉄製加圧板で材中央部を横部分圧縮した場合の実験および計算の結果である〔2、3〕。全面圧縮によって求めたヤング率を基準にして見かけのヤング率に及ぼす材長（余長）の影響を見たものである。余長が大きくなると見かけのヤング率は2.6倍程度まで上昇する。

図3は、材長を材せいの5倍としたときの、材せいの影響を検討したものである〔2、3〕。比例限度応力、ヤング率、10%変形時の応力を全面横圧縮の値に対する比で表わしてある。どの値も材せいとほぼ直線関係がある。



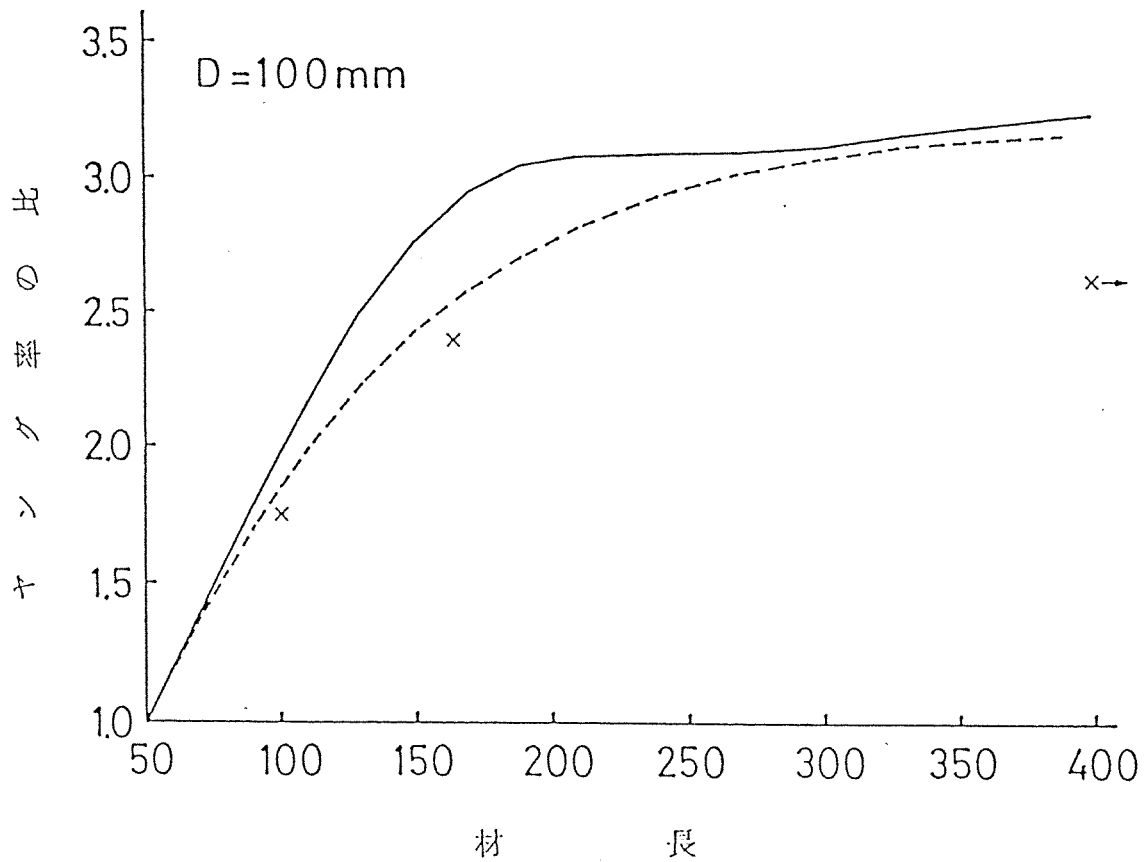


図2 材長とヤング率の比の関係 (材せい 100mm) [2、3]

——弾性床上的はり計算値

----有限要素法計算値

× 実験値

全面横圧縮のヤング率 1600kgf/cm<sup>2</sup>

比重 0.39

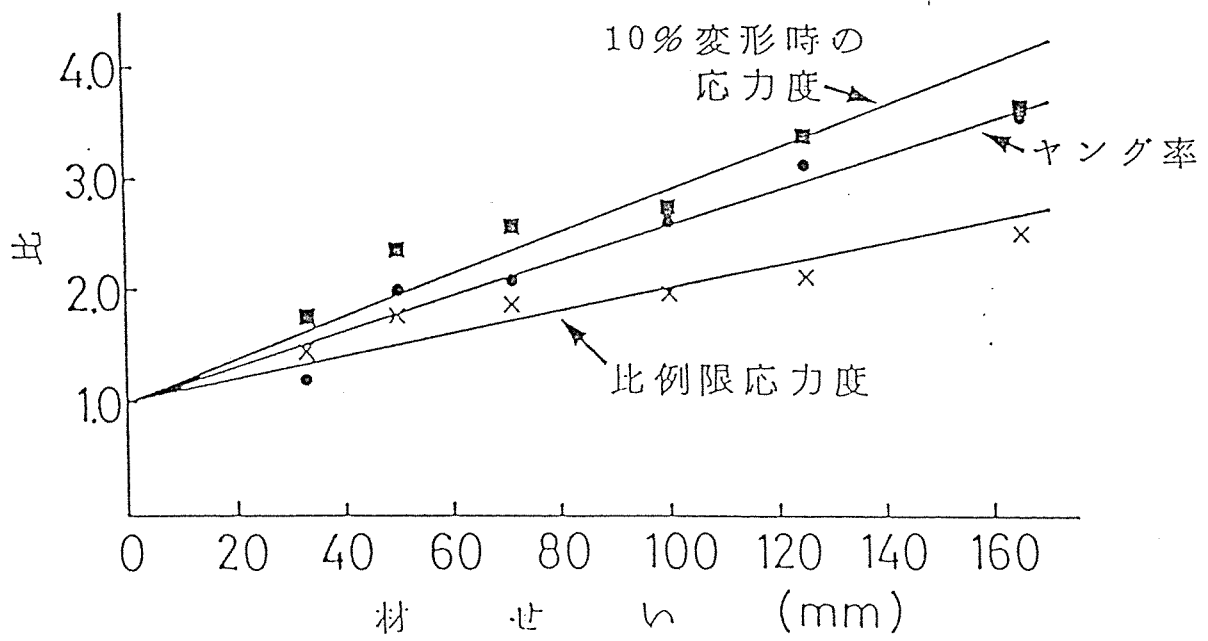


図3 応力度、ヤング率（部分横圧縮／全面横圧縮）の比の材せいによる変化 [ 2、3 ]

#### 4.4.2 縦部分圧縮

図4は、寸法10×10×10cmの立方体形状のスギ集成材を用いて木口面を部分圧縮した結果である[4]。圧入鉄板の寸法は1辺が3、6cmの2段階、もう1辺が5、7、10cmの3段階とし、それぞれを組み合わせて3L7Dなどと表記されている。余長の効果は認められるものの、横部分圧縮に比べるとあまり大きくない。これは、縦部分圧縮の場合には、圧入鉄板の縁でせん断力による破壊が生じやすいため、周辺の繊維が力を十分に支えることが出来ないためであると考えられる。

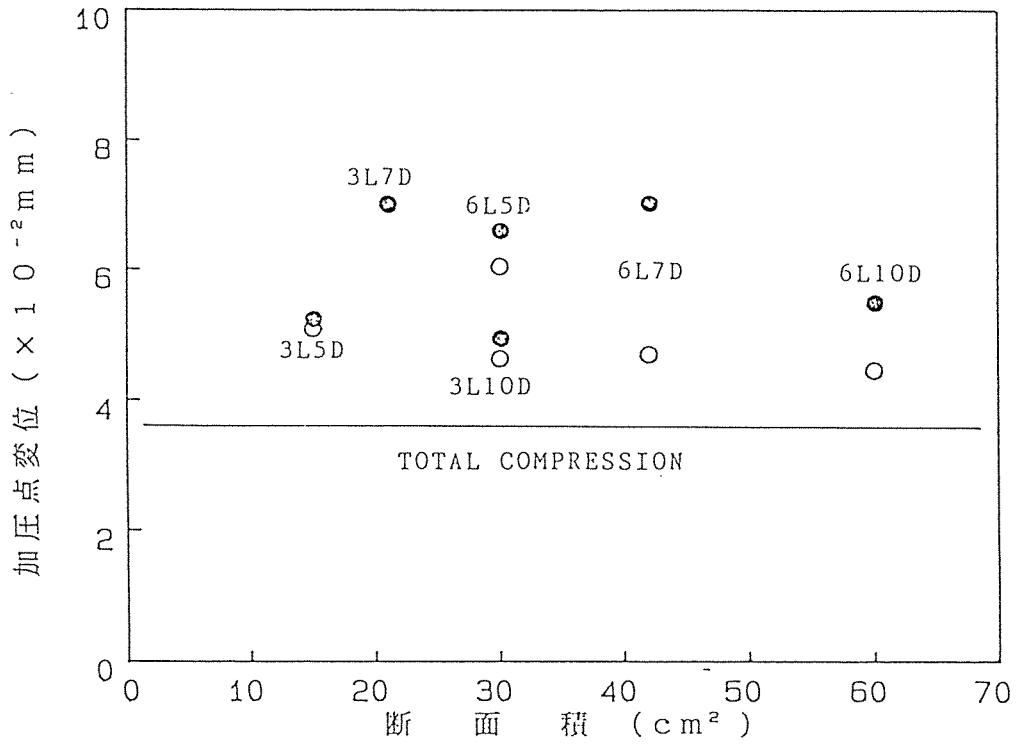


図4 縦部分圧縮における余長の効果 [4]

## 引用文献

- [ 1 ] 佐々木光・角谷和男・瀧野真二郎：スギ36品種の力学的性質、木材研究・資料、No.17,192-205(1983)
- [ 2 ] 建設省委託事業 木造軸組構法等の開発業務報告書一貫構造・差鴨居構造設計方法の開発一、(財)日本住宅・木材技術センター (1986.3)
- [ 3 ] 黒田紀雄、金谷紀行：木材の部分横圧縮強度一材せい、加圧材料、加圧方法による応力度の変化一、建築学会大会梗概集(1986.8、北海道)
- [ 4 ] 平成元年度 集成材構造委員会 実験結果報告書(1990.6)

5.1 鋼板挿入式ドリフトピン（ボルト）接合の繊維平行方向の強度性能

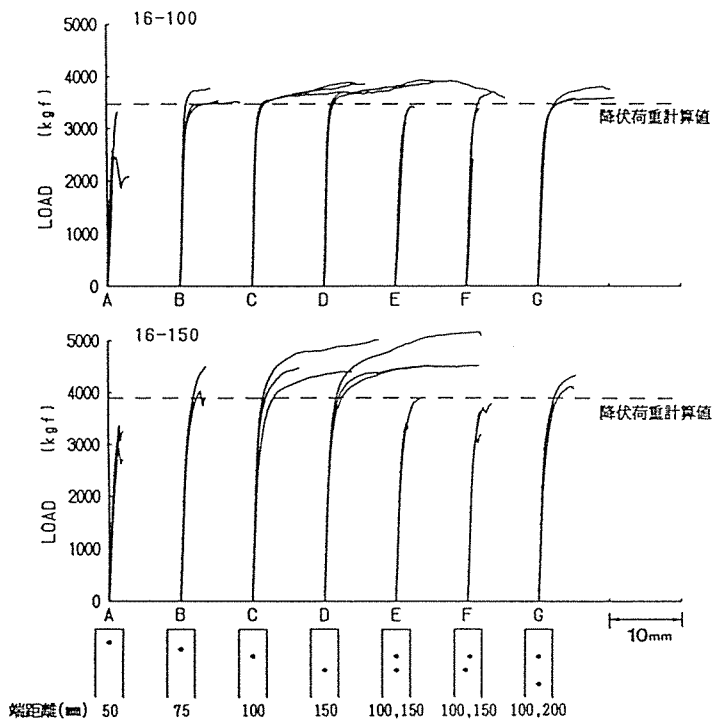


図1 荷重-相対変位曲線  
(ピン径16mm、長さ100mmと150mm)

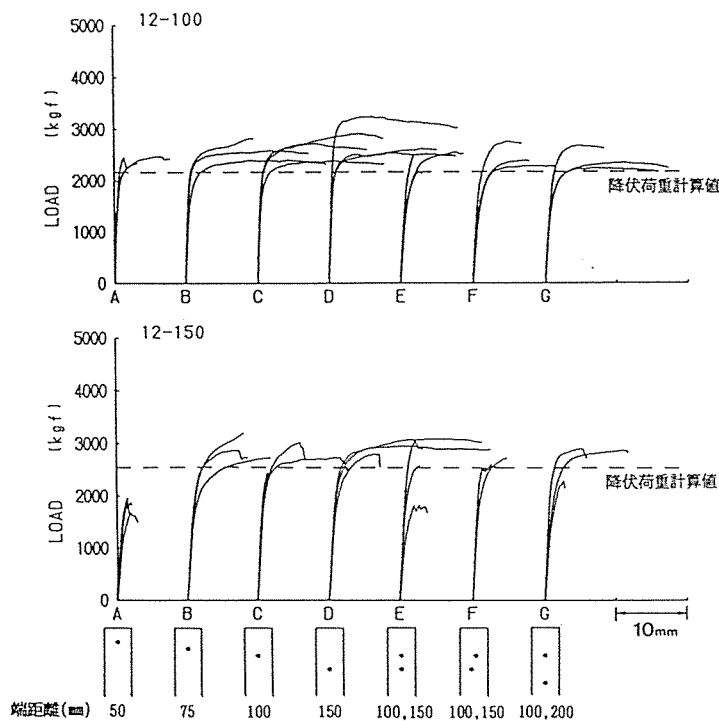


図2 荷重-相対変位曲線  
(ピン径12mm、長さ100mmと150mm)

5.1.1 端距離、ピン間隔と耐力の関係

ボルト接合およびドリフトピン接合は、木構造接合部によく用いられる接合具であり、ボルトは、座金とナットが用いられ、ドリフトピンは打ち込むだけという差はあるが、ここで取り扱う鋼板挿入式接合部では両者は類似の耐力発現機構を持つものと考えられる。ここでは、ドリフトピン接合を代表としてとりあげ、用いたピンの直径 ( $d$ ) と長さ ( $l$ )、端距離とピン間隔が最大耐力に及ぼす影響を調べた。

図1、2にその結果を示す。

試験は、直径16mmで長さ100mmと150mm、直径12mmで長さ100mmと150mmのピンを、端距離50mm (A)、75mm (B)、100mm (C)、150mm (D)、ピン2本を端距離100mmとしてピン間隔50mm (E)、その打ち込み位置をピンの半径だけ左右にずらしたもの (F)、ピン間隔を100mmにしたものについて行い、ピン2本打ちのものはピン1本当りの荷重で示した。

結果には端距離の影響が顕著にみられ、端距離が小さく、ピン径が大きい場合は直線域で集成材が破壊した。またピン2本打ちでは端距離が同じピン1本打ちの場合に比べて最大荷重が0.75~0.98倍程度に落ちた。またピン間隔50mmの方が100mmより最大荷重は低い。

降伏点については、ピン径、ピン長が同じであれば端距離、ピン間隔によらず一定であり、この値は次項で述べるLARSENの降伏荷重推定式を用いれば図中点線で示すように実際の降伏点とよく一致した。

### 5. 1. 2 ドリフトピン接合部への

#### LARSENの式の適用

LARSENは、鋼板挿入式ドリフトピン接合（ボルト接合）の降伏荷重推定方法として、図3に示す計算式を提案している。

まずピンの直径（ $d$ ）に比べてピンの長さ（ $l$ ）が小さい場合は、ピンが変形することなく木材中にめり込んでいくことにより降伏すると考えられ、この場合降伏荷重（ $P_y$ ）は（I）式のようにピンの見付面積（ $d \cdot l$ ）とピンの木材繊維平行方向へのめり込み強度（ $S$ ）を用いて推定できる。

ピンの長さが長くなると、こんどはピンが挿入鋼板部分で曲げ降伏し、この場合には打ち込んだピンの曲げ降伏モーメント（ $M$ ）とピンのめり込み強度（ $S$ ）を用い、（II）式のようにして降伏荷重が推定できる。

さらにピンの長さが長くなると、ピンが鋼板部のほかに左右材端よりの木材中でも降伏するため、この場合の降伏荷重は（III）式のようにピンの長さによらず一定となる。

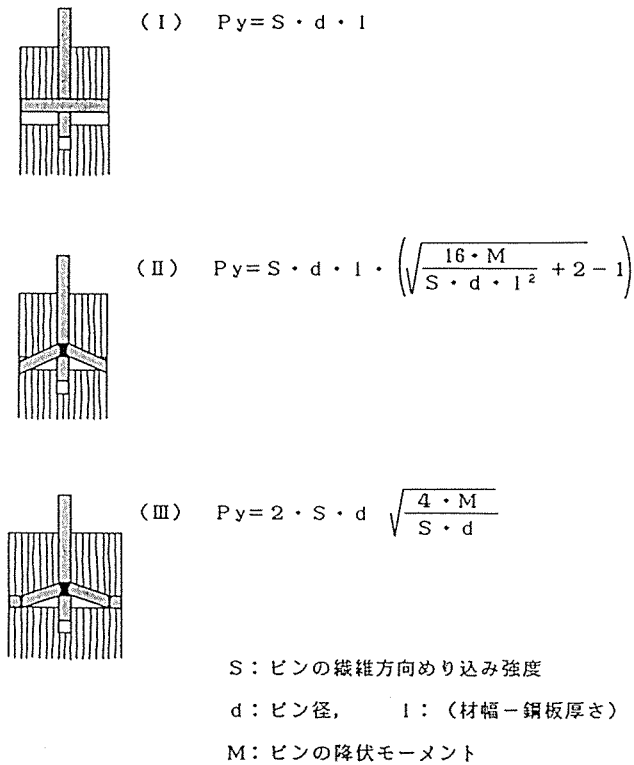


図3 LARSENの降伏荷重計算式

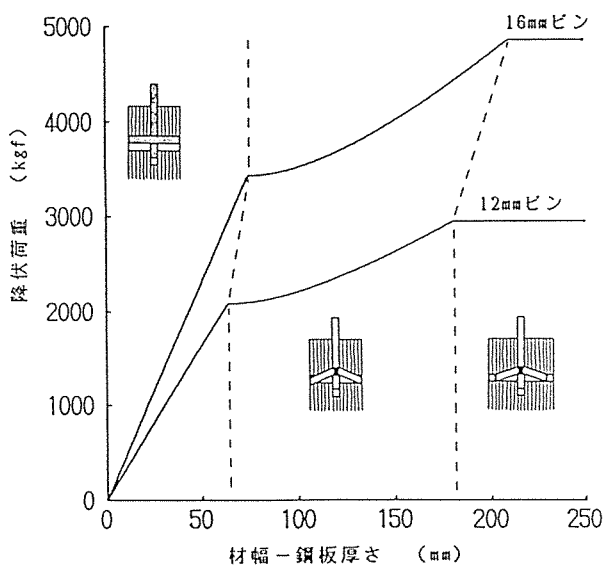


図4 打ち込みピンの長さ  
と降伏荷重の関係

図4は実験により求めたピンの木材繊維方向めり込み強度（16mmピン288kgf/cm<sup>2</sup>、12mmピン272kgf/cm<sup>2</sup>）およびピンの曲げ降伏モーメント（16mmピン3200kgf・cm、12mmピン1670kgf・cm）を用いて計算した降伏荷重の値である。

図1、2の結果をみてもわかるように、このLARSENの式を用いた降伏荷重の計算値は、実際のドリフトピン接合の降伏荷重とかなりよく一致する。

木構造計算規準の中で、ボルト接合についてはこの式が採用されており、図3において

$$M = F \cdot d^3 / 6 \quad (F \text{ はボルトの降伏点})、$$

$S = 3 f_c$  ( $f_c$  は木材の長期許容圧縮応力度) とおけば、規準の式となる。

5. 1. 3 ボルトとドリフトピンの  
強度性能の比較

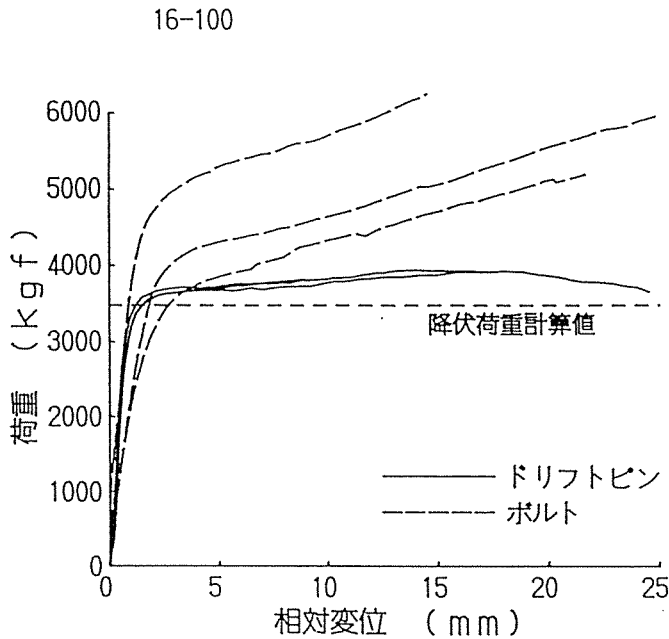


図5 ボルトとドリフトピンの強度性能  
(直径16mm,長さ100mm)

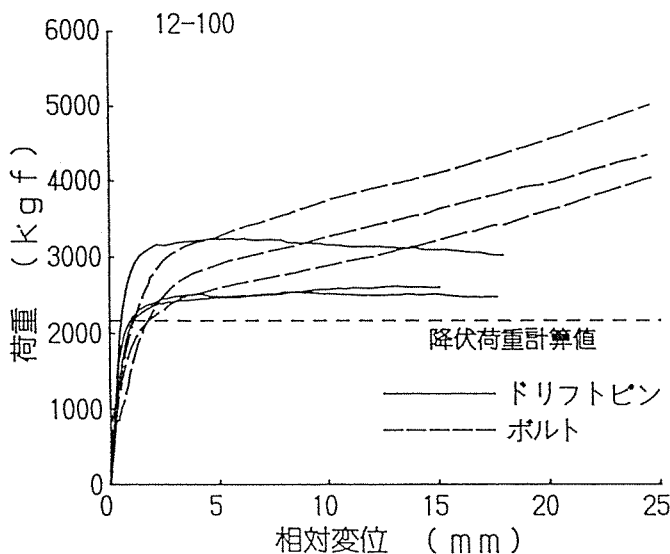


図6 ボルトとドリフトピンの強度性能  
(直径12mm,長さ100mm)

表1 ドリフトピンとボルトの性能比較

| 直径<br>(mm) | 長さ<br>(mm) | 接 合 具  | 1mm変位時<br>荷重 (kgf) | 最大荷重<br>(kgf) |
|------------|------------|--------|--------------------|---------------|
| 16         | 100        | ボ ル ト  | 2710               | 5972          |
|            |            | ドリフトピン | 3225               | 3888          |
|            |            | ボルト/ピン | 0.84               | 1.54          |
| 12         | 100        | ボ ル ト  | 1808               | 5329          |
|            |            | ドリフトピン | 2363               | 2800          |
|            |            | ボルト/ピン | 0.77               | 1.90          |

ボルトとドリフトピンの接合具としての違いは、ボルトは座金を用いナットを締めることにより、ボルト軸方向に締め付け力が発生する点、及びボルトを引き抜こうとする力に対して座金が抵抗する点であり、ドリフトピンには、これらの力は働かない。

図5および図6は、同一形状の試験体についてこのボルトとドリフトピンの繊維平行方向せん断耐力試験を行った結果である。実線がボルト、点線がドリフトピンである。

また表1に両者の性能比較表を示した。

ボルトとドリフトピンでは降伏点以降の荷重-相対変位関係に明確な差がみられ、ドリフトピンは降伏後荷重がほとんど増大せず、変形のみが進んでいったのに対し、ボルトは座金がボルトの変形を拘束し、荷重が増大していった。このため両者の最大耐力の比は、直径16mmの場合にはボルトがドリフトピンの1.54倍、直径12mmの場合には1.9倍に達した。

一方、1mm変位時の荷重はドリフトピンの方が2割程度ボルトより高い値を示し、加力初期は概してドリフトピンの方が高い性能を示した。これはドリフトピンが打ち込みタイプであるために、ドリフトピンと同径の穴にピンをたたき込むことができたのに対し、ボルトはネジ部のつぶれを防ぐため、部材に多少大きめの穴をあけて打ち込み時にネジ山がつぶれないようにしたため、接合部にガタが生じたのが原因であろう。

なお、ボルト、ドリフトピンいずれの場合も降伏点の推定にはLARSENの式が適用できた。



表2. スギとベイマツの強度性能の比較

|         | 直線域傾き<br>(kgf/mm) | 0.5mm変位<br>時荷重 (kgf) | 最大荷重<br>(kgf) | 気乾比重 | 縦圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|-------------------|----------------------|---------------|------|---------------------------------|
| スギ      | 3995              | 1780                 | 3813          | 0.37 | 347                             |
| ベイマツ    | 4794              | 2214                 | 4591          | 0.48 | 444                             |
| ベイマツ/スギ | 1.20              | 1.24                 | 1.20          | 1.30 | 1.28                            |

5. 1. 4 樹種、比重と耐力の関係

木構造計算規準を見ると、釘、ボルト、ドリフトピン、ラグスクリューなどいずれの接合具においても、その許容耐力は、比重あるいは樹種グループにより異なる値が与えられており、比重が接合具の性能に与える影響は無視できない。

表1はピン径16mm、長さ100mmのドリフトピン接合において、樹種をスギおよびベイマツとした場合の強度性能を比較したものである。直線域傾きや0.5mm変位時荷重などの初期性能および最大荷重は、ベイマツがスギより20%高かった。しかしながら比重や縦圧縮強度など材料自身の強度性能はベイマツの方が約30%程度高かったことを考えると、接合部では若干樹種間の耐力差がちぢまったことになる。

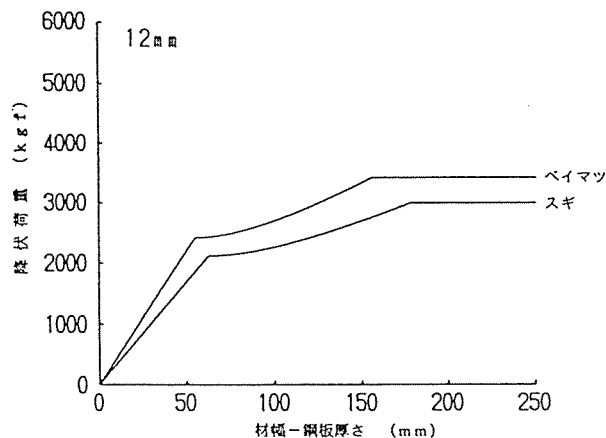
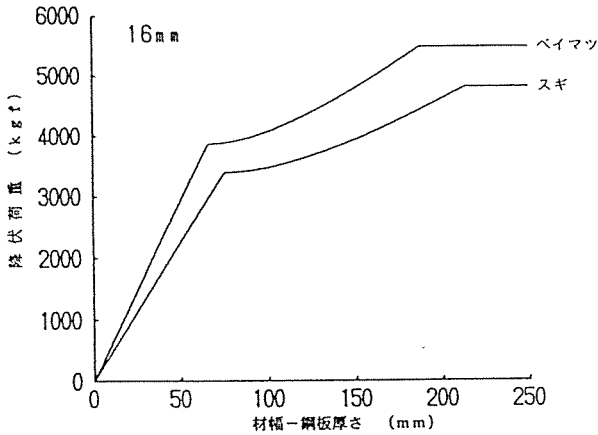


図5 LARSENの式で求めたベイマツおよびスギの降伏荷重(上:径16mm,下:12mm)

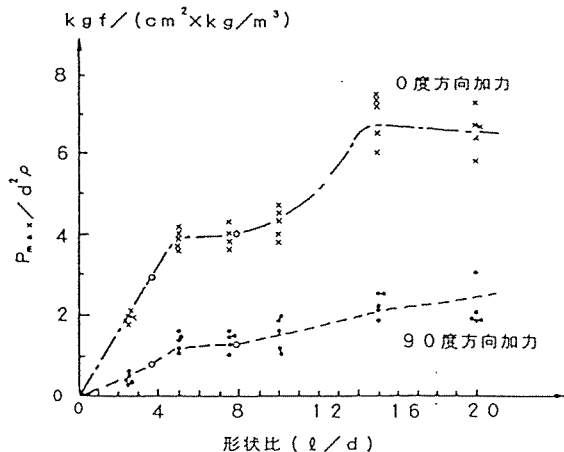


図6 ドリフトピンの比耐力 ( $P_{max}/d^2\rho$ ) と形状比 ( $l/d$ ) の関係

図5はLARSENの式を用い、ピンの繊維方向めり込み強度をベイマツ 349kgf/cm<sup>2</sup>、スギ 282kgf/cm<sup>2</sup> (いずれも実測値) として計算した降伏荷重である。

ピン長さ(材幅-鋼板厚さ)が小さいうちは、めり込み強度が直接降伏荷重にきくため接合部の降伏荷重比はめり込み強度比 ( $349/282=1.24$ ) と同じになるのに対し、ピン長さが十分大きい場合は降伏荷重がめり込み強度の平方根に比例するため、ベイマツとスギの降伏荷重比は 1.11 程度と小さくなる。

図6はスギ、ベイマツ、エゾ・トド、ベイマツと異なる樹種について、ドリフトピン接合部の最大荷重とピン形状比 ( $l/d$ ) の関係を示したものである。最大荷重はこれを供試材の比重で割っておけば、おおむね樹種、比重によらず同一の曲線にのると考えてよい。(図6は小松ら：“集成材によるモーメント抵抗接合部の構造性能”、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989.10より引用)

## 5. 2 ドリフトピン接合の繊維直交方向の強度性能

### 5. 2. 1 縁距離、端距離と荷重-相対変位曲線

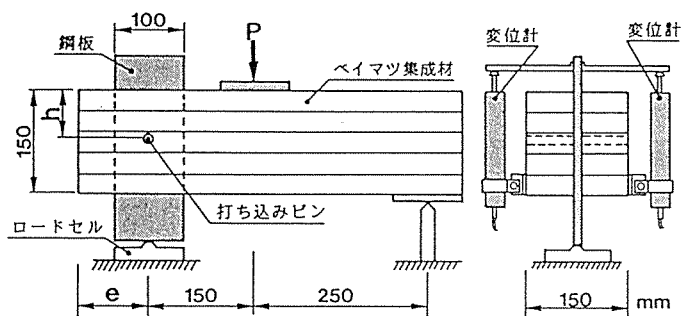


図7 曲げ型の繊維直交方向加力

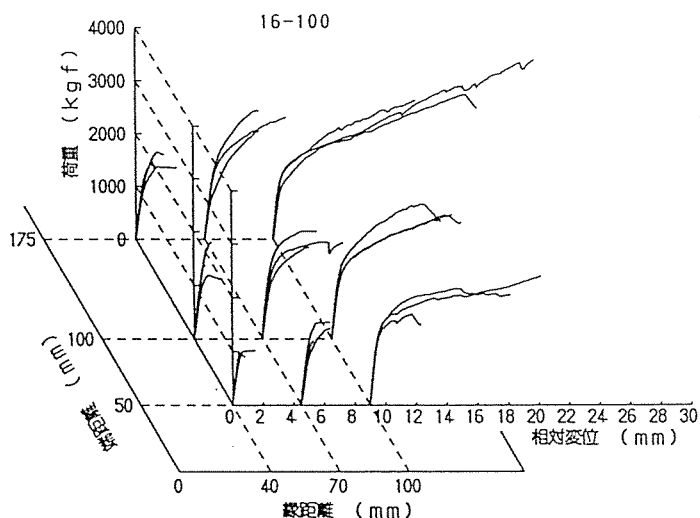


図8 荷重-相対変位曲線

(鋼板1枚、ピン径16mm、長さ100mm)

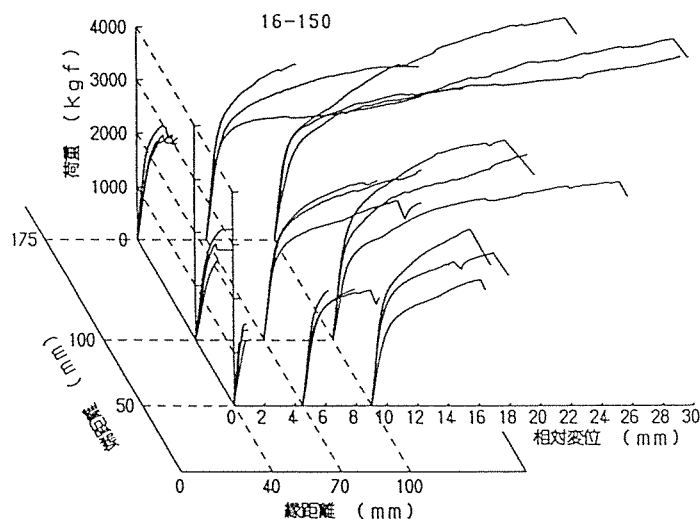


図9 荷重-相対変位曲線

(鋼板1枚、ピン径16mm、長さ150mm)

ドリフトピンやボルトの繊維直交方向のせん断耐力を測定する場合、その加力形状としては横引張型、曲げ型、圧縮型の3種類が考えられる。このうち横引張型は亀裂が接合具の左右両方向に広がるために破壊しやすく、圧縮型は部材両端を支持しているために亀裂が進展せず高い耐力を示し、曲げ型はちょうど両者の中間くらいの性能を示すと考えられる。以下の実験では、この曲げ型(図7)により、ドリフトピン接合部の繊維に直交方向加力時のせん断耐力を測定した。

図8～図11に縁距離(40mm、70mm、100mm)、端距離(50mm、100mm、175mm)の組み合わせごとに荷重-相対変位曲線を表示した。

直径16mm、長さ100mmのピンの場合、一般に相対変位が小さいうちに集成材が割裂破壊してしまい、ねばりに欠けた。またこの場合は、ドリフトピンには曲げ変形がほとんど生じなかった。

一方、ドリフトピン形状比( $l/d$ )が最も大きい直径12mm、長さ150mmのピンの場合、ピンが挿入鋼板部で著しく曲げ変形し、このため集成材は割裂破壊を生じにくく、ねばりのある接合部となった。

また、いずれのドリフトピンでも縁距離、端距離が大きくなるに従って、最大荷重および相対変位量が大きくなった。これは縁距離、端距離が大きくなると、集成材が割裂破壊しにくくなるためであり、特に縁距離の影響が強く認められた。

木構造計算規準では、縁距離は荷重負担側で4d以上、端距離は7d以上あけるように定めている。規準ぎりぎりにとると16mmピンで縁距離は64mm、12mmピンで縁距離は48mmで良いことになるが、今回の結果をみればわかるように縁距離を70mmから100mmにすると割裂破壊が生じにくくなり、より高い最大荷重が期待できる。従って縁距離、端距離は規準にこだわらずできるだけ大きくとることが望ましい。

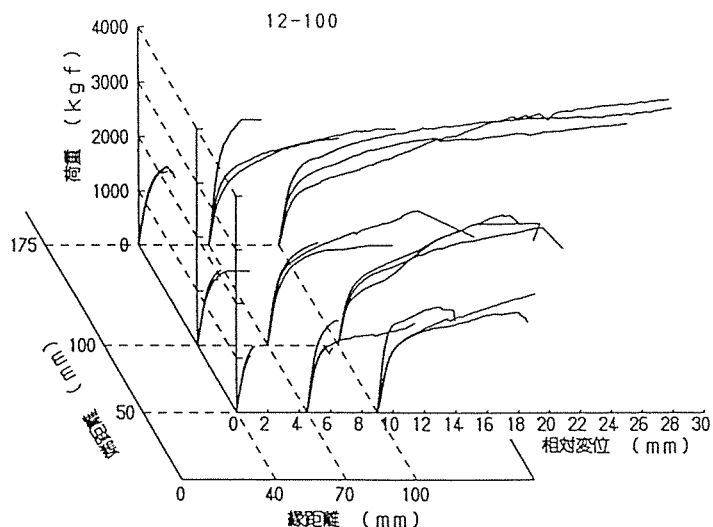


図10 荷重-相対変位曲線  
(鋼板1枚、ピン径12mm、長さ100mm)

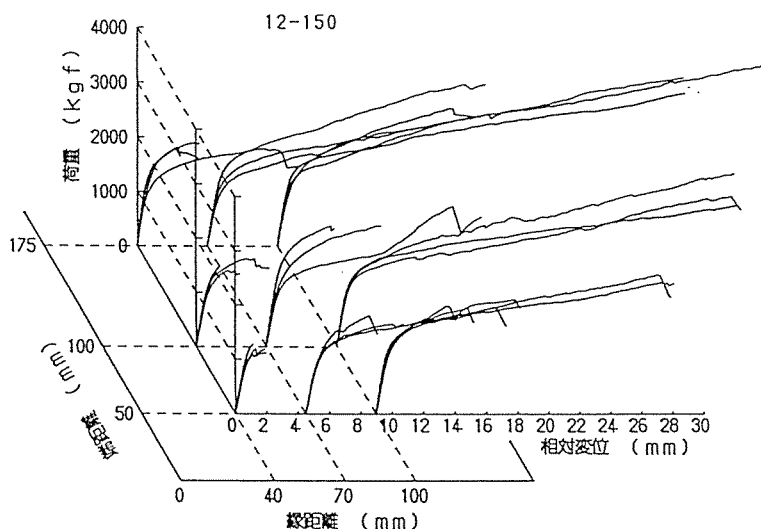


図11 荷重-相対変位曲線  
(鋼板1枚、ピン径12mm、長さ150mm)

### 5. 2. 2 ピン径、ピン長さとの最大荷重の関係

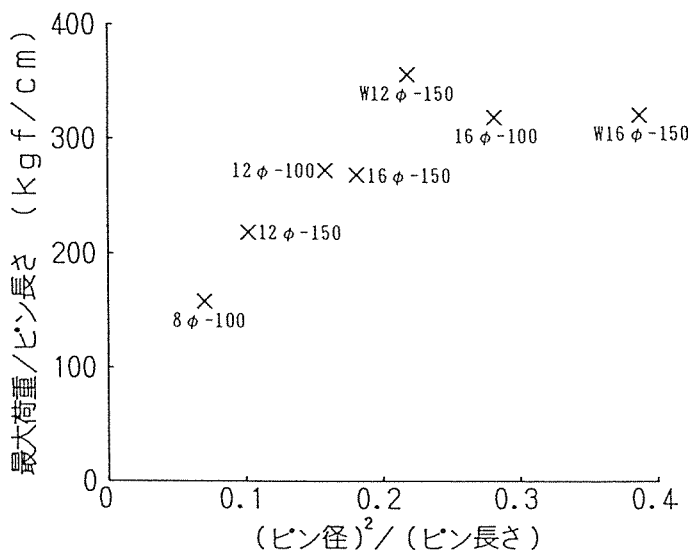


図12 ピンの直径、長さとの最大荷重の関係

図12は縁距離100mm、端距離を175mmとし、 $(\text{ピン径})^2 / (\text{ピン長さ})$ を横軸として最大荷重を示した。このうちWは鋼板を2枚並列に挿入したタイプである。

横軸の $(\text{ピン径})^2 / (\text{ピン長さ})$ が小さいうちは、この値が大きくなるに従って最大荷重が増大していくが、この値が一定値をこえるとそれ以上ピン径を大きくしても単位ピン長さあたりの最大荷重は上がらない。これは最大荷重がピンの降伏ではなく、集成材の割裂破壊で決まるためである。

表3 スギ集成材に対するベイマツ集成材  
接合部の強度性能比

| ピン径<br>(mm) | ピン長<br>(mm) | 径間幅<br>(mm) | 端頭幅<br>(mm) | P0.5<br>(kgf) | P1.0<br>(kgf) | P2.0<br>(kgf) | 直線傾き<br>(kgf/mm) | Pp1<br>(kgf) | d p1<br>(mm) | Pmax<br>(kgf) | d Pmax<br>(mm) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|
| 16          | 150         | 40          | 50          | 1.46          | -             | -             | 1.46             | 1.06         | 0.69         | 1.27          | 0.85           |
|             |             |             | 100         | 1.88          | -             | -             | 1.79             | 1.36         | 0.73         | 1.40          | 0.70           |
|             |             |             | 175         | 1.40          | 1.32          | -             | 1.36             | 1.30         | 0.92         | 1.39          | 1.37           |
|             |             | 70          | 50          | 1.54          | 1.39          | -             | 1.51             | 1.28         | 0.79         | 1.26          | 0.69           |
|             |             |             | 100         | 1.41          | 1.30          | 1.26          | 1.45             | 1.09         | 0.73         | 1.07          | 0.48           |
|             |             |             | 175         | 1.18          | 1.07          | 1.07          | 1.17             | 1.00         | 0.83         | 1.19          | 0.86           |
|             |             | 100         | 50          | 1.37          | 1.33          | 1.31          | 1.31             | 1.28         | 0.93         | 1.14          | 0.72           |
|             |             |             | 100         | 1.43          | 1.35          | 1.29          | 1.45             | 1.22         | 0.85         | 1.25          | 0.98           |
|             |             |             | 175         | 1.45          | 1.37          | 1.34          | 1.52             | 1.23         | 0.81         | 1.29          | 0.99           |
| 12          | 150         | 40          | 50          | 1.59          | -             | -             | 1.62             | 1.20         | 0.70         | 1.29          | 0.76           |
|             |             |             | 100         | 1.45          | 1.34          | -             | 1.54             | 1.06         | 0.66         | 1.38          | 1.04           |
|             |             |             | 175         | 1.29          | 1.26          | 1.27          | 1.34             | 1.10         | 0.80         | 1.23          | 0.74           |
|             |             | 70          | 50          | 1.80          | 1.66          | -             | 1.80             | 1.31         | 0.68         | 1.19          | 0.32           |
|             |             |             | 100         | 1.32          | 1.15          | 1.14          | 1.39             | 0.88         | 0.59         | 1.17          | 0.92           |
|             |             |             | 175         | 1.35          | 1.24          | 1.25          | 1.37             | 1.14         | 0.79         | 1.17          | 0.71           |
|             |             | 100         | 50          | 1.39          | 1.34          | 1.36          | 1.46             | 1.03         | 0.69         | 1.14          | 0.38           |
|             |             |             | 100         | 1.43          | 1.41          | 1.43          | 1.55             | 1.11         | 0.73         | 1.24          | 0.60           |
|             |             |             | 175         | 1.46          | 1.39          | 1.39          | 1.58             | 1.17         | 0.76         | 1.33          | 0.91           |

表3-2 供試材料の強度

|         | 気乾比重 | 縦 圧 縮<br>ヤング係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 縦圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|------|------------------------------------------|---------------------------------|
| スギ      | 0.36 | 86.7                                     | 347                             |
| ベイマツ    | 0.50 | 118.3                                    | 432                             |
| ベイマツ/スギ | 1.39 | 1.36                                     | 1.24                            |

5. 2. 3 樹種による強度性能の比  
(スギ集成材とベイマツ集成材)

樹種のみをスギとベイマツに変えて実施した繊維直交方向加力時の鋼板挿入式ドリフトピン接合のせん断耐力試験の結果を、スギを1とする比の値で示したのが表3である。

この結果、0.5mm変位時荷重や直線域の傾きなどの初期性能は、平均でベイマツはスギの1.4倍以上の値を示した。一方比例限度荷重は1.1~1.2倍程度の差しかなく、これはこの値が主にピンの曲げ降伏で決まり、木材の性能にあまり依存しないためであろう。最大荷重は1.2~1.3倍程度となり、材料の比重の比の値1.39を若干下まわった。

繊維平行方向加力では、この最大荷重の比はベイマツ/スギ=1.20であったが、直交方向加力ではこの値が、1.2~1.3倍と若干小さくなった。

ただ、いずれの場合も接合部の最大荷重の比は、供試材の比重の比の値よりは少し小さくなった。

5. 2. 4 繊維に平行方向加力と直交方向加力

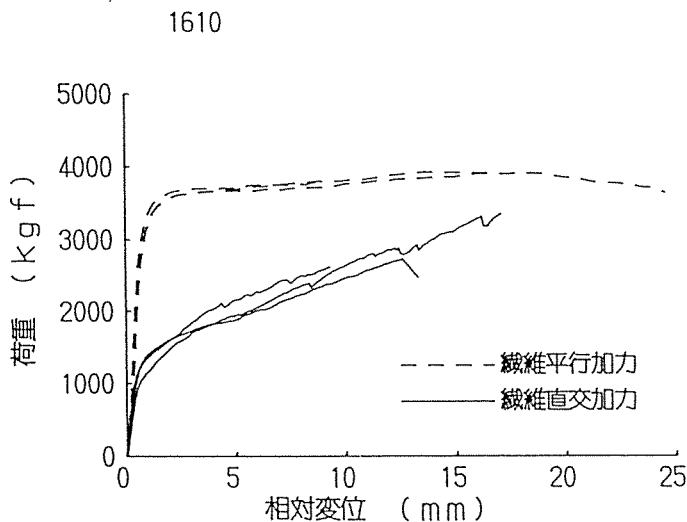


図13 繊維平行加力と直交加力の比較  
(ピン径16mm、長さ100mm)

図13~16に繊維に平行方向加力時と直交方向加力時の荷重-相対変位曲線を示した。この繊維に平行方向加力時と直交方向加力時では、両者の荷重-相対変位曲線に顕著な差がみられる。

繊維平行方向加力では、加力初期は荷重が急勾配で上昇し、降伏点を過ぎると荷重はほとんど増大せず変形のみが進んでいく。

これに対し、繊維直交方向加力では、かなり低い荷重で降伏点に達するが、降伏点を過ぎた後も変位の増大にともない荷重がゆっくり上昇し、木材が割裂破壊するまでこの傾向

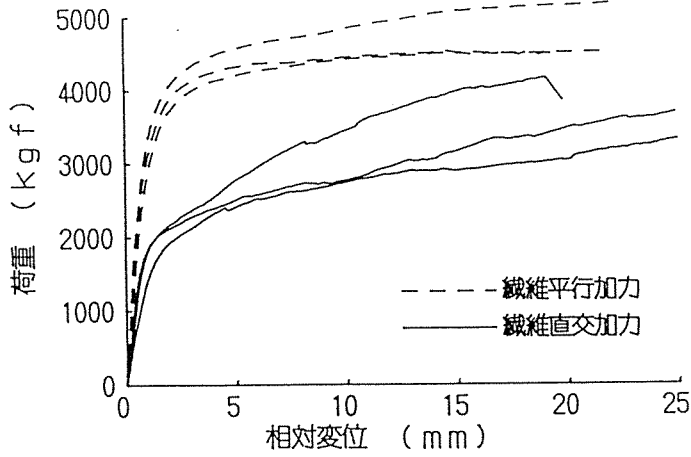


図 1 4 繊維平行加力と直交加力の比較  
(ピン径16mm、長さ150mm)

1210

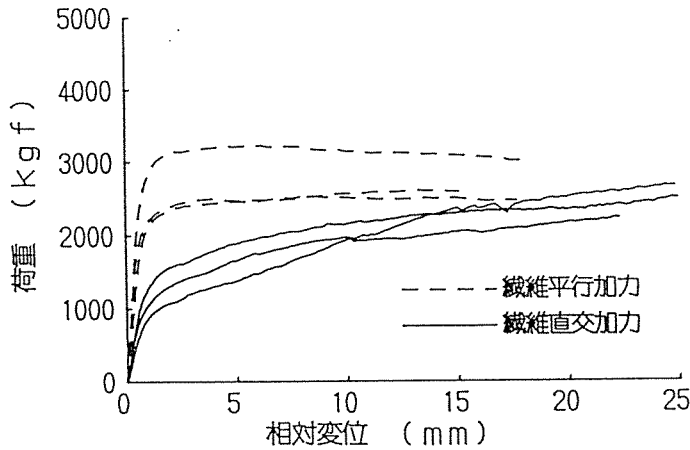


図 1 5 繊維平行加力と直交加力の比較  
(ピン径12mm、長さ100mm)

1215

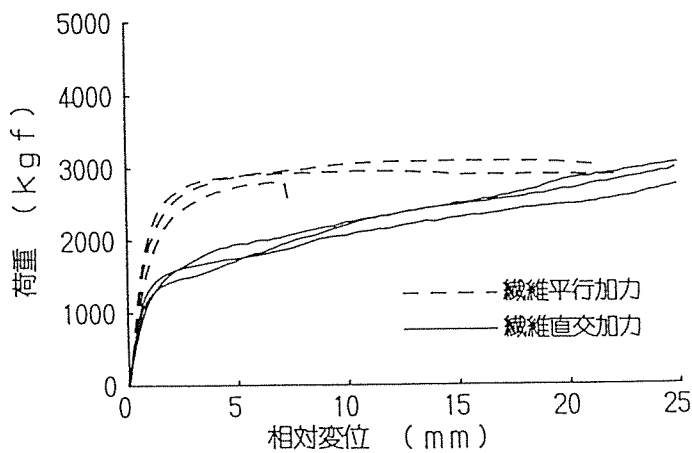


図 1 6 繊維平行加力と直交加力の比較  
(ピン径12mm、長さ150mm)

続く。

また、最大荷重について平行方向加力と直交方向加力を比較してみると、直径16mm、長さ100mmのピンでは直交/平行=0.75、長さ150mmのピンでは直交/平行=0.80となり、直径12mmのピンでは長さ100mmで直交/平行=0.88、長さ150mmのピンで直交/平行=1.04となった。

ピン形状比 ( $l/d$ ) の最も大きい直径12mm、長さ150mmのピンは、木材に割裂を生じさせにくいため、変位の増大に伴って荷重も増大していき、ついには繊維平行方向加力時の最大荷重を上まわるまでに至る。ただしそのためには縁距離、端距離を十分にとっておく必要があり、この直径12mmのピンでは縁距離  $8.3d$  (100mm)、端距離  $14.6d$  (175mm) と木構造計算規準の2倍以上の値をとっている。

16mmピンも、縁距離 (100mm)、端距離 (175mm) をさらに大きくすれば割裂破壊が生じず、直交方向の最大荷重が平行方向の値を上まわることも考えられる。

いずれにしても、繊維直交加力では初期性能は平行方向のそれに劣るものの、縁距離、端距離を十分とおけば、平行方向とほぼ同等の最大荷重も期待できる。

## 第6章 スギ集成材を用いた建築物の設計・施工

### 6.1 スギ集成材の施工性・加工性

実際にスギ集成材を用いて、集成材建物を施工した経験より、次に加工性や施工性について述べる。

#### 1) 加工性

- ① 材質が軟らかいので加工はしやすく、刃物の減りは少ない。
- ② 刃物を良く研磨しておかないと、切削肌が悪くなるので、研磨の管理が肝要である。
- ③ 刃物が逃げないので、ベイマツ等より精度をだしやすい。
- ④ 春材、秋材の密度差がはっきりしているため、加工しにくい面もあり、化粧的にも色むらとなり歓迎されない面もある。

#### 2) 輸送運搬

- ① 材が軟らかいので、積み降ろし、荷造り、結束固定などの場合に、材に傷をつけないような配慮は、他の材より一層必要である。
- ② 一度に運べる材積は、密度の軽い分だけ、多く運送可能となる。

#### 3) 現場建方

- ① 材に傷がつき易いので、建方時のつり上げ、つり下げ等には布帯や材面を保護する治具を用いて作業を行うと共に、十分な養生を行う。
- ② 建方作業にはクレーン等の揚重機械を用いるため、密度が軽いためのメリットは殆どない。

## 6. 2 建築物の保守管理と防腐処理・塗装

### 1) 保守管理の注意点

- ① 雨水が直接当たる構造材は、原則として防腐用水切り材でカバーする。
- ② 直接外気に面し、雨水が当たるところは原則として2～5年毎に木材保護塗料を塗布する。特に南めん、西面では3年程度での塗り替えが建物を長持ちさせる。
- ③ 雨水や水滴が溜らないよう、水勾配を設ける。
- ④ 基礎部では結露を生じないように、“通気性を良くする” “防腐塗料を塗布する” “コーキング材で防水する”などの注意深い配慮が重要である。
- ⑤ 防蟻にたいして土壌処理が一般的であるが、周囲の環境を配慮した対応が必要で環境問題を生じないように対応する。なお、沖縄では防蟻の問題があり木造は盛んでないが、スギの黒心部は白蟻に有効で防蟻作用があるとも言われている。

## II. スギ集成材の性能実験

### 目 次

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 1. スギに関する技術研究の現況               | 4 9   |
| 2. スギ通直構造用集成材の製造における等級区分       | 5 0   |
| 2.1 はじめに                       | 5 0   |
| 2.2 スギ通直構造用集成材製造における問題点        | 5 0   |
| 2.3 スギ通直構造用集成材の製造コスト低減と性能向上手法  | 5 0   |
| 2.4 スギ集成材挽板の等級区分に関する実験的検討      | 5 3   |
| 3. 複合集成材の強度特性                  | 6 8   |
| 3.1 はじめに                       | 6 8   |
| 3.2 材料と実験方法                    | 6 9   |
| 3.3 集成材内の応力分布                  | 7 7   |
| 3.4 強度特性予測シミュレーション             | 7 9   |
| 3.5 結果と考察                      | 8 1   |
| 3.6 まとめ                        | 9 6   |
| 4. スギ集成材における鋼板挿入式ドリフトピン接合部の耐力  | 1 0 1 |
| 4.1 繊維に平行方向加力時の性能              | 1 0 1 |
| 4.2 ベイマツとスギの比較およびスチールピン以外のピン打ち | 1 0 3 |
| 4.3 繊維に直交方向加力時の性能              | 1 0 5 |
| 4.4 ボルト接合とドリフトピン接合の耐力比較        | 1 0 7 |
| 5. スギのめりこみ圧縮試験                 | 1 2 8 |
| 5.1 実験の目的                      | 1 2 8 |
| 5.2 実験の実施場所                    | 1 2 8 |
| 5.3 実験の方法と試験体                  | 1 2 8 |
| 5.4 測定項目                       | 1 2 9 |
| 5.5 試験結果                       | 1 2 9 |
| 5.6 初期剛性と弾性限界の誘導方法             | 1 5 0 |
| 5.7 実験結果の解析：その1                | 1 5 2 |
| 5.8 実験結果の解析：その2                | 1 5 6 |
| 5.9 まとめ                        | 1 6 0 |



# 1. スギに関する技術研究の現況

スギに関する全般的な傾向をまとめると以下のとおりである。

a) 製材品あるいは丸太などの研究では化粧、造作を主体とした従来の評価と異なり、強度部材、すなわちティンバーエンジニアリングの材料としての適正利用の展開を求めたものがとくに目立つ。各地における実大強度試験の蓄積がはかられてきており、製材規格などへの展開がでてきている。日本における林業、木材業および木造建築業への新しい提案、警鐘としてとらえられると考えられるが、具体的には次のような意義がある。

木材の適正利用をはかるにはエンドユーザーが要求する性能を担保するための技術を可能な限り、木材生産者である山元に近づけることが必要で、そのために丸太から最終製品までを追跡した研究が重要であることが明らかになってきた。

b) 在来構法木造住宅における乾燥材の要求をうけ、乾燥の比較的困難なスギ製材品の乾燥の効率化、経済性の検討がなされている。葉枯らしなど経験に対して科学的な検討もなされつつある。しかしながら、乾燥の難易と品種、材質、地域性あるいは物理、生物学的特性の関係が十分明らかになっていない。

c) 集成加工、LVL、LVB、パーティクルボードなどは原料としてのスギの可能性と中小径材であるスギそのものを対象とした内容が増加の傾向にある。その背景には木材資源を諸外国に依存しつづけることが妥当かという問いがある。資源保護、環境保全、地域の活性化という社会的な要請のなかで経済的な合理性とどのようなバランスをとるのか課題があろう。

d) スギの需要拡大のための試みは間伐材からはじまり、中目材などに展開してきているが、スギ全般の問題として取り上げられねばならない状況にある。農業用建築物、大規模構造物などは行性的な配慮をバックに技術的な蓄積が行われた。しかしながら、一般の市場という面からみると心もとない状況にある。設計、技術の改良、改善だけの問題ではなく、さらに集荷、流通、情報を含めた体系化あるいは新たな構築が要求されていよう。

## 2. スギ通直構造用集成材の製造における等級区分

### 2.1. はじめに

等級区分は一般に強度等級区分を意味することが多いが、本来的な意味としては、ある性能ないしは性質に応じていくつかに分類することといえる。従って、対象とする材料と性能により等級区分はその内容を異にする。ここでは、スギ通直構造用集成材を製造する過程で、今後必要とされるであろう等級区分に付いて実験的結果を含めて検討する。

### 2.2. スギ通直構造用集成材製造における問題点

ここで、あえて通直構造用集成材と限定した理由は、構造用集成材の内でも比較的安価で、量産が要求されるまぐさ材や床梁材等に使用する構造用集成材を対象とするためである。

スギ材は、国産造林木の蓄積量の過半を占めているが、建築需要の質的变化にともないスギ材の需要は停滞し、新たな需要の掘興が必要とされている。スギ丸太は比較的中径材が多く、構造用集成材の材料としての利用が考えられているが、集成材製造にあたって解決しなければならない問題がいくつかある。その中で最も大きな要因は価格であり、スギ材の性能ないしは性質のバラツキの大きいことも挙げられる。したがって、比較的安価で、性能の保証されたスギ集成材を量産するに要求される手法およびそれを実現するために解決しなければならない問題点を整理する必要がある。その中には当然いくつかの等級区分があり、これらについて以下述べる。

### 2.3. スギ通直構造用集成材の製造コスト低減と性能向上手法

スギ通直構造用集成材の製造コスト低減と性能向上に要求される等級区分とその問題点をFig. 1に示す。

## 7. 丸太の等級区分

スギ材に限らず、わが国における集成材製造で使用される挽板の厚さは、20～25mmのものが多く、一般流通製材寸法と異にしている。また、先に述べたように、スギ材は個々の丸太で強度性能を大きく異にし、製材された挽板が全て集成材に使用できる訳ではない。集成材に使用できる挽板の性能は規定されており、規定される性能を満たさない材が多く得られた場合は、歩留まりの低下を生じて価格に跳ね返ることになる。したがって、丸太の段階では集成材原木としての適正を区分する必要がある、この区分法の確立が丸太利用効率の向上、ひいてはコスト低減に寄与するものと考えられる。

丸太の段階での等級区分として、役物用丸太と並材用の丸太を区分する等級区分と、並材用丸太の中で強度性能を区分する丸太の機械的等級区分が考えられる（図中のC1およびC2）。集成材に必要とされる性能以上あるいは以下の丸太を区分できれば、それらを丸太市場に還流して丸太利用効率を上げることができる。

役物丸太の区分（選別）指標は、目が詰んでいる（年輪幅が狭い）、通直である、表面が滑らかである（節が見えない）、材色（スギ材の場合特に問題となる）等が最低限の指標と考えられるが、それぞれの製材工場における長年の経験と感によるところが大きく、指標の確立はかなり困難である。しかしながら、役物丸太は並材丸太と価格体系を異にしているので、区分指標が確立すればその効果は極めて大きい。

スギ材のヤング係数は40～120 tonf/cm<sup>2</sup>程度の範囲にあるといわれ、丸太によっては4等の挽板のみが製材される危険があり、丸太利用効率の向上の上からも丸太の機械的等級区分は必要であると思われる。丸太の機械的等級区分のデータ蓄積も徐々になされているが、これを誰がどの様にして行い、品質を保証するかというシステムの確立が早急に整備される必要がある。

## 4. 集成材用挽板の断面寸法

先に述べたように、現在一般的に使用されている集成材挽板の厚さは、20～25mmで流通製材寸法と異にしている。このことは、一度、集成材用挽板として製材された材は、要求される性能を満たさない材が多く製材されても、他への流用は出来ないことを意味し、また、製材市場から集成材用挽板を入手できないこ

とを意味する。製材寸法は等級区分とは直接関連しないが、集成材の製造コスト低減の上からは大きな意味を持つ。ここではまぐさ材や床梁材に使用する通直集成材を想定して、挽板断面寸法を一般流通製材寸法である45 x 105 mmと考えた。この様な流通寸法材であれば、①挽板を製材市場から入手できる、②要求性能以下の挽板を製材市場に還流できる、③上級ラミナの市場形成が行えるなどのメリットが考えられる。さらに、副次的には材の厚さを厚くしたことにより接着工程の軽減、加工歩留まりの向上などもあるであろう。挽板の厚さを厚くしたことによるデメリットとして、特にスギ材においては、乾燥コストの増加が考えられる。

#### ウ. 挽板の等級区分

強度ないしはヤング係数を区分する方法として、機械的等級区分および視覚的等級区分がある。視覚的等級区分は、基本的には節の大きさに応じて強度等級区分するもので、機械的等級区分との併用が区分精度を高める上から望ましい。視覚的等級区分法には、肉眼による他、工業用テレビカメラを用いた自動計測なども研究が開始されてきている。機械的等級区分は強度とヤング係数の高い相関をもとにしている。ヤング係数測定には重錘载荷法やグレーディング・マシーン（CLTマシーン）の様に曲げヤング係数を測定するもの、打撃音法のように応力波の縦振動を用いたもの、Eコンピュータといわれる横振動を用いたものまで多岐に渡っている。それぞれ研究としてはかなりのデータ蓄積がなされてきているが、工場への導入には、検査に手間がかかる、設備投資がいるなどそれぞれの理由からわが国では機械的等級区分の導入が遅れている。いずれの方法を採用するにしろ、計測時間の短縮、手間の軽減の上から、挽板の加工精度の向上は機械的等級区分を導入するに必要な条件であろう。

#### I. 乾燥性難易の区分

スギ材の乾燥は難しいといわれている。その原因は明確でないが、①心材含水率が高い、②含水率の幅が大きい（60～200%）、③乾燥速度に差がある等が上げられている。乾燥性を区分しないで乾燥を行うと、乾燥ムラをおこし易く、結果として乾燥コストを上昇させることになる。集成材用挽板の厚さを厚くする

ことのメリットについては先にふれたが、乾燥においては板厚が2倍になると乾燥に要する時間は2～4倍になるといわれる。従って、乾燥性の難易を区分する指標の確立は、集成材に限らず、スギ材を利用するにあたって重要なことである。乾燥性と言いつてもその内容は、初期含水率、乾燥速度、乾燥による障害の発生難易が上げられるであろう。スギ材の人工乾燥についての検討は著に付いたばかりであるが、乾燥性の区分指標の確立と乾燥法（スケジュールを含めて）の確立が必要である。

#### オ. 曲げ保証荷重検査

フィンガージョイント等による縦継ぎ材の性能保証は、材料に要求されるレベルの保証荷重を加え、破損しない材を使用することが最も確実な方法である。縦継ぎラミナの保証荷重検査には、曲げ応力を負荷するものと引張応力を負荷するものがあるが、曲げ応力を負荷する検査法は、材料の移動を連続的に行える利点があり、有効な方法と考えられる。しかしながら、わが国では保証荷重検査法が確立しておらず、要求される性能と負荷すべき荷重の関係、検査合格の判定基準について実験的検討を早急に行う必要がある。

### 2.4. スギ集成材挽板の等級区分に関する実験的検討

先に述べたスギ通直集成材を製造するにあたって今後必要と考えられる等級区分の可能性を実験的に確認するために、スギ丸太を供試して集成材用挽板を製材し、いくつかの等級区分について検討した結果を述べる。

#### 7. 丸太の機械的等級区分

材長4 m、末口径約22 cmの静岡県産スギ丸太50本を供試した。末口、元口径および年輪数、材長、丸太重量、木口の色差を測定した。丸太重量測定は、写真1に示す三又を用いて、丸太にロープを掛け、チェーンブロックで昇降させてチェーンブロックにとりつけたロードセルで測定した。釣り下げた丸太の木口をハンマーで打撃して得られる打撃音をマイクロフォンで収録し、これを周波数分析して得られる丸太の縦振動固有周波数から打撃音法による縦振動ヤング係数を

求めた。

ヤング係数測定後、直ちにFig. 2に示すように、厚さ45mm x 幅105mmの挽板を3本製材した。このうち中央の1本は心持ち材となるように木取りした。また、比較のために集成材挽板寸法としてよく用いられる25mm厚の材も併せて製材した。製材後、それぞれ打撃音法によるヤング係数を測定し、丸太ヤング係数との関係を求め、丸太の機械的等級区分の可能性とその推定精度について検討した。

丸太ヤング係数と材厚45mmの挽板のヤング係数の関係をFig. 3に示す。今回供試した丸太のヤング係数は、50～120 tonf/cm<sup>2</sup>と広い範囲にあり、等級区分の必要性がこの結果からも伺える。挽板のヤング係数との相関係数は、0.77と高く、丸太の機械的等級区分は精度良く行えることが明きらかとなった。また、回帰式はほぼ原点を通る直線で、回帰式の傾きは0.93が得られた。回帰推定誤差は10.7 tonf/cm<sup>2</sup>であり、製材のヤング係数の区分間隔を20 tonf/cm<sup>2</sup>とすれば、今回供試した丸太では大凡4等級に区分できるといえる。

回帰推定誤差は、丸太寸法や製材する挽板の寸法等により大きく異なることが予想され、データ蓄積を早急に行う必要がある。

今回心持ちの挽板をあえて木取りしたが、これは心持ちラミナの適正利用を検討する目的がある。現行の製造基準にあっては、心持ちラミナは4等にランクされ、集成材の内層用挽板として使用することが許されているにすぎない（正しくは2級の集成材であれば中間層用挽板としても使用できる）。スギ材のように比較的丸太径の小さい材を集成材に使用する場合は心持ちラミナの性能に応じた利用を考えないと歩留まりの低下をおこすことになる。3本製材した挽板の中では心持ち材のヤング係数は低い傾向が認められる。丸太のヤング係数が高い場合、心持ち材のヤング係数もそれに比例して高くなり、85 tonf/cm<sup>2</sup>（測定は生材時のヤング係数：2等材）を上回るものも見られ、機械的等級区分の有効性がここにも認められる（Fig. 4）。

#### イ. 乾燥性難易の区分

スギ材は乾燥が難しい材といわれる。その原因として、心材含水率が高い、含水率のばらつきが大きい、乾燥速度が遅い等が上げられるであろう。特に、黒心

といわれる材の心材含水率は著しく高いといわれているが、その原因については不明である。

製材直後の挽板材面の表面色差をL a b表色系で測定した。製材時の挽板の容積重をもとに含水率を以下の式により求めた。

$$U(\%) = ( 100 + 0.84 * R0 * Ufsp ) * Ru / R0 - 100 \quad \text{Eq. 2.1}$$

ここで、R0 : 全乾容積重 = 0.38

Ufsp : 繊維飽和点の含水率 = 30 %

Ru : 測定時の容積重

これより算出した含水率とL a b表色系のL値との関係をFig. 5に示す。L値は表色系の内明度を示し、L値が大きくなると白く、低くなるにしたがい黒さを増すことを意味する。赤色を示す指標はa値（aの+の領域）であるが、スギ材についてのいくつかの測定結果から、a値を用いるよりL値を用いる方が評価が容易であることがわかっている。材色としてはL値が大きくなるほど赤からピンクを呈し、L値が小さいほど黒心材といえる。結果をみると、L値と含水率の関係における相関係数は高く、L値が増加するにともない含水率は直線的に減少している。この結果からも一般にいわれているように、黒心材の初期含水率は高く、赤心材の初期含水率は低いことがいえ、心材色による初期含水率の差は著しい。したがって、丸太木口の色差は、初期含水率の大まかな区分には有効である。当然、玉切りしてからの経過日数や保管状況によって含水率は大きく異にし、ロットが違えば比較することは難しい。その場合は、容積重を用いて初期含水率を区分する必要がある。

材厚45mmおよび25mmの挽板を人工乾燥した。乾燥スケジュールをFig. 6に示す。乾燥は1日11時間の間欠運転で行った。材厚25mmの挽板の含水率が約12%となった時点でそれぞれ乾燥室より取りだし、含水率、反り（カップ）を測定した。材厚45mmの乾燥時の含水率を容積重をもとに計算した結果をFig. 7に示す。L値が低い材においても乾燥がかなり進んでいる材とそうでない材があり、材色のみでは乾燥速度を評価し得ないといえる。乾燥性を評価するにあたっては、初期含水率、乾燥速度、乾燥時の障害発生の難易が考えられるが、そのな

かで、材の色調は初期含水率を区分するには有効であるが、乾燥速度を評価するには別の指標を加える必要がある。

板目板材の乾燥にともなうカップ量は加工歩留まりに著しく影響する。材厚25mmの挽板の平均カップ量は、0.70mmあり、最大のもは1.50mmであった（Fig. 8）。材厚45mmの挽板は、乾燥が不十分であったので再度乾燥を行い、平均含水率を11%にした。再乾燥後のカップ量は平均0.81mm、最大カップ量2.13mmとなった。これを材厚25mmの挽板の結果と比較すると、最大カップ量がやや大きいもののほぼ同様の数値を示し、いずれもプレーナ削りして材表面を一律に平滑にするには、表裏2mmずつ削る必要がある。この結果より、材厚45mmの挽板の乾燥にともなうカップ量は、材厚25mmの挽板と同程度で、厚さ当たりの加工歩留まりで評価すると材厚が厚い方が向上するといえる。

さらに、乾燥歩留まりを評価するために、材厚45mmの挽板の曲がり（C r o o k）の出現頻度を調査した（Fig. 9）。測定は長さ370cm区間の中央部における矢高量として求めた。平均の曲がり4.5mmあり、最大36mmの曲がり示すものが見られた。20mm以上の曲がり示すものは数本の丸太に集中しており、これらは丸太が曲がっていた形跡が認められた。したがって、丸太選別の段階で、曲がり材の除去も加工歩留まり、生産効率向上の上から必要であるといえる。

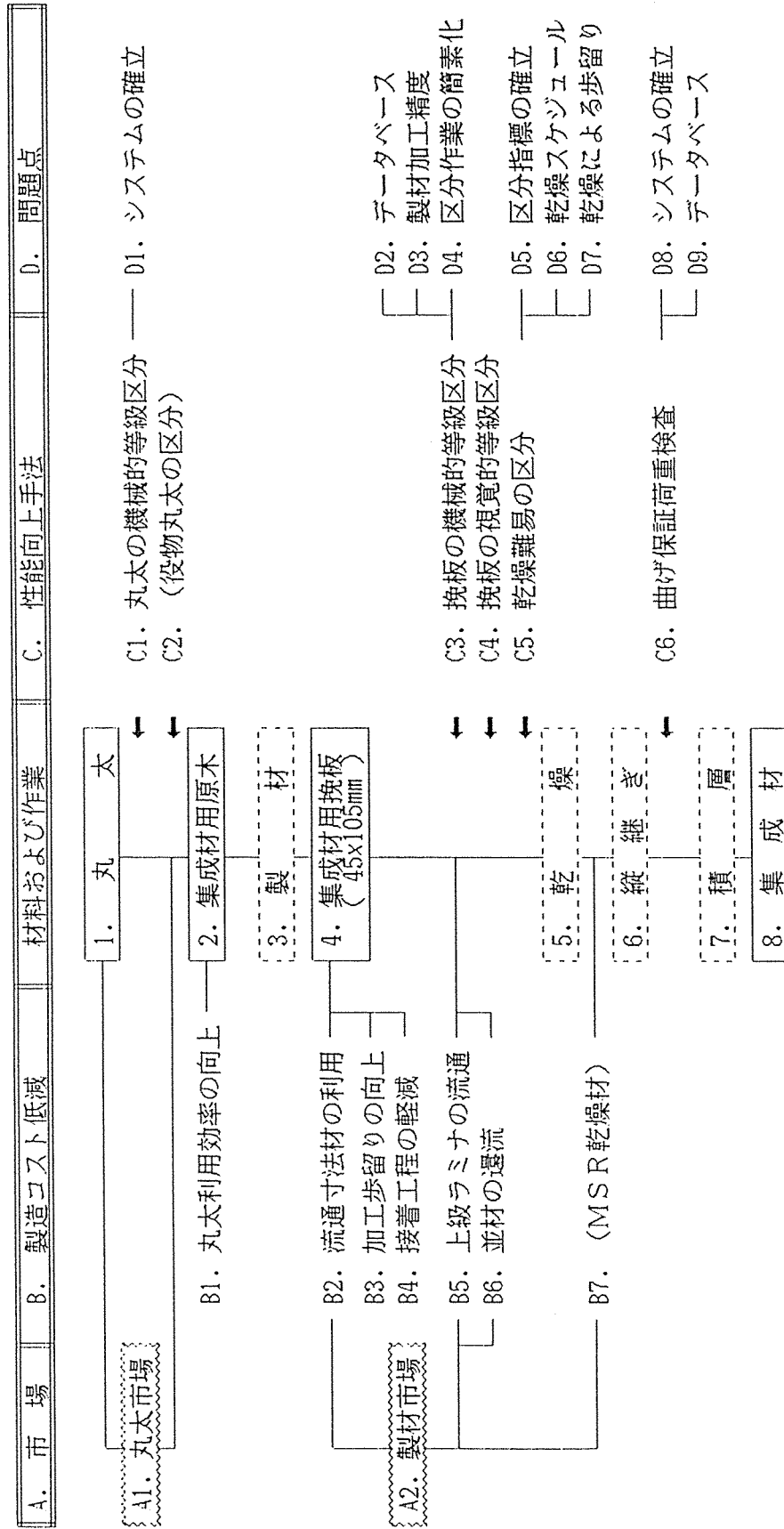
製材時と乾燥時における打撃音法によるヤング係を比較した。その結果、比率1.14が得られ、乾燥（平均含水率11%）に伴ってヤング係数は14%上昇するといえる（Fig. 10）。製材時含水率の高低（黒心、赤心）によらずこの関係は一定であった。

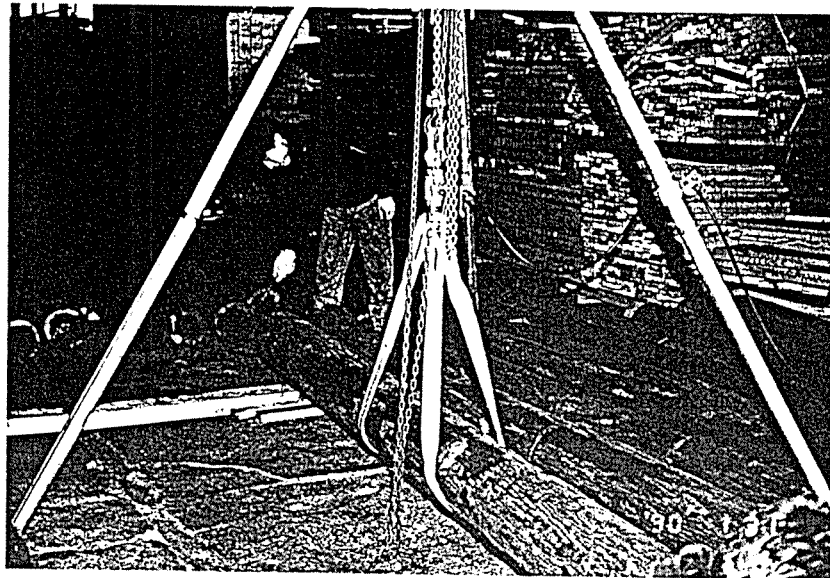
#### り. まとめ

スギ材を集成材用材として利用するにあたっては、それぞれの目的に応じた等級区分を行うことが経済性と強度性能を兼ね備えるために必要である。その中で、丸太の機械的等級区分および乾燥性の等級区分を行った。その結果、上記の成果が得られたが、他の項目については、引き続き実験を継続して行う予定にしている。



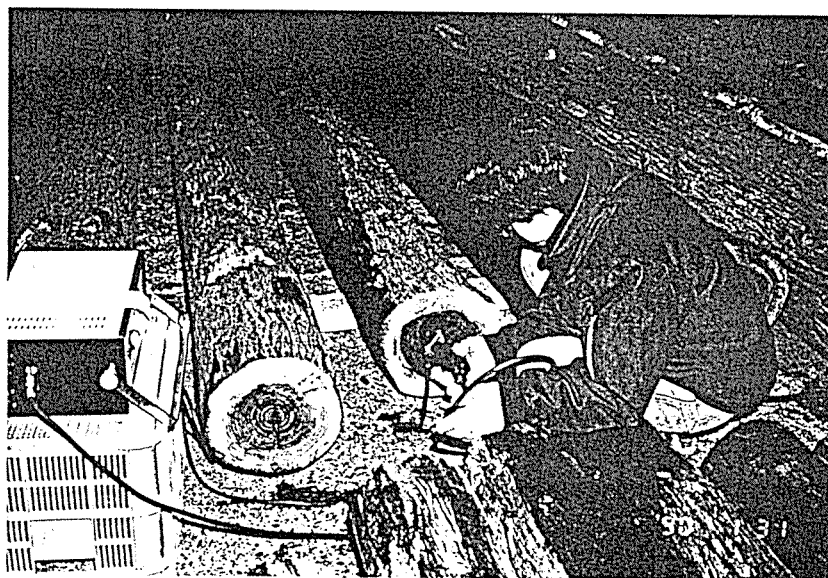
Fig. 1 スギ通直構造用集成材の製造コスト低減と性能向上フロー





FUJICOLOR HR

写真1 丸太重量測定



FUJICOLOR HR

写真2 丸太木口の色差測定

Table 1 45 x 105 mm スギ挽き板用原木の性状

| コード | L   | d    | ARN | SG   | Et    | コード | L   | d    | ARN | SG   | Et    |
|-----|-----|------|-----|------|-------|-----|-----|------|-----|------|-------|
| S01 | 402 | 20.9 | 23  | 0.92 | 76.6  | S26 | 409 | 20.6 | 30  | 0.89 | 73.9  |
| S02 | 419 | 20.9 | 26  | 0.78 | 80.6  | S07 | 404 | 20.8 | 33  | 0.87 | 102.1 |
| S03 | 404 | 20.8 | 29  | 0.88 | 88.9  | S28 | 408 | 22.1 | 32  | 0.85 | 79.5  |
| S04 | 408 | 22.2 | 21  | 0.84 | 82.1  | S29 | 405 | 22.0 | 33  | 0.77 | 86.0  |
| S05 | 405 | 21.0 | 40  | 0.98 | 69.1  | S30 | 405 | 22.2 | 21  | 0.94 | 68.3  |
| S06 | 406 | 21.1 | 25  | 0.96 | 92.8  | S31 | 403 | 21.1 | 31  | 0.86 | 84.3  |
| S07 | 406 | 20.9 | 24  | 0.87 | 68.0  | S32 | 406 | 20.4 | 29  | 0.62 | 86.5  |
| S08 | 405 | 20.8 | 26  | 0.81 | 82.9  | S33 | 405 | 21.0 | 31  | 0.78 | 77.5  |
| S09 | 427 | 21.5 | 28  | 0.86 | 78.6  | S34 | 421 | 21.5 | 26  | 0.63 | 57.3  |
| S10 | 406 | 21.7 | 25  | 0.87 | 80.3  | S35 | 423 | 20.0 | 27  | 0.87 | 53.7  |
| S11 | 408 | 22.4 | 21  | 0.85 | 69.1  | S36 | 422 | 21.0 | 27  | 0.79 | 72.4  |
| S12 | 405 | 20.2 | 27  | 0.90 | 82.3  | S37 | 408 | 19.7 | 22  | 0.76 | 68.4  |
| S13 | 403 | 21.5 | 29  | 0.79 | 75.5  | S38 | 403 | 20.2 | 33  | 0.88 | 82.4  |
| S14 | 427 | 21.2 | 27  | 0.66 | 76.4  | S39 | 403 | 22.0 | 36  | 0.74 | 88.7  |
| S15 | 404 | 20.7 | 33  | 0.74 | 81.1  | S40 | 419 | 21.8 | 32  | 0.83 | 92.7  |
| S16 | 423 | 21.8 | 29  | 0.80 | 83.7  | S41 | 407 | 21.2 | 28  | 0.69 | 66.9  |
| S17 | 404 | 21.1 | 24  | 0.76 | 68.9  | S42 | 407 | 21.2 | 23  | 0.88 | 102.0 |
| S18 | 411 | 22.5 | 27  | 0.81 | 80.9  | S43 | 405 | 22.8 | 42  | 0.84 | 99.1  |
| S19 | 405 | 21.0 | 30  | 0.92 | 75.5  | S44 | 407 | 21.0 | 20  | 0.96 | 79.4  |
| S20 | 424 | 23.2 | 27  | 0.85 | 67.7  | S45 | 404 | 21.5 | 19  | 0.88 | 62.0  |
| S21 | 405 | 22.4 | 45  | 0.79 | 80.9  | S46 | 403 | 21.1 | 43  | 0.79 | 122.8 |
| S22 | 405 | 21.6 | 26  | 0.85 | 69.2  | S47 | 430 | 22.8 | 27  | 0.77 | 63.0  |
| S23 | 407 | 21.3 | 25  | 0.63 | 82.8  | S48 | 408 | 18.8 | 31  | 0.89 | 106.1 |
| S24 | 404 | 19.8 | 37  | 0.73 | 68.8  | S49 | 407 | 21.7 | 26  | 0.83 | 94.3  |
| S25 | 405 | 21.3 | 35  | 0.84 | 118.3 | S50 | 403 | 20.7 | 32  | 0.82 | 96.0  |

L : 材長 (cm)  
 d : 末口径 (cm)  
 ARN: 末口年輪数

SG : 容積重  
 Et : 打撃音法によるヤング係数 (ton/cm<sup>2</sup>)

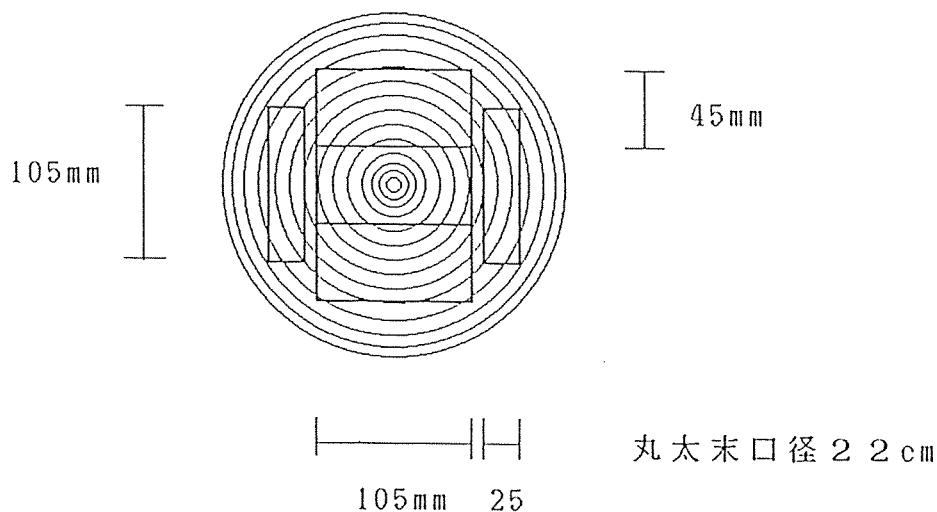


Fig.2 挽板の木取り

2:HIKIITDS

2:HIKIITDS

$$Y = A \cdot X + B$$

$$A = 0.928$$

$$B = 0.33$$

$$r = 0.773$$

$$U_{yx} = 10.6727$$

挽板のヤング係数

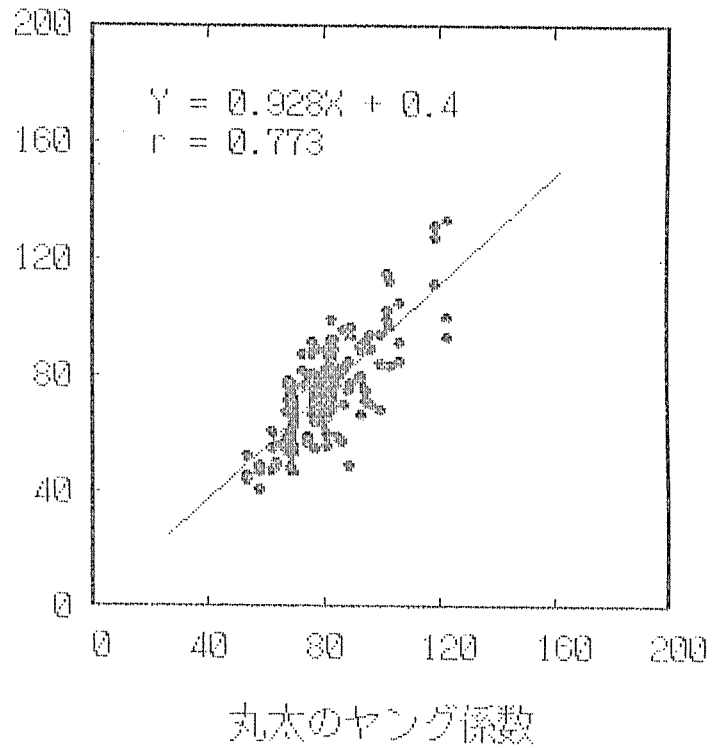


Fig. 3 丸太のヤング係数と挽板（45x105mm）のヤング係数の関係

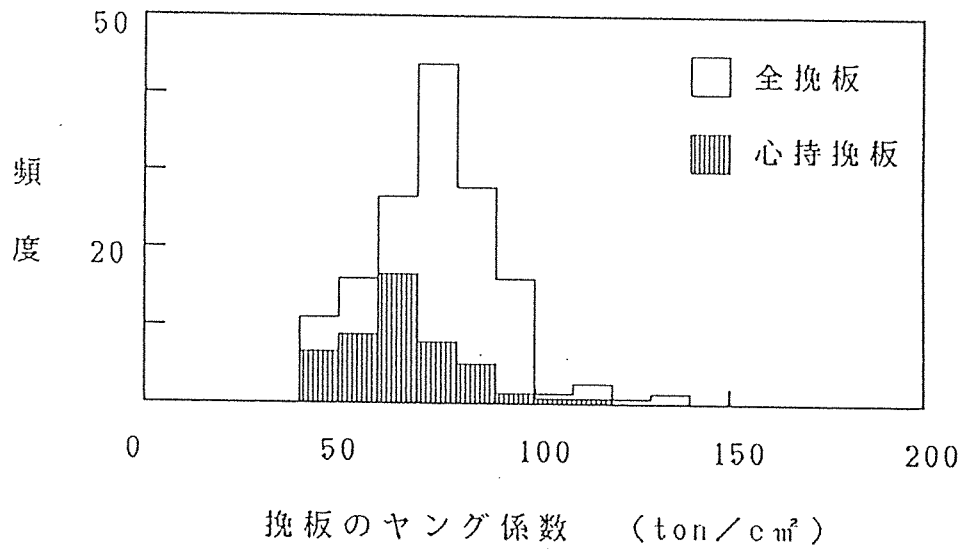


Fig. 4 挽板のヤング係数の分布

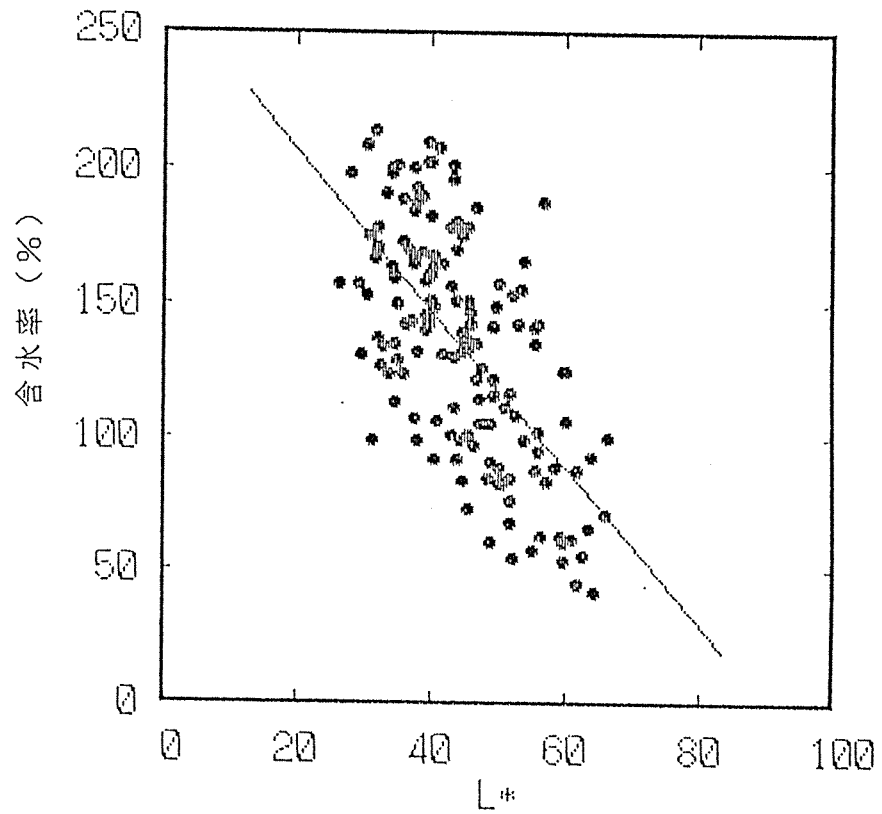


Fig. 5 材の色差 (L\*値) と容積重より求めた含水率の関係

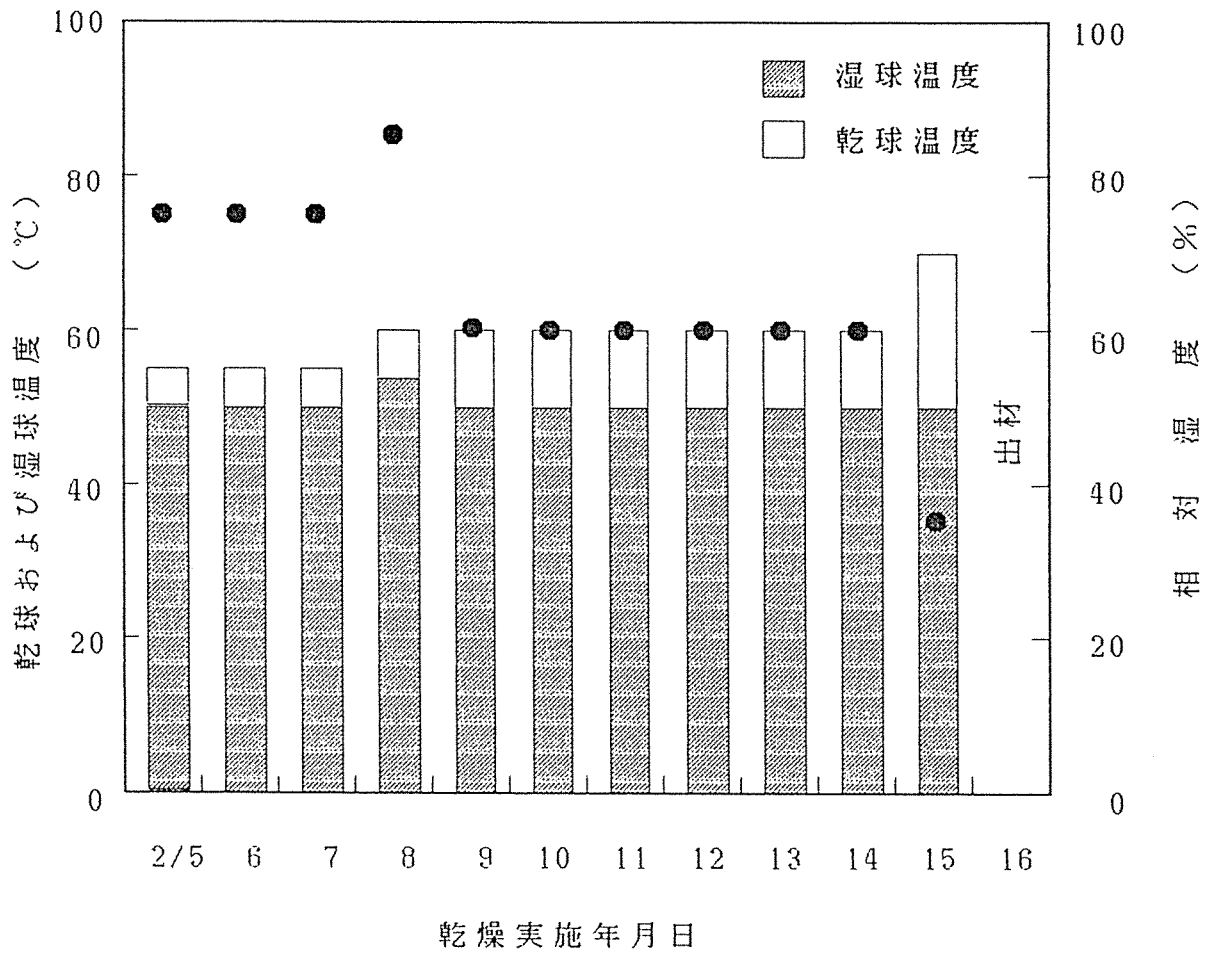


Fig. 6 スギ挽板の乾燥スケジュール  
 (毎日8時～19時までの間欠運転)

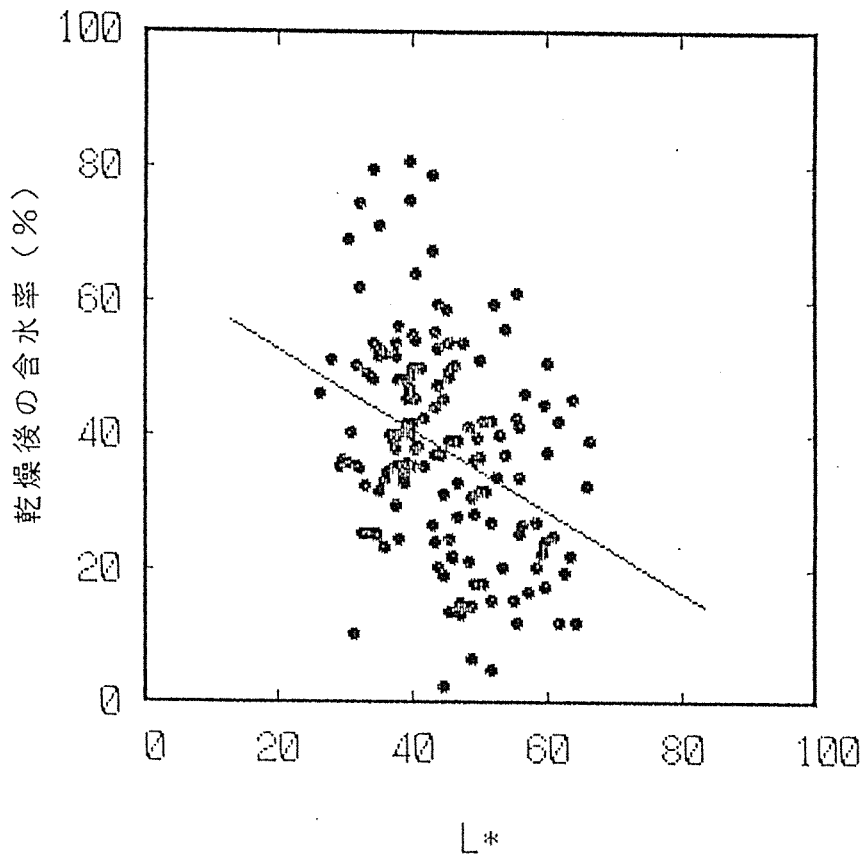


Fig.7 製材時のL値と容積重より求めた乾燥後の挽板含水率



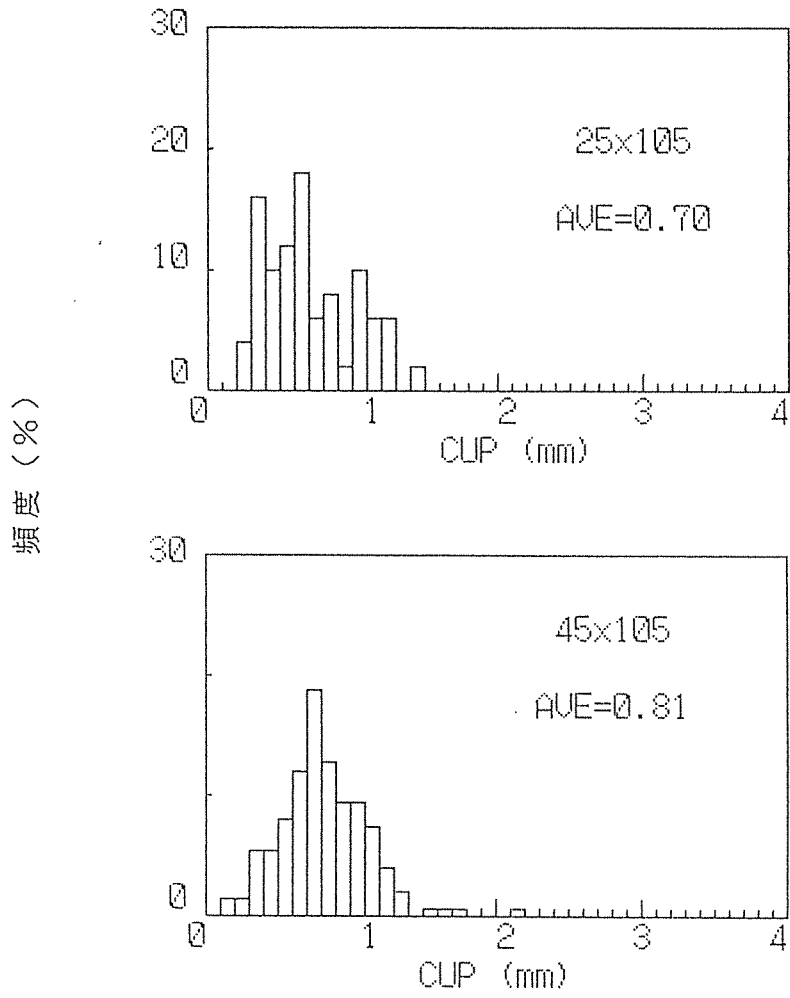


Fig. 8 乾燥後の挽板のカップ量 (mm)

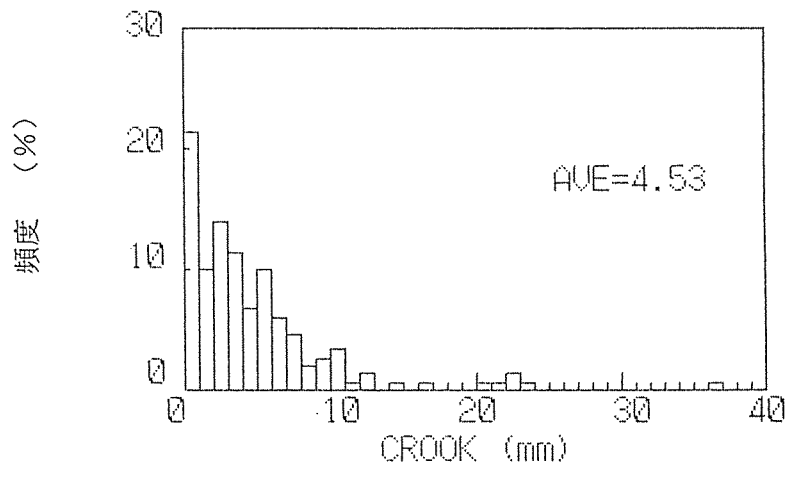
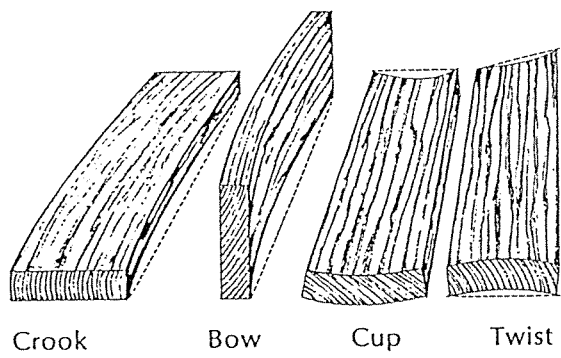


Fig. 9 3 7 0 cmスパン中央で求めた曲がりの出現頻度



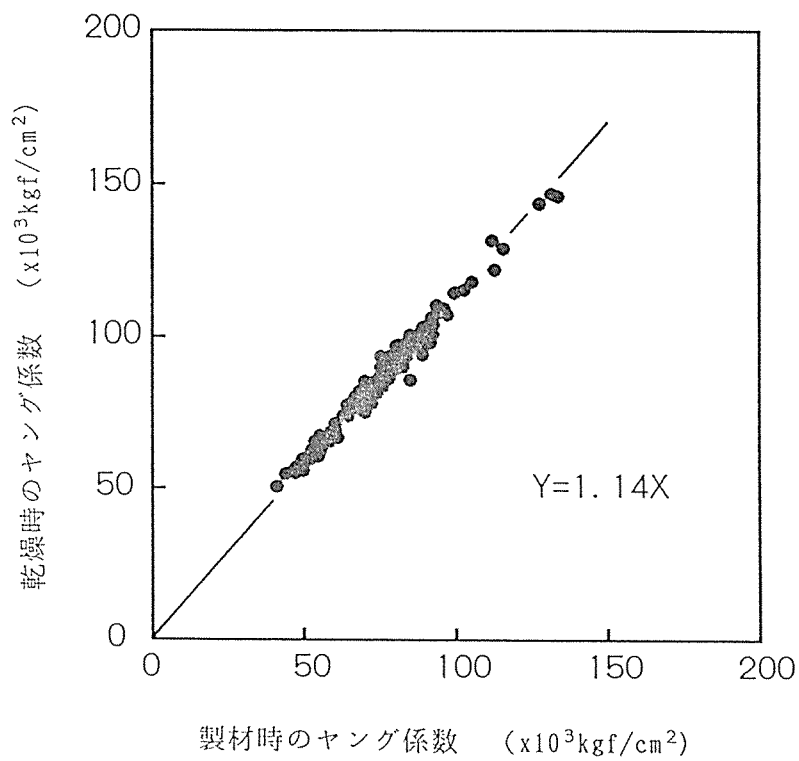


Fig. 10 製材時と乾燥時におけるヤング係数の比較

### 3. 複合集成材の強度特性

#### 3. 1 はじめに

強度面から見たスギ集成材の最大の問題点は、強度特性が他の樹種より低いことである。構造用大断面集成材のJAS [1]においても、スギ集成材は最も強度性能の低い針葉樹B-2類に区分されており、他の樹種に比べ強度利用面で不利な立場にある。

スギ集成材が強度面で不利であるとはいっても、集成材の断面を大きくする事によって、強度特性の不利な点のある程度までカバーすることはできる。例えば、梁せいを大きく取れば、曲げ剛性を向上し得る。今、ヤング係数が80トンのスギラミナを用いて、ヤング係数が120トンのベイマツラミナを用いた集成材と同じだけの曲げ剛性を持つ集成材を製造するためには、単純に計算して15%程度大きな梁せいにすればよい。もちろん、使用する材料の体積が増加するので、コスト面における経済性低下の問題は存在する。

一方、断面の増加だけでは解決できない問題もある。めりこみに対する抵抗力(部分圧縮特性)などは集成材の表面付近の強度特性が問題であり、梁せいあるいは断面量の増加では解決できない。梁受け金物のようなものを使用することを考える場合、部分圧縮特性の低い材では木材との接触部分の大きなもの、すなわちより大きな接合金物を使用して特性の低さを補償せざるを得ない。

いずれにせよ、スギ集成材の需要拡大を目指すならば、強度特性の低さを改良するための何等かの技術開発が必要と考えられる。

上に挙げたスギ集成材の2つの問題点、すなわち低いヤング係数と低いめりこみ抵抗力を解決するための方法として、最外層ラミナに強度特性の高い樹種のラミナやバラツキの少ないLVLを用いることが考えられる。最外層にヤング係数の高いラミナがあれば、内層にスギラミナが使用されていても集成材全体としてのヤング係数は上昇するし、めり込みに対する抵抗力も大幅に改善されることが予想される。また、大断面集成材であれば引張側最外層にLVLを使用することによる曲げ強度の向上も期待できる。

集成材の外層に異樹種を用いるという考え方は、特に新しく提案されたものではなく、古くから異樹種構成集成材として検討されてきたものである。その経緯等は菅野・今泉 [2] あるいは杉山 [3] の著書に詳しい。ただ、異樹種を用いることの積極的理由がそれほどなかったため、近年実用化された例は少なく、研究もヒノキとスギの混交集成材の例 [4] が見られる程度である。

一方、外層にLVLを用いるという考え方は、アメリカで1970年代後半〔4〕に提案されたもので、当時不足ぎみであった高品質の引張用ラミナをLVLで補うということがその主たる目的であった。その後実用化もされ、現在ではアメリカの集成材規格であるAITC規格〔5〕に、大断面集成材の引張最外層用ラミナとしてのLVLの利用が規定されている。

ただ、これらはいくまでも高品質の引張用ラミナの代用品としての利用法であり、さきに述べたような低いヤング係数と低いめりこみ抵抗力を解決するための方法として開発されたものではない。従って、外層にLVLを用いたときの種々の強度特性はほとんど明らかにされていない。また、外層と内層のMOEの差が大きいことによって生じるいくつかの問題点、例えばせん断変形の増加に伴うたわみの増大などについては全く検討されていない。

本研究では、この様な複合集成材の強度特性を説明することを目的として、次のような実験を行なった。

- ①、ラミナの曲げ試験および引張試験
- ②、異なったラミナ間の接着力試験
- ③、複合集成材の部分圧縮試験
- ④、複合集成材（5プライ、断面10\*10cm、長さ3m）の実大実験
- ⑤、複合集成材の強度予測シミュレーション

### 3. 2 材料と実験方法

#### 2. 1、ラミナ

実験に用いたラミナは次の3種類である。

- ①、スギのラミナ（産地：栃木県）  
寸法（幅10.5 \* 厚さ2.2 \* 長さ300cm）
- ②、カラマツのラミナ（産地：長野県）  
寸法（幅10.5 \* 厚さ2.0 \* 長さ300cm）
- ③、ベイマツLVL（マイクロラム）  
寸法（幅10.5 \* 厚さ1.8 \* 長さ300cm）

スギについては、集成材工場より搬入されたものをそのまま用いた。カラマツについては搬入されたものを所定の寸法に木取りしたものを用いた。LVLについては搬入された原板（幅60.0\*厚さ1.9\*長さ300cm）を15cm幅に切断した後、両面から0.5mmずつプレーナで削り取り、所定の寸法とした。

なお、材料の含水率は3種類とも6~8%程度であった。

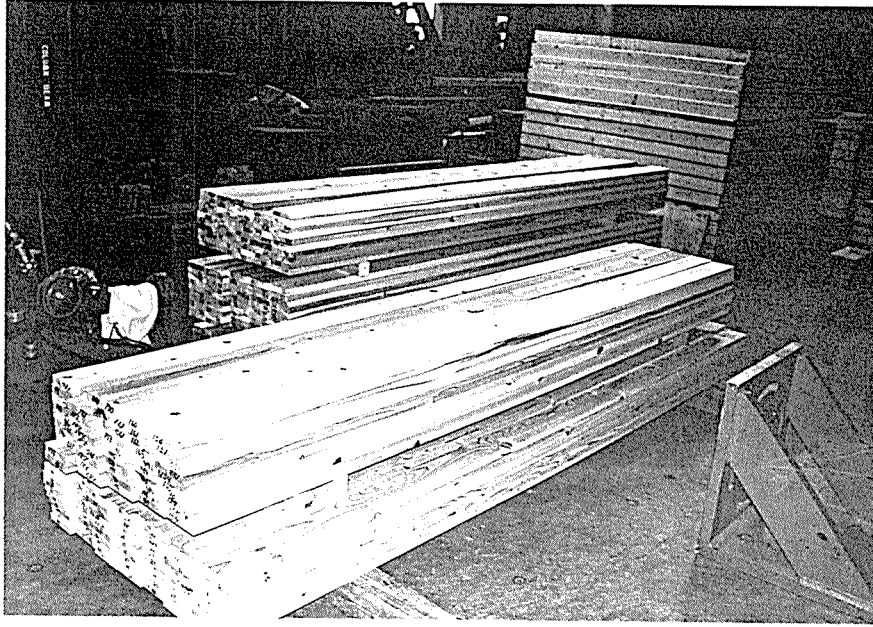


写真1、スギラミナ

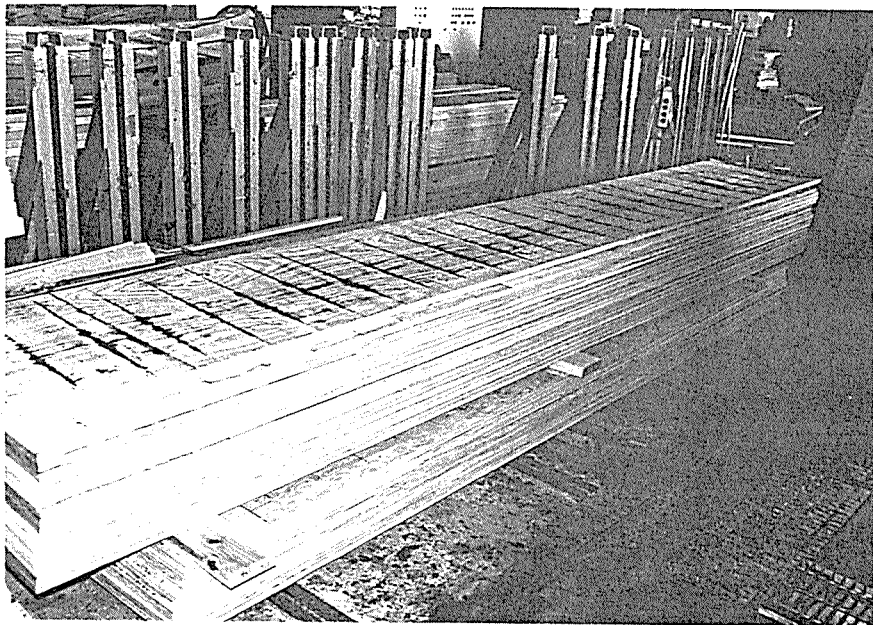


写真2、ベイマツLVL

## 2. 2、ラミナの曲げ試験および引張試験

3種類のラミナから、それぞれ100体の曲げ試験片（長さ100cm）と100体の引張試験片（長さ150cm）をランダムに取り出した。LVLについてはジョイント位置による曲げ強度への影響が予想されたが、ここでは全く考慮しなかった。

曲げ試験片については、スパン90cmの3等分4点曲げ試験を行ない、MOEとMORを求めた。なお、MOEは支点間で求めた。

引張試験片については、引張プルーフロダ（最大容量20トン）を用いて引張試験を行ない、引張強度を求めた。なお、チャック間の距離は約55cmであった。

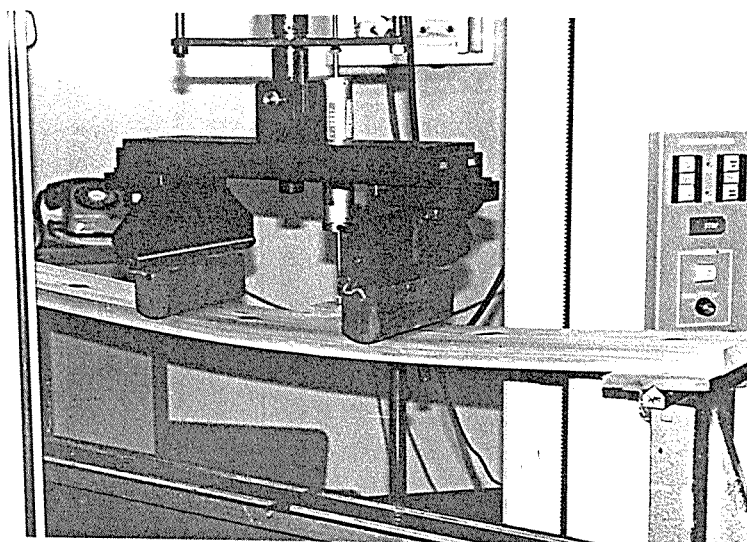


写真3、ラミナの曲げ試験

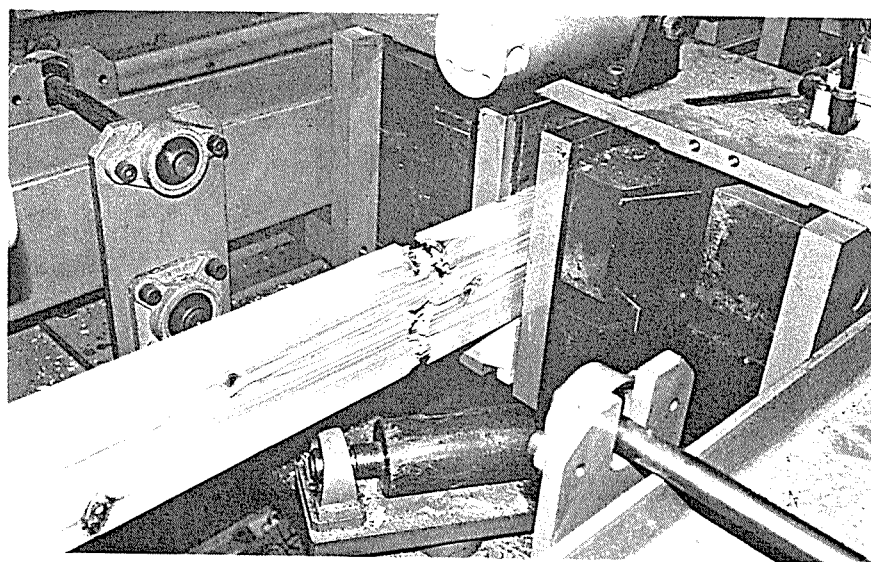


写真4、ラミナの引張試験

### 2. 3、接着のブロックせん断試験

各ラミナ間の接着力を検討するために、ラミナを2枚ずつレゾルシノール樹脂接着剤で接着し、ブロックせん断試験片を作成した。この試験片についてJASに準じたブロックせん断試験を行なった。

組合せは次の6種類である。記号(スギ：S、カラマツ：K、LVL：L)  
①S+S、②K+S、③L+S、④K+L、⑤K+K、⑥L+L

ただし、煮沸繰返しの場合は前にWが付く。例えば、スギ+スギの場合はWSSとなる。

個数は各組合せについて200個(常態：100、煮沸繰返し：100)である。なお、煮沸繰返し条件はJISに準じ、沸騰水中に5時間浸せき、室温水中に1時間、その後60℃で24時間乾燥とした。

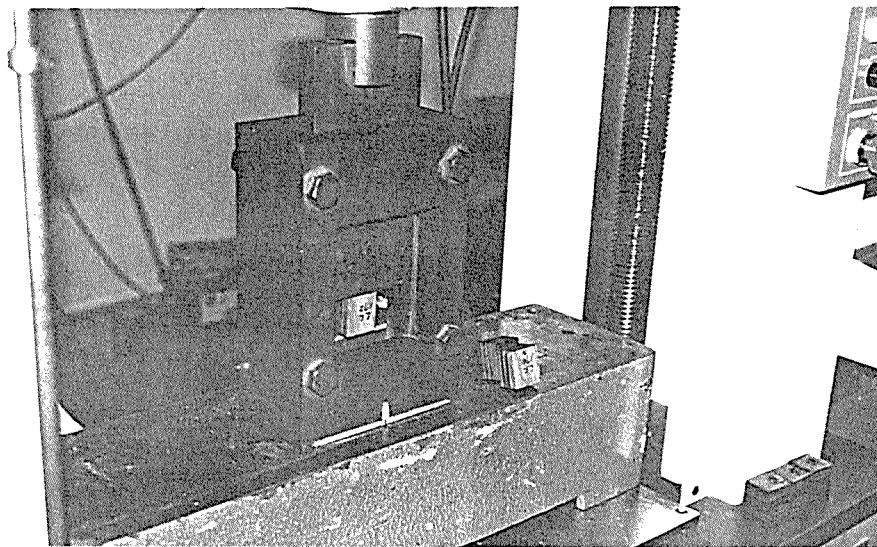


写真5、ブロックせん断試験

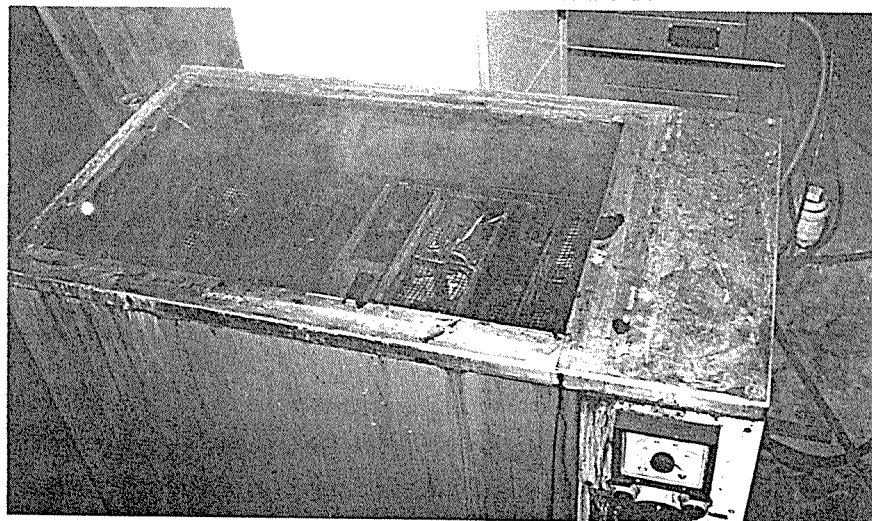


写真6、煮沸試験



## 2. 4、部分圧縮試験

部分圧縮試験用の試験片は、次に示す実大試験が終了した後の試験片の健全部分より採取した。寸法は幅が4.5cm、長さが40cmである。SS、KS、LSそれぞれについて、10個用意した。

試験片を万能試験機上にセットした鉄製の土台上に置き、中央に幅6cmの鉄製ブロックを載せ、めりこみ量が10mmになるまで変形させた。測定した荷重-変形量曲線から、変形量が5mm時の荷重、比例限度荷重およびその時の変形量を求めた。

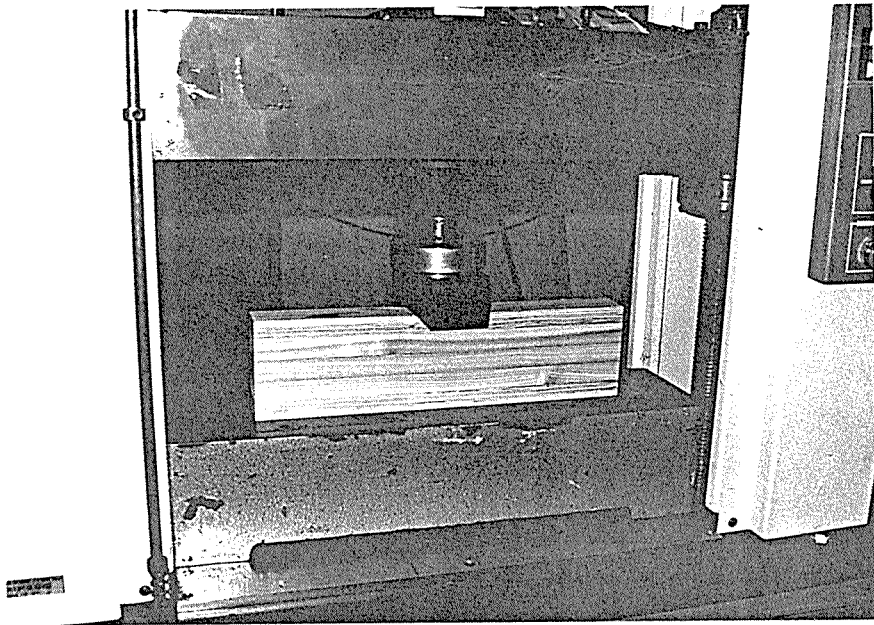


写真7、部分圧縮試験

## 2. 5、実大試験体

まず、すべてのラミナについて小荷重を中央に作用させ、たわみ量からヤング係数を求めた。このヤング係数に基づいてスギラミナを次のようにグレーディングした。

表 1 . スギラミナの等級

| 等級  | ヤング係数<br>( $t \cdot f / cm^2$ ) | 集中節径比    |
|-----|---------------------------------|----------|
| 1 等 | 95 以上                           | 1 / 8 以下 |
| 2 等 | 85 以上                           | 1 / 4 以下 |
| 3 等 | 75 以上                           | 1 / 3 以下 |
| 4 等 | 65 以上                           | 1 / 2 以下 |

ただし、例えば 1 等の規定内のヤング係数を示しても集中節径比が 1 / 8 以上であるような場合のラミナはこれを除外し、より低いグレードのラミナとして用いなかった。

なお、カラマツ、LVL についてもヤング係数を測定したが、その結果を用いたグレーディングは行なわなかった。

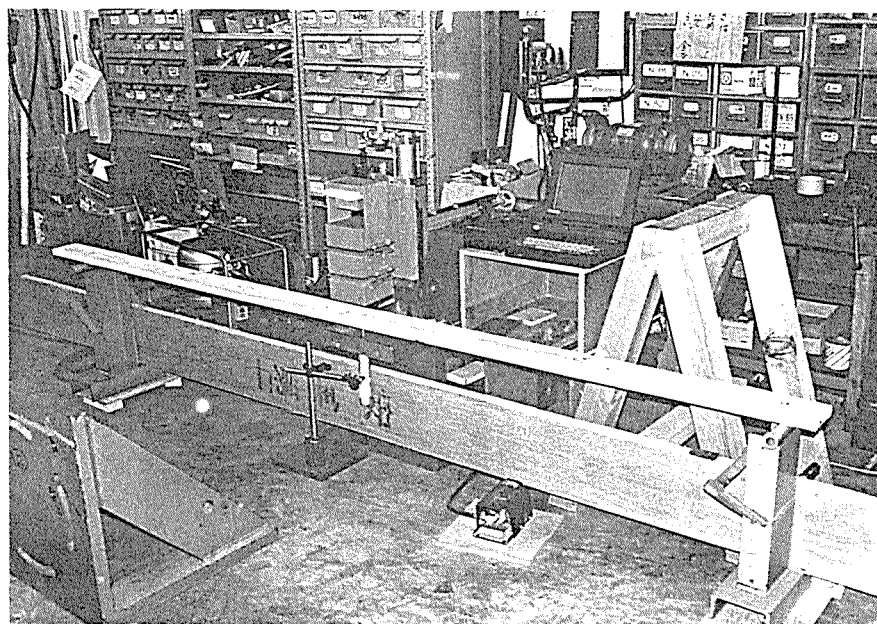


写真 8、小荷重によるたわみ測定法

このように区分されたラミナを用いて、次に示すような5種類の5プライ集成材を製造した。試験体の寸法は（約11.0 \* 11.0 \* 300 cm）であり、本数は各条件に付き5本である。

表2. 集成材の断面構成

| 記号   | 外層（2層） | 内層（3層） |
|------|--------|--------|
| SS12 | スギ 1等  | スギ 2等  |
| SS13 | スギ 1等  | スギ 3等  |
| KS4  | カラマツ   | スギ 4等  |
| LS2  | L V L  | スギ 2等  |
| LS4  | L V L  | スギ 4等  |

集成材は次に示す工程で製造した。

- ①、スプレッターを用いてラミナにレゾルシノール樹脂を塗布。
- ②、ラミナを5枚積層した後、通直油圧プレスで圧縮。
- ③、1昼夜圧縮の後、解圧。
- ④、1週間以上の養生期間を経て、実大試験。



写真9. 集成材の製造

このようにして製造された集成材を用いてスパン270cmの3等分4点曲げ試験を行ない、MOEとMORを求めた。なお、MOEは支点間およびモーメント一定区間の2種類を求めた。

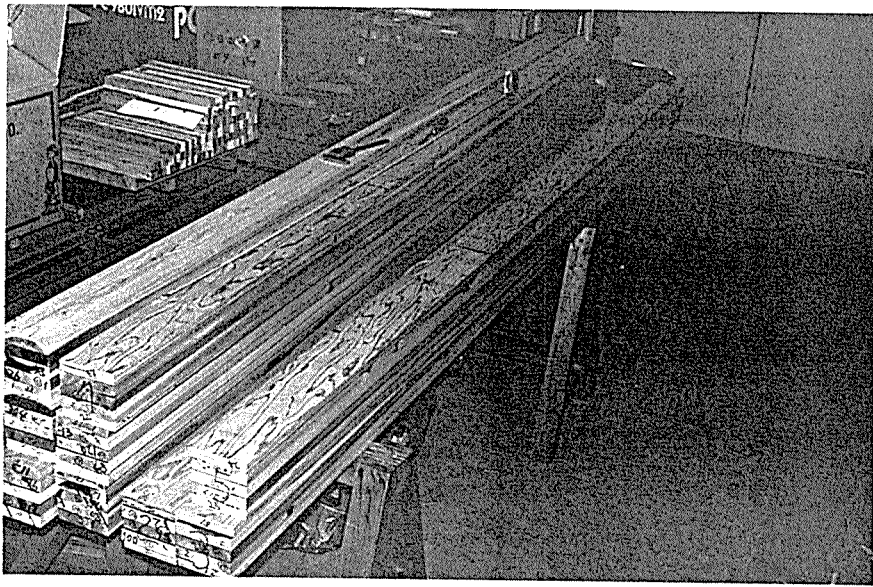


写真 1 0、試験体

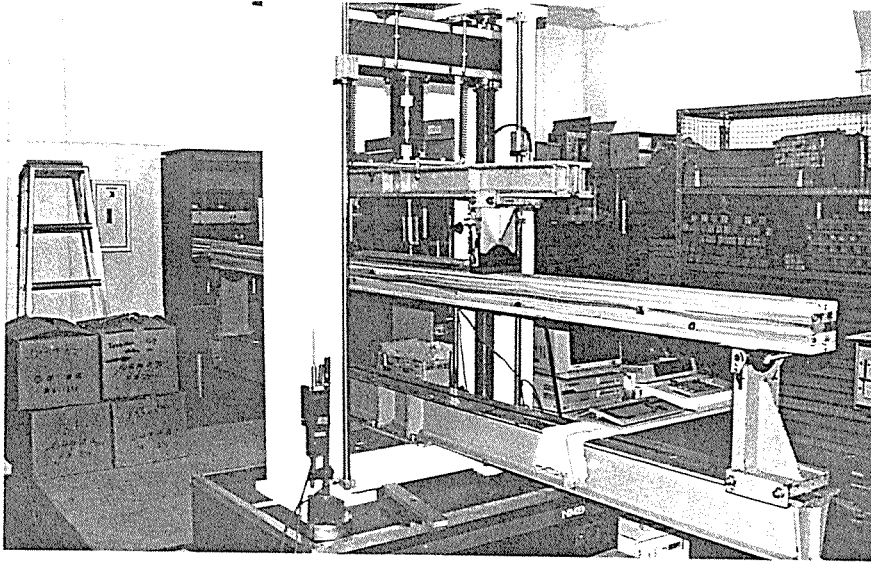


写真 1 1、実大曲げ試験

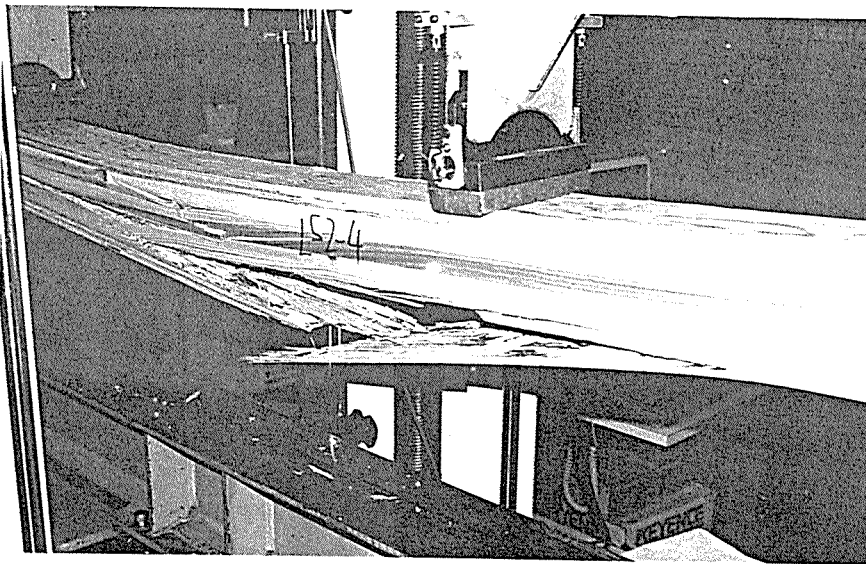


写真 1 2、実大曲げ試験

3. 3 集成材内の応力分布 [7]

集成材内部に生じる曲げ応力とせん断応力は次のようにして求められる。  
今、幅  $w$ 、 $n$  プライの集成材を考える。

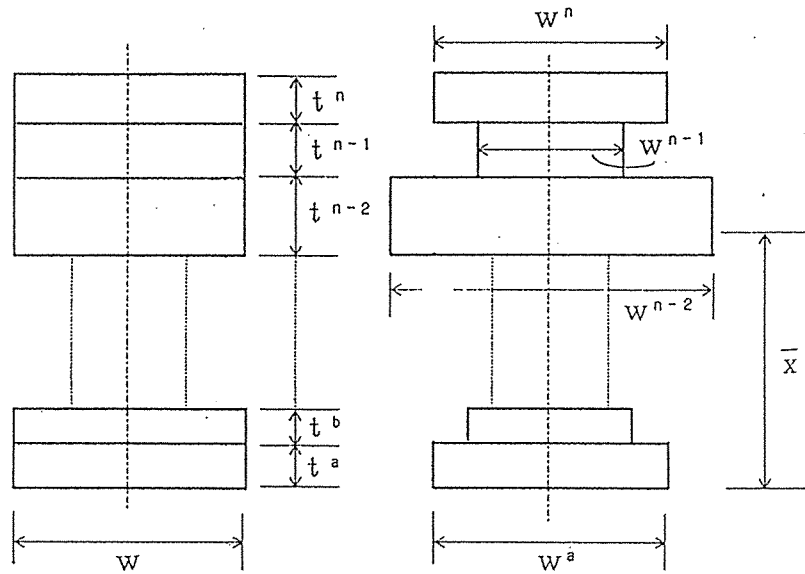


図 1 . 等価断面法

各層の厚さを  $t^1, t^2, \dots, t^n$ 、および各層のヤング係数を  $E^1, E^2, \dots, E^n$  とすると、第 1 層(最下層)を基準にした等価断面幅  $w^i$  は、

$$w^i = w (E^i / E^n) \quad \dots (1)$$

各層の断面 2 次モーメント  $I^i$  は、

$$I^i = w^i (t^i)^3 / 12 \quad \dots (2)$$

等価断面  $A^i$  は、

$$A^i = w^i t^i \quad \dots (3)$$

また、第 1 層下面(基準面)から各層の中心までの距離  $d^i$  は、

$$d^i = \sum_1^{i-1} t^{i-1} + (t^i / 2) \quad \dots (4)$$

で表わされる。集成材の中立軸の位置  $\bar{x}$  は

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A^i d^i}{\sum_{i=1}^n A^i} \quad \dots (5)$$

となる。(1)、(3)を(4)に代入すると、

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n E^i t^i \left( \sum_{l=1}^{i-1} t^{l-1} + (t^i / 2) \right)}{\sum_{i=1}^n E^i t^i} \quad \dots (6)$$

等価断面の断面 2 次モーメントは、

$$I_2' = \sum_{i=1}^n [I_0^i + A^i (\bar{d}^i)^2] \quad \dots (7)$$

また断面 1 次モーメントは、

$$Q' = \sum_{i=1}^n A^i \bar{d}^i \quad \dots (8)$$

となる。曲げモーメント M が作用したときの応力  $\sigma$  は

$$\sigma = \frac{M \bar{d}^i}{I_2'} \frac{w^i}{w} \quad \dots (9)$$

で示される。また、せん断力 V が作用したときのせん断応力  $\tau$  は

$$\tau = \frac{V Q'}{I_2' w} \quad \dots (10)$$

となる。

### 3. 4 強度特性予測シミュレーション

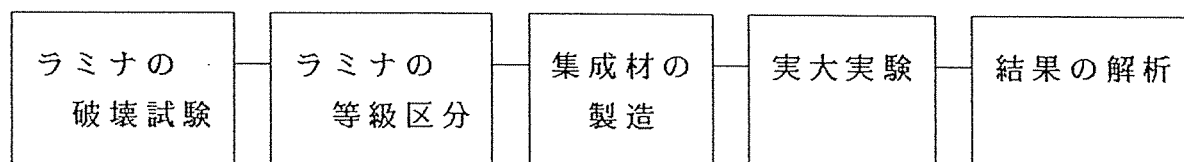
5 プライ程度の比較的梁せいの低い集成材の強度分布予測については、ラミナのMOE-MOR関係から集成材の終局耐力を予想するモンテカルロシミュレーションモデル [8] の有効性が明らかにされている。ただし、これらの試みは、外層と内層のラミナの性能差が小さい組合せの場合であり、今回のように両者の性能に大きな隔たりがある場合に成立するか否かは定かではない。特に外層に生じる応力は引張が支配的になるので、ラミナのMOE-MOR関係から集成材の終局耐力を予想し得なくなる可能性も考えられる。

そこで、曲げによる破壊条件だけではなく、引張あるいは曲げと引張の組合せなどの破壊条件を設定した確率モデルを作成し、本実験で得られたラミナのデータを用いて、モンテカルロシミュレーションを行った。その後、シミュレーションの結果と実大実験結果と比較することにより、モデルの破壊条件について検討を加えた。

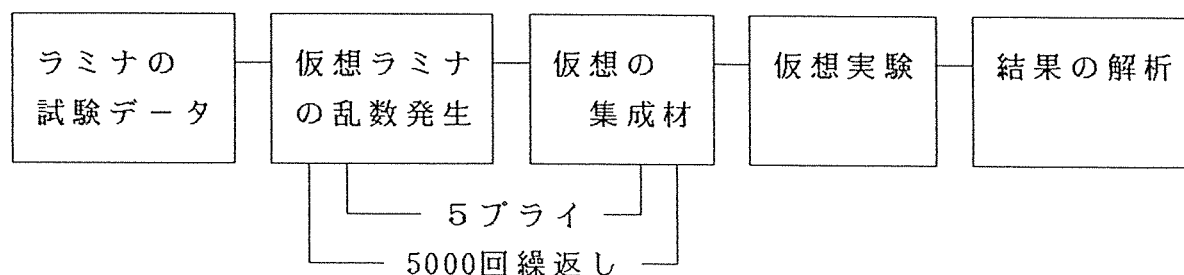
#### 4・1、実大実験およびシミュレーションのフローチャート

実験の流れを示すフローチャートを次に示す。

##### ①、実大実験



##### ②、シミュレーション



実大実験の内容に関しては第2章ですでに説明した通りである。以下にシミュレーションの基本的なプログラムの流れを簡単に説明する。

#### 4・2、仮想ラミナの作成

まず実大ラミナのMOEの確率分布に従った乱数を発生させこれを仮想ラミナのMOEとする。次にTaylor-Bender法 (Appendix参照) を用いて仮想ラミナのMOR、またはTS (引張強度)、あるいはその両者を発生させる。

#### 4・3、仮想集成材の作成

上の過程を5回繰返して仮想の5プライ集成材を作成する。

この仮想の集成材について次のような計算を行う。

##### ①、集成材のMOEの算出

次式により集成材のMOE( $E_a$ )を計算する。

$$E_a = \frac{\sum E_i I_i}{I}$$

$E_i$  :  $i$  番目のラミナのMOE

$I_i$  :  $i$  番目のラミナの中立軸に関する断面2次モーメント

$I$  : 中立軸に関する断面2次モーメント

##### ②、集成材の破壊強度の推定

検討した破壊条件は次の4種類である。

1)ラミナ外縁部の応力がラミナのMOR(曲げ強度)に達したとき。

2)ラミナ外縁部の応力がラミナのTS(引張強度)に達したとき。

3)ラミナ内部の応力が次式を満足したとき。[9]

$$(\sigma_t / f_t) + (\sigma_b / f_b) = 1$$

ここで、 $f_t$ 、 $f_b$ はラミナのTSおよびMOR。 $\sigma_t$ 、 $\sigma_b$ はラミナに生じる応力。

4)ラミナ内部の応力が次式を満足したとき。[10]

$$(\sigma_t / f_t)^2 + (\sigma_b / f_b)^2 = 1$$

集成材の破壊は引張側2層のラミナのどちらかが、上の破壊条件を満足したときに生じると仮定した。集成材の曲げ破壊強度は破壊時のモーメントを断面係数で除して求めた。

なお、3)および4)のシミュレーションで最も問題となるのが、 $f_t$ と $f_b$ の相関である。一般的に $f_t$ と $f_b$ の相関は求めることができないので、ここでは $\gamma = 0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$ の3種類を仮定し、それぞれについてシミュレーションを行なった。

##### ③、仮想集成材の強度分布予測

上の過程を5000回繰返し、データを統計処理して、作成された5000体の仮想集成材の強度分布を求める。



### 3. 5 結果と考察

#### 5・1、ラミナの強度特性

表3にラミナのMOE、MOR（曲げ強度）、TS（引張強度）の分布パラメータを示す。なお確率密度関数の式は以下に示すとおりである。

（正規分布）

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

ここで、 $\mu$ ：平均、 $\sigma$ ：標準偏差

（3パラメータワイブル分布）

$$f(x) = \frac{m}{\theta} \left\{ \frac{(x-\gamma)^{m-1}}{\theta} \right\} \exp\left\{-\frac{(x-\gamma)^m}{\theta}\right\}$$

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

表3、ラミナの強度特性

| MOE<br>樹種 | 個数  | 正規分布   |       | 3Pワイブル分布 |       |        |
|-----------|-----|--------|-------|----------|-------|--------|
|           |     | 平均     | 変動係数  | 尺度       | 形状    | 位置     |
| スギ        | 100 | 87.16  | 13.62 | 42.89    | 3.523 | 48.45  |
| カラマツ      | 100 | 111.75 | 16.36 | 100.86   | 6.009 | 18.21  |
| LVL       | 100 | 151.99 | 7.84  | 48.25    | 4.116 | 108.14 |

表3の結果を見ると、いずれの項目においてもLVLの変動係数の小さいことが分かる。特に引張強度では変動係数が15%弱であり、他の2樹種とは格段の差が生じている。一方、カラマツはいずれの項目においてもバラツキが最も大きい。購入したラミナの材質が平均的なカラマツのそれより以下であったため、このような結果になったものと思われるが、引張強度ではスギより平均値が低い。また3Pワイブル分布の位置パラメータも最低であり、非常に材質の低いものが含まれていることが分かる。これらのことから、外層ラミナにこのカラマツを用いても、めり込みに対する性能の向上しか期待できないと予想された。

図2～図10に、それぞれのヒストグラムと当てはめた3パラメータワイブル分布曲線を示す。

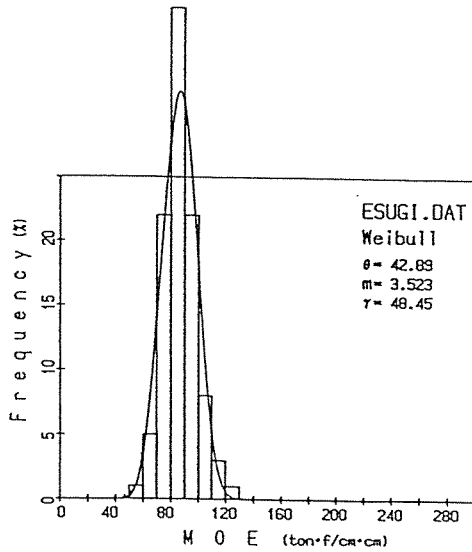


図2. スギのMOE

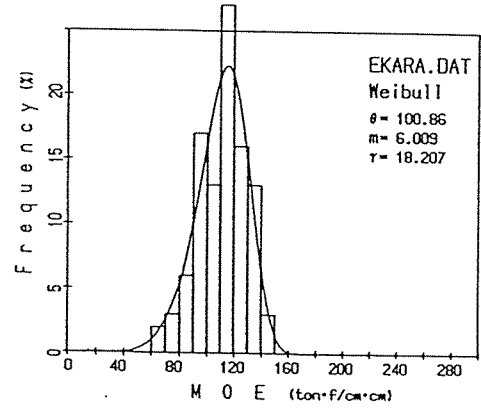


図5. カラマツのMOE

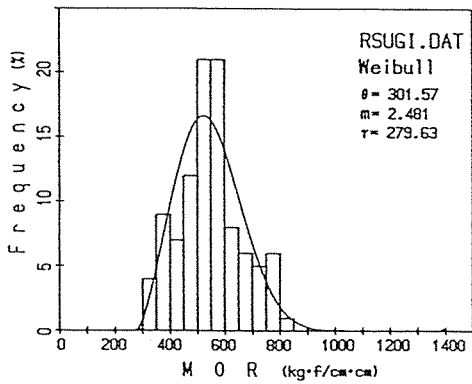


図3. スギのMOR

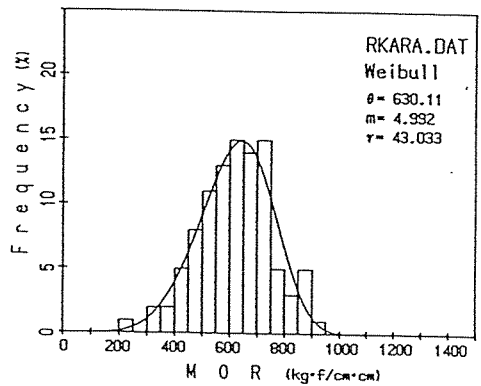


図6. カラマツのMOR

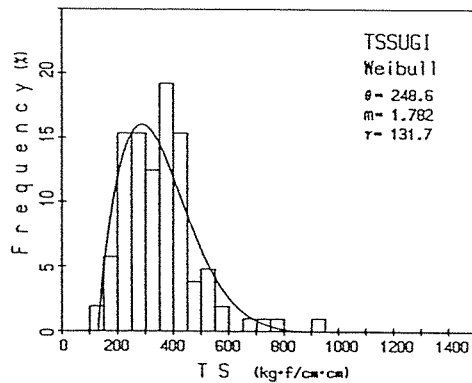


図4. スギのTS

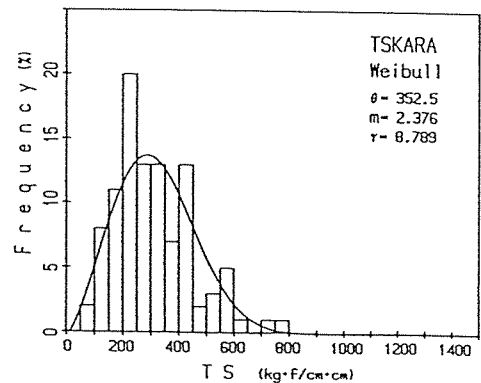
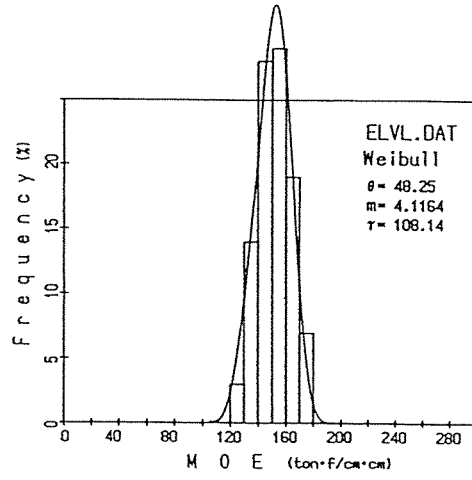
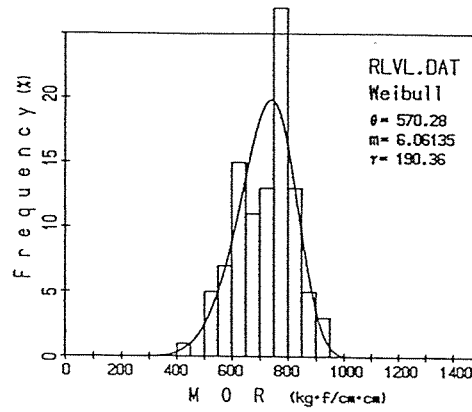


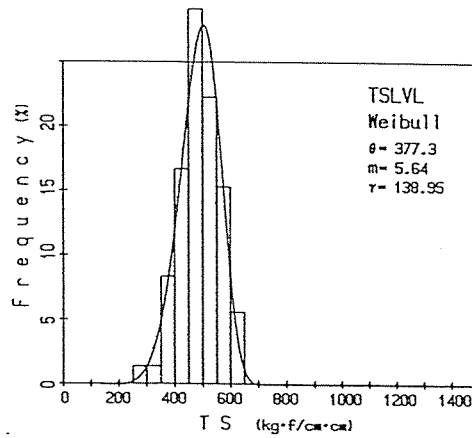
図7. カラマツのTS



☒ 8. LVLのMOE



☒ 9. LVLのMOR



☒ 10. LVLのTS

図11～図14に、MOE-MOR、およびMOE-TSの相関図を示す。なお、図中の点線は99%信頼区間の上下限值である。

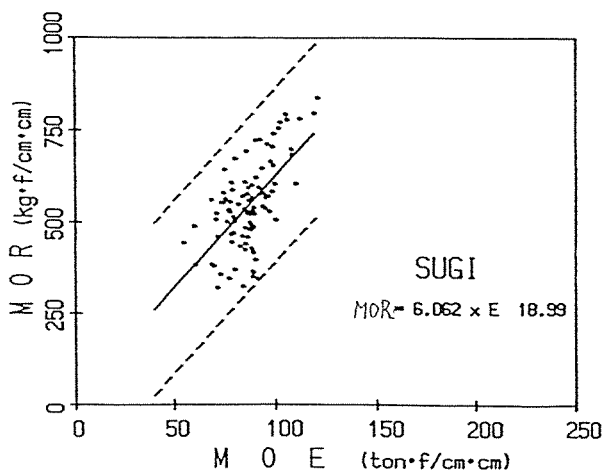


図11. スギの  
MOE-MOR

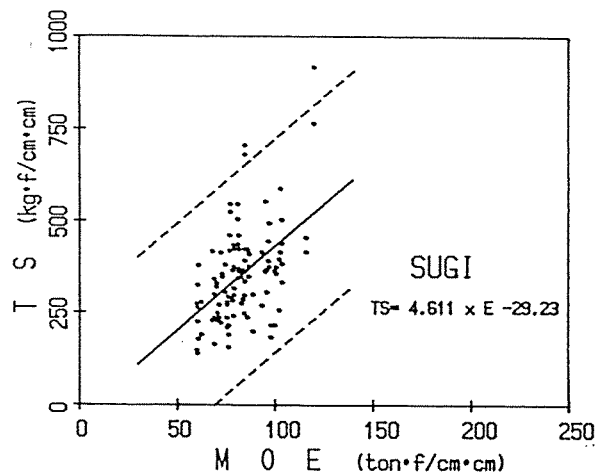


図12. スギの  
MOE-TS

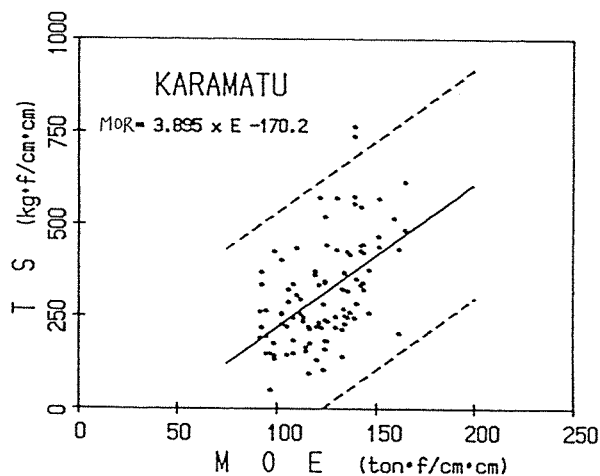


図13. カラマツの  
MOE-MOR

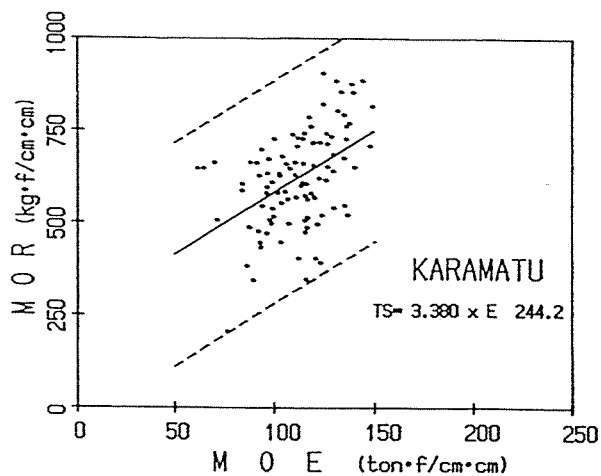


図14. カラマツの  
MOE-TS

## 5・2、集成材内部の応力分布

--集成材に作用するモーメントが1000000kgf・cm、各層のMOEを次のように仮定したときの、応力分布図を図15から19に示す。

LVL: 150、S1: 100、S2: 90、S3: 80、S4: 70、  
KARAMATU: 110 (単位: ton・f/cm<sup>2</sup>)

SSに比べ、LSやKSでは最外層に生じる応力が高くなっていることが分かる。例えば、SS12では外層外縁部の応力が500程度なのに対しLS2では650程度となっている。

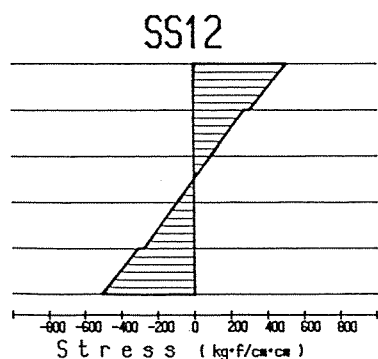


図15. SS12

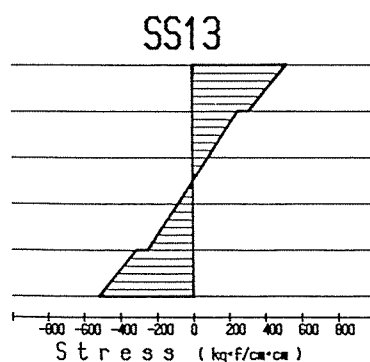


図16. SS13

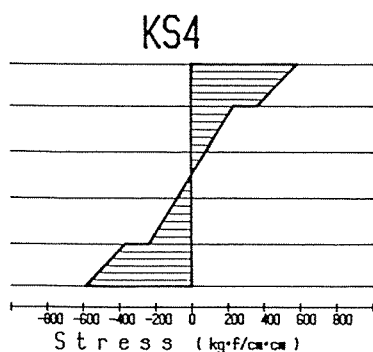


図17. KS4

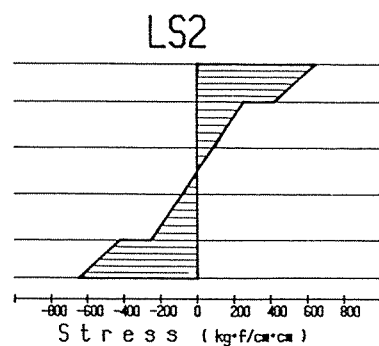


図18. LS2

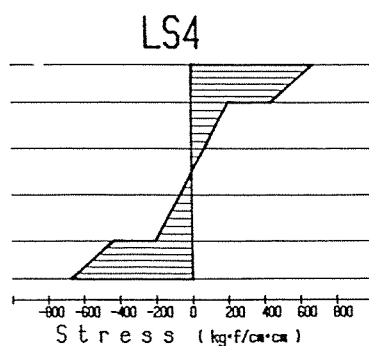


図19. LS4

### 5・3、ブロックせん断強度

表4にブロックせん断試験の結果を示す。Sはスギ、Kはカラマツ、LはLVLの略である。SSならスギとスギ、KSならば、カラマツとスギを接着した試験体である。

表4、せん断試験データ  
(常態試験)

| 樹種 | 個数  | 正規分布   |       | 3Pワイブル分布 |       |        |
|----|-----|--------|-------|----------|-------|--------|
|    |     | 平均     | 変動係数  | 尺度       | 形状    | 位置     |
| SS | 100 | 98.56  | 9.494 | 38.29    | 4.089 | 63.77  |
| KK | 100 | 123.43 | 13.58 | 128.98   | 11.14 | 0.0072 |
| LL | 100 | 90.10  | 11.70 | 47.21    | 4.204 | 47.23  |
| LS | 100 | 90.14  | 9.879 | 62.76    | 6.882 | 31.38  |
| KS | 100 | 101.36 | 11.44 | 53.09    | 4.858 | 52.67  |
| KL | 85  | 98.30  | 12.13 | 47.17    | 4.024 | 55.56  |

(煮沸試験)

| 樹種  | 個数  | 正規分布  |       | 3Pワイブル分布 |       |        |
|-----|-----|-------|-------|----------|-------|--------|
|     |     | 平均    | 変動係数  | 尺度       | 形状    | 位置     |
| WSS | 100 | 53.77 | 7.633 | 24.01    | 6.435 | 31.42  |
| WKK | 100 | 64.78 | 9.352 | 22.32    | 3.699 | 44.61  |
| WLL | 100 | 42.04 | 18.31 | 41.02    | 5.368 | 4.002  |
| WLS | 97  | 44.70 | 11.09 | 38.46    | 8.890 | 8.316  |
| WKS | 100 | 54.45 | 8.650 | 12.07    | 2.446 | 43.75  |
| WKL | 75  | 54.57 | 15.59 | 57.96    | 8.189 | 0.0037 |

ラミナの試験結果とは逆に、ブロックせん断試験ではカラマツが最も強度が高く、LVLが最も低い結果となっている。

また、異なった材料同士の場合、強度の低いほうの材料に近い値を示すことが分かる。

#### 5・4、部分圧縮試験

表5に部分圧縮試験の結果を示す。加圧ヘッドが5mmめり込んだ時の荷重と比例限の荷重を示したものであるが、いずれもLVLやカラマツを複合せると50%程度性能が向上することがわかる。

部分圧縮では、加圧ヘッドや試験体の寸法によってめり込みに対する性能が変化するので、ここでの結果がそのまま普遍性を持つことにはならないが、いずれにせよ複合による効果は非常に大きいと考えられる。

表5、複合集成材の耐めり込み性能

| 樹種      | 5mm変形時の荷重<br>(kg・f) | 比例限荷重<br>(kg・f) |
|---------|---------------------|-----------------|
| スギ+スギ   | 1643 (12.2%)        | 826 (16.4%)     |
| LVL+スギ  | 2360 (10.8%)        | 1278 (13.5%)    |
| カラマツ+スギ | 2324 (13.5%)        | 1321 (19.2%)    |

### 5・5、実大曲げ試験結果

表6に実大曲げ試験の結果を示す。まず、MORの平均値についてみると、SS12とSS13では低品質であるはずのSS13のほうがむしろ高い値を示している。KS4ではSSと同じ程度の値となっている。LS2では、5種類の中では最も高い値を示しているが、SSやKSに比べて格段に高い値とはいえず、逆にLS4では最も低い値となっている。このようなことから、5プライ程度の小断面集成材では、複合化によるMORの向上はそれほど期待できないことが明らかになった。

表6．実大曲げ試験結果

| 種類   | 番号     | MOR                     | MOE<br>EI              | MOE<br>EL              | MOE<br>ECAL            |
|------|--------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|      |        | (kg・f/cm <sup>2</sup> ) | (t・f/cm <sup>2</sup> ) | (t・f/cm <sup>2</sup> ) | (t・f/cm <sup>2</sup> ) |
| SS12 | 1      | 450.2                   | 104.1                  | 95.54                  | 100.7                  |
|      | 2      | 514.3                   | 101.9                  | 95.98                  | 98.97                  |
|      | 3      | 506.4                   | 98.51                  | 92.18                  | 101.1                  |
|      | 4      | 585.4                   | 99.43                  | 94.18                  | 95.47                  |
|      | 5      | 458.8                   | 103.5                  | 93.95                  | 96.58                  |
|      | 平均     | 503.                    | 101.5                  | 94.37                  | 98.56                  |
|      | 偏差     | 48.3                    | 2.2                    | 1.34                   | 2.22                   |
| 変動係数 | 9.60%  | 2.17%                   | 1.42%                  | 2.25%                  |                        |
| SS13 | 1      | 519                     | 107.6                  | 91.27                  | 94.25                  |
|      | 2      | 553.6                   | 105.7                  | 95.97                  | 97.81                  |
|      | 3      | 441.2                   | 98.9                   | 90.5                   | 94.83                  |
|      | 4      | 578.3                   | 101                    | 95.9                   | 97.45                  |
|      | 5      | 600.1                   | 101                    | 93.4                   | 98.33                  |
|      | 平均     | 538.4                   | 102.8                  | 93.41                  | 96.53                  |
|      | 偏差     | 55.6                    | 3.3                    | 2.27                   | 1.66                   |
| 変動係数 | 10.33% | 3.17%                   | 2.43%                  | 1.72%                  |                        |
| KS4  | 1      | 484.1                   | 95.1                   | 92.4                   | 101.9                  |
|      | 2      | 474.1                   | 121.3                  | 113.3                  | 126.3                  |
|      | 3      | 560.8                   | 100.1                  | 96.8                   | 107.4                  |
|      | 4      | 541.6                   | 113.7                  | 106.9                  | 119.8                  |
|      | 5      | 583.7                   | 104                    | 97.6                   | 110.6                  |
|      | 平均     | 528.9                   | 106.8                  | 101.4                  | 113.2                  |
|      | 偏差     | 42.9                    | 9.5                    | 7.6                    | 8.76                   |
| 変動係数 | 8.11%  | 8.85%                   | 7.49%                  | 7.73%                  |                        |
| LS2  | 1      | 598.9                   | 135.4                  | 122.4                  | 144.8                  |
|      | 2      | 565.4                   | 127.6                  | 116.3                  | 134.3                  |
|      | 3      | 510.8                   | 130.4                  | 120.2                  | 139.7                  |
|      | 4      | 550.8                   | 139.2                  | 127.1                  | 146.1                  |
|      | 5      | 588                     | 134.1                  | 125.7                  | 147.8                  |
|      | 平均     | 562.8                   | 133.3                  | 122.3                  | 142.5                  |
|      | 偏差     | 31.                     | 4.                     | 3.87                   | 4.93                   |
| 変動係数 | 5.50%  | 3.01%                   | 3.17%                  | 3.46%                  |                        |
| LS4  | 1      | 475                     | 124.6                  | 115.9                  | 140.                   |
|      | 2      | 459.3                   | 122.7                  | 113.3                  | 139.4                  |
|      | 3      | 375.1                   | 115.9                  | 109.1                  | 136.5                  |
|      | 4      | 512.4                   | 125.3                  | 115.2                  | 137.8                  |
|      | 5      | 502.2                   | 134.6                  | 118.5                  | 138.2                  |
|      | 平均     | 464.8                   | 124.6                  | 114.4                  | 138.4                  |
|      | 偏差     | 48.7                    | 6.                     | 3.13                   | 1.23                   |
| 変動係数 | 10.47% | 4.81%                   | 2.74%                  | 0.89%                  |                        |

EI： モーメント一定区間  
 EL： 全スパン  
 ECAL： ラミナのEより計算



図20に複合集成材のMOE (EL) とMORの関係を示す。LS2とLS3では、MOEがSSに比べ20~30t・f/cm<sup>2</sup>程度向上していることが分かる。

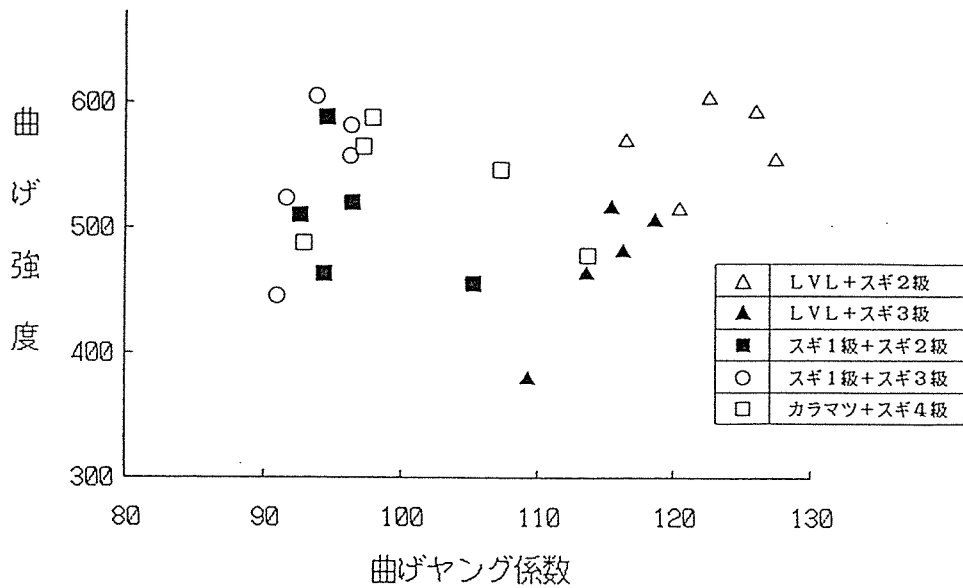


図20. 複合集成材のMOE (EL) とMORの関係

図21にELとECALの関係を示す。SSでは計算値と測定値がほぼ一致するのに対し、KSやLSでは測定値が計算値を10%程度下回る。これは前章で説明したように、複合集成材ではせん断付加たわみが生じるためである。

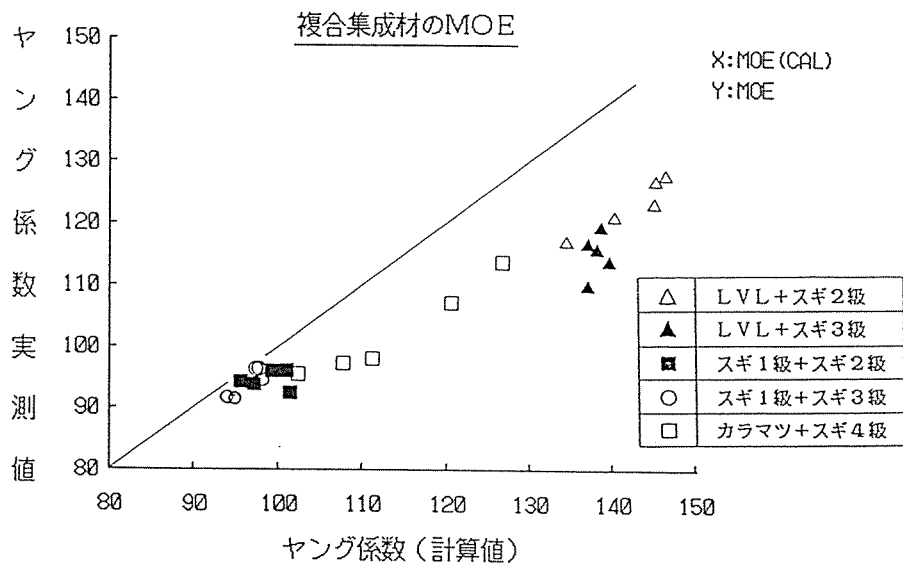


図21. 計算により求められたMOE (ECAL) と実測値ELの関係

## 5・6、シミュレーション結果

図22～25にシミュレーションにより予測されたMORのヒストグラムと実大試験により得られたMORを示す。それぞれのシミュレーションにおける破壊条件は次の4種類である。

(図22) ラミナ外縁部の応力がラミナのMOR(曲げ強度)に達したとき。

(図23) ラミナ外縁部の応力がラミナのTS(引張強度)に達したとき。

(図24) ラミナ内部の応力が次式を満足したとき。[9]

$$(\sigma_t / f_t) + (\sigma_b / f_b) = 1$$

ここで、 $f_t$ 、 $f_b$ はラミナのTSおよびMOR。 $\sigma_t$ 、 $\sigma_b$ はラミナに生じる応力。

(図25) ラミナ内部の応力が次式を満足したとき。[10]

$$(\sigma_t / f_t)^2 + (\sigma_b / f_b)^2 = 1$$

ただし、図24と25における $f_t$ と $f_b$ の相関は0.8である。

シミュレーションモデルに入力するラミナのデータは、スギのMORのように当てはめた分布曲線に少々問題があるものも見られるが、図2～11に示した値をそのまま用いた。また、MOE-MOR、およびMOE-TSの相関も図12～15から得られたデータを直接用いた。カラマツラミナの下限值は $115 \text{ t}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ 、LVLのそれは $110 \text{ t}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ とした。また、スギラミナの等級は表1に示した通りである。

まず、図22についてみると、SSでは少々高目のシミュレーション結果となっている。これは当てはめた分布関数と現実のデータとの間に多少の食い違いがあるためと思われる。本研究で採用した乱数発生法では、当てはめた分布関数に全く忠実な乱数が得られるために、このような問題が生じることが分かった。今後ラミナのデータ収集方法の工夫と乱数発生法の改良が必要になるものと思われる。

KSやLSではいずれも実測値よりも高い予測結果となっている。これは単に乱数発生法だけの問題ではなく、さきに解析したような応力分布から分かるように、ラミナ外縁部の応力がラミナのMOR(曲げ強度)に達したときに集成材の破壊が生じるという仮定そのものに無理があるためであろう。筆者らは先に、この破壊条件で5プライ集成材の強度予測シミュレーション[8]を行い、かなり精度良く予測が可能であることを明らかにしたが、本試験のように内層と外層のMOEの差が大きい場合には適用が困難であることが明らかになった。

図23を見ると、シミュレーション結果が明らかに低い方に偏っていることがわかる。カラマツの場合に左に裾を引く形態となるのはM O E - T Sの関係(図14)から考えて十分予想されることである。

一般に集成材の積層数が増加して行くとき、その強度はラミナの引張強度に収束すると考えられるが、本研究のように5プライ程度の集成材では、ラミナ外縁部の応力がラミナのT S(引張強度)に達したときに集成材の破壊が生じると仮定すると、非常に強度を低く評価してしまうことになる。

図24も、図23とほぼ同じ分布形態をしめしている。図24は $f_t$ と $f_b$ の相関 $\gamma$ が0.8の場合を示しているが、 $\gamma = 0.4, 0.6$ の場合もほぼ同一の結果となったのでここでは省略した。

この場合の破壊条件式は小松ら[9]が提案したものであるが、図24からも明らかなように小断面や積層数の少ない集成材に適用することは不可能である。

図25では、カラマツを除いて、非常に予想が良く当てはまっているように思われる。カラマツの適合性が悪い理由は先に述べたことによるものであろう。また図24と同様に $\gamma = 0.4, 0.6$ の場合には省略した。

この場合の破壊条件式は丸山ら[10]が提案したものであるが、本研究で用いたようなプライ数の場合、最も適合性が良いように思われる。ただ、本研究で行なった様なシミュレーション方法では、予測の幅が広くなりすぎる傾向にあるので、何等かの改良が必要であると思われる。特に集中節径比の様な視覚区分を併用した形の確率モデルを作成して予測の精度を向上させることが必要となろう。

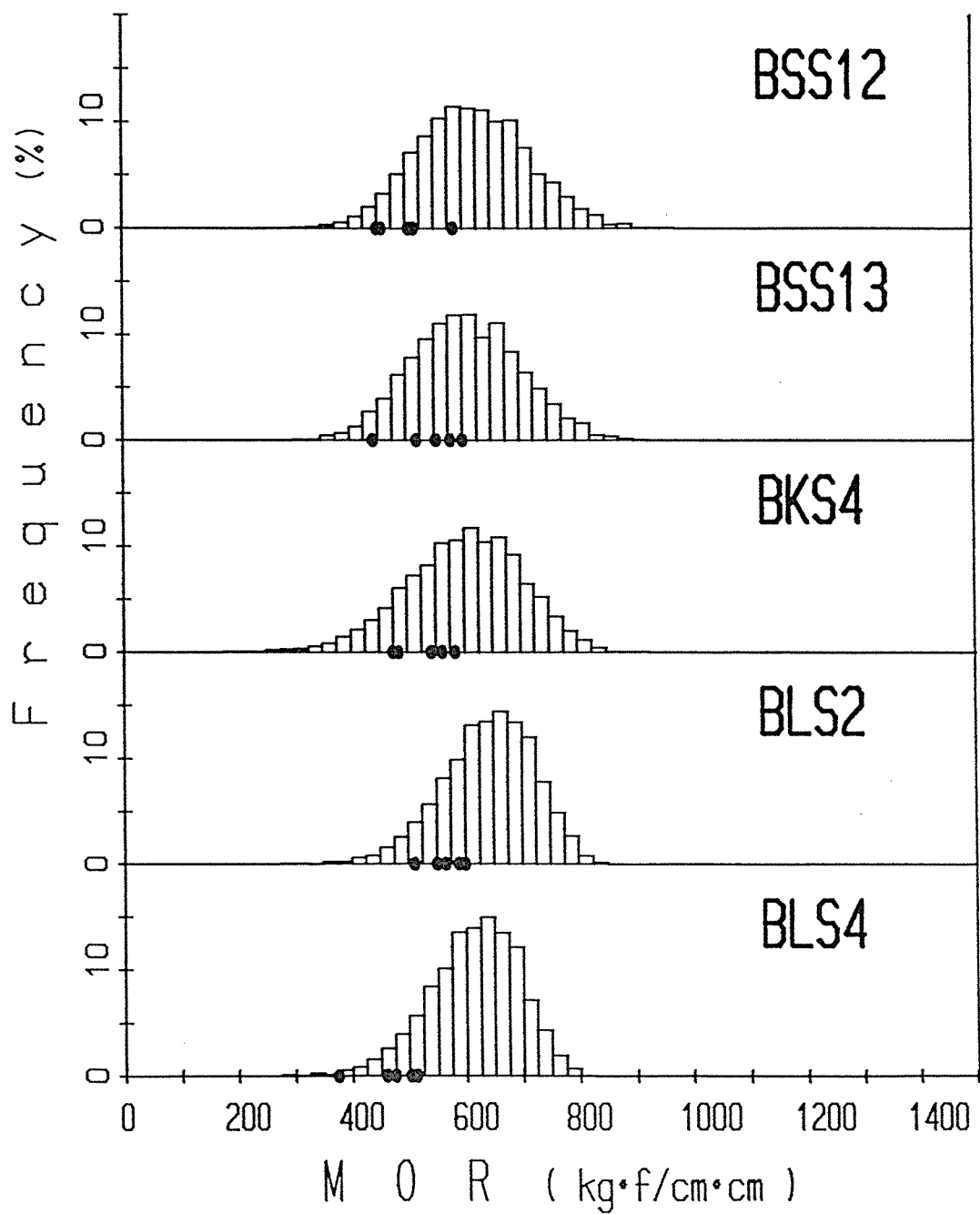


図 2 2 . シミュレーションによる MOR の分布予測と  
実験値の比較

破壊条件：ラミナ外縁部の応力がラミナの MOR（曲げ強度）に達したとき。

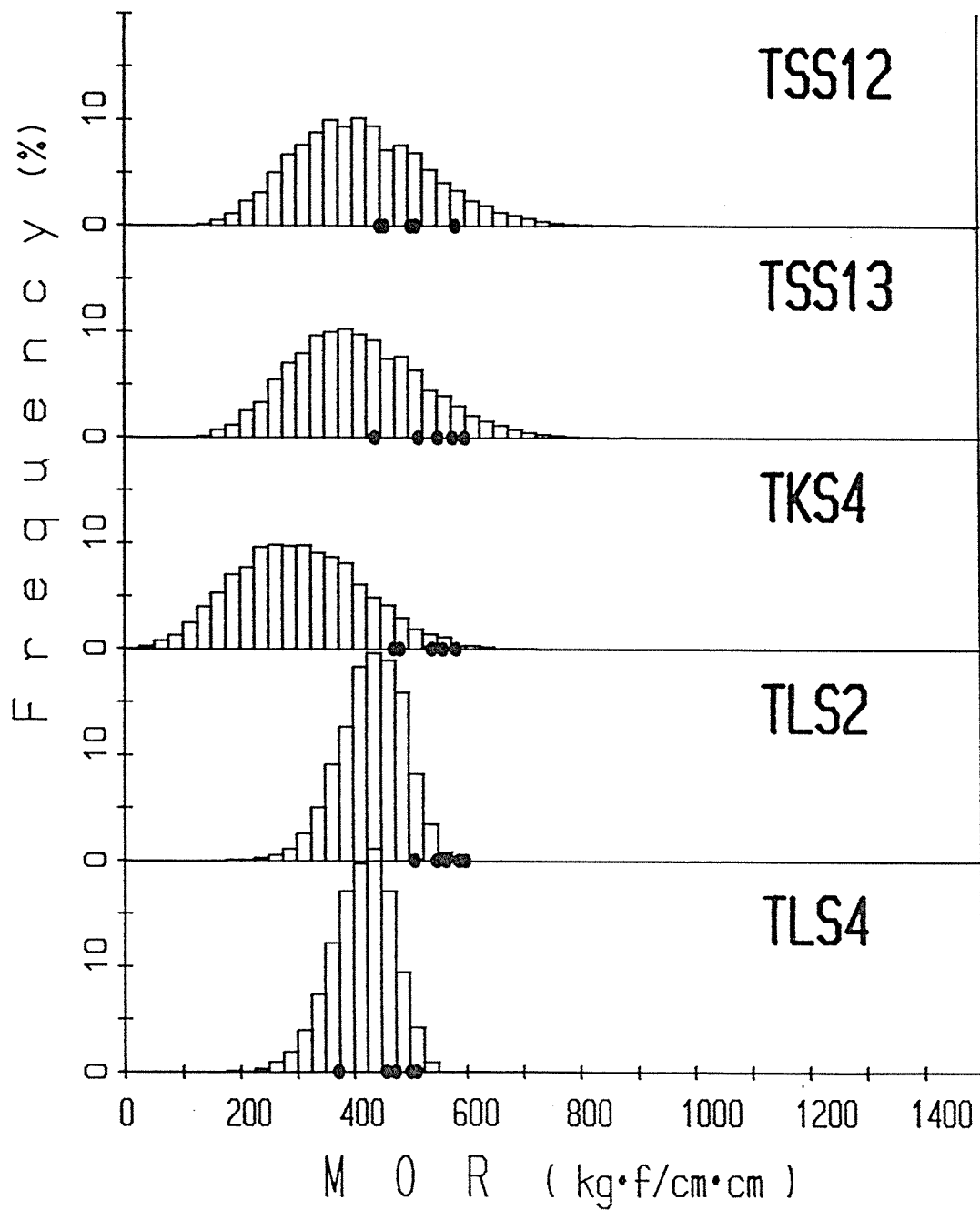


図 23. シミュレーションによるMORの分布予測と  
実験値の比較

破壊条件: ラミナ外縁部の応力がラミナの  
TS (引張強度) に達したとき。

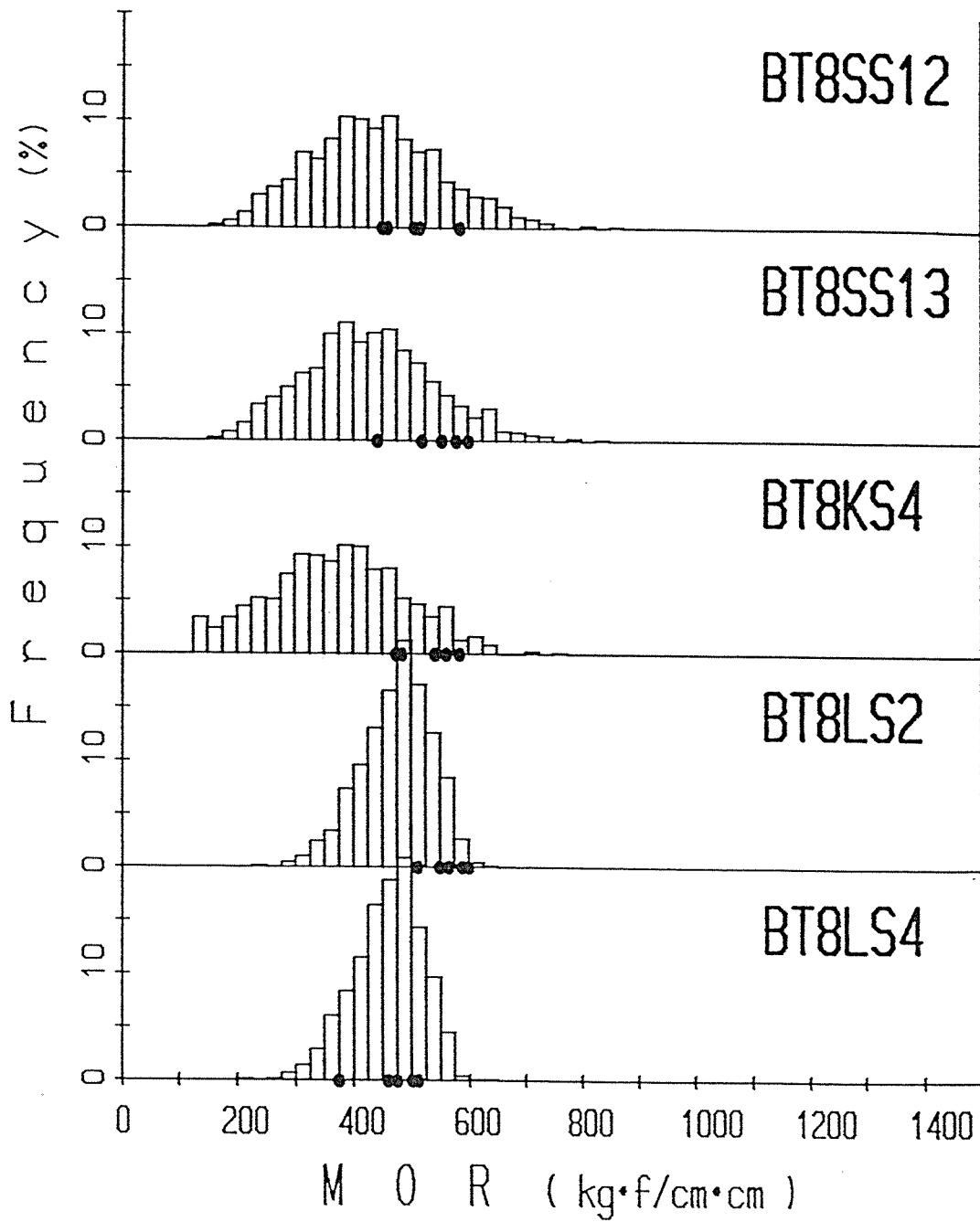


図24. シミュレーションによるMORの分布予測と  
 実験値の比較  
 破壊条件:  $(\sigma_t / f_t) + (\sigma_b / f_b) = 1$

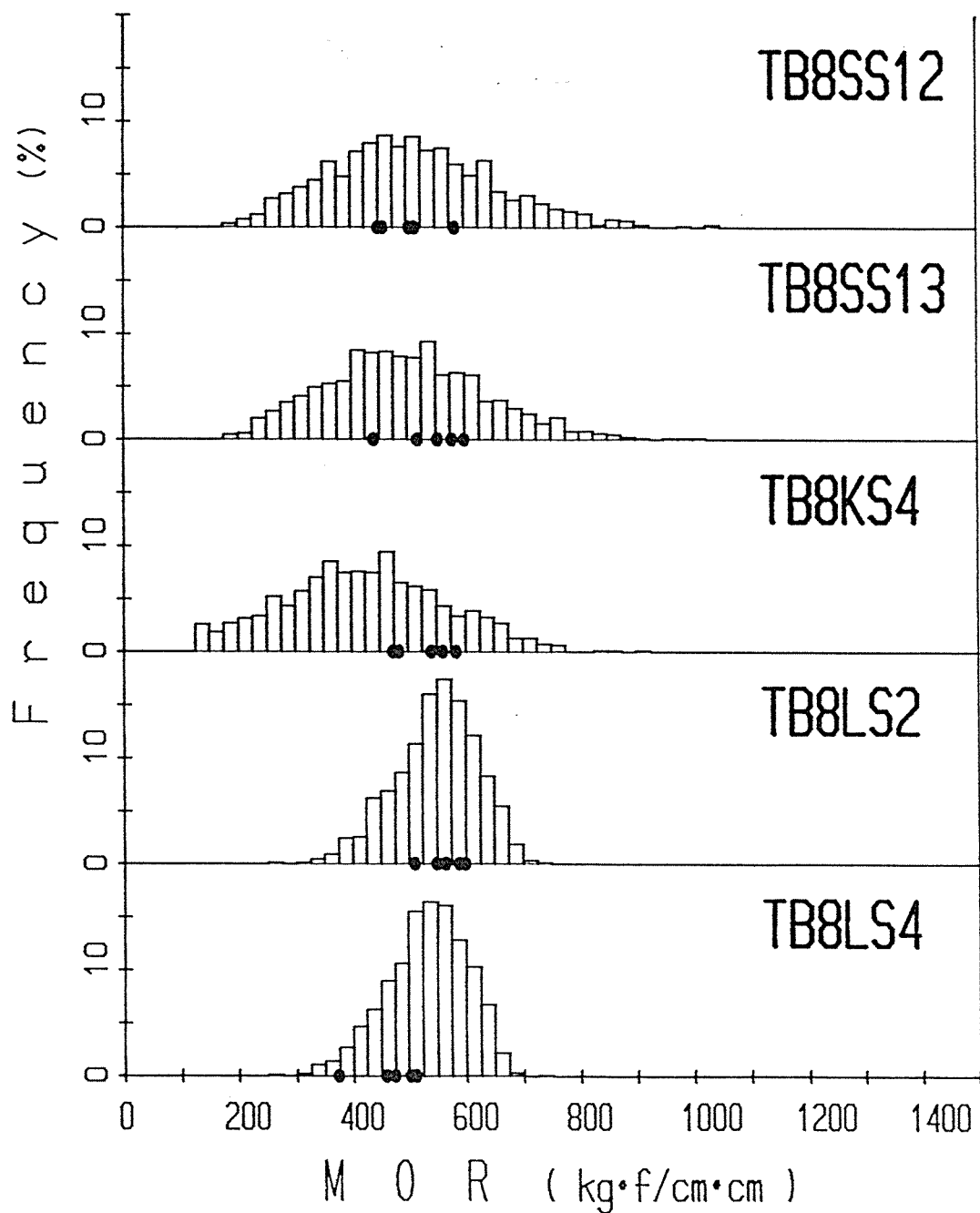


図25. シミュレーションによるMORの分布予測と  
実験値の比較

破壊条件:  $(\sigma_t / f_t)^2 + (\sigma_b / f_b)^2 = 1$

### 3. 6 まとめ

スギ集成材の最外層にLVLや等級の高い樹種のラミナを用いた複合集成材の強度性能について、種々の試験を行い検討した。また確率モデルを用いてMORの予測を行い、集成材の破壊条件について検討した。

複合を行なうことによって、スギ集成材としての耐部分圧縮性能が非常に向上することが明らかになった。また、より大きなせん断変形は生じるものの、MOEの値が大きくなることも明らかになった。

最外層の破壊が引張破壊となるような大断面集成材では、LVLを複合することによって、MORが向上すると報告されているが、本研究で用いた5プライ程度の小断面の集成材では外層にLVLを用いてもMORの増加はあまり期待できないことが明らかになった。

異樹種あるいは異材料同士の接着強度は強度の低いほうの材料のそれに近くなる。煮沸繰返し処理による接着層の特別な劣化は観察されなかった。一般的な使用条件における接着耐久性には問題がないと思われるが、実用化のためにはさらに詳しい検討が必要と思われる。現在、屋外暴露条件下における複合集成材の耐久性を検討するため、森林総合研究所試験地において屋外暴露試験を実施中である。

シミュレーションによる集成材の破壊条件の検討を行なったところ、本研究の条件下では、丸山ら[9]の提案した次の破壊条件式が最も良く適合することが明らかになった。

$$(\sigma_t / f_t)^2 + (\sigma_b / f_b)^2 = 1$$

ここで、 $f_t$ 、 $f_b$ はラミナのTSおよびMOR、また $\sigma_t$ 、 $\sigma_b$ はラミナに生じる応力である。

本研究では用いたスギラミナは、フィンガージョイントによる縦つぎがなされていないものであった。したがって、フィンガージョイントが集成材の強度特性に及ぼす影響については全く検討されなかった。特に最外層にフィンガージョイントラミナを用いた場合と通しラミナを用いた場合とでは、かなり強度特性に変化が生じるものと思われるので、更に検討が必要である。また今後、大断面スギ集成材の最外層にLVLを用いたときの強度特性を検討して行く必要があると考えられる。



## 7、参考文献

- [1] 日本農林規格：構造用大断面集成材の日本農林規格、合板検査会、  
(1987)
- [2] 菅野襄作，今泉勝吉：集成材，森北出版，(1975)
- [3] 杉山英男：木構造，彰国社，(1971)
- [4] 江口 篤：スギとヒノキを混用した集成材の強度性能、奈良県林試  
研報、17、(1987)
- [5] Braun, M.O. and R.C. Moody:FPJ 27(11),46-51 (1977)
- [6] AITC:ANSI/AITC190.1 (1983)
- [7] Bodig, J.; Jayne, B.A.:”Mechanics of Wood and Wood  
Composites”, Van Nostrand Reinhold, 1982, p.359-375.
- [8] 林知行：木材誌、投稿中
- [9] 小松幸平：建築学会講概集，6399，(1988)
- [10] 丸山則義，山嶋道夫：第39回木材学会要旨，65，(1989)
- [11] 石川 宏：”パソコンシミュレーション入門”，企画センター，  
(1983)
- [12] 星谷 勝，石井 清：”構造物の信頼性設計法”，鹿島出版会  
(1986)
- [13] Taylor, S.E.;Bender,D.A.: Forest Prod. J.,39(7/8), 71-74,  
(1989).

## A p p e n d i x

### I 相互に相関をもつ多次元非正規乱数発生法

モンテカルロシミュレーションにおいてまず問題となるのが、現実の分布に似通ったの乱数を発生させるための方法論である。シミュレーションとはそもそも模倣という意味であり、発生された乱数の分布が現実を得られているデータの分布に似たものでなければ、模擬実験としての意味がない [11]。乱数が1種類で単純な場合にはなんら問題はないが、多種類の乱数が必要でかつそれらが互いに相関を持つような場合には、乱数発生法そのものを工夫しておく必要がある。

集成材のMORの分布を非破壊的に求められるMOEや集中節径比の分布からモンテカルロシミュレーションにより求めようとする場合、何種類かの乱数を発生させてやる必要がある。さらに、MOR、MOE、TS、集中節径比等は互いに相関を示すので、それらの乱数もまた互いに相関を持ったものでなければならない。

ここでは、まず一般的な多次元正規乱数発生法 [12] を説明した後、これを非正規分布の場合にも適用できるように改良したTaylor-Bender法 [13] について解説する。

### II 多次元正規乱数発生法

星谷 [11] によれば、相互に相関をもつ  $n$  個の正規乱数  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  の発生方法は次のとおりである。ここで、それぞれの平均値は0、共分散を  $\text{cov}[X_i, X_j]$  ( $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n$ ) とする。

- ①、共分散  $\text{cov}[X_i, X_j]$  を要素とする共分散マトリクス  $C_x$  を次のように三角形行列  $C$  の積の形に分解する。ただし、 $\text{cov}[X_n, X_n] = \text{var}[X_n]$  である。

$$\begin{bmatrix} \text{var}[X_1] & \dots & \text{cov}[X_1, X_n] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}[X_n, X_1] & \dots & \text{var}[X_n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & & & \\ c_{21}, c_{22} & & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ c_{n1}, c_{n2}, \dots, c_{nn} & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11}, c_{21}, \dots, c_{n1} \\ c_{22}, \dots, c_{n2} \\ 0 \quad \ddots \quad \vdots \\ \quad \quad \quad \quad c_{nn} \end{bmatrix}$$

すなわち、

$$C_x = C C^T \quad (1)$$

なお、この分解にはコレスキー分解を用いることができる。

- ②、平均値が0、分散値が1となる互いに独立な  $n$  個の正規乱数を1組  $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  発生させる。
- ③、相互に相関をもつ  $n$  個の正規乱数のサンプル  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}^T$  は

式 (1) の C を用いて

$$X = C a$$

すなわち、

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & & & \\ c_{21}, c_{22} & & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ c_{n1}, c_{n2}, \dots, c_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$$

となる。ただし、 $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}^T$  である。

④、手順②～③を繰り返し行なえば複数の乱数を発生することができる。平均値が 0 でないときには、発生した X の各乱数にそれぞれの平均値を加算すればよい。また、式 (1) は線形式であり、かつ a が正規分布に従うので X も当然、正規確率変数になる。

### III Taylor-Bender 法

Taylor-Bender 法 [13] は前節で発生された正規乱数を等価な非正規乱数に変換するものである。例として、正規乱数が平均値 0、標準偏差 1 の標準正規分布に従い、一方、変換したい非正規乱数が 3 パラメータワイブルに従う場合のことを考える。

今、発生された正規乱数の値が 0.5 であったとすると、その時の下方確率は、0.6915 となる。一般的な逆関数法 [11] と同様にして、この値を 3 パラメータワイブル分布関数  $F(x)$  の逆関数  $F^{-1}(x)$  に代入すれば、求める乱数が得られる (図 26)。

$$F^{-1}(x) = \theta x \{-\ln(1-r)\}^{1/m} + \gamma$$

ここで、 $m$  : 形状パラメータ、 $\theta$  : 尺度パラメータ、

$\gamma$  : 位置パラメータ  $r$  : 標準正規乱数下方確率

発生されたすべての正規乱数について、このような変換を行なえば、変換後の乱数はそれぞれの分布関数に従い、かつ相互に相関をもつことになる。

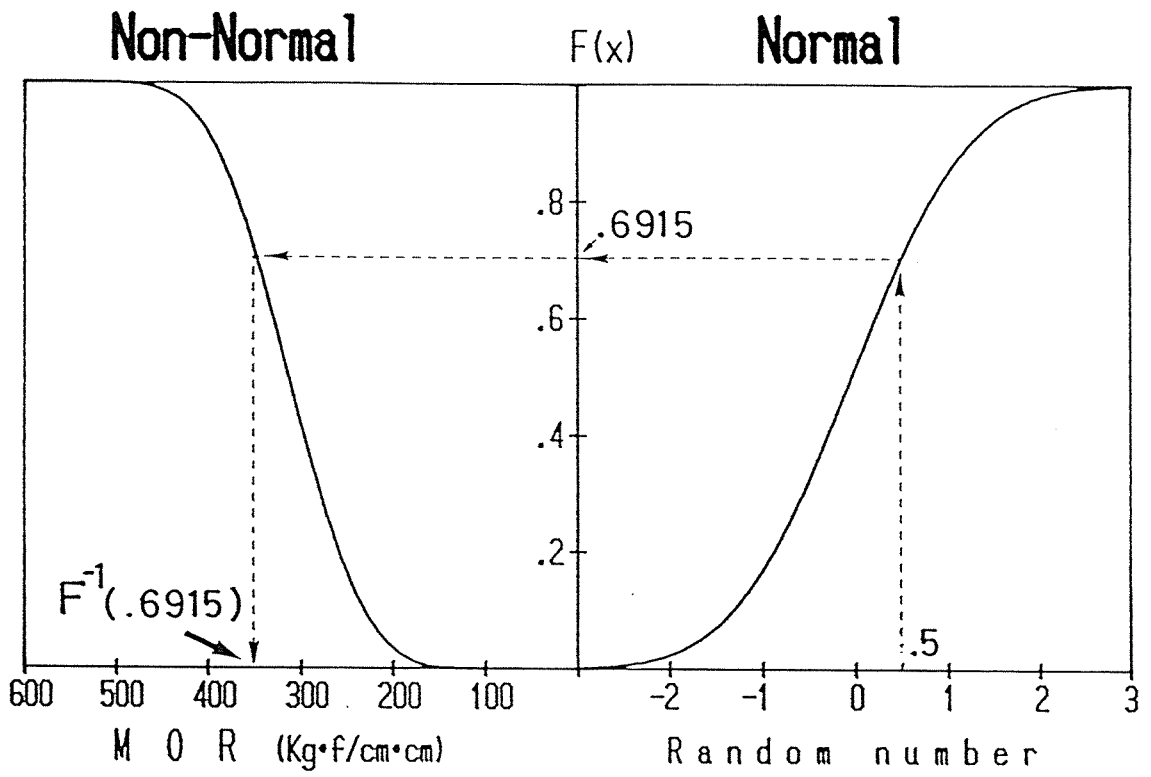


図 2 6 . 正規乱数から等価な非正規乱数への変換

## 4. スギ集成材における鋼板挿入式ドリフトピン接合部の耐力

国産針葉樹は人工造林面積が1000万haにも達し、21世紀初頭にはわが国の木材需要の主たる部分を占めると考えられているが、これまでに木構造接合部について得られている強度性能データは、諸外国における実験やベイマツなどの外材を用いたものが多く、国産材を用いた木構造接合部に関する強度性能データは、蓄積が十分であるとはいいがたい。このため、きたるべき国産材時代にそなえ、早急に国産材を用いた木構造接合部の強度性能データを蓄積しておく必要がある。

ここでは国産材の中で最も蓄積が多く、また性能面では、比重が小さく最も低い許容応力度を与えられているスギ集成材を対象とし、鋼板挿入型ドリフトピン接合部について、繊維に平行方向加力時および直交方向加力時の性能、ベイマツ集成材を用いた場合との性能比較等について実験検討を行った。またボルトとドリフトピンの比較も行った。

### 4. 1 繊維に平行方向加力時の性能

#### 1. 1 試験方法

試験体にはスギ集成材（素材は和歌山龍神産）を用い、これに積層面と直交するように帯鋸でスリットをあけて9mm厚の鋼板を挿入し、直径12mmおよび16mmの鋼棒（SS41）を積層面と平行に打ち込んだものを試験体とした。

材幅（ピン長さ）は100mmおよび150mmの2種類とし、ピンの打ち込み位置は図1に示すように端距離を50mm(A)、75mm(B)、100mm(C)、150mm(D)にしたものと、2本のピンを端距離100mm一定にしてピン間隔を50mmにしたもの(E)、この打ち込み位置をピンの半径だけ左右にずらしたもの(F)、およびピン間隔を100mmにしたもの(G)の計7種類とした。試験体は各3体ずつとし、鋼板と集成材の間に引張力を加え、鋼板と集成材の間の荷重－相対変位を記録した。

#### 1. 1 試験の結果

試験により得られたドリフトピン接合部の荷重－相対変位曲線を図2、および図3に示す。E、F、Gはピンを2本打ち込んでいるため、ピン1本当たりの荷重で

結果を示している。

図2が直径16mmのピン、図3が直径12mmのピンの場合である。いずれのピン径、ピン長の組み合わせでも、端距離が小さい場合およびピン2本打ちで2本のピンの間隔が50mmと狭い場合は、相対変位が小さいうちに集成材が割裂あるいはせん断により破壊した。

また、図中に示す点線は、LARSENの降伏荷重推定式を用いて計算した接合部の降伏荷重計算値であり、この計算法を図4に示す。ピン径（ $d$ ）に比べてピン長（ $l$ ）が短い場合は、ピンが変形することなく木材中にめり込んでいくことによりドリフトピン接合部が降伏するので、その降伏荷重は（Ⅰ）の式で示すようにピンの木材繊維方向めり込み強度（ $S$ ）にピンの見付面積（ $d l$ ）をかけたもので推定できる。ピン長がこれより長くなるとこんどはピンが挿入鋼板部分で曲げ降伏し、この場合は（Ⅱ）式で示すようにめり込み強度（ $S$ ）と打ち込んだピンの曲げ降伏モーメント（ $M$ ）を用いて降伏荷重が推定できる。さらにピン長が長くなると、ピンが挿入鋼板部のみでなく、材中の左右2ヶ所でも同時に曲げ降伏するため、以後は（Ⅲ）式で示すように降伏荷重はピン長によらず一定となる。

ここではピンの木材繊維平行方向のめり込み耐力  $S = 288 \text{kgf/cm}^2$  (16mmピン)、 $272 \text{kgf/cm}^2$  (12mmピン)、およびピンの曲げ降伏モーメント  $M = 3200 \text{kgf}\cdot\text{cm}$  (16mmピン)、 $1670 \text{kgf}\cdot\text{cm}$  (12mm)を実験により求め、これを用いて計算した降伏荷重を図2、3中の点線で示した。なお、今回のピン径、ピン長の範囲では、降伏はいずれもピンが挿入鋼板部で降伏する（Ⅱ）型であった。なお、図4の右側には、ピン長さ（材幅－鋼板長さ）によって16mmおよび12mmピンの降伏荷重がどのように変化するかを示した。

さて、ピン径、ピン長が同じであれば、初期に集成材が破壊してしまわない限りA、B、C、D、E、F、Gいずれの端距離でも、ほぼ同じ荷重で接合部が降伏点に達しており、降伏荷重の計算値は実験によるドリフトピン接合部の降伏点とよく一致していた。このLARSENの計算式は、木構造計算規準のボルト接合部の許容耐力の計算にはすでに取り入れられているが、ドリフトピン接合部についても、この式は実際の降伏荷重をよく表しており、ボルトのみでなくドリフトピンについてもこのLARSENの式が許容耐力の計算に使えるよう。

ただし、ピン2本打ちの場合のピン1本当当たりの最大荷重は、Gタイプで端距離

が同じCタイプの0.87～0.98倍しかなく、EやFタイプではピン間隔が狭いために最大荷重はさらに小さくなった。また直線域の傾きや比例限度荷重も2本打ちだからといって必ずしも1本打ちの場合の2倍にはならず、低いものでは1本当たりの値が0.6～0.8倍に落ちた。このためピンを複数本打った接合部ではピン間隔も十分にとっておく必要があり、またピンを複数本打ったからといって、初期剛性の向上は期待できない。

#### 4. 2 バイマツとスギの比較およびスチールピン以外のピン打ち

##### 2. 1 試験方法

スギ集成材（容積密度 $0.34\text{g/cm}^3$ ）およびバイマツ集成材（容積密度 $0.44\text{g/cm}^3$ ）に9mm厚鋼板を挿入し、端距離を150mm一定として、直径16mmで長さ100mmのスチール（S S 4 1）製ピン、直径16mm、長さ100mmのジルコニアセラミックス製ピン、および直径20mmで長さ100mmのFRP（ガラス布基材ポリイミド）製ピンを打ち込みピンとして用いたドリフトピン接合部の、繊維に平行方向のせん断耐力試験を行った。試験方法および試験体形状は1. の試験のDタイプと同様である。

##### 2. 2 試験の結果

試験に用いたピン材料の性質を表1に、試験の結果を表2に示す。試験体数はスギスチールの組み合わせのみが6体であり、あとは各3体ずつ行った。スチールピンはスギ集成材、バイマツ集成材ともに、鋼板部でピンが曲げ変形し降伏するLARSENの（Ⅱ）型の降伏をし、降伏後も破壊することなく変形が進んでいった。一方、セラミックスピン、FRPピンの場合は、材中にめり込まないうちにピンが中央部で折れた。FRPピンは直径が20mmと大きいにもかかわらず最大耐力はスチールを下まわり、セラミックスピンも加力初期に曲げまたはせん断で破壊した。結局「新素材」と呼ばれるセラミックスやエンジニアリングプラスチックよりもスチールピンの方がずっと高い接合性能を持つという結果になった。

##### 2. 3 考察

さて、ここでは通常のスチール（鋼製）ピンについてスギとバイマツという樹種

間の違いに限って検討する。木構造計算規準では、ドリフトピン接合部の短期許容せん断耐力は

$$l / d > 4 \text{ のとき } \quad \text{短期許容せん断耐力} = 1040 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot d^2$$

$$2 \leq l / d \leq 4 \text{ のとき } \quad \text{短期許容せん断耐力} = 260 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot d \cdot l$$

ここで、 $\alpha$ ：継手形式による係数で、鋼板挿入式では $\alpha = 1.0$

$\rho$ ：木材の気乾比重

$d$ ：ドリフトピン直径（cm）

$l$ ：主材厚（cm）

と定めている。ここで $\rho$ はスギ0.32、ベイマツ0.42を用いても良いとしている。このことから、同一形状のドリフトピン接合部において、樹種のみがベイマツとスギに分かれた場合、接合部の短期許容せん断耐力は比重の大小のみで決まり、その値はベイマツ／スギ $= 0.42/0.32 \doteq 1.31$ となる。一方スチールピンでの実験結果は試験体数が3体と少ないが、最大荷重についてベイマツ／スギ $= 4591/3813 \doteq 1.20$ となった。なお、これらの残材を用いて測定した縦圧縮強度の比は、ベイマツ／スギ $= 444/347 \doteq 1.28$ であり、またベイマツでは加力中に縦割れを生じるなど問題もあったが、16φのスチールピンを用いて測定したピンの繊維方向めり込み強度の比はベイマツ／スギ $= 349/282 \doteq 1.24$ であった。ドリフトピン接合部の耐力は、樹種が異なってもその比重のみに比例するという考え方は明快で便利な方法ではあるが、今回の実験のように接合部の最大荷重が打ち込んだピンの曲げ降伏モーメントにも左右される場合には比重が最大荷重に及ぼす影響が少し弱められるため、両者の最大荷重の比は比重の比よりも若干小さくなる。

図5はLARSENの式を用い、ベイマツ（16mmピンの木材平行方向めり込み強度  $S = 349\text{kgf/cm}^2$ ）、スギ（ $S = 282\text{kgf/cm}^2$ ）について16mmのピンおよび12mmのピンを打ち込んだ時の降伏荷重を計算したものである。ピン長さが短い時はピンの木材中へのめり込み強度の比（ $349/282 \doteq 1.24$ ）がそのままきいてくるので、接合部の降伏荷重の計算値の比もベイマツ／スギ $= 1.24$ になるが、ピン長さが十分大きい（200mm以上）場合には、めり込み強度はその平方根でしか降伏荷重の計算にきいてこないため、両者の降伏荷重計算値の比はベイマツ／スギ $\doteq 1.1$ 程度と小さくなる。

このように $l / d$ の大きなピン、すなわち直径の小さなピンを接合部に用いる場合は、樹種がベイマツであってもスギであっても降伏荷重の計算値にはあまり差が



ない。直径の小さなピンでは、ピン1本あたりの許容耐力が小さくなるためにピンの打ち込み本数をより多くする必要がある、というデメリットがあるが、小径のピンは木材を割裂などにより破壊させる危険性が小さく、また多数本打つことにより特定の部位に応力が集中的にかかることも防止できるため、得られた接合部は破壊しにくく、ねばりのある接合部になると期待される。これらのことから、小径ピン多数本打ちは非常に安全性の高い接合部と考えられ、またこのような小径ピンでは  $l/d$  が大きくなるために、スギ材はベイマツ材に比べて最大耐力がそれほど不利にはならないと考えられる。

また、今回同時に実験したセラミックスピン、FRPピン、そして実験は行っていないがアカガシ等の堅木のピンのように脆性材料を接合具に用いた場合には、ピンが木材中にめり込んでいかないうちにピンが折れてしまうので、この場合にはスギ、ベイマツの樹種間で耐力の差はほとんど出てこない。

このように、接合具の種類とその形状に注意して接合部を設計すれば、スギ集成材でもベイマツ集成材に匹敵する接合部耐力が期待できる。

#### 4. 3 繊維に直交方向加力時の性能

一般に木材の繊維に直交方向の強度性能は、平行方向のそれに比べて著しく低く、このためドリフトピン接合部においても木構造計算規準では、荷重方向が繊維に直交する方向の場合の許容耐力は平行方向の荷重を受ける場合の許容耐力の 1/2 とする、と定めている。

ここでは、スギ集成材における鋼板挿入式ドリフトピン接合部について、繊維に直交する方向の荷重を受けた場合の接合部強度の性能を明らかにすることを目的として実験を行った。

##### 3. 1 試験方法

スギ集成材（材せい150mm、材幅100mm、および150mm）に9mm厚鋼板を挿入し、縁距離、端距離の組み合わせを縁距離40mm、70mm、100mmの3種類、端距離50mm、100mm、175mmの3種類の組み合わせ計9通りとし、直径16mmで長さ100mmおよび150mm、直径12mmで長さ100mmおよび150mmのピンをそれぞれ1本打ち込んで試験体とした。実験は図6に示すように挿入した鋼板の下にロードセルを置き、この鋼板と集成材

の他端を支持し、ピンから150mmの位置を加力する方法で、曲げ型の繊維直交方向加力により行った。試験体数は、各種類3体ずつとした。

### 3. 2 試験の結果

図7（ピン径16mm、ピン長100mm）、図8（ピン径16mm、ピン長150mm）、図9（ピン径12mm、ピン長100mm）、図10（ピン径12mm、ピン長150mm）に、すべての試験体の端距離、縁距離ごとの荷重－相対変位曲線を示した。また、図11、12には同じピン径、ピン長のものについて繊維に平行方向加力時と直交方向加力時の荷重－相対変位曲線を示した。

繊維に直交方向の加力の場合は、早期に接合部が降伏してしまうもののその後も変位の増大に伴って荷重は少しずつ増大していく、という特徴がみられた。端距離、縁距離を最も大きくとった場合について、繊維平行方向加力と直交方向加力の最大荷重を比較してみると、直径16mm、長さ100mmのピンの場合で、直交／平行＝0.75、直径16mm、長さ150mmで直交／平行＝0.80、直径12mm、長さ100mmでは直交／平行＝0.88、直径12mm、長さ150mmで直交／平行＝1.04 となり、特に直径12mmのピンの場合には最大荷重の差がかなり小さくなった。

これらのことから接合部の繊維直交方向加力時の初期性能は平行方向加力時の値をかなり下まわるが、端距離、縁距離を十分にとっておけば最大荷重は繊維平行方向加力時のそれに近い値が期待でき、この傾向は  $l/d$  の大きいピンほど顕著であった。

さて、木構造計算規準では、ドリフトピン接合部の短期許容せん断耐力は、木材の繊維に平行方向加力の場合

$$l/d > 4 \text{ のとき } P = 1040 \cdot \alpha \cdot \rho \cdot d^2$$

（P：ドリフトピンの短期許容せん断耐力）

であり、繊維に直交方向加力の場合はこの 1/2 と定められている。これにより求めたスギ集成材における16mmピンの直交方向加力時の短期許容せん断耐力は426kgf、12mmピンは240kgfとなり、これを縁距離100mm、端距離175mmの場合の最大耐力の実験結果と比較すると、径16mm、長さ100mmのピンで  $2900/426 = 6.8$  倍、直径16mm、長さ150mmのピンで  $3789/426 = 8.9$  倍、直径12mm、長さ100mmのピンで  $2484/240 = 10.4$  倍、直径12mm、長さ150mmのピンで  $3086/240 = 12.9$  倍となった。

接合部にピンを複数本打った場合には、特定のピンに荷重が集中し、これが早期に降伏してしまうため、接合部設計時に期待していた降伏荷重よりも小さな荷重で接合部が降伏してしまう危険性も考えられる。このため接合具の安全率は十分にとっておく必要があるが、今回の試験で得られた最大荷重から考えると繊維に直交方向の短期許容せん断耐力は、ドリフトピン接合にとってかなり厳しいものであると考えられる。接合部の剛性や降伏耐力が、用いられている部材の剛性や耐力に比べて大きなものであれば、地震などが発生したときにこの接合部が全く変形せず、かわりに近傍の部材が過大な応力を受けて破壊してしまう危険性があり、接合部の許容耐力は部材の許容耐力や安全率とバランスのとれたものにする必要がある。このためにはさらにドリフトピン接合部について実験を進めていかねばならない。

#### 4. 4 4 ボルト接合とドリフトピン接合の耐力比較

木構造計算規準では、ボルト接合とドリフトピン接合について、それぞれ異なった誘導方法によるせん断許容耐力を与えている。一方、大断面木造建築物設計施工マニュアルでは、ドリフトピン接合とボルト接合で、同一の許容耐力値が与えられており、この値は木構造計算規準のボルト接合と同じ値になっている。

これまで、ボルトとドリフトピンを同一試験方法で比較したデータがなく、またドリフトピンについてはデータの絶対量が少なかったため、両者の許容耐力について詳細な検討が行えなかった。そこで、ボルト接合とドリフトピン接合の強度性能の比較を目的として、ボルトについてもドリフトピンで実施した鋼板挿入式接合部と同一形状の試験体をスギ集成材を用いて作成し、繊維に平行方向のせん断耐力試験を行い、両者の性能比較を行った。

##### 4. 1 試験体形状および実験

1. で実施したドリフトピン接合の試験と同様、試験体には 20mm 厚ラミナ 5 層からなる断面 100mm×100mm のスギ集成材を用い、これに 9mm 厚の鋼板を挿入し、胴部径 12mm と 16mm の中ボルトをラミナの幅方向に平行に打ち込んだ。なお、12mm ボルトでは 40×40×4.5mm の角座金、16mm ボルトでは 50×50×6.0mm の角座金を両側に用い、手で軽く締める程度に締め付けた（図 1 3）。なお材幅（ボルト長さ）は 100mm のもののみとした。

ボルトの位置と本数は、ボルト 1 本締めで端距離 50mm (A)、75mm (B)、100mm (C)、150mm (D)、ボルト 2 本締めで端距離が 100mm 一定でボルト間隔50mm (E)、100mm (G) の 6 種類とした (F は欠)。

#### 4. 2 試験の結果

図 1 4 に 16mm ボルトの荷重－相対変位曲線を、図 1 5 に 12mm ボルトの荷重－相対変位曲線を示した。なお、比較のため同径のドリフトピンでの結果を図中に点線で示した。ボルトを 2 本用いた E、G については、荷重をボルト 1 本当たりの値で示している。

また、表 3 には、ボルトとドリフトピンの 1mm 変位時の荷重、最大荷重、大断面木造建築物設計施工マニュアルに示されたボルトおよびドリフトピン接合部の短期許容耐力 (16mm ボルトおよびドリフトピン 1329kgf、12mm ボルトおよびドリフトピン 810kgf) に対する最大荷重の比を示した。

まず、1mm 変位時の荷重 (P 1mm) については、ドリフトピンの方が打ち込みタイプでガタが小さいためか、若干高い値を示した。打ち込まれたドリフトピンやボルトが挿入鋼板部で曲げ降伏する降伏点については、ボルトとドリフトピンであまり差がなく、この結果降伏点は、ボルト、ドリフトピンともに LARSEN の降伏荷重推定式を用いて同様に推定できることが明らかになった。

最大荷重については、A タイプや B タイプのように端距離が小さい場合は、どちらもわずかな相対変位で割裂破壊を生じるために、ボルトとドリフトピンで荷重の差があまりみられなかった。一方、D タイプのように端距離が十分あり、割裂による破壊を生じにくい場合には、ドリフトピン接合は降伏後ほとんど荷重が上昇せず、変形のみが進んでいったのに対し、ボルト接合は座金がボルトの変形や引き抜けを拘束し、降伏後も荷重が上昇していった。この結果、ドリフトピンに対するボルトの最大荷重の比は、最大値を示した D タイプで 16mm の場合が 1.54 倍、12mm の場合には 1.90 倍にも達した。これらのことから初期剛性はドリフトピンの方がわずかに優れ、降伏点は両者ともほぼ同じであり、最大荷重はボルトの方がドリフトピンより 1.5～1.9 倍大きい、という結果を得た。

表 3 にはボルトとドリフトピンで同一の短期許容せん断耐力を与えている大断面木造建築物設計施工マニュアルに記された繊維に平行方向加力時の短期許容せん断

耐力に対する、ボルトとドリフトピンの実験で得た最大耐力の比を示した。この比の値は 16mm ボルトで最大 4.5 倍、12mm ボルトでは最大 6.6 倍になり、ドリフトピンでも 16mm で最大 2.9 倍、12mm で最大 3.5 倍となった。特にボルト接合では、短期許容せん断耐力は、最大荷重に対してかなり安全を見込んだ値となった。

また、木構造計算規準に従って今回実験したボルトとドリフトピンの短期許容せん断耐力を求めこれを実験による最大荷重と比較すると、図 16 のようになる。この木構造計算規準では、ドリフトピンの短期許容せん断耐力は直径 16mm で 852kgf、直径 12mm で 479kgf しか認められていないので、実験で得た最大荷重は 16mm ドリフトピンで許容耐力の 4.56 倍、12mm ドリフトピンでは 5.85 倍となり、ボルト同様、許容耐力はかなり安全を見込んだ値となる。

これらのことから、スギ集成材を用い、現行の許容せん断耐力に基づいて鋼板挿入式ドリフトピン接合、あるいはボルト接合を設計した場合、その接合部の実際の最大耐力は設計耐力よりかなり大きな値になるものと考えられる。

また、この短期許容せん断耐力に対する最大荷重の比は、直径 12mm のボルトやドリフトピンの方が直径 16mm のものより高く、いいかえれば直径の小さなピンほど安全率が高いという結果になった。

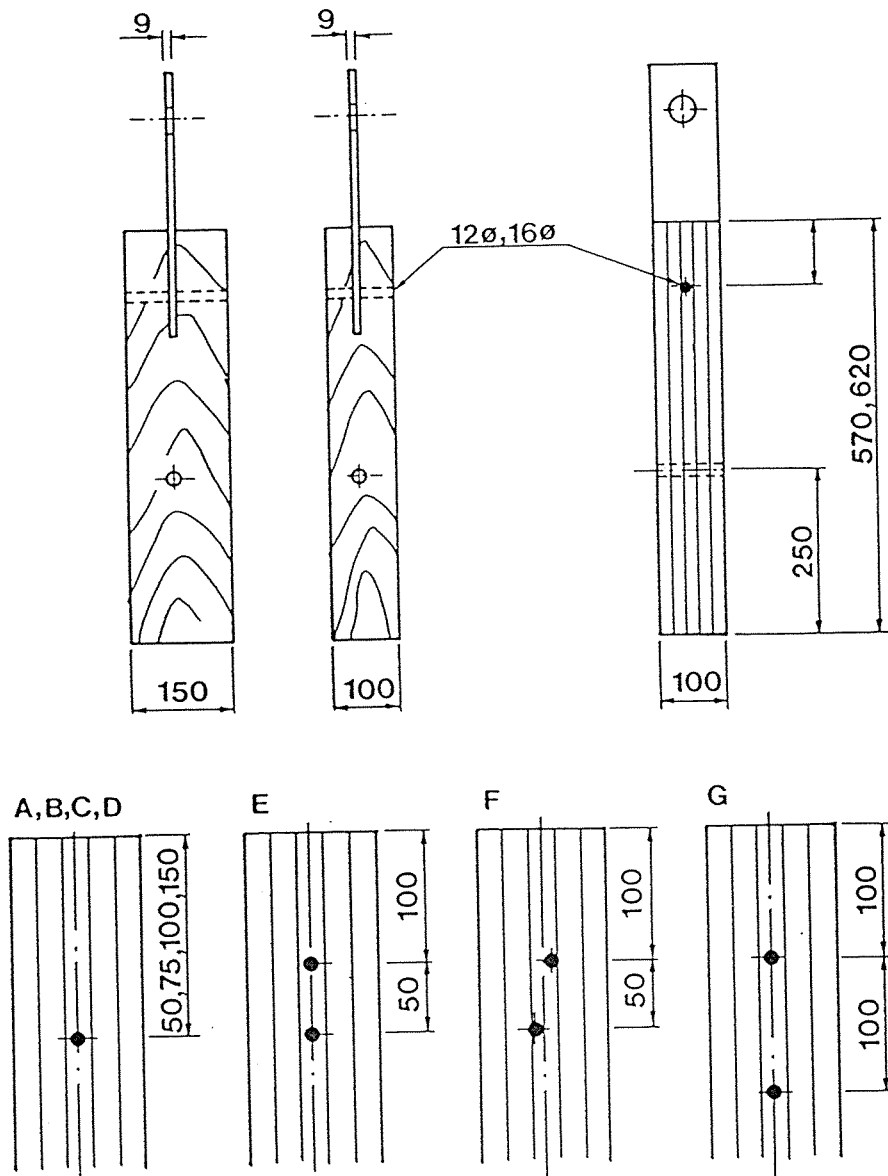


図1 繊維平行方向の耐力試験  
— 試験体形状 —

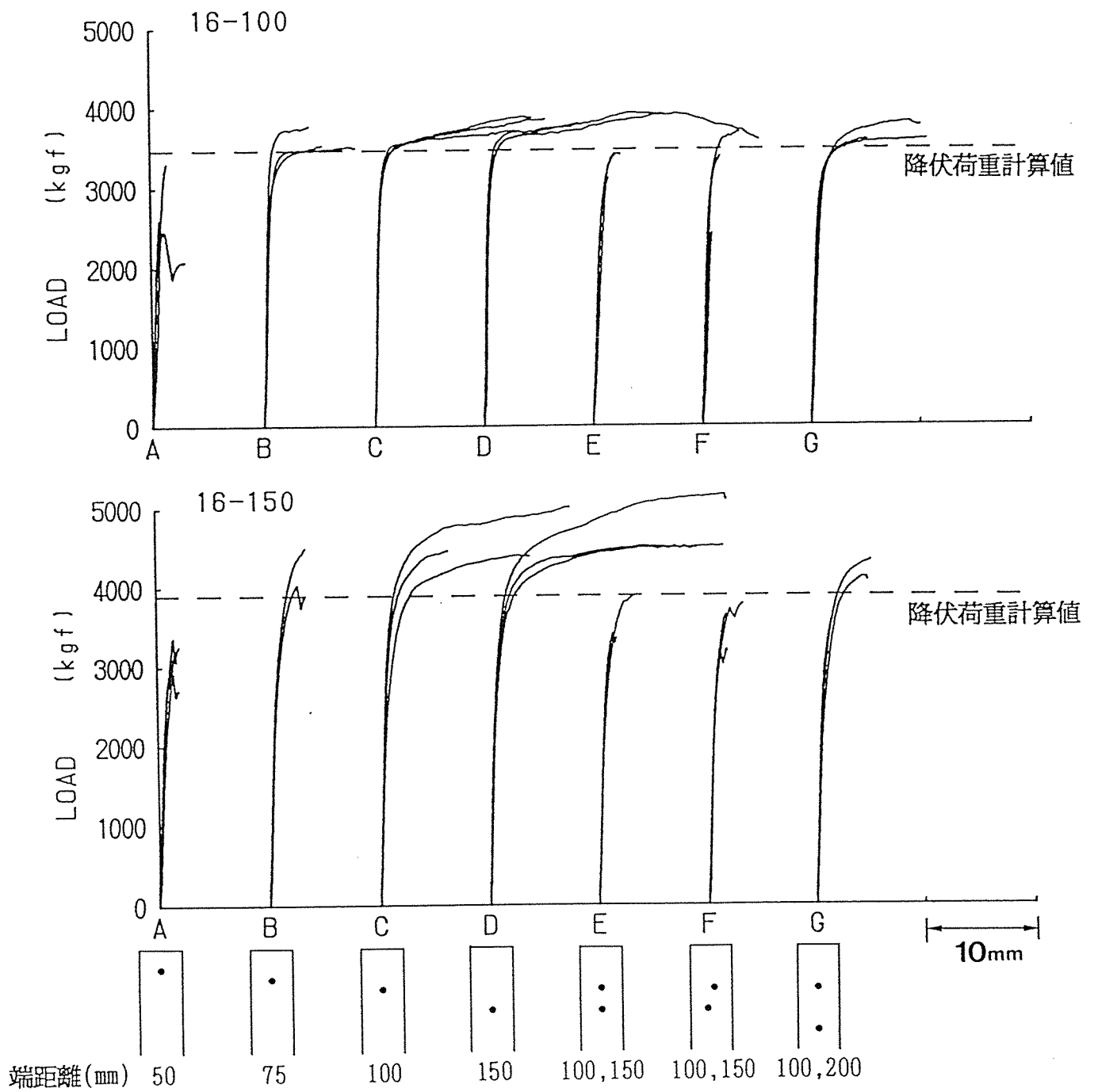


図2 荷重-相対変位曲線  
 (ピン径16mm、長さ100mmと150mm)

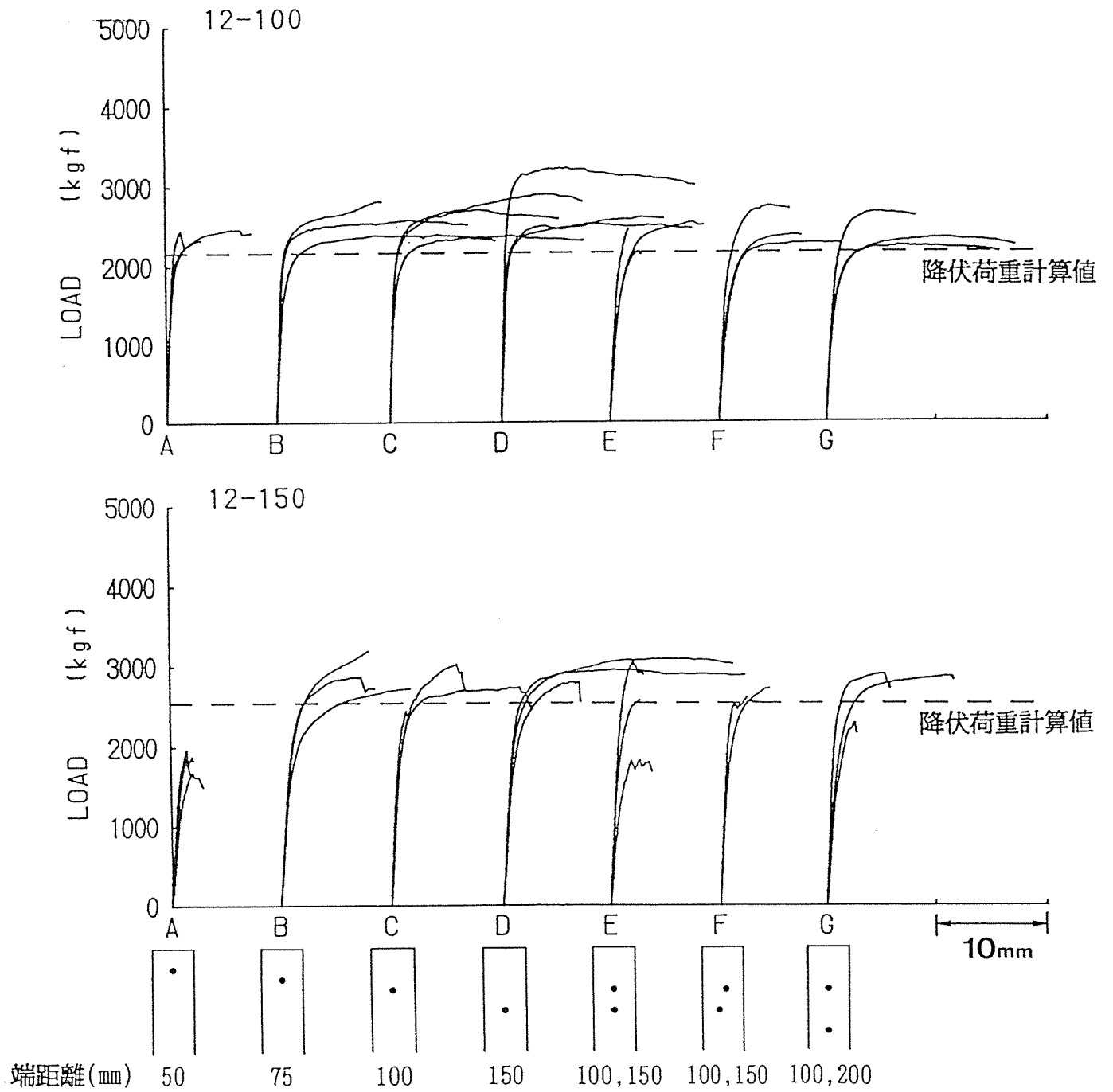
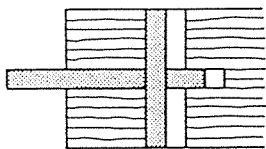


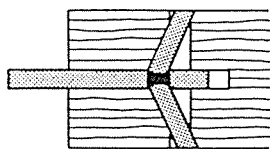
図3 荷重-相対変位曲線  
(ピン径12mm、長さ100mmと150mm)



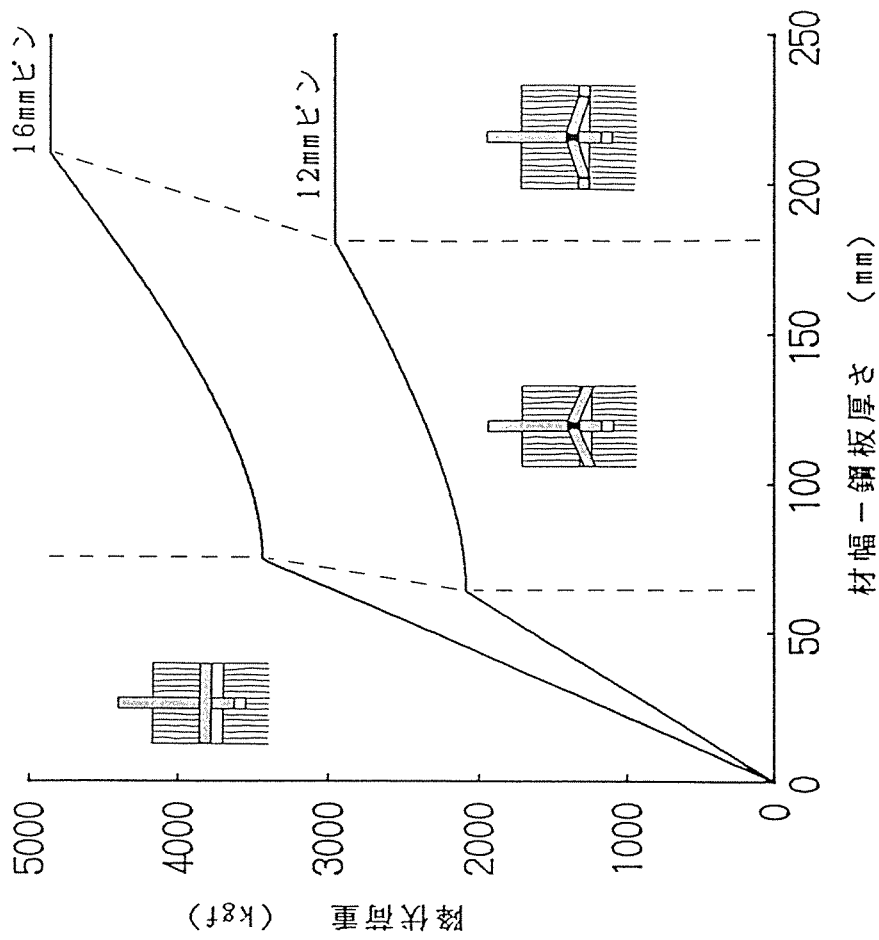
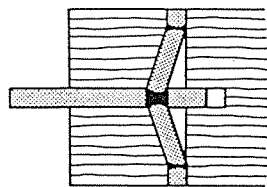
(I)  $P_y = S \cdot d \cdot l$



(II)  $P_y = S \cdot d \cdot l \cdot \left( \sqrt{\frac{16 \cdot M}{S \cdot d \cdot l^2} + 2} - 1 \right)$



(III)  $P_y = 2 \cdot S \cdot d \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot M}{S \cdot d}}$



S: ビンの繊維方向めり込み強度

d: ビン径, l: (材幅 - 鋼板厚さ)

M: ビンの降伏モーメント

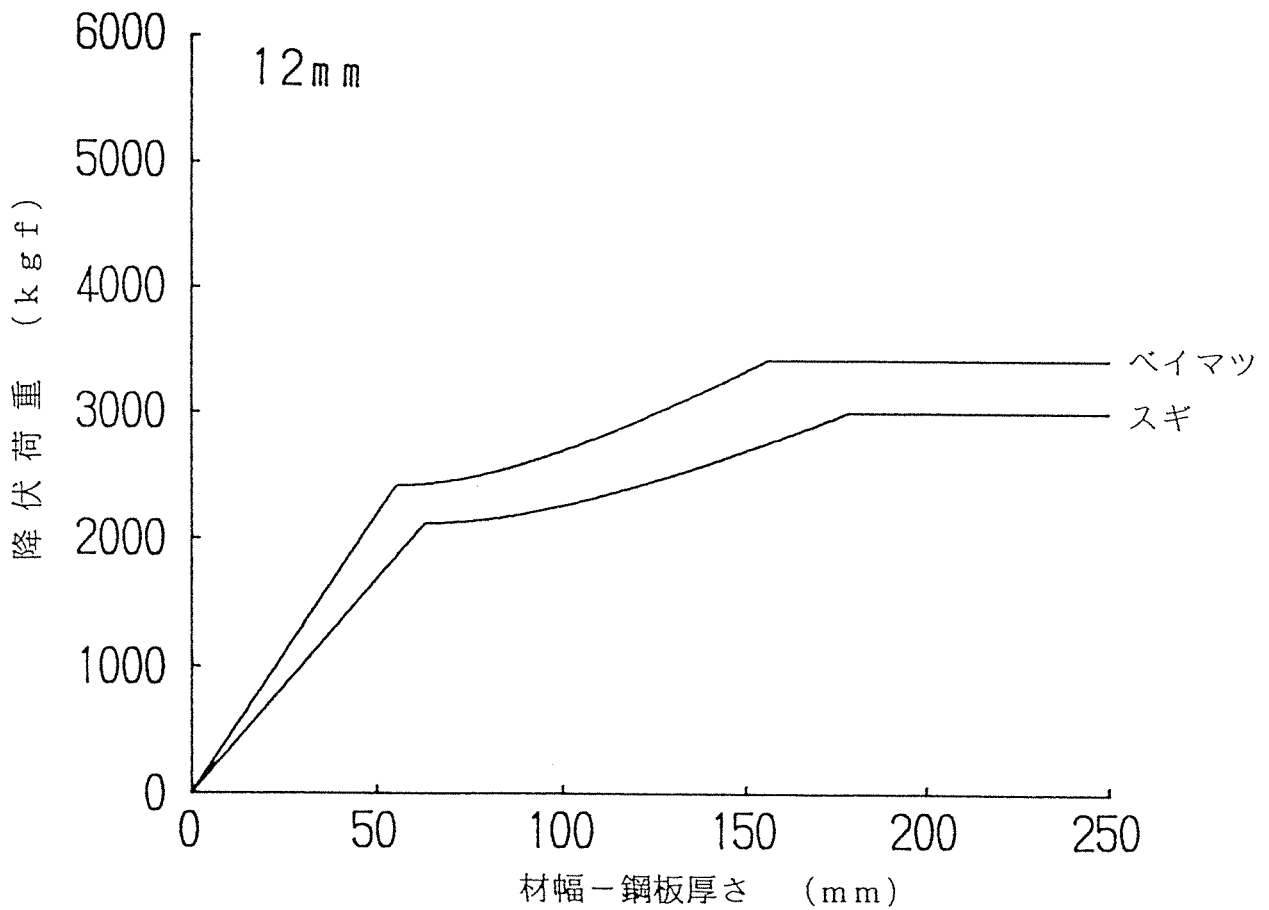
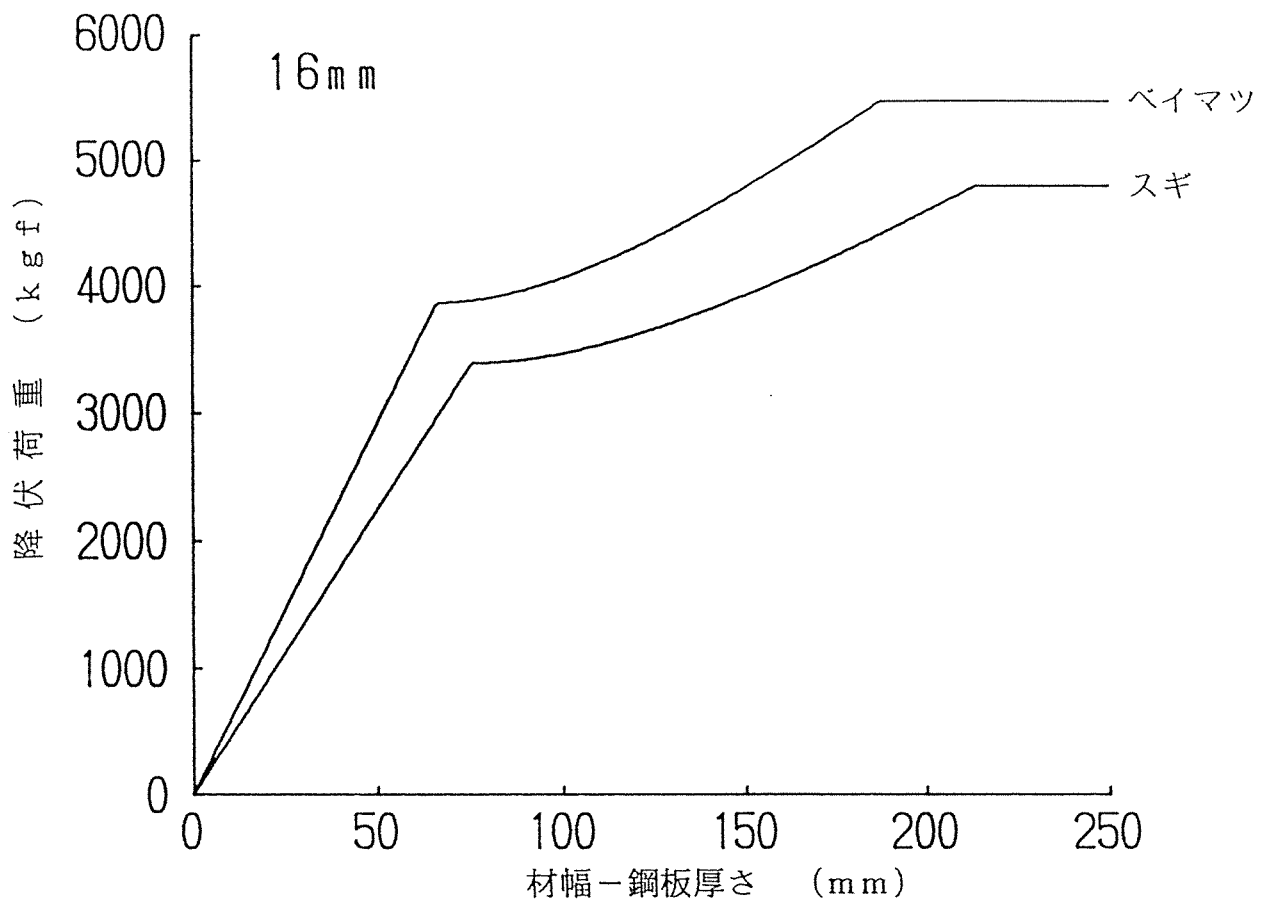


図5 LARSENの式で求めたベイマツおよびスギの降伏荷重  
 (上:ピン径16mm 下:ピン径12mm)

表1. ピン材料の性質 (カタログ記載値および実測値)

| 材料     | 種類                      | カタログ記載値 |                                |                                    | 実測値*                    |                                |
|--------|-------------------------|---------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
|        |                         | 比重      | ヤング率<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 引張, 曲げ強さ<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 曲げ降伏モーメント M<br>(kgf・cm) | 曲げ強さ<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) |
| スチール   | SS41                    | 7.85    | 2.1x10 <sup>4</sup>            | 41~52(引張り)                         | 3200 (ピン径16mm)          | 53                             |
| セラミックス | シノニアセラミックス<br>(東ソー ZYM) | 6.05    | 2.0x10 <sup>4</sup>            | 120 (曲げ)                           | 2430 (ピン径16mm<br>ピンは破壊) | 60                             |
| FRP    | ガラス布基材<br>ホリミト棒         | 1.9     | 2.5x10 <sup>3</sup>            | 35 (引張り)<br>56 (曲げ)                | 3516 (ピン径20mm<br>ピンは破壊) | 45                             |

\*: スパン90mm 中央集中荷重方式、試験体は接合部試験に用いたものと同じもの

表2 ドリフトピン接合部せん断試験の結果  
(スギおよびベイマツ集成材にスチール、セラミックス、FRP製のピン打ち)

| 樹種   | ピンの材料  | ピン径<br>d (mm) | P <sub>0.5</sub><br>(kgf) | 直線傾き<br>(kgf/mm) | P <sub>PL</sub><br>(kgf) | d <sub>PL</sub><br>(mm) | P <sub>max</sub><br>(kgf) | d <sub>max</sub><br>(mm) | 降伏荷重<br>計算値 |
|------|--------|---------------|---------------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|
| スギ   | スチール   | 16            | 1780                      | 3995             | 1788                     | 0.49                    | 3813                      | 13.30                    | 3472        |
|      | セラミックス | 16            | 1536                      | 3369             | 1830                     | 0.63                    | 1990                      | 0.71                     | 2136        |
|      | FRP    | 20            | 1100                      | 2052             | 1957                     | 0.94                    | 3162                      | 1.73                     | 3090        |
| ベイマツ | スチール   | 16            | 2214                      | 4794             | 1723                     | 0.36                    | 4591                      | 15.28                    | 3873        |
|      | セラミックス | 16            | 1738*                     | 4468             | 1704                     | 0.38                    | 1738                      | 0.42                     | 2136        |
|      | FRP    | 20            | 1426                      | 2651             | 2204                     | 0.82                    | 3539                      | 1.52                     | 3090        |

\*: 最大荷重 (P<sub>max</sub>) を表示

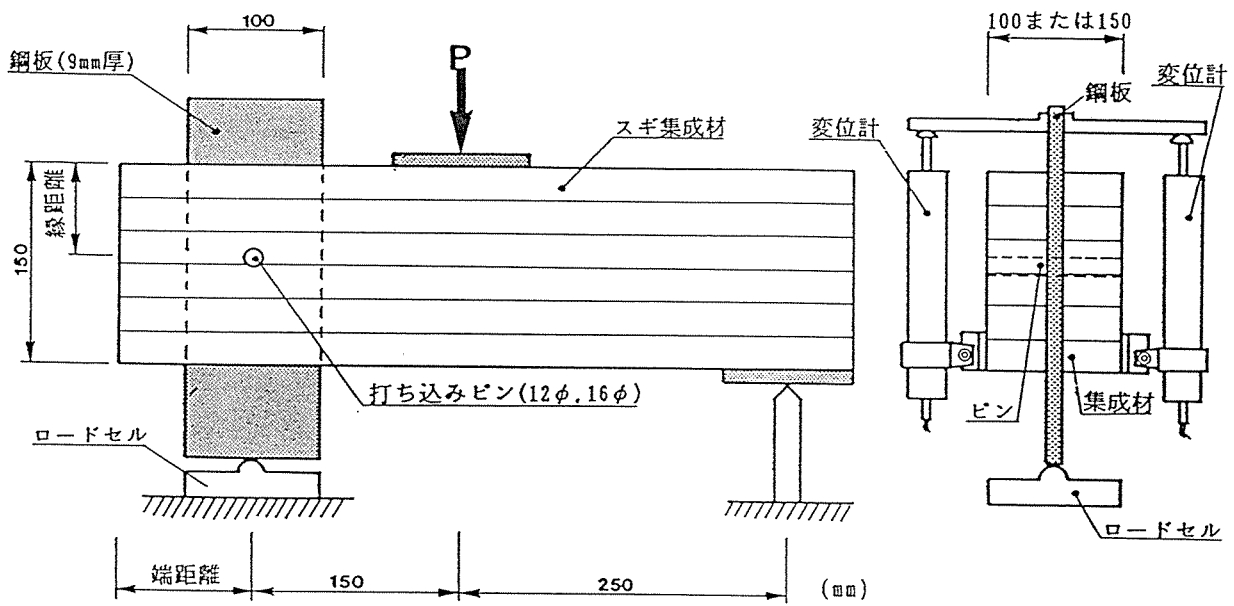


図6 繊維に直交する方向のドリフトピン接合部の耐力  
 — 試験方法 —

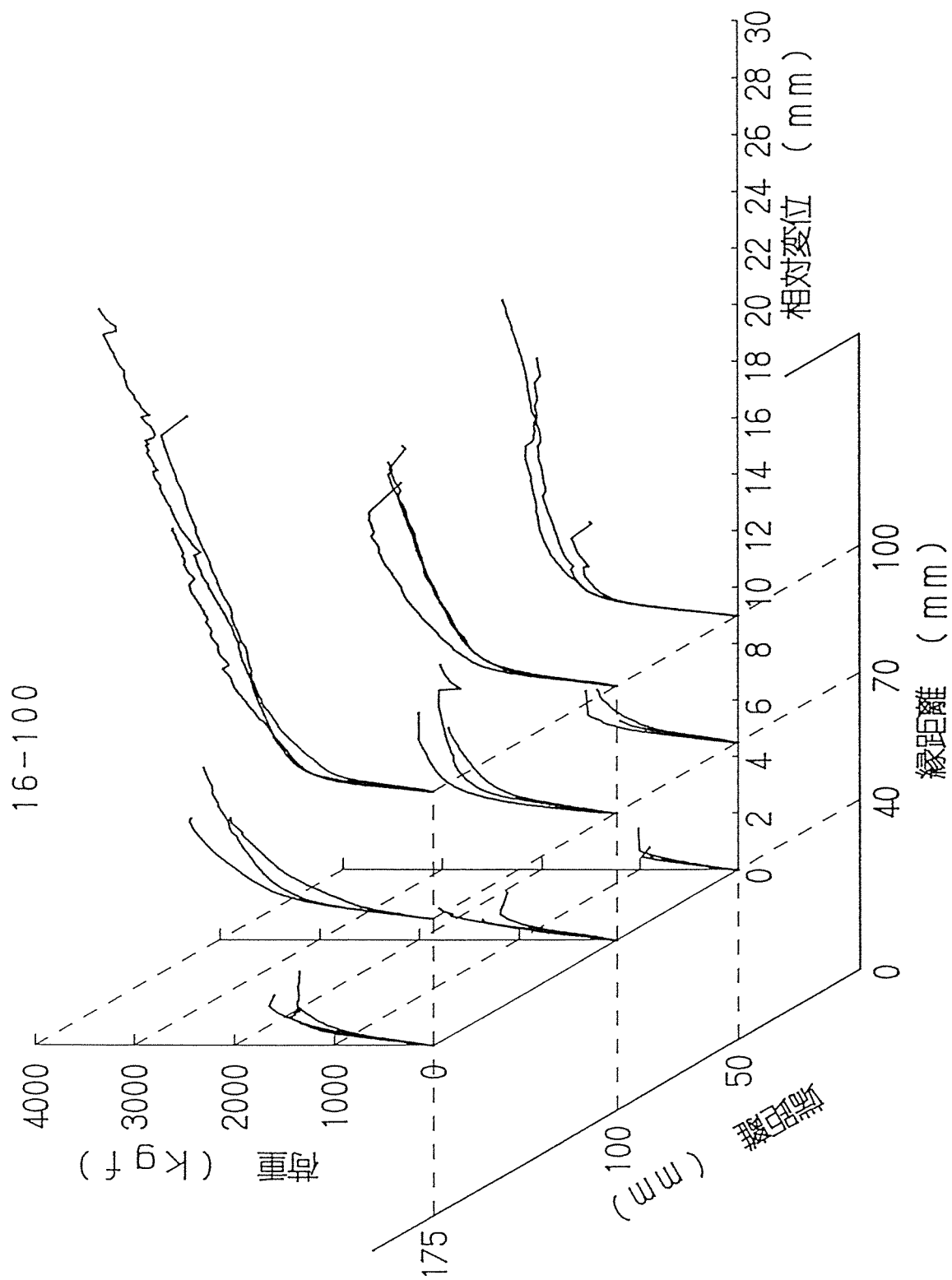


図7 繊維に直交方向加力時の荷重-相対変位曲線 (ピン径16mm、長さ100mm)

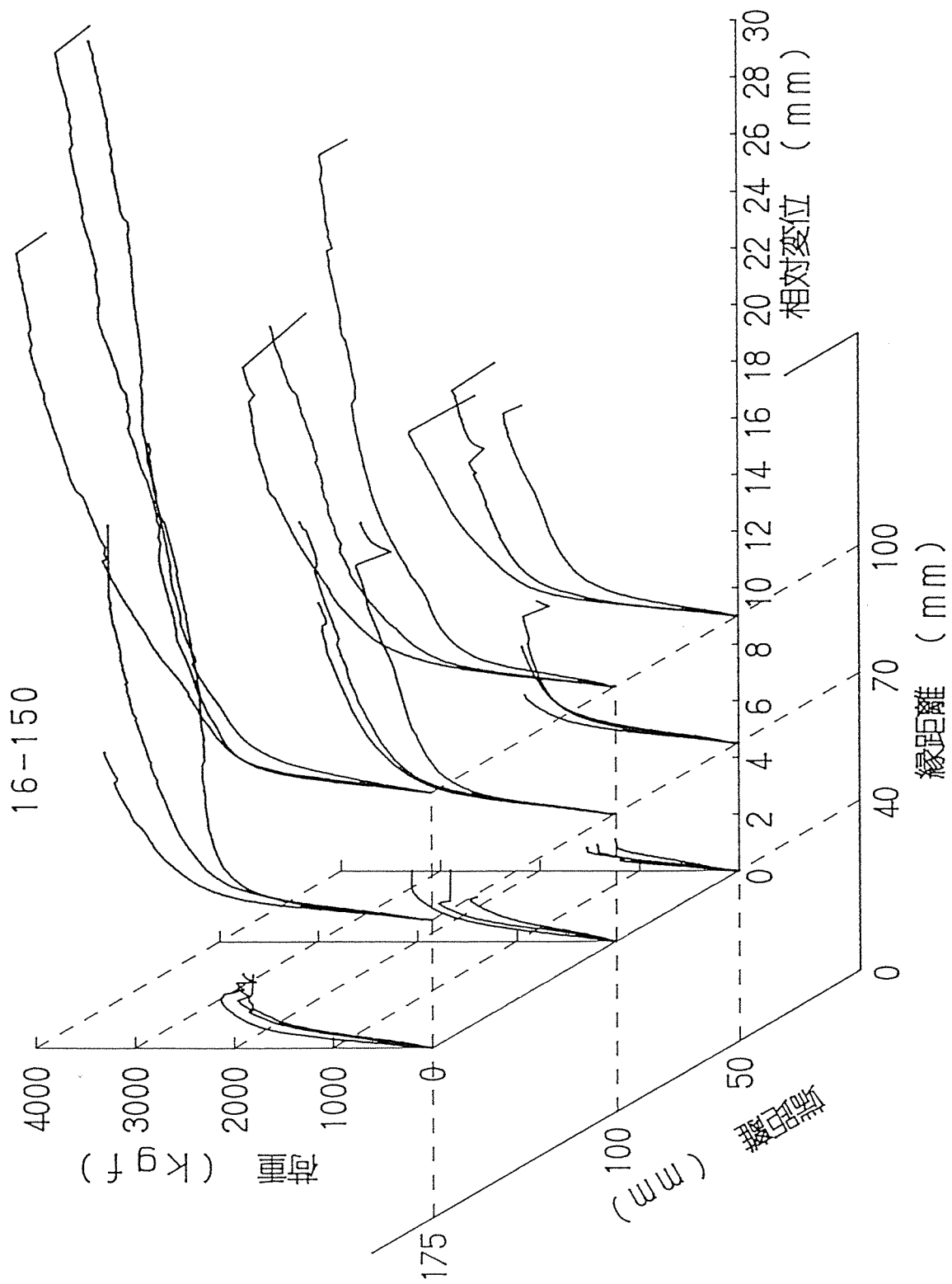


図8 繊維に直交方向加力時の荷重-相対変位曲線 (ピン径16mm、長さ150mm)

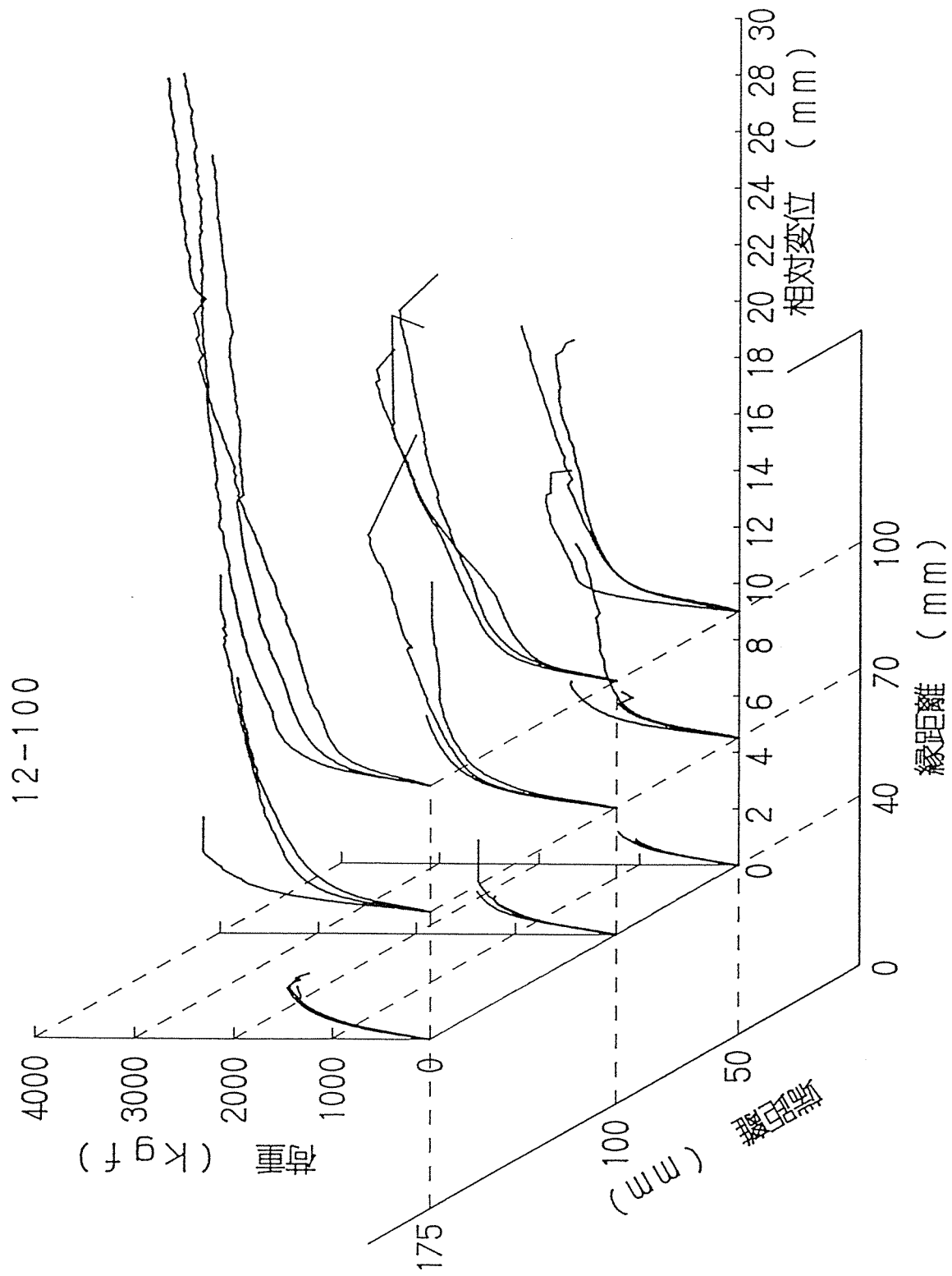


図9 繊維に直交方向加力時の荷重-相対変位曲線 (ピン径12mm、長さ100mm)

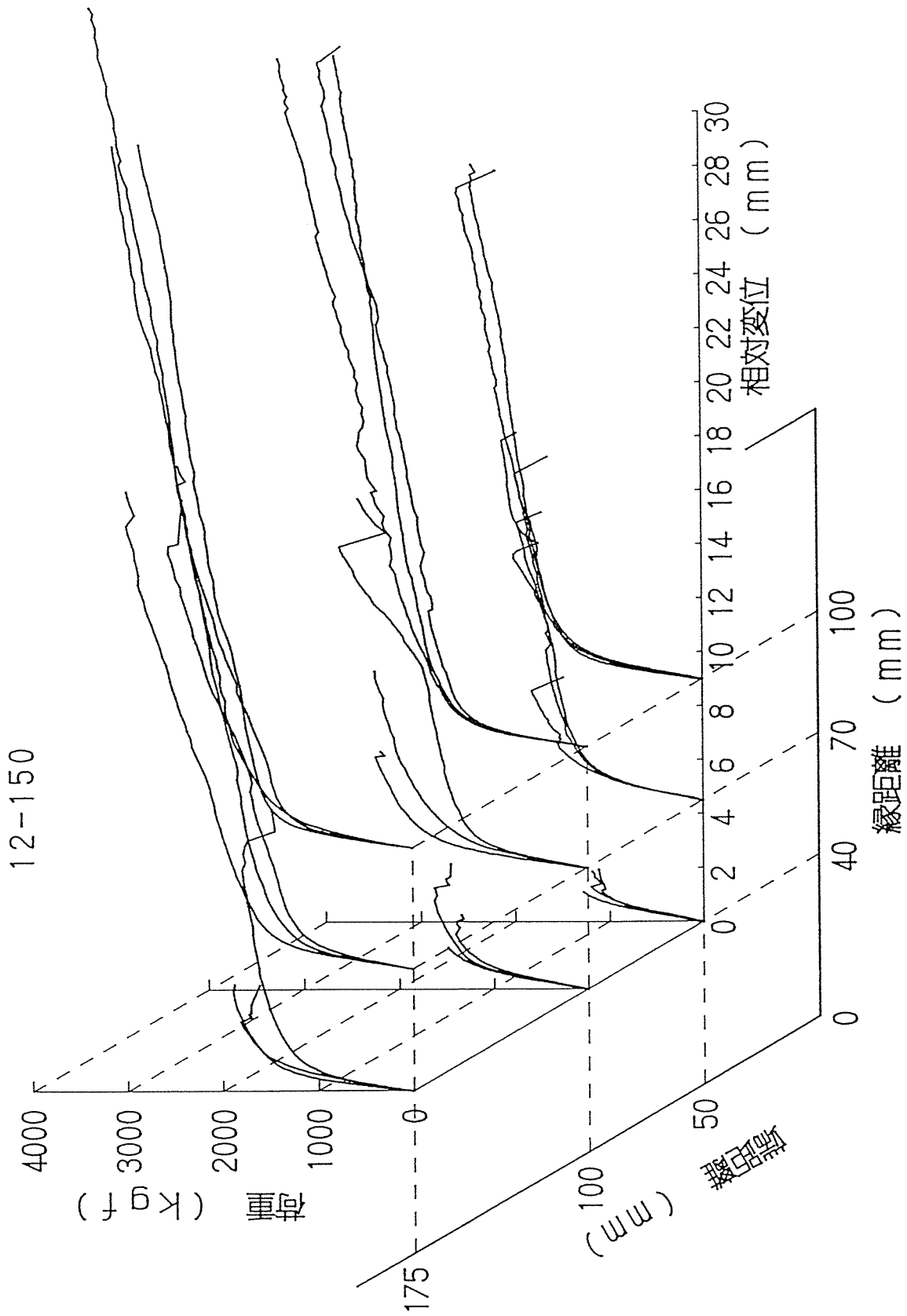
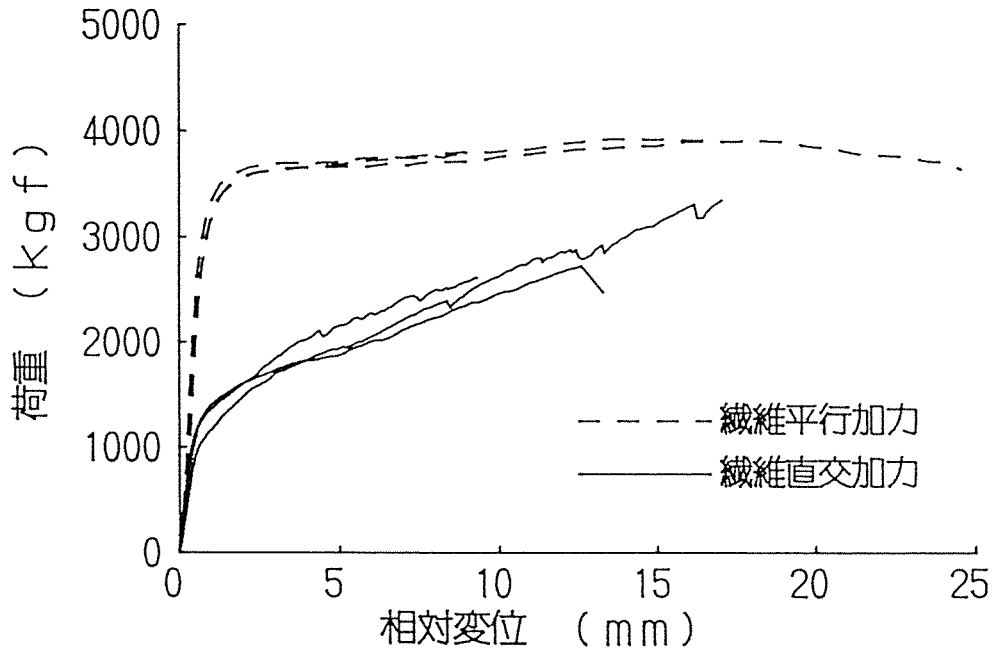


図10 繊維に直交方向加力時の荷重—相対変位曲線 (ピン径12mm、長さ150mm)



1610



1615

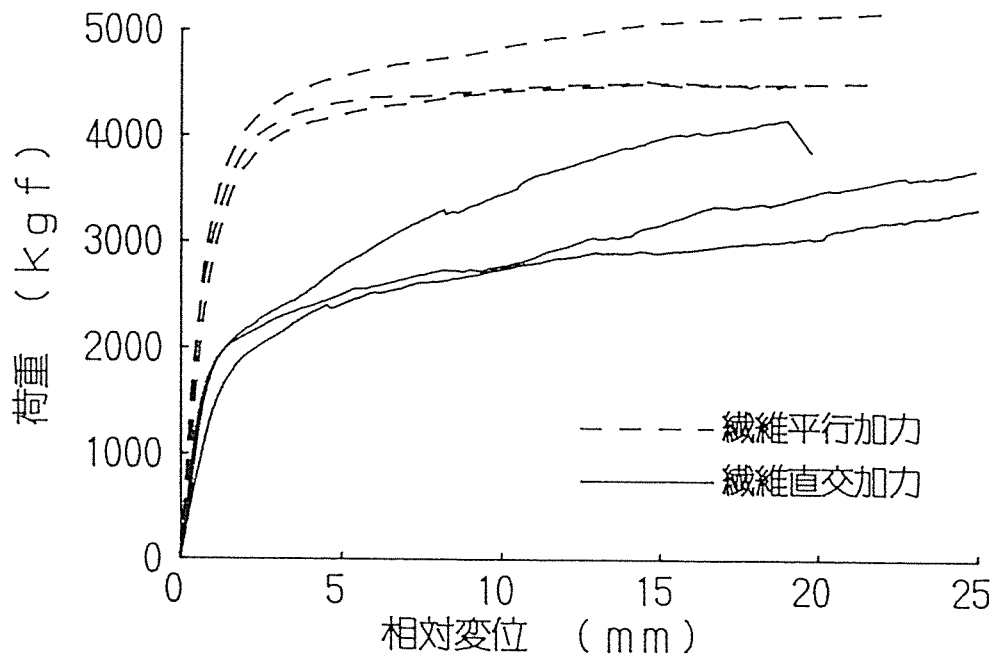
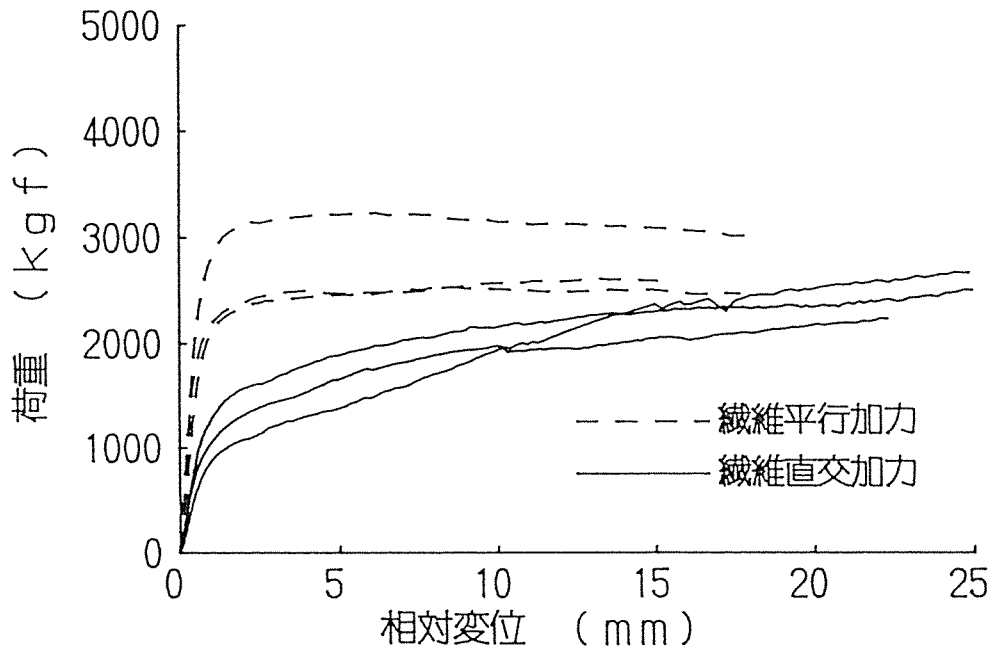


図 1 1 繊維に平行方向加力と直交方向加力  
(ピン径16mm、上:長さ100mm、下:長さ150mm)

1210



1215

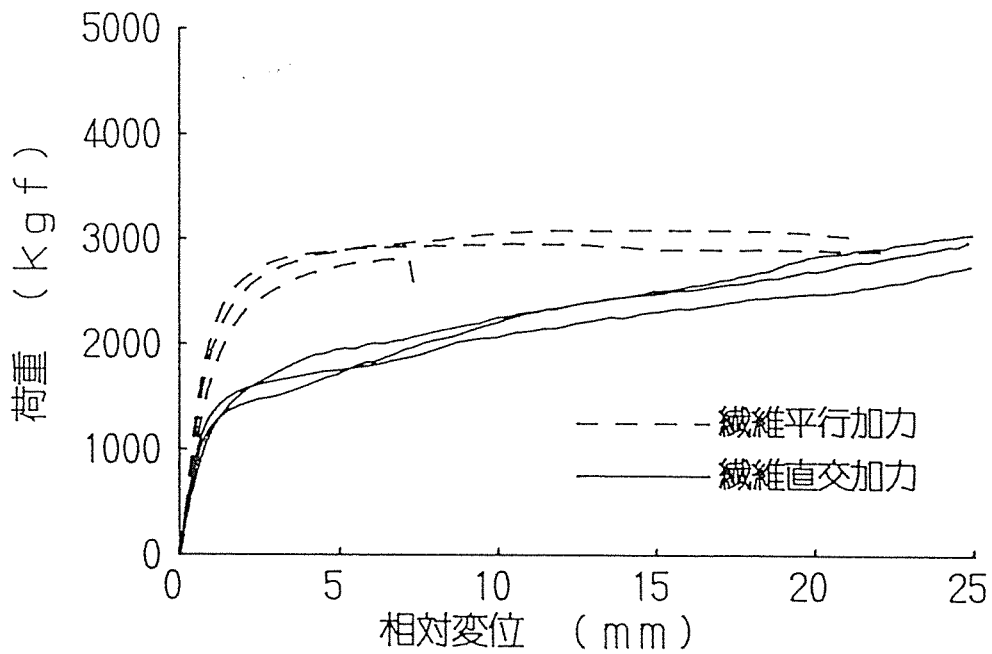


図 1 2 繊維に平行方向加力と直交方向加力  
(ピン径12mm、上:長さ100mm、下:長さ150mm)

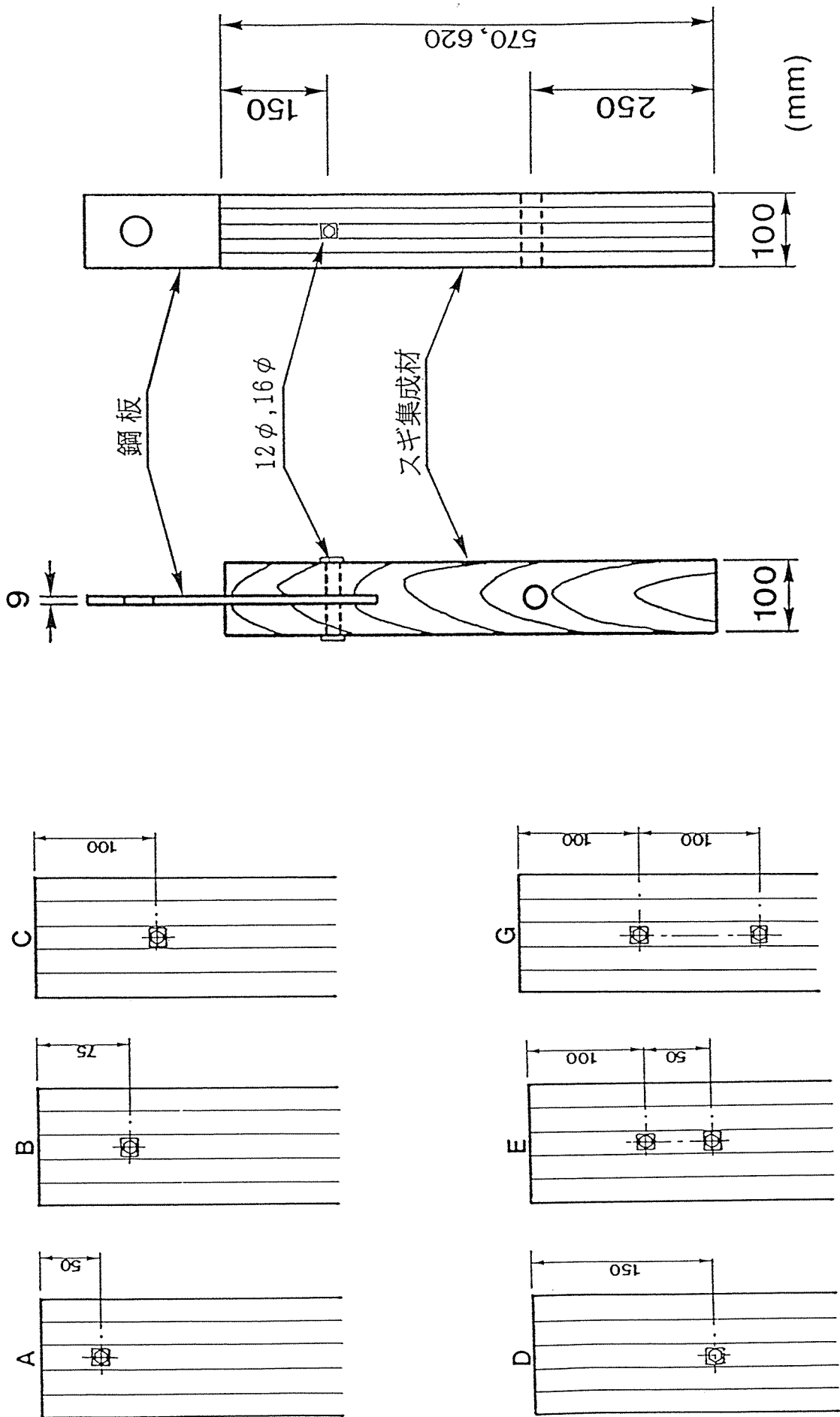


図13. ボルトの繊維平行方向の耐力試験

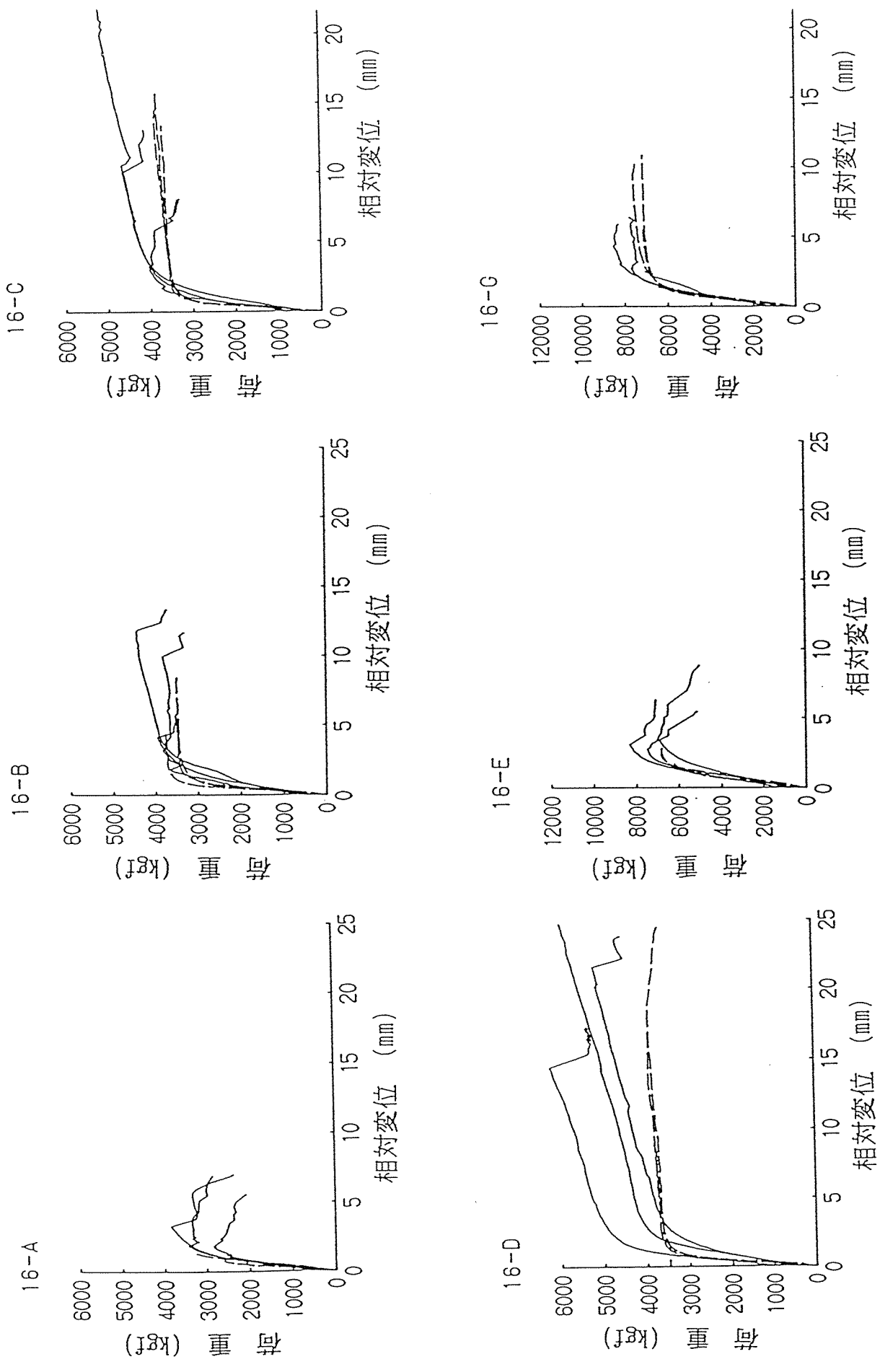
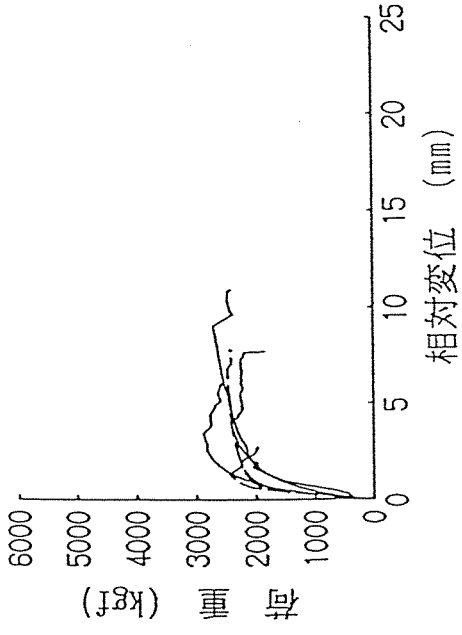
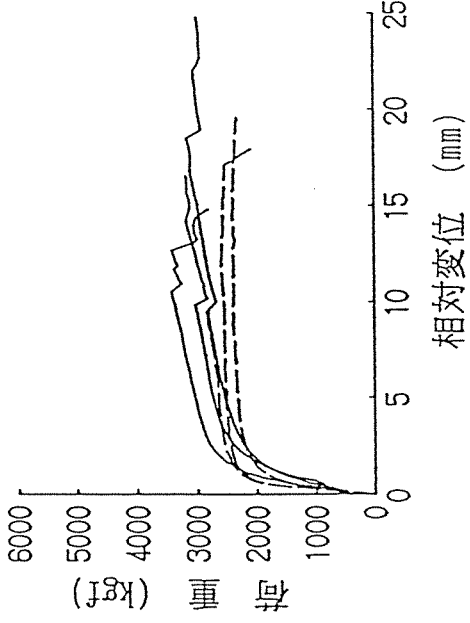


図14. 繊維に平行方向加力時の荷重-相対変位曲線 (ボルト、ピン径 16mm、長さ 100mm)  
 ————— ボルト  
 - - - - - ドリフトピン

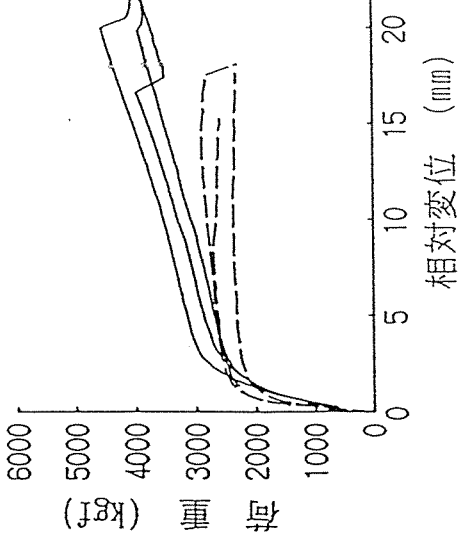
12-A



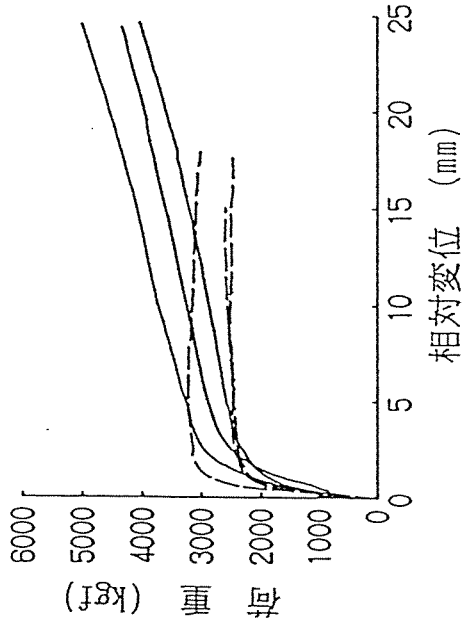
12-B



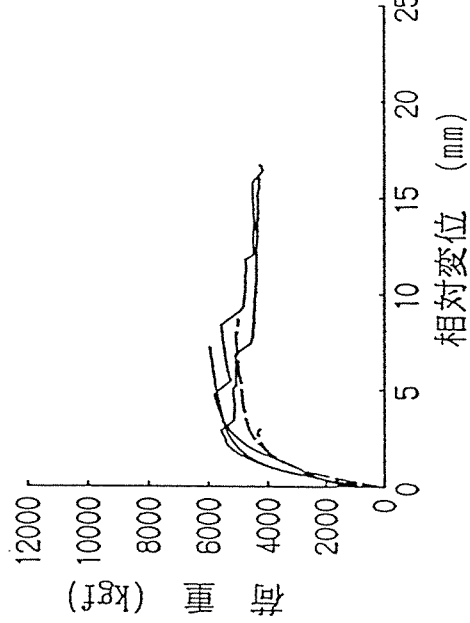
12-C



12-D



12-E



12-G

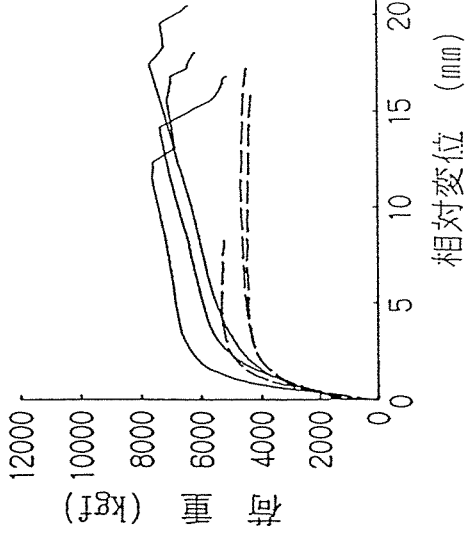


図15. 繊維に平行方向加力時の荷重—相対変位曲線 (ボルト、ピン径 12mm、長さ 100mm)  
 — ボルト      - - - - - ドリフトピン

表3. 鋼板挿入式ボルト接合とドリフトピン接合の強度性能の比較  
 (スギ集成材、繊維に平行方向加力、3体の平均値)

| ピン径 | タイプ | 1mm変位時荷重 (kgf) |        |        | 最大荷重 (kgf) |        |        | 短期許容せん断耐力に対する最大荷重の比* |        |
|-----|-----|----------------|--------|--------|------------|--------|--------|----------------------|--------|
|     |     | ボルト            | ドリフトピン | ボルト/ピン | ボルト        | ドリフトピン | ボルト/ピン | ボルト                  | ドリフトピン |
| 16φ | A   | 2416           | 2539   | 0.95   | 3391       | 2835   | 1.20   | 2.55                 | 2.13   |
|     | B   | 2310           | 3152   | 0.73   | 4087       | 3614   | 1.13   | 3.07                 | 2.72   |
|     | C   | 2658           | 3203   | 0.83   | 4648       | 3833   | 1.21   | 3.50                 | 2.88   |
|     | D   | 2710           | 3225   | 0.84   | 5972       | 3888   | 1.54   | 4.49                 | 2.93   |
|     | E   | 2219           | 2440   | 0.91   | 3818       | 3322   | 1.15   | 2.87                 | 2.50   |
|     | G   | 2484           | 2657   | 0.93   | 4261       | 3663   | 1.16   | 3.21                 | 2.76   |
|     | 12φ | A              | 1709   | 2134   | 0.80       | 2690   | 2437   | 1.10                 | 3.32   |
| B   |     | 1664           | 2080   | 0.80   | 3274       | 2616   | 1.25   | 4.04                 | 3.23   |
| C   |     | 1693           | 2107   | 0.80   | 4366       | 2673   | 1.63   | 5.39                 | 3.30   |
| D   |     | 1808           | 2363   | 0.77   | 5329       | 2800   | 1.90   | 6.58                 | 3.46   |
| E   |     | 1791           | 1668   | 1.07   | 2906       | 2402   | 1.21   | 3.59                 | 2.97   |
| G   |     | 1871           | 1669   | 1.12   | 3788       | 2423   | 1.56   | 4.68                 | 2.99   |

\*) 短期許容せん断耐力    16mm 1329kgf    (ボルト、ドリフトピンとも)  
                                  12mm 810kgf

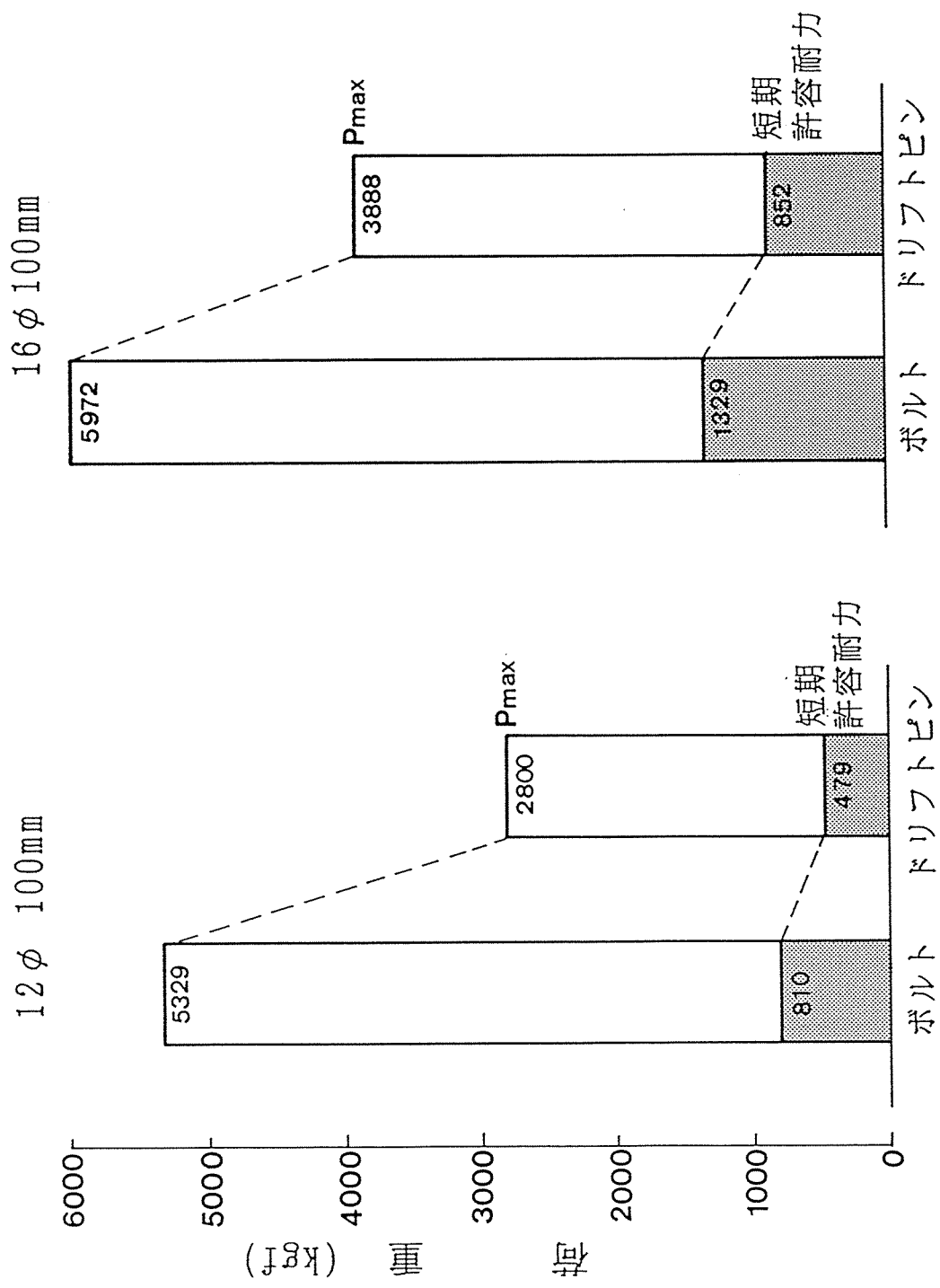


図16. 木構造計算規準によるボルトおよびドリフトピンの短期許容せん断耐力  
(直径 12mm および 16mm、長さ 100mm)

## 5. スギのめりこみ圧縮試験

### 5.1 実験の目的

杉材のめりこみ圧縮に関する性状を明らかにする。この実験では、縁端距離と材厚を主なパラメータとして変化させたときの、初期剛性と弾性限界荷重の変化を確認する。

### 5.2 実験の実施場所

パネ協中央試験場内、20t パネル試験機を用いて行った。

### 5.3 実験の方法と試験体

X方向を繊維方向とする。

圧縮面:  $x_p \times y_p$

端距離:  $x_1, x_2$

縁距離:  $y_1, y_2$

材厚:  $z_0$

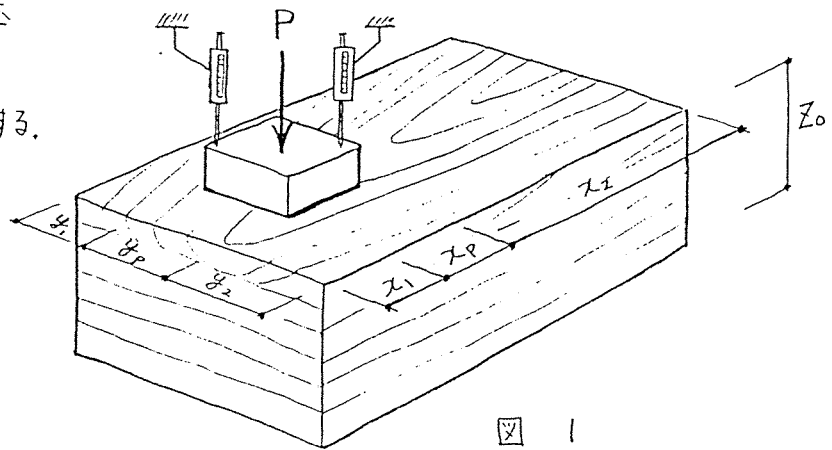


図 1 に示すような、直方体木材の上に 25mm 厚の鉄片をのせ、その上から加圧する方法とした。変形はジャッキの加圧板の対角2点を測定し、その平均値をとった。

- 木材の樹種と等級は、スギの JAS 1 等級品を使用した。
- 圧縮面積  $x_p \times y_p = 50 \times 50$  (以後、長この単位は mm) の 1 種類のみとした。
- 材厚  $z_0$  は、20, 40, 80, 160 の 4 種類とした。材厚 80 と 160 のものは、ラミナ厚 20mm、積層面が加圧表面と平行となるようなスギ集成材を用いた。
- 端距離  $x_1, x_2$  と縁距離  $y_1, y_2$  の組合せ  $(x_1, x_2, y_1, y_2)$  は、以下のとおりとした。

記号  $(x_1, x_2, y_1, y_2)$

a (0, 300, 0, 0)

b (20, 280, 0, 0)

c (50, 250, 0, 0)

d (150, 150, 0, 0)

e (0, 300, 50, 50)

f (20, 280, 50, 50)

g (50, 250, 50, 50)

h (150, 150, 50, 50)

記号  $(x_1, x_2, y_1, y_2)$

i (0, 0, 0, 100)

j (0, 0, 10, 90)

k (0, 0, 25, 75)

l (0, 0, 50, 50)

m (150, 150, 0, 100)

n (150, 150, 10, 90)

o (150, 150, 25, 75)

p (0, 0, 0, 0)



・ 試験体の種類と数

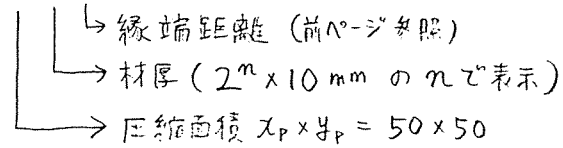
圧縮面積 材厚 縁端距離

$$1種 \times 4種 \times 16種 = 64種類$$

1種類につき5体ずつ、計  $64 \times 5 = 320$ 体 行った。

・ 試験体記号の説明

A3f-04



#### 5.4. 測定項目

荷重  $P$  と変位  $\delta$  の他に、以下の物性をその場で測定した。

- ① 芯材 or 辺材 の区別
- ② 含水率
- ③ 年輪幅
- ④ 比重

①は、加圧部について目視で判断し、芯材を+1、辺材を-1、両方にまたがるものを0とした。

②は、加圧部の繊維方向の前後数cm以内の表面2ヶ所の平均値とした。

③は、加圧部に近い方の端部断面の、加圧部からの延長線上にある年輪と表面に近い方から1cm程度の深さまでの平均年輪幅とした。

④は、試験体が寸法どおり正しく作られているものと仮定して、その重量を測定し、体積で割って求めた。従って、材厚80と160の集積材は、表面ラミナの比重ではなく、全体の平均値になっている。

なお、節はなるべく加圧部から遠ざけるように配慮した。

加力は、めりこみ変位が20mm又は5tに達した時点で打ち切った。それ以前に試験体が割れたりしたものは、その時点で打ち切った。また、20mm厚のものは、10mm位めりこんだ時点でつぶれキって急激に荷重が上がり始める傾向を示したため、その上がり始めのあたりで打ち切った。

#### 5.5 試験結果

次ページ以降に実験結果の一覧表(320体全部)と、5体中のうち1体の写真と  $P$ - $\delta$  グラフ(64種類全部)を示す。

## 実験結果一覽表

| 番号   |   | 芯または辺<br>x 6 | 含水率<br>x 7 | 年輪幅<br>x 8 | 比重<br>x 9 | 初期変位<br>y1 | 降伏点<br>y2 |
|------|---|--------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|
| A1a- | 1 | 1            | 13.3       | 6.0        | 0.443     | 0.41       | 1375      |
| A1a- | 2 | 1            | 13.3       | 4.0        | 0.426     | 0.70       | 1073      |
| A1a- | 3 | 1            | 13.5       | 5.0        | 0.420     | 0.38       | 1207      |
| A1a- | 4 | 0            | 11.0       | 6.0        | 0.409     | 0.46       | 873       |
| A1a- | 5 | 1            | 13.0       | 6.0        | 0.426     | 0.37       | 1339      |
| A1b- | 1 | 1            | 12.5       | 5.0        | 0.428     | 0.39       | 1296      |
| A1b- | 2 | -1           | 10.5       | 2.5        | 0.371     | 0.59       | 829       |
| A1b- | 3 | 0            | 11.0       | 2.5        | 0.377     | 0.56       | 751       |
| A1b- | 4 | 1            | 13.0       | 5.0        | 0.446     | 0.41       | 1322      |
| A1b- | 5 | 0            | 10.0       | 2.5        | 0.366     | 0.65       | 760       |
| A1c- | 1 | 0            | 10.5       | 2.5        | 0.369     | 0.69       | 748       |
| A1c- | 2 | 0            | 10.3       | 3.0        | 0.371     | 0.38       | 1130      |
| A1c- | 3 | 1            | 10.3       | 3.5        | 0.443     | 0.34       | 1410      |
| A1c- | 4 | -1           | 10.5       | 2.5        | 0.391     | 0.40       | 1093      |
| A1c- | 5 | 0            | 10.0       | 2.5        | 0.369     | 0.68       | 874       |
| A1d- | 1 | 1            | 11.0       | 3.5        | 0.437     | 0.35       | 1260      |
| A1d- | 2 | 1            | 12.8       | 4.0        | 0.437     | 0.57       | 1409      |
| A1d- | 3 | 0            | 11.0       | 3.5        | 0.380     | 0.39       | 1001      |
| A1d- | 4 | 1            | 12.3       | 4.0        | 0.403     | 0.49       | 986       |
| A1d- | 5 | 1            | 10.5       | 3.5        | 0.360     | 0.41       | 1072      |
| A1e- | 1 | 1            | 12.0       | 4.0        | 0.436     | 0.76       | 1578      |
| A1e- | 2 | 1            | 11.5       | 4.0        | 0.446     | 0.52       | 1250      |
| A1e- | 3 | 0            | 11.0       | 3.0        | 0.450     | 0.42       | 1297      |
| A1e- | 4 | 1            | 11.2       | 3.5        | 0.399     | 0.47       | 945       |
| A1e- | 5 | 0            | 11.0       | 4.0        | 0.475     | 0.41       | 1245      |
| A1f- | 1 | 1            | 12.6       | 4.0        | 0.448     | 0.37       | 1475      |
| A1f- | 2 | 1            | 11.2       | 3.5        | 0.454     | 0.38       | 1431      |
| A1f- | 3 | 1            | 11.5       | 6.0        | 0.422     | 0.37       | 1309      |
| A1f- | 4 | 1            | 11.3       | 5.0        | 0.485     | 0.36       | 2022      |
| A1f- | 5 | 1            | 12.3       | 3.0        | 0.430     | 0.40       | 1395      |
| A1g- | 1 | 1            | 12.2       | 5.0        | 0.418     | 0.38       | 1404      |
| A1g- | 2 | 1            | 10.7       | 3.0        | 0.399     | 0.49       | 1304      |
| A1g- | 3 | 1            | 12.0       | 5.0        | 0.438     | 0.34       | 2028      |
| A1g- | 4 | 1            | 12.0       | 4.5        | 0.427     | 0.36       | 1544      |
| A1g- | 5 | 1            | 12.0       | 5.0        | 0.422     | 0.40       | 1770      |
| A1h- | 1 | 1            | 11.8       | 5.0        | 0.390     | 0.38       | 1490      |
| A1h- | 2 | 1            | 10.3       | 5.5        | 0.440     | 0.37       | 1151      |
| A1h- | 3 | 1            | 11.0       | 4.0        | 0.439     | 0.42       | 1192      |
| A1h- | 4 | 1            | 10.6       | 7.0        | 0.433     | 0.43       | 1203      |
| A1h- | 5 | 1            | 10.5       | 5.0        | 0.439     | 0.41       | 1055      |
| A1i- | 1 | 0            | 12.5       | 4.5        | 0.447     | 1.00       | 880       |
| A1i- | 2 | 1            | 12.5       | 3.5        | 0.420     | 0.74       | 834       |
| A1i- | 3 | 1            | 10.8       | 4.5        | 0.447     | 0.61       | 1433      |
| A1i- | 4 | 0            | 10.5       | 4.5        | 0.373     | 0.75       | 812       |
| A1i- | 5 | 0            | 12.0       | 3.5        | 0.440     | 0.60       | 624       |
| A1j- | 1 | 1            | 12.2       | 4.5        | 0.427     | 0.38       | 959       |
| A1j- | 2 | 1            | 11.0       | 5.0        | 0.427     | 0.48       | 1501      |
| A1j- | 3 | 1            | 10.8       | 4.5        | 0.413     | 0.69       | 637       |
| A1j- | 4 | 1            | 12.1       | 3.5        | 0.407     | 0.76       | 923       |
| A1j- | 5 | 1            | 12.4       | 3.0        | 0.427     | 0.43       | 1050      |
| A1k- | 1 | -1           | 10.5       | 2.5        | 0.440     | 0.67       | 719       |
| A1k- | 2 | 1            | 12.0       | 4.5        | 0.427     | 0.33       | 1318      |
| A1k- | 3 | -1           | 10.0       | 2.0        | 0.440     | 0.42       | 984       |
| A1k- | 4 | 0            | 11.2       | 4.5        | 0.373     | 0.66       | 860       |
| A1k- | 5 | -1           | 9.9        | 2.5        | 0.440     | 0.51       | 741       |
| A1l- | 1 | 0            | 9.8        | 3.0        | 0.440     | 0.39       | 1166      |
| A1l- | 2 | 0            | 9.8        | 2.5        | 0.447     | 0.39       | 1080      |
| A1l- | 3 | 1            | 10.2       | 4.0        | 0.393     | 0.37       | 1288      |
| A1l- | 4 | 1            | 12.0       | 3.0        | 0.433     | 0.54       | 805       |
| A1l- | 5 | 1            | 11.0       | 4.0        | 0.393     | 0.45       | 754       |
| A1m- | 1 | 0            | 12.6       | 3.5        | 0.405     | 0.49       | 1474      |
| A1m- | 2 | 1            | 12.5       | 5.0        | 0.430     | 0.37       | 1452      |
| A1m- | 3 | 0            | 12.5       | 4.0        | 0.411     | 0.59       | 1455      |
| A1m- | 4 | 0            | 12.3       | 3.5        | 0.402     | 0.49       | 1093      |
| A1m- | 5 | 1            | 12.6       | 5.0        | 0.429     | 0.43       | 1342      |
| A1n- | 1 | 1            | 12.2       | 4.5        | 0.415     | 0.47       | 1211      |
| A1n- | 2 | 0            | 10.8       | 3.0        | 0.475     | 0.48       | 1327      |
| A1n- | 3 | 1            | 11.3       | 4.0        | 0.434     | 0.40       | 1483      |
| A1n- | 4 | 1            | 10.8       | 4.0        | 0.448     | 0.45       | 1271      |
| A1n- | 5 | 0            | 10.6       | 3.0        | 0.485     | 0.52       | 1323      |
| A1o- | 1 | 0            | 11.3       | 4.0        | 0.459     | 0.38       | 1517      |
| A1o- | 2 | 1            | 10.5       | 4.0        | 0.399     | 0.53       | 1040      |
| A1o- | 3 | 1            | 10.4       | 4.5        | 0.417     | 0.47       | 1176      |
| A1o- | 4 | 1            | 10.4       | 4.5        | 0.395     | 0.50       | 1235      |
| A1o- | 5 | 0            | 10.7       | 4.0        | 0.431     | 0.43       | 1323      |
| A1p- | 1 | 1            | 10.3       | 3.0        | 0.420     | 0.92       | 898       |
| A1p- | 2 | 0            | 9.7        | 2.5        | 0.360     | 0.46       | 786       |
| A1p- | 3 | 1            | 10.2       | 3.0        | 0.460     | 0.64       | 1118      |
| A1p- | 4 | 1            | 10.3       | 2.5        | 0.420     | 0.68       | 686       |
| A1p- | 5 | 1            | 9.5        | 3.0        | 0.440     | 0.63       | 837       |

単位の説明

① 芯材 = 1  
 辺材 = -1  
 中間 = 0

② 含水率 : %

③ 年輪幅 : mm

④ 比重 : 無次元

⑤ 初期変位 : mm/t

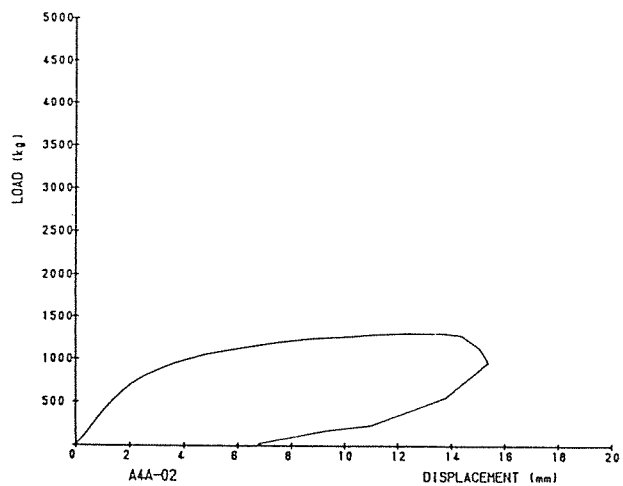
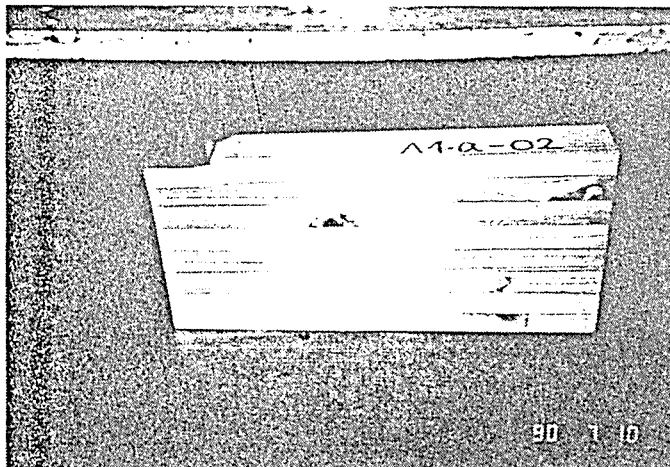
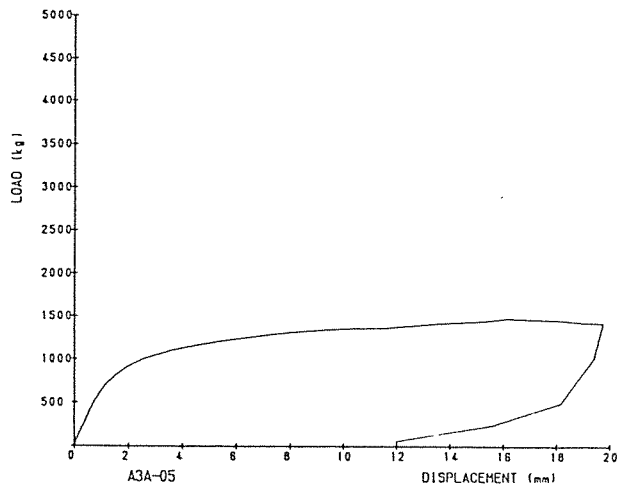
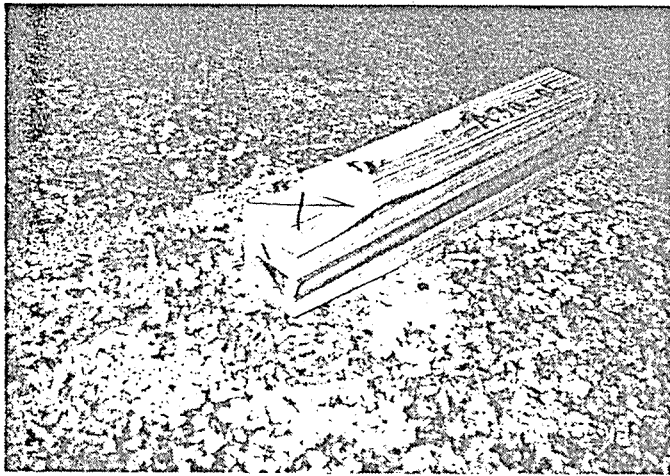
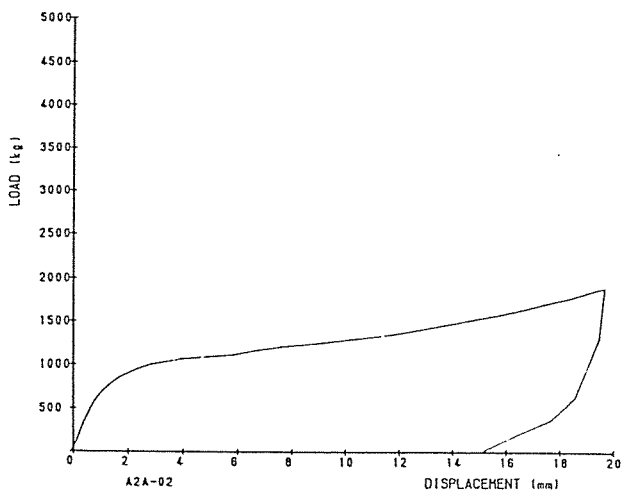
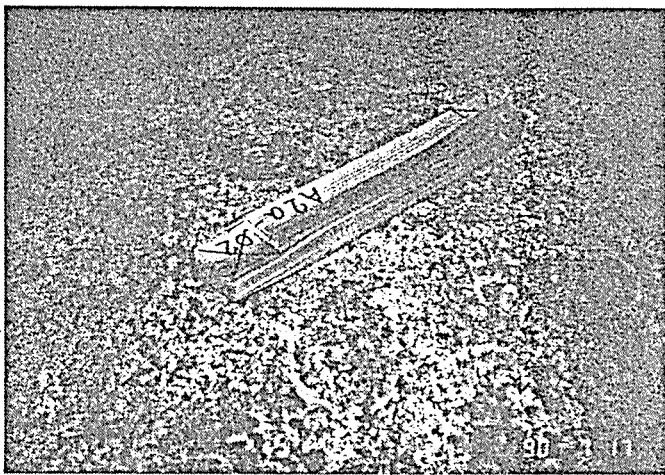
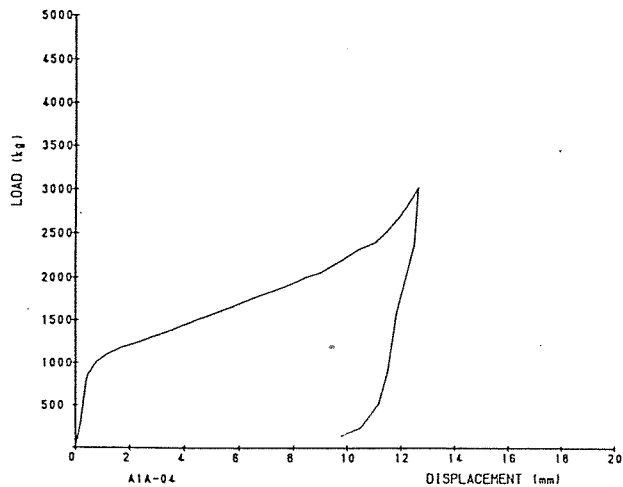
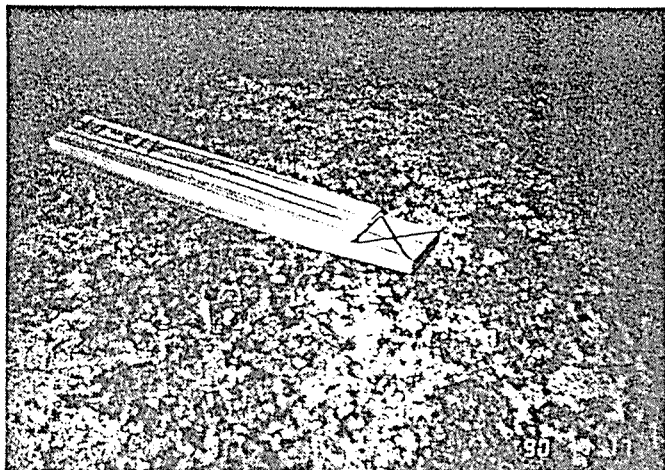
⑥ 降伏点 : kg

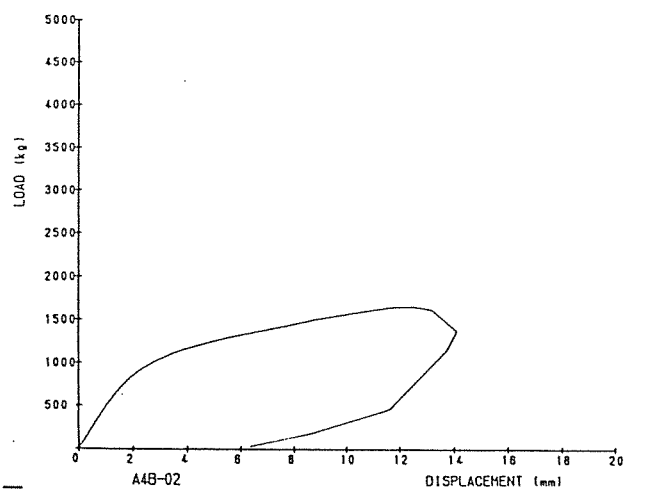
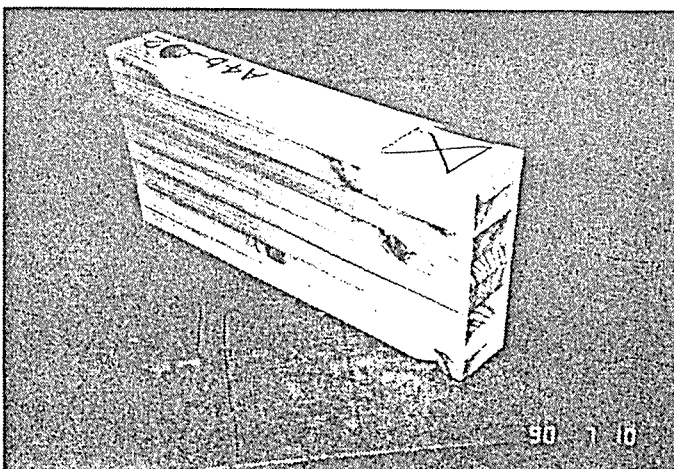
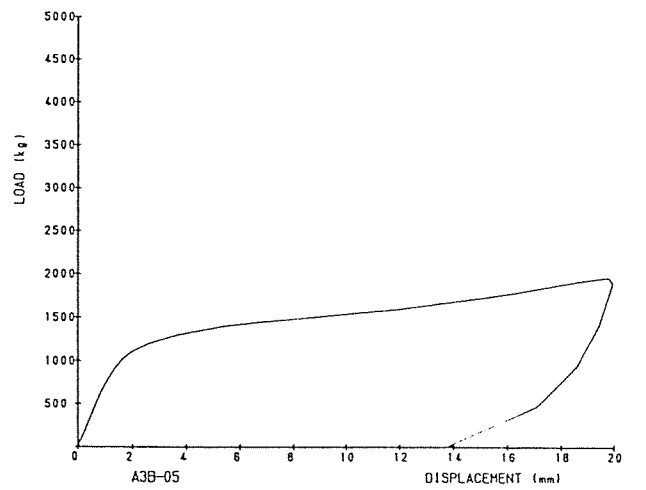
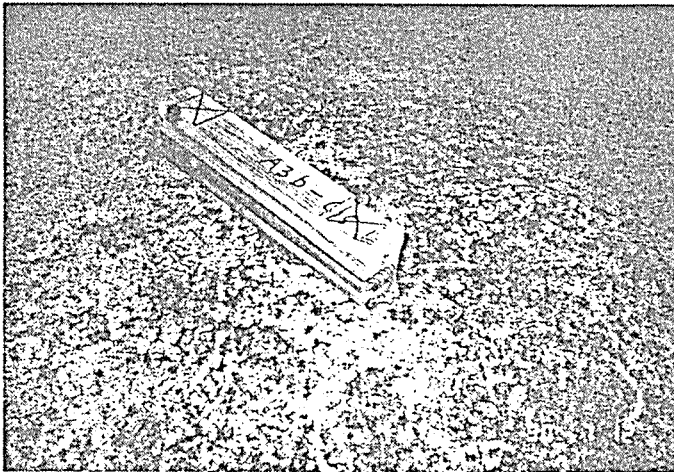
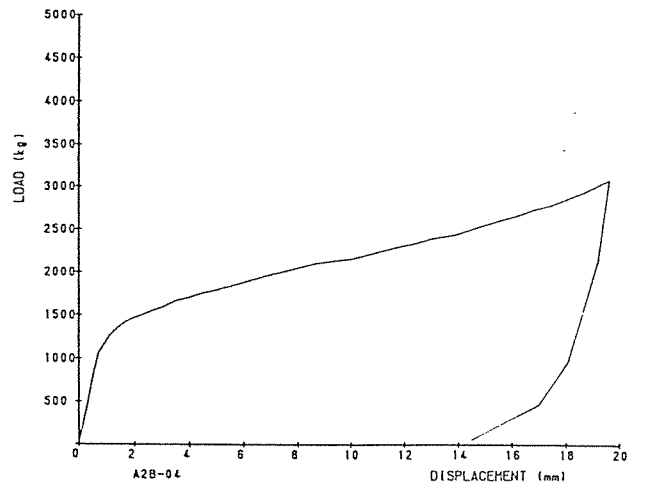
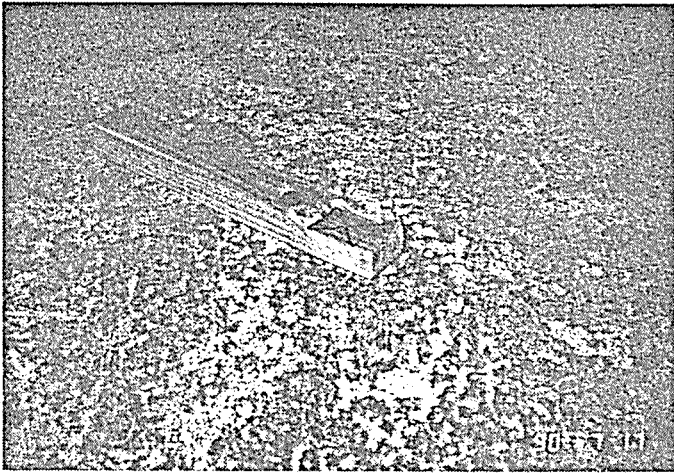
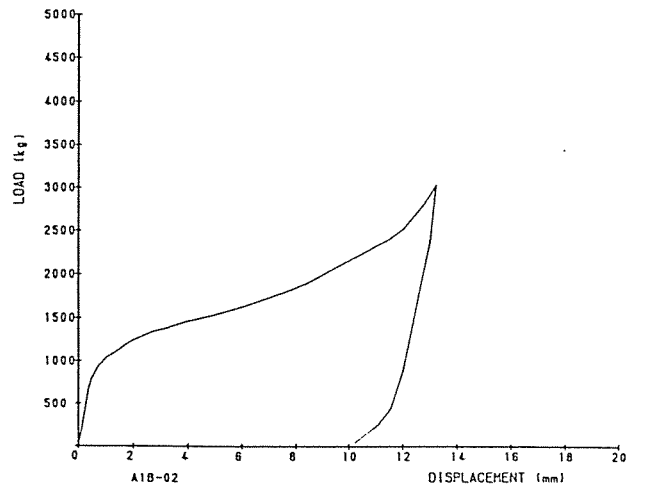
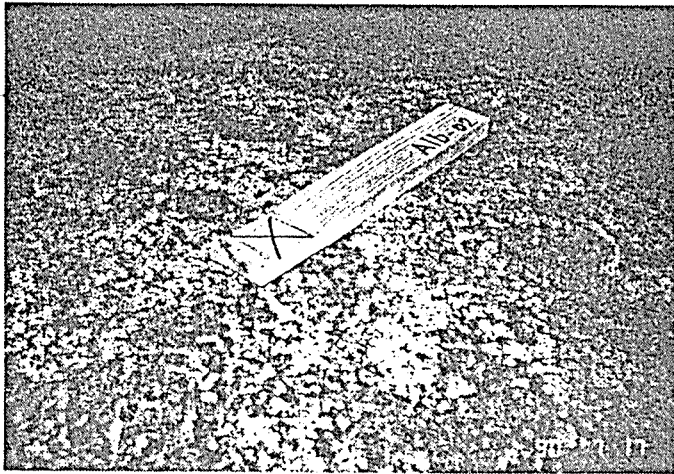
|      |   |    |      |     |       |      |      |
|------|---|----|------|-----|-------|------|------|
| A2a- | 1 | 0  | 11.0 | 3.0 | 0.351 | 1.45 | 489  |
| A2a- | 2 | 0  | 12.5 | 5.0 | 0.374 | 1.36 | 589  |
| A2a- | 3 | 1  | 12.5 | 5.0 | 0.376 | 1.37 | 648  |
| A2a- | 4 | 0  | 13.5 | 4.5 | 0.463 | 1.43 | 782  |
| A2a- | 5 | 1  | 14.5 | 4.5 | 0.429 | 0.56 | 685  |
| A2b- | 1 | 0  | 14.0 | 2.5 | 0.449 | 1.22 | 1034 |
| A2b- | 2 | 1  | 14.0 | 3.5 | 0.471 | 0.53 | 1089 |
| A2b- | 3 | 1  | 14.0 | 6.0 | 0.390 | 0.60 | 874  |
| A2b- | 4 | 1  | 15.0 | 4.5 | 0.447 | 0.63 | 1075 |
| A2b- | 5 | 0  | 12.5 | 2.5 | 0.446 | 1.02 | 870  |
| A2c- | 1 | 1  | 11.0 | 2.5 | 0.443 | 0.84 | 780  |
| A2c- | 2 | 0  | 11.0 | 2.5 | 0.441 | 0.69 | 1366 |
| A2c- | 3 | 0  | 11.0 | 4.5 | 0.387 | 0.70 | 1368 |
| A2c- | 4 | 1  | 12.0 | 5.5 | 0.381 | 0.78 | 1078 |
| A2c- | 5 | 0  | 12.0 | 4.0 | 0.384 | 0.81 | 1055 |
| A2d- | 1 | 1  | 14.0 | 5.5 | 0.447 | 0.78 | 938  |
| A2d- | 2 | 1  | 15.5 | 4.5 | 0.449 | 0.75 | 863  |
| A2d- | 3 | 0  | 13.5 | 5.0 | 0.397 | 0.74 | 1269 |
| A2d- | 4 | 0  | 13.0 | 4.5 | 0.366 | 0.76 | 1202 |
| A2d- | 5 | 1  | 17.2 | 4.5 | 0.416 | 0.88 | 992  |
| A2e- | 1 | 0  | 11.8 | 2.5 | 0.444 | 0.50 | 1007 |
| A2e- | 2 | 1  | 15.3 | 5.0 | 0.421 | 0.65 | 1740 |
| A2e- | 3 | 1  | 15.8 | 5.0 | 0.426 | 0.72 | 1529 |
| A2e- | 4 | 0  | 11.5 | 2.5 | 0.436 | 0.50 | 946  |
| A2e- | 5 | -1 | 11.0 | 2.5 | 0.446 | 0.44 | 867  |
| A2f- | 1 | 1  | 13.0 | 4.5 | 0.402 | 0.46 | 1184 |
| A2f- | 2 | 1  | 11.9 | 4.5 | 0.451 | 0.46 | 1444 |
| A2f- | 3 | 1  | 12.6 | 4.5 | 0.425 | 0.48 | 1787 |
| A2f- | 4 | 1  | 13.5 | 4.5 | 0.430 | 0.48 | 1274 |
| A2f- | 5 | 1  | 15.0 | 4.5 | 0.425 | 0.51 | 1718 |
| A2g- | 1 | 1  | 14.5 | 4.0 | 0.377 | 0.40 | 1040 |
| A2g- | 2 | 1  | 15.6 | 4.5 | 0.384 | 0.57 | 1054 |
| A2g- | 3 | 0  | 12.6 | 4.5 | 0.383 | 0.55 | 983  |
| A2g- | 4 | 0  | 12.7 | 5.0 | 0.389 | 0.65 | 956  |
| A2g- | 5 | 0  | 13.0 | 4.5 | 0.399 | 0.51 | 1101 |
| A2h- | 1 | 1  | 11.5 | 4.0 | 0.353 | 0.45 | 1181 |
| A2h- | 2 | 1  | 14.2 | 4.5 | 0.437 | 0.45 | 1349 |
| A2h- | 3 | 0  | 11.0 | 3.0 | 0.364 | 0.57 | 1016 |
| A2h- | 4 | 0  | 11.3 | 3.0 | 0.367 | 0.50 | 1110 |
| A2h- | 5 | 1  | 13.6 | 4.0 | 0.457 | 0.35 | 1645 |
| A2i- | 1 | -1 | 11.8 | 2.5 | 0.397 | 1.93 | 551  |
| A2i- | 2 | 0  | 14.5 | 5.0 | 0.403 | 1.54 | 612  |
| A2i- | 3 | 0  | 11.8 | 4.0 | 0.383 | 1.39 | 539  |
| A2i- | 4 | 0  | 13.7 | 4.5 | 0.380 | 1.92 | 672  |
| A2i- | 5 | -1 | 11.8 | 3.5 | 0.380 | 1.95 | 597  |
| A2j- | 1 | 0  | 13.0 | 5.5 | 0.387 | 1.21 | 792  |
| A2j- | 2 | -1 | 10.0 | 3.0 | 0.380 | 0.73 | 501  |
| A2j- | 3 | -1 | 11.0 | 3.0 | 0.383 | 0.93 | 661  |
| A2j- | 4 | 1  | 12.5 | 3.0 | 0.400 | 0.90 | 709  |
| A2j- | 5 | 0  | 12.0 | 5.0 | 0.447 | 1.43 | 656  |
| A2k- | 1 | 1  | 13.2 | 3.5 | 0.353 | 1.10 | 765  |
| A2k- | 2 | -1 | 11.3 | 3.5 | 0.380 | 0.45 | 830  |
| A2k- | 3 | 1  | 11.5 | 5.0 | 0.353 | 0.80 | 742  |
| A2k- | 4 | -1 | 12.5 | 3.0 | 0.377 | 0.72 | 966  |
| A2k- | 5 | 1  | 11.0 | 5.0 | 0.377 | 0.80 | 622  |
| A2l- | 1 | 1  | 12.5 | 3.5 | 0.407 | 0.59 | 900  |
| A2l- | 2 | 1  | 12.2 | 5.0 | 0.377 | 0.42 | 1297 |
| A2l- | 3 | 1  | 13.0 | 3.5 | 0.357 | 0.49 | 933  |
| A2l- | 4 | 1  | 12.0 | 3.5 | 0.347 | 0.53 | 736  |
| A2l- | 5 | -1 | 10.5 | 2.5 | 0.387 | 0.73 | 954  |
| A2m- | 1 | 1  | 11.5 | 3.0 | 0.392 | 0.95 | 1147 |
| A2m- | 2 | 1  | 11.3 | 3.0 | 0.391 | 0.92 | 1123 |
| A2m- | 3 | 1  | 11.5 | 3.0 | 0.404 | 0.88 | 1220 |
| A2m- | 4 | 1  | 12.1 | 4.0 | 0.990 | 1.02 | 1250 |
| A2m- | 5 | 0  | 10.5 | 3.0 | 0.433 | 1.06 | 937  |
| A2n- | 1 | 0  | 11.2 | 3.5 | 0.337 | 0.85 | 998  |
| A2n- | 2 | -1 | 11.2 | 4.0 | 0.343 | 1.00 | 841  |
| A2n- | 3 | -1 | 11.5 | 4.0 | 0.336 | 1.06 | 828  |
| A2n- | 4 | 0  | 11.3 | 3.5 | 0.325 | 0.84 | 950  |
| A2n- | 5 | -1 | 10.0 | 4.0 | 0.327 | 0.94 | 976  |
| A2o- | 1 | 1  | 13.5 | 4.0 | 0.381 | 0.56 | 1012 |
| A2o- | 2 | 1  | 15.0 | 3.5 | 0.349 | 0.67 | 1270 |
| A2o- | 3 | 1  | 15.5 | 3.0 | 0.363 | 0.59 | 1080 |
| A2o- | 4 | 0  | 13.7 | 4.5 | 0.428 | 0.69 | 1188 |
| A2o- | 5 | 1  | 14.6 | 4.0 | 0.442 | 0.53 | 1100 |
| A2p- | 1 | 1  | 15.0 | 2.0 | 0.420 | 1.29 | 596  |
| A2p- | 2 | -1 | 11.2 | 4.5 | 0.410 | 1.28 | 676  |
| A2p- | 3 | -1 | 10.4 | 3.5 | 0.340 | 2.09 | 687  |
| A2p- | 4 | 1  | 13.0 | 2.5 | 0.430 | 1.74 | 559  |
| A2p- | 5 | -1 | 12.5 | 3.5 | 0.420 | 1.26 | 596  |

|      |   |    |      |     |       |      |      |
|------|---|----|------|-----|-------|------|------|
| A3a- | 1 | 0  | 11.0 | 3.5 | 0.409 | 1.83 | 677  |
| A3a- | 2 | 0  | 11.8 | 3.0 | 0.417 | 2.23 | 877  |
| A3a- | 3 | 1  | 13.0 | 3.0 | 0.419 | 0.84 | 1106 |
| A3a- | 4 | 1  | 12.0 | 5.0 | 0.434 | 0.81 | 1098 |
| A3a- | 5 | 0  | 11.5 | 4.5 | 0.441 | 1.44 | 639  |
| A3b- | 1 | -1 | 11.5 | 5.0 | 0.411 | 0.66 | 1252 |
| A3b- | 2 | 1  | 11.7 | 4.0 | 0.431 | 0.81 | 1360 |
| A3b- | 3 | 0  | 11.0 | 3.5 | 0.421 | 1.34 | 721  |
| A3b- | 4 | 1  | 12.5 | 5.0 | 0.409 | 0.56 | 1309 |
| A3b- | 5 | 0  | 11.5 | 4.0 | 0.416 | 1.29 | 738  |
| A3c- | 1 | 0  | 11.5 | 2.5 | 0.398 | 1.05 | 1112 |
| A3c- | 2 | 0  | 11.0 | 4.0 | 0.429 | 1.12 | 1091 |
| A3c- | 3 | 0  | 10.4 | 4.0 | 0.423 | 0.98 | 1135 |
| A3c- | 4 | 0  | 10.3 | 3.5 | 0.415 | 1.23 | 1357 |
| A3c- | 5 | -1 | 9.5  | 3.5 | 0.382 | 1.31 | 753  |
| A3d- | 1 | 1  | 11.0 | 4.0 | 0.423 | 0.94 | 1048 |
| A3d- | 2 | 0  | 10.0 | 2.5 | 0.422 | 1.11 | 1014 |
| A3d- | 3 | 0  | 10.5 | 2.5 | 0.441 | 1.01 | 1083 |
| A3d- | 4 | -1 | 10.5 | 3.5 | 0.391 | 1.13 | 903  |
| A3d- | 5 | 0  | 11.5 | 3.5 | 0.395 | 1.03 | 1128 |
| A3e- | 1 | 1  | 11.4 | 4.0 | 0.400 | 0.72 | 1253 |
| A3e- | 2 | 1  | 10.8 | 4.0 | 0.394 | 0.66 | 1288 |
| A3e- | 3 | -1 | 8.4  | 3.0 | 0.395 | 0.82 | 906  |
| A3e- | 4 | 1  | 9.5  | 3.0 | 0.416 | 0.66 | 1297 |
| A3e- | 5 | 1  | 8.5  | 3.5 | 0.409 | 0.55 | 910  |
| A3f- | 1 | 1  | 11.2 | 4.0 | 0.405 | 0.65 | 1410 |
| A3f- | 2 | 1  | 12.5 | 6.0 | 0.421 | 0.53 | 1837 |
| A3f- | 3 | -1 | 8.2  | 3.0 | 0.392 | 0.65 | 1106 |
| A3f- | 4 | 1  | 10.0 | 4.0 | 0.402 | 0.67 | 1457 |
| A3f- | 5 | 1  | 12.4 | 7.0 | 0.404 | 0.56 | 1185 |
| A3g- | 1 | 1  | 10.9 | 2.5 | 0.414 | 0.68 | 938  |
| A3g- | 2 | 1  | 10.0 | 3.5 | 0.454 | 0.55 | 1563 |
| A3g- | 3 | 1  | 10.5 | 4.5 | 0.386 | 0.60 | 1300 |
| A3g- | 4 | 1  | 11.0 | 2.5 | 0.406 | 0.60 | 1084 |
| A3g- | 5 | 1  | 10.6 | 5.0 | 0.424 | 0.52 | 1422 |
| A3h- | 1 | -1 | 8.3  | 4.5 | 0.386 | 0.50 | 1044 |
| A3h- | 2 | 1  | 13.7 | 6.5 | 0.390 | 0.53 | 1533 |
| A3h- | 3 | 1  | 11.4 | 3.0 | 0.424 | 0.49 | 1200 |
| A3h- | 4 | 0  | 10.1 | 5.0 | 0.417 | 0.51 | 1315 |
| A3h- | 5 | -1 | 8.3  | 4.0 | 0.392 | 0.56 | 968  |
| A3i- | 1 | 0  | 10.7 | 2.5 | 0.413 | 1.56 | 701  |
| A3i- | 2 | 0  | 11.7 | 2.5 | 0.420 | 1.90 | 764  |
| A3i- | 3 | -1 | 11.4 | 4.5 | 0.475 | 1.48 | 895  |
| A3i- | 4 | 0  | 10.7 | 3.0 | 0.403 | 1.47 | 647  |
| A3i- | 5 | 0  | 11.2 | 3.0 | 0.450 | 1.20 | 950  |
| A3j- | 1 | 0  | 10.0 | 5.0 | 0.435 | 1.12 | 925  |
| A3j- | 2 | 1  | 11.2 | 4.5 | 0.463 | 1.29 | 634  |
| A3j- | 3 | 1  | 10.6 | 3.5 | 0.427 | 1.34 | 885  |
| A3j- | 4 | 1  | 10.6 | 3.0 | 0.397 | 1.24 | 710  |
| A3j- | 5 | 1  | 10.8 | 3.0 | 0.423 | 1.84 | 804  |
| A3k- | 1 | 0  | 11.5 | 3.5 | 0.417 | 0.84 | 738  |
| A3k- | 2 | 0  | 11.6 | 3.0 | 0.463 | 0.88 | 701  |
| A3k- | 3 | 1  | 10.9 | 4.0 | 0.427 | 0.95 | 1001 |
| A3k- | 4 | 1  | 10.5 | 4.5 | 0.407 | 0.90 | 926  |
| A3k- | 5 | 0  | 11.3 | 4.5 | 0.385 | 1.12 | 906  |
| A3l- | 1 | 1  | 9.2  | 4.0 | 0.398 | 0.78 | 820  |
| A3l- | 2 | 1  | 9.0  | 4.0 | 0.400 | 0.77 | 932  |
| A3l- | 3 | 1  | 9.5  | 3.5 | 0.408 | 0.57 | 1284 |
| A3l- | 4 | 1  | 8.6  | 4.0 | 0.408 | 1.06 | 1035 |
| A3l- | 5 | 1  | 9.0  | 4.0 | 0.383 | 1.21 | 1079 |
| A3m- | 1 | 1  | 11.0 | 5.0 | 0.441 | 0.76 | 1061 |
| A3m- | 2 | -1 | 9.5  | 3.5 | 0.443 | 0.76 | 1106 |
| A3m- | 3 | 1  | 9.7  | 4.0 | 0.406 | 0.89 | 917  |
| A3m- | 4 | 1  | 9.1  | 3.5 | 0.411 | 0.88 | 890  |
| A3m- | 5 | 1  | 9.0  | 3.0 | 0.405 | 0.80 | 1104 |
| A3n- | 1 | 1  | 9.7  | 4.0 | 0.397 | 0.75 | 1426 |
| A3n- | 2 | -1 | 9.4  | 3.0 | 0.405 | 0.74 | 1086 |
| A3n- | 3 | 1  | 9.9  | 6.0 | 0.397 | 0.59 | 1209 |
| A3n- | 4 | -1 | 8.8  | 3.0 | 0.400 | 0.78 | 1009 |
| A3n- | 5 | -1 | 9.2  | 3.5 | 0.393 | 0.67 | 1049 |
| A3o- | 1 | 1  | 9.3  | 2.5 | 0.425 | 0.63 | 1168 |
| A3o- | 2 | 1  | 10.1 | 2.5 | 0.445 | 0.59 | 1314 |
| A3o- | 3 | 1  | 10.0 | 2.5 | 0.418 | 0.62 | 1250 |
| A3o- | 4 | 1  | 10.5 | 3.0 | 0.440 | 0.59 | 1180 |
| A3o- | 5 | 1  | 10.8 | 4.0 | 0.412 | 0.63 | 1887 |
| A3p- | 1 | 0  | 8.6  | 3.5 | 0.375 | 2.40 | 453  |
| A3p- | 2 | 1  | 9.5  | 4.0 | 0.390 | 2.61 | 786  |
| A3p- | 3 | 0  | 8.8  | 4.0 | 0.410 | 2.14 | 496  |
| A3p- | 4 | 1  | 9.1  | 4.5 | 0.395 | 2.06 | 394  |
| A3p- | 5 | 0  | 8.6  | 4.0 | 0.390 | 2.74 | 454  |

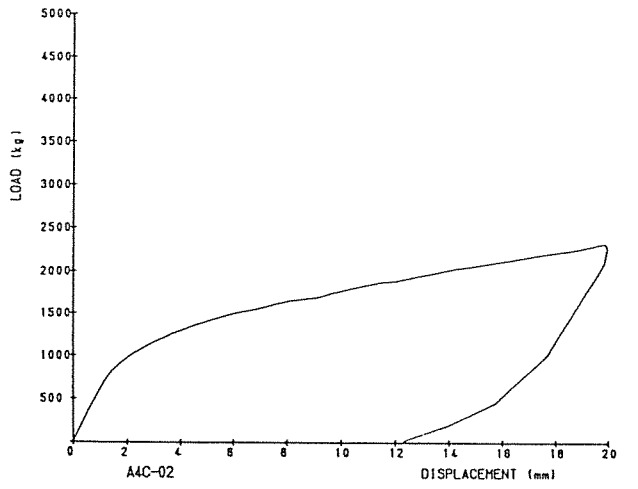
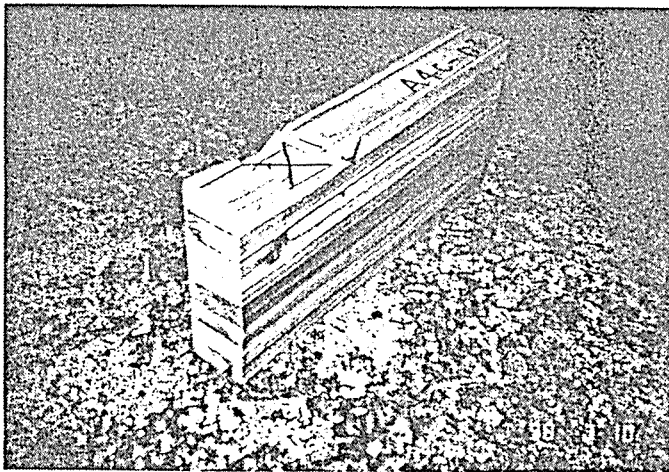
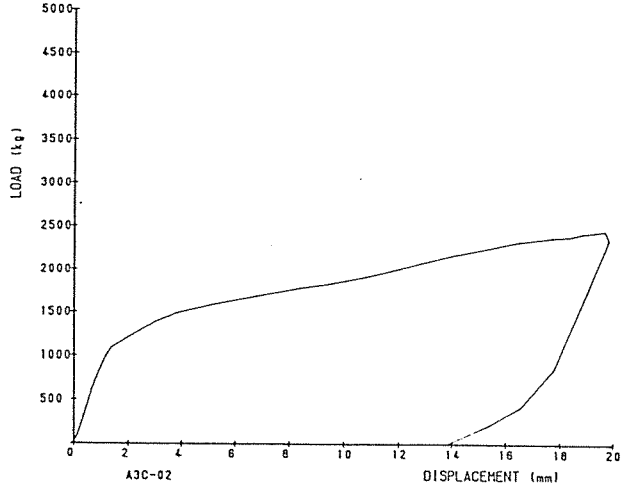
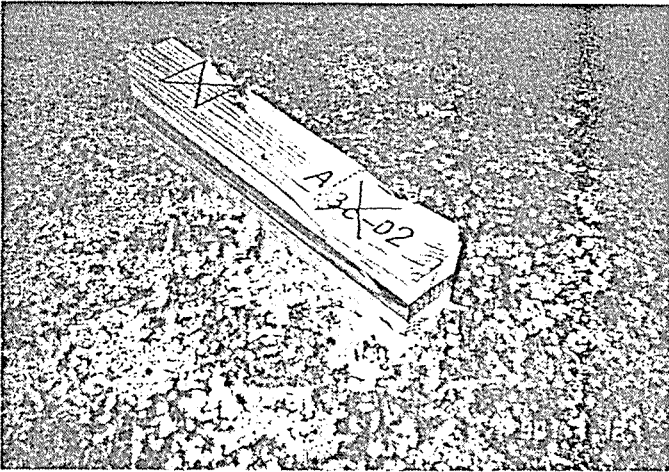
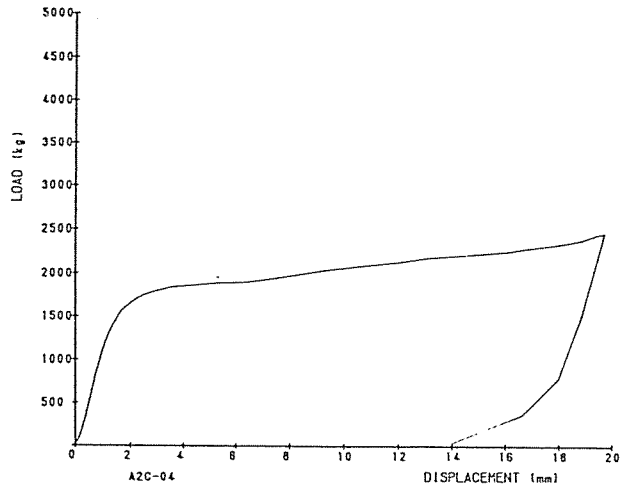
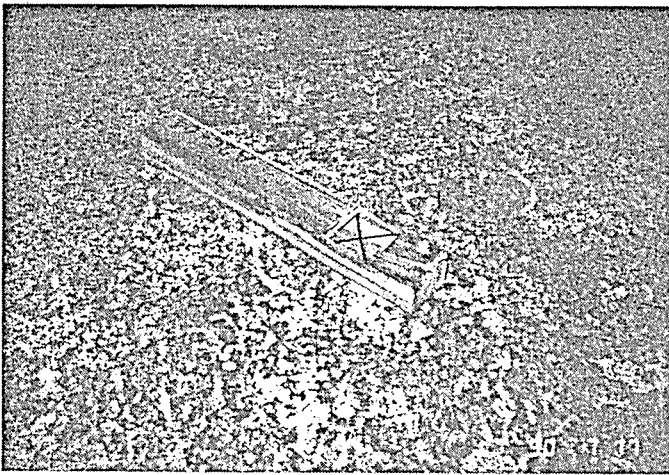
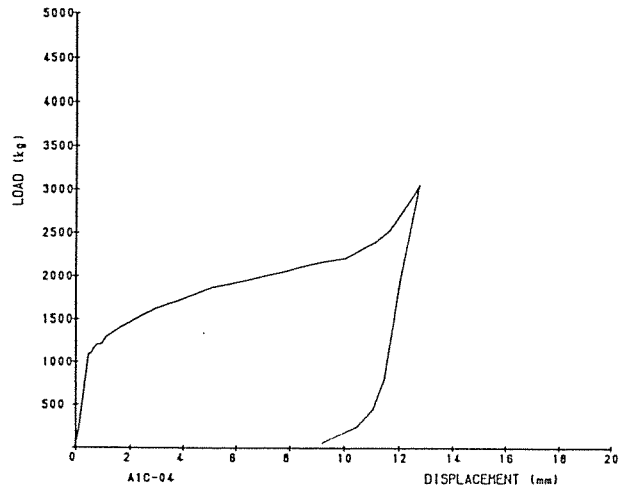
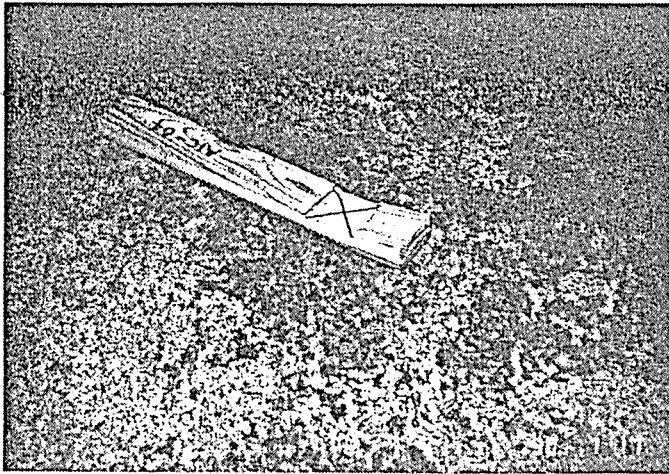
|      |   |    |      |     |       |      |      |
|------|---|----|------|-----|-------|------|------|
| A4a- | 1 | 1  | 14.0 | 5.5 | 0.395 | 2.85 | 856  |
| A4a- | 2 | 1  | 15.5 | 4.5 | 0.395 | 2.56 | 594  |
| A4a- | 3 | 0  | 13.5 | 5.0 | 0.410 | 2.31 | 686  |
| A4a- | 4 | 0  | 13.0 | 4.5 | 0.406 | 2.79 | 806  |
| A4a- | 5 | 1  | 17.2 | 4.5 | 0.412 | 2.54 | 510  |
| A4b- | 1 | 0  | 11.3 | 2.5 | 0.398 | 1.79 | 552  |
| A4b- | 2 | -1 | 9.5  | 3.5 | 0.413 | 1.99 | 638  |
| A4b- | 3 | 0  | 12.5 | 3.5 | 0.411 | 1.86 | 621  |
| A4b- | 4 | 0  | 9.8  | 4.0 | 0.405 | 1.96 | 619  |
| A4b- | 5 | 0  | 13.0 | 3.5 | 0.419 | 2.06 | 933  |
| A4c- | 1 | -1 | 10.8 | 4.0 | 0.421 | 1.44 | 698  |
| A4c- | 2 | 0  | 10.9 | 3.5 | 0.401 | 1.63 | 815  |
| A4c- | 3 | -1 | 11.0 | 3.0 | 0.431 | 0.78 | 840  |
| A4c- | 4 | 1  | 11.2 | 4.5 | 0.407 | 0.66 | 1182 |
| A4c- | 5 | 0  | 11.0 | 4.0 | 0.410 | 1.56 | 927  |
| A4d- | 1 | 0  | 10.0 | 2.5 | 0.414 | 1.36 | 921  |
| A4d- | 2 | 0  | 10.5 | 2.0 | 0.393 | 1.40 | 731  |
| A4d- | 3 | -1 | 10.1 | 4.5 | 0.387 | 1.35 | 1385 |
| A4d- | 4 | 0  | 13.0 | 3.5 | 0.425 | 1.13 | 1101 |
| A4d- | 5 | -1 | 9.7  | 4.0 | 0.408 | 1.40 | 946  |
| A4e- | 1 | 1  | 9.6  | 6.0 | 0.380 | 0.88 | 795  |
| A4e- | 2 | 1  | 9.0  | 4.5 | 0.417 | 0.80 | 1497 |
| A4e- | 3 | 0  | 10.5 | 3.5 | 0.390 | 0.99 | 1455 |
| A4e- | 4 | -1 | 9.0  | 4.5 | 0.388 | 0.92 | 1378 |
| A4e- | 5 | 1  | 9.9  | 3.5 | 0.404 | 0.88 | 1549 |
| A4f- | 1 | 0  | 10.4 | 5.0 | 0.394 | 0.68 | 1122 |
| A4f- | 2 | 1  | 12.0 | 4.5 | 0.383 | 0.74 | 1514 |
| A4f- | 3 | 1  | 10.5 | 3.5 | 0.430 | 0.61 | 1599 |
| A4f- | 4 | -1 | 10.8 | 3.5 | 0.395 | 0.73 | 932  |
| A4f- | 5 | 1  | 10.4 | 5.0 | 0.424 | 0.68 | 1491 |
| A4g- | 1 | 1  | 9.2  | 5.0 | 0.425 | 0.64 | 1641 |
| A4g- | 2 | 1  | 10.7 | 3.0 | 0.429 | 0.58 | 1327 |
| A4g- | 3 | 1  | 10.6 | 5.0 | 0.387 | 0.60 | 1255 |
| A4g- | 4 | 1  | 12.0 | 3.5 | 0.388 | 0.73 | 1328 |
| A4g- | 5 | 1  | 9.2  | 3.0 | 0.417 | 0.57 | 1516 |
| A4h- | 1 | -1 | 11.7 | 4.5 | 0.396 | 0.65 | 876  |
| A4h- | 2 | 1  | 12.0 | 4.0 | 0.419 | 0.60 | 1385 |
| A4h- | 3 | 1  | 9.9  | 4.0 | 0.425 | 0.54 | 1264 |
| A4h- | 4 | 1  | 9.3  | 4.0 | 0.423 | 0.53 | 1630 |
| A4h- | 5 | 0  | 10.0 | 3.5 | 0.386 | 0.70 | 977  |
| A4i- | 1 | 0  | 10.8 | 5.0 | 0.416 | 2.68 | 566  |
| A4i- | 2 | 0  | 11.3 | 5.0 | 0.403 | 2.55 | 670  |
| A4i- | 3 | 0  | 11.8 | 4.5 | 0.414 | 2.79 | 637  |
| A4i- | 4 | 0  | 10.0 | 4.0 | 0.405 | 2.62 | 605  |
| A4i- | 5 | 0  | 10.0 | 4.0 | 0.428 | 2.60 | 985  |
| A4j- | 1 | 0  | 10.8 | 3.5 | 0.413 | 1.79 | 630  |
| A4j- | 2 | 1  | 10.5 | 3.0 | 0.449 | 1.54 | 649  |
| A4j- | 3 | 0  | 9.6  | 3.0 | 0.388 | 2.21 | 619  |
| A4j- | 4 | 0  | 11.4 | 4.0 | 0.407 | 2.24 | 511  |
| A4j- | 5 | 1  | 12.0 | 6.0 | 0.402 | 2.51 | 505  |
| A4k- | 1 | 1  | 10.5 | 4.5 | 0.420 | 1.56 | 975  |
| A4k- | 2 | 1  | 13.8 | 4.0 | 0.413 | 2.00 | 1180 |
| A4k- | 3 | 0  | 11.5 | 4.5 | 0.414 | 1.69 | 730  |
| A4k- | 4 | 1  | 11.2 | 3.5 | 0.418 | 1.55 | 759  |
| A4k- | 5 | 0  | 12.3 | 3.0 | 0.411 | 1.57 | 961  |
| A4l- | 1 | 0  | 10.8 | 2.0 | 0.468 | 1.18 | 1035 |
| A4l- | 2 | 1  | 12.0 | 3.0 | 0.411 | 1.01 | 1191 |
| A4l- | 3 | 1  | 10.4 | 5.0 | 0.413 | 1.23 | 967  |
| A4l- | 4 | 1  | 9.1  | 4.0 | 0.396 | 1.02 | 1141 |
| A4l- | 5 | 1  | 10.5 | 4.5 | 0.428 | 1.02 | 1056 |
| A4m- | 1 | -1 | 9.1  | 4.0 | 0.387 | 0.92 | 769  |
| A4m- | 2 | 0  | 10.0 | 3.0 | 0.423 | 0.87 | 1548 |
| A4m- | 3 | 1  | 9.5  | 4.0 | 0.423 | 0.81 | 1132 |
| A4m- | 4 | 1  | 11.2 | 4.5 | 0.392 | 1.11 | 663  |
| A4m- | 5 | -1 | 9.6  | 3.0 | 0.392 | 1.13 | 629  |
| A4n- | 1 | 1  | 11.5 | 3.0 | 0.393 | 0.73 | 1595 |
| A4n- | 2 | 1  | 9.8  | 3.0 | 0.393 | 0.69 | 1392 |
| A4n- | 3 | 1  | 9.7  | 3.5 | 0.391 | 0.80 | 1645 |
| A4n- | 4 | 1  | 10.0 | 4.0 | 0.423 | 0.75 | 1337 |
| A4n- | 5 | 0  | 9.5  | 3.0 | 0.392 | 0.71 | 1340 |
| A4o- | 1 | 0  | 9.5  | 3.5 | 0.382 | 0.97 | 981  |
| A4o- | 2 | 1  | 9.8  | 4.0 | 0.398 | 0.72 | 926  |
| A4o- | 3 | 0  | 9.3  | 4.0 | 0.403 | 0.86 | 896  |
| A4o- | 4 | 1  | 12.5 | 4.0 | 0.387 | 0.59 | 1178 |
| A4o- | 5 | 1  | 11.4 | 3.5 | 0.391 | 0.72 | 1182 |
| A4p- | 1 | 0  | 8.6  | 3.0 | 0.448 | 4.26 | 378  |
| A4p- | 2 | -1 | 8.8  | 4.5 | 0.385 | 4.00 | 377  |
| A4p- | 3 | 0  | 9.2  | 3.0 | 0.405 | 4.81 | 450  |
| A4p- | 4 | 1  | 9.6  | 2.5 | 0.428 | 4.05 | 322  |
| A4p- | 5 | 1  | 9.2  | 5.0 | 0.393 | 3.71 | 403  |

|           | x6        | x7        | x8        | x9        | y1        | y2        |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| purecount | 320       | 320       | 320       | 320       | 320       | 320       |
| sum       | 132       | 3611.4    | 1240.5    | 131.855   | 309.36    | 332757    |
| average   | 0.4125    | 11.285625 | 3.8765625 | 0.4120468 | 0.96675   | 1039.8656 |
| purevar   | 0.5048437 | 2.5184808 | 0.8683569 | 0.0018231 | 0.4762363 | 103287.64 |
| ijjouwa   | 216       | 41562.82  | 5086.75   | 54.913833 | 451.4694  | 379074613 |

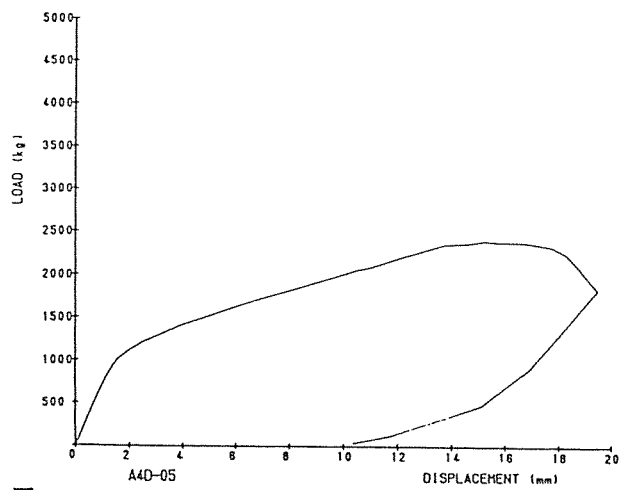
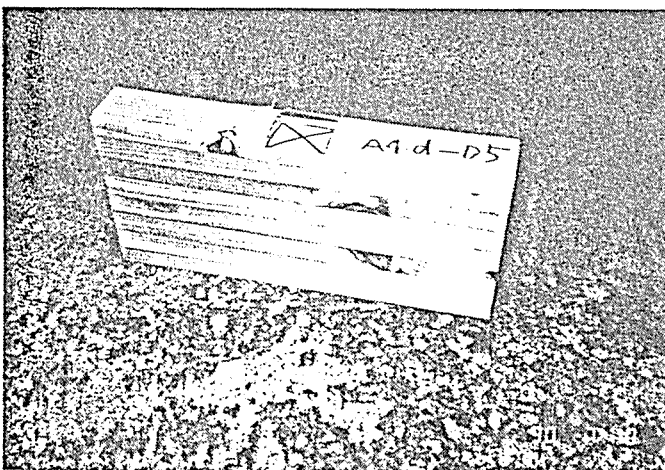
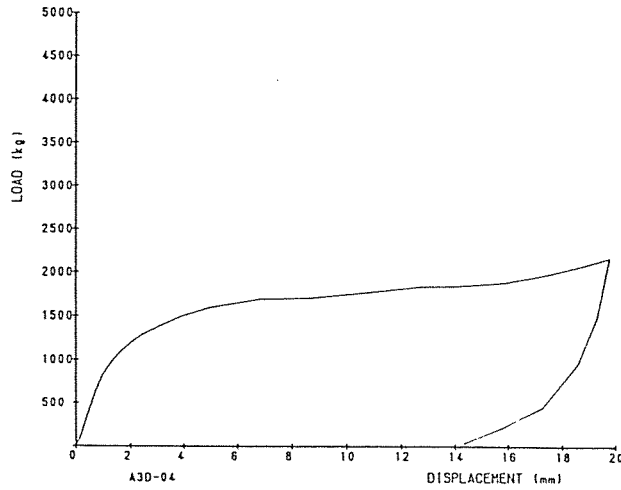
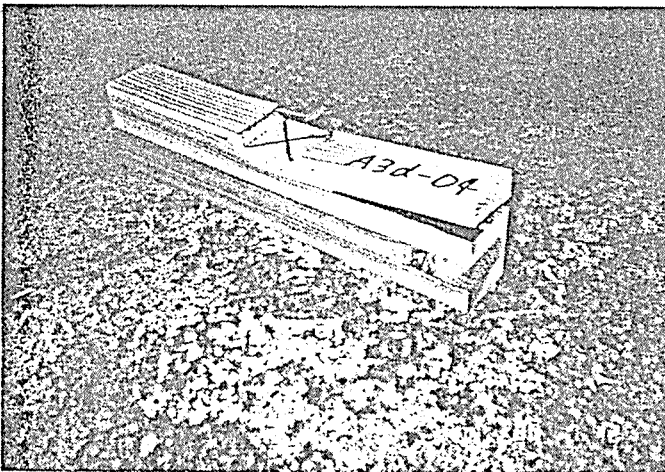
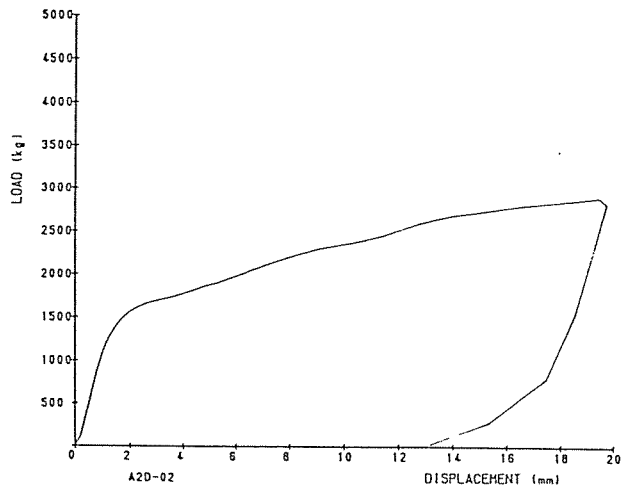
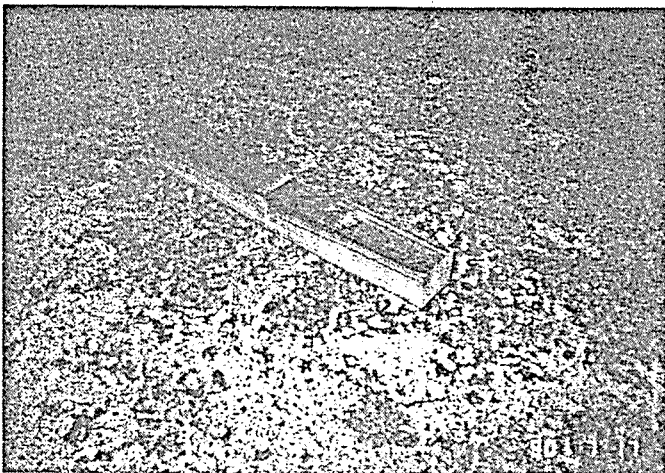
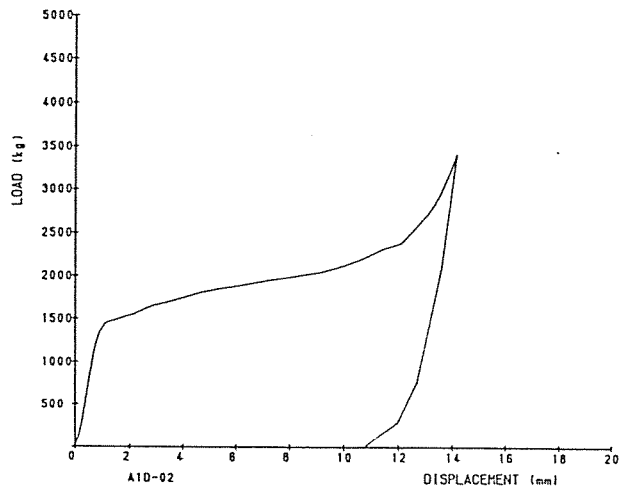
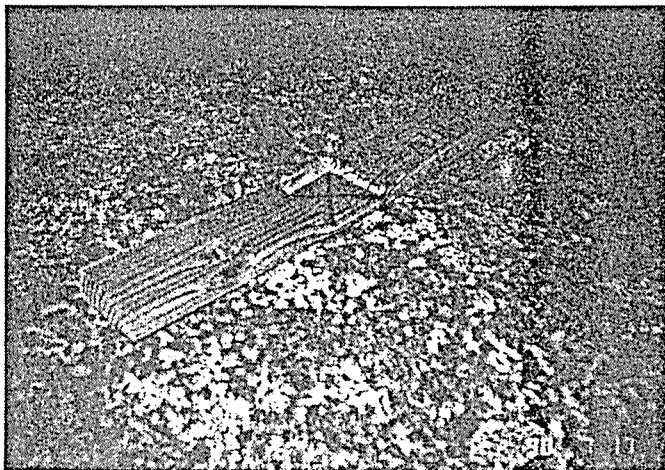


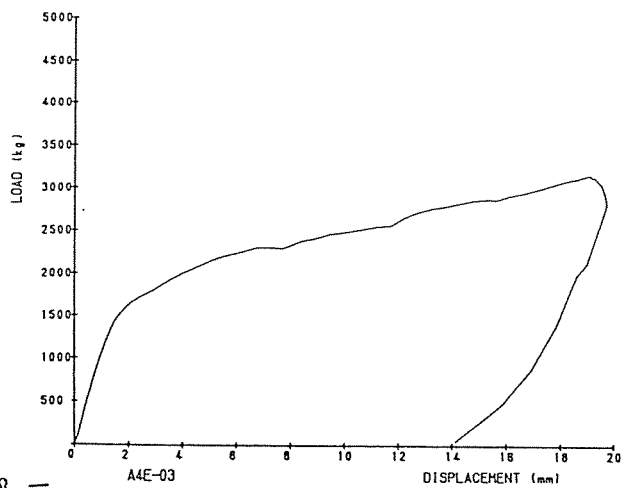
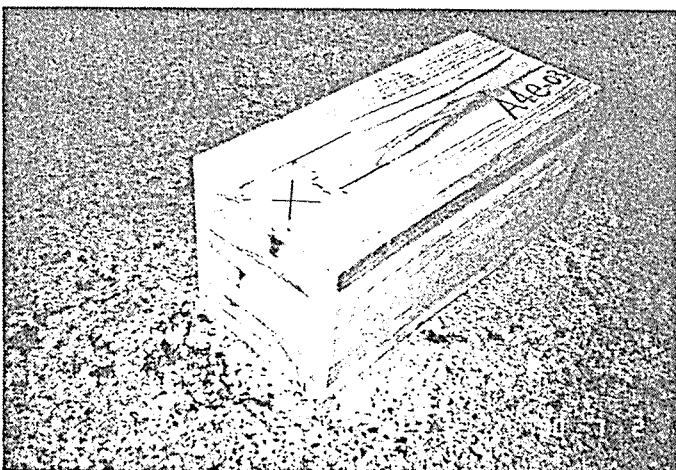
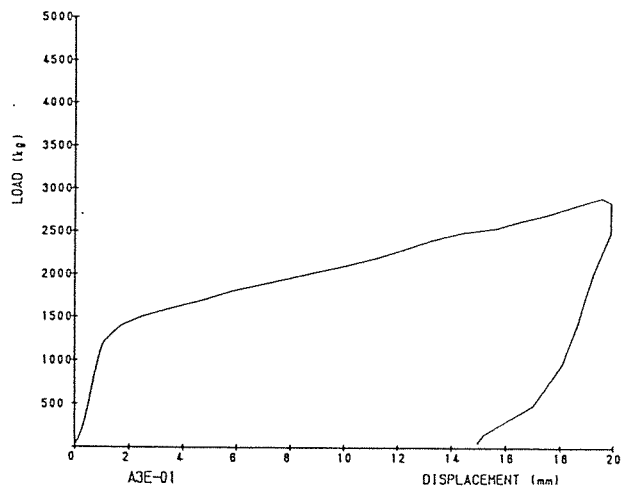
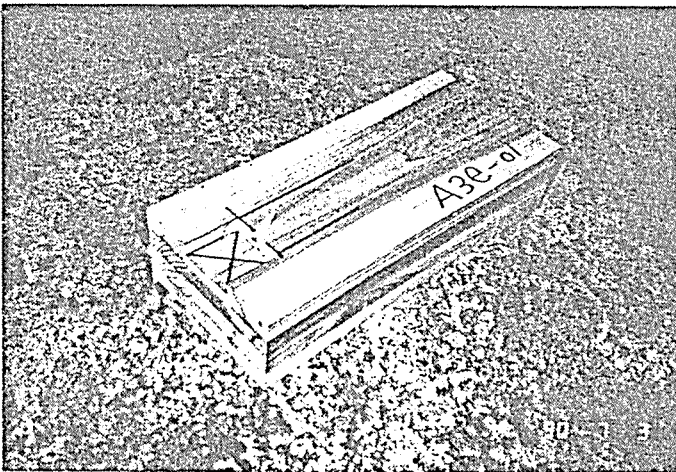
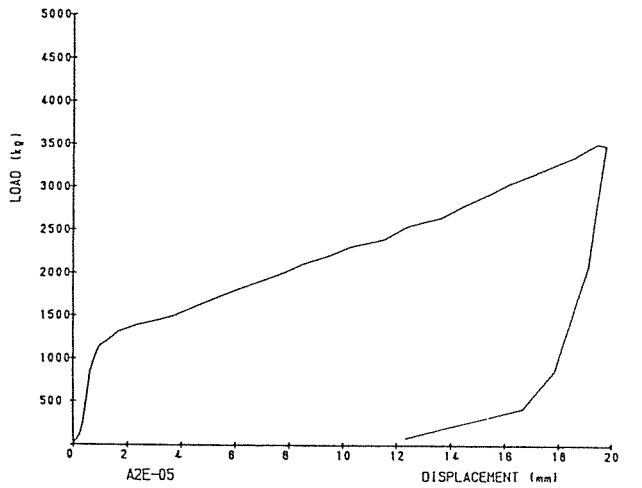
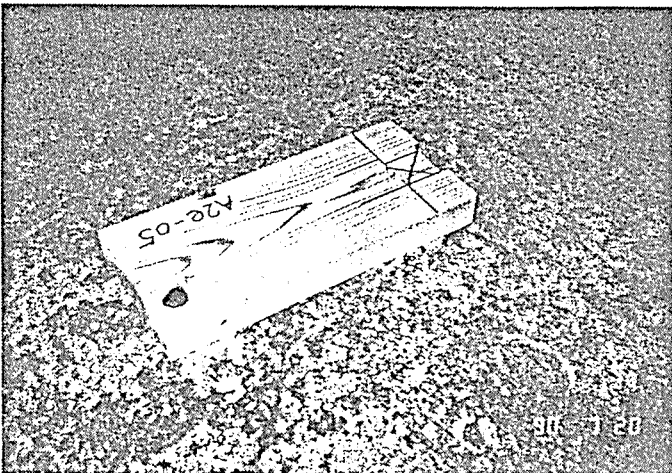
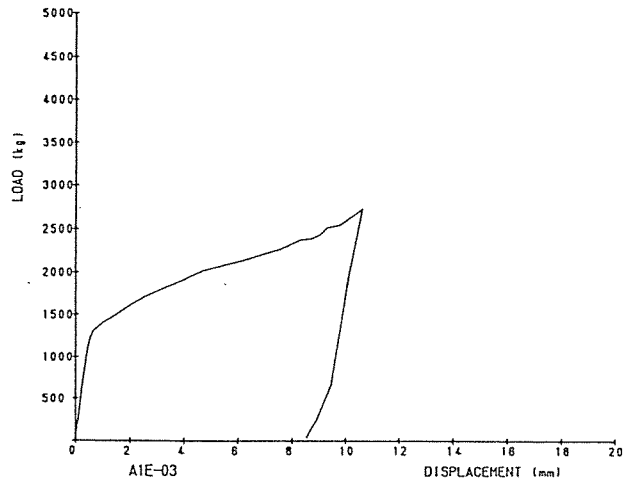
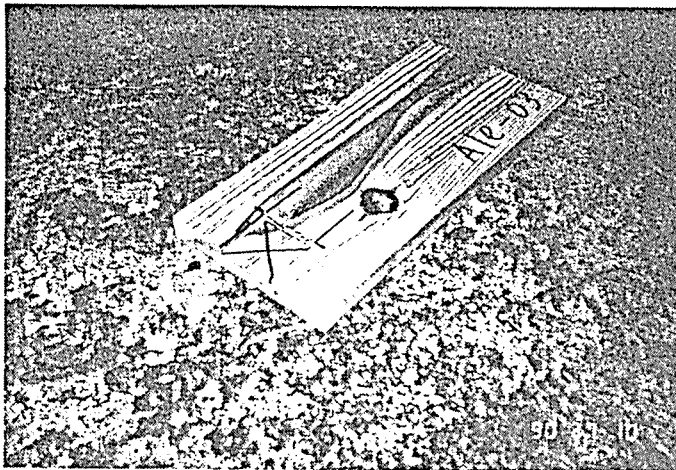


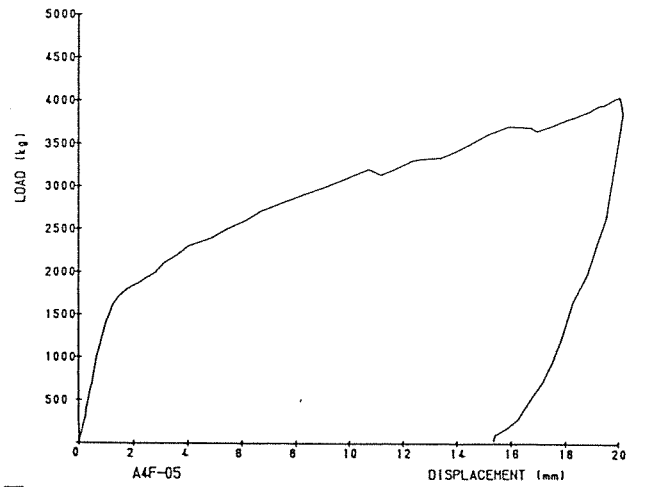
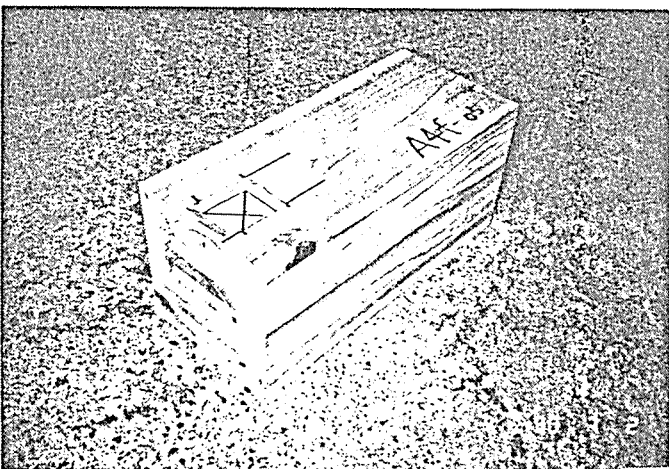
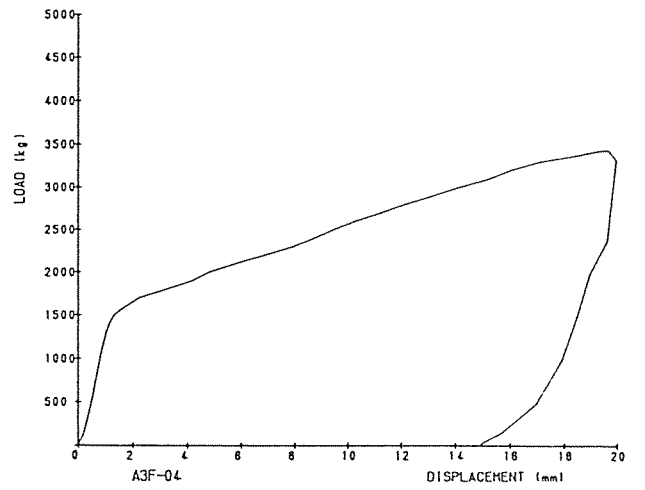
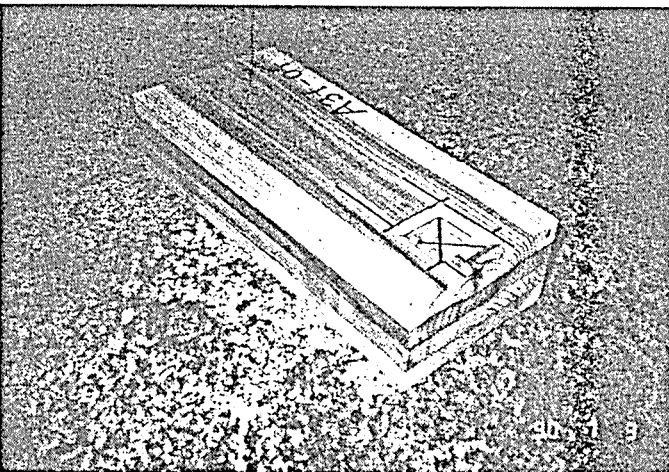
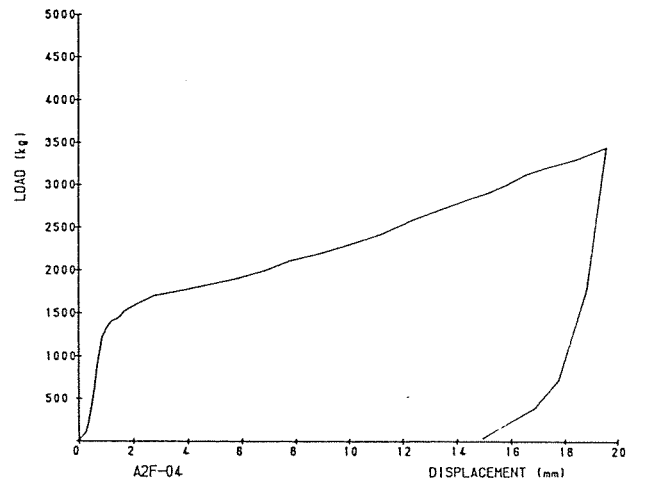
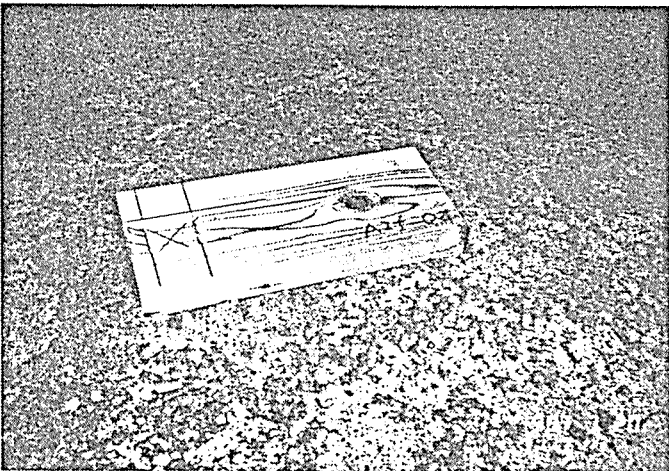
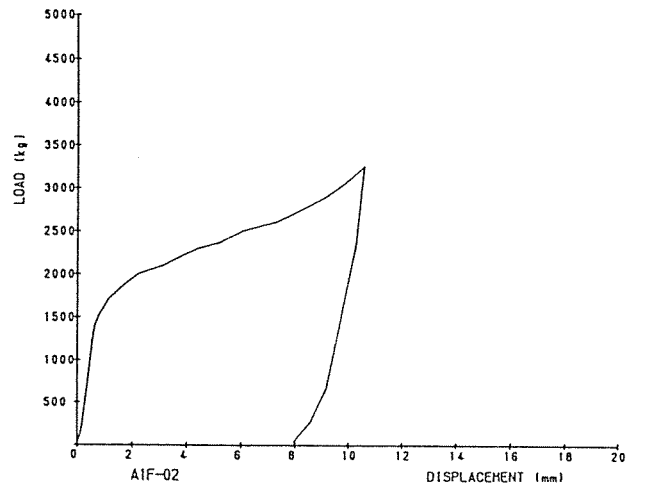
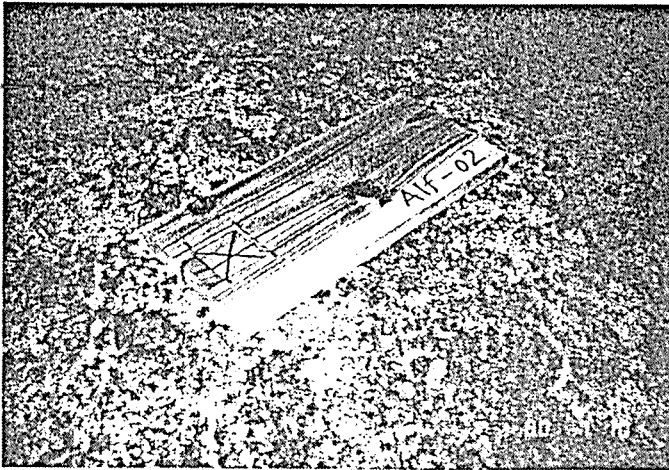


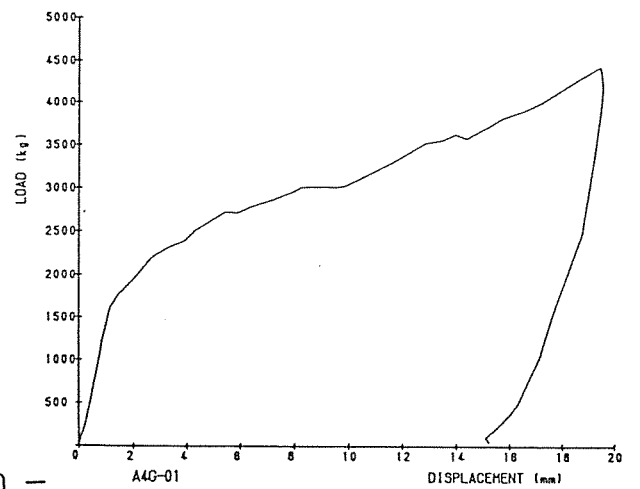
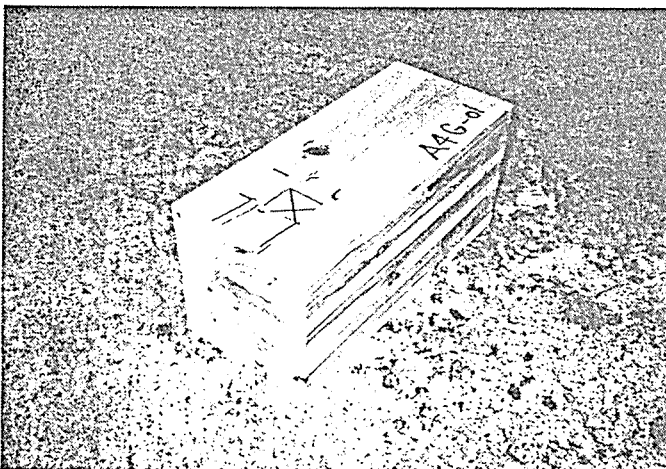
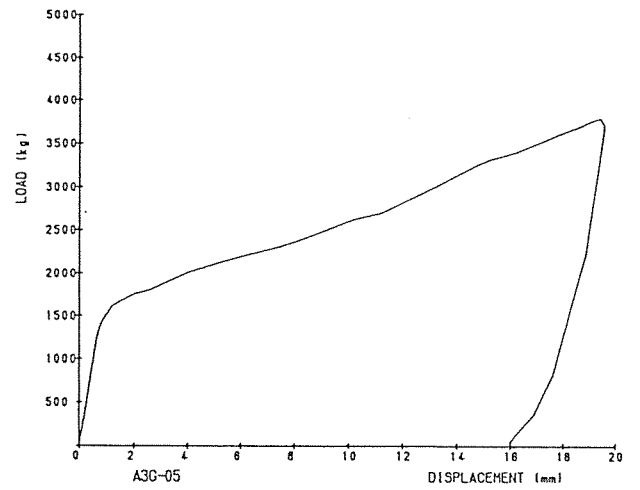
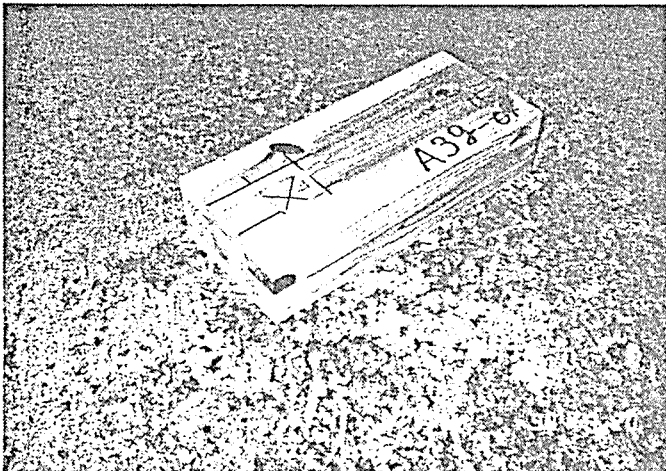
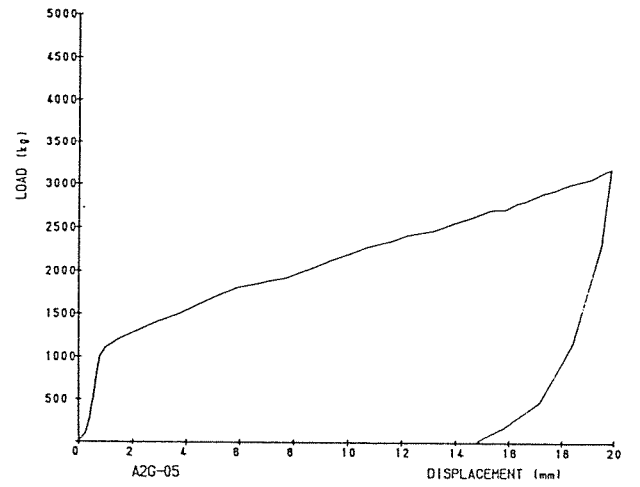
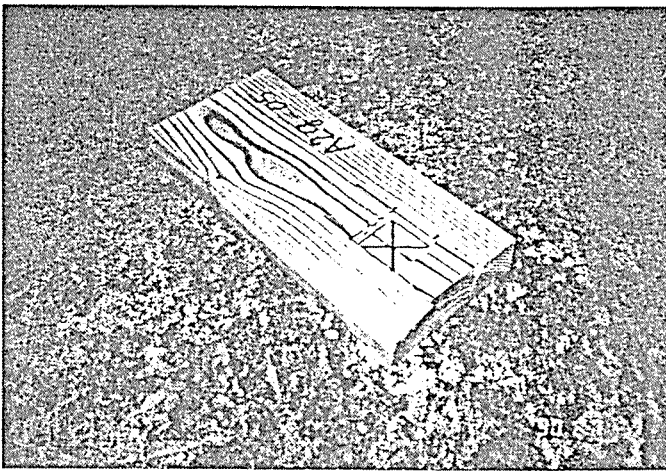
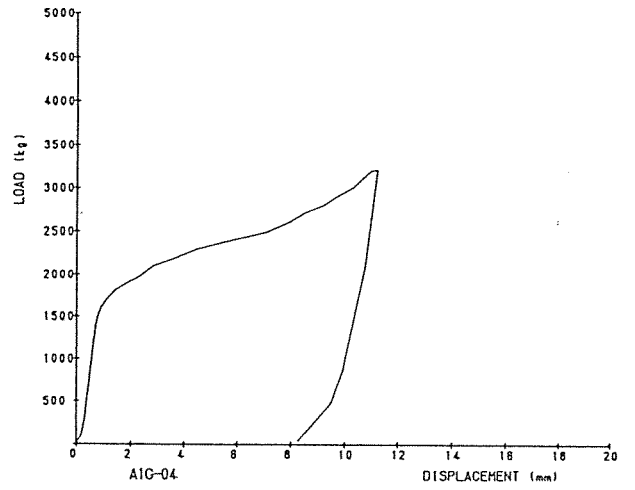
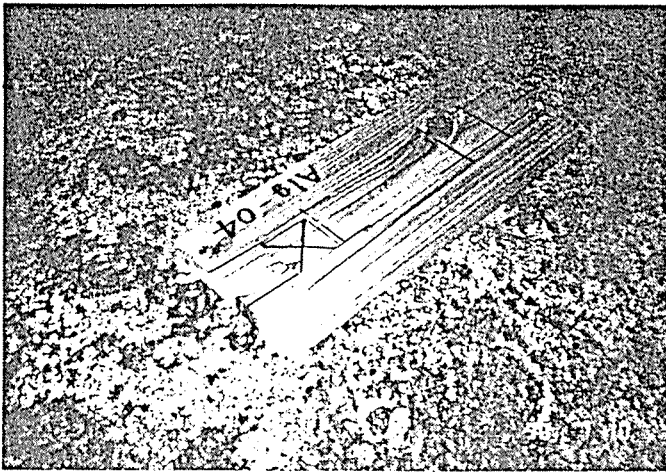




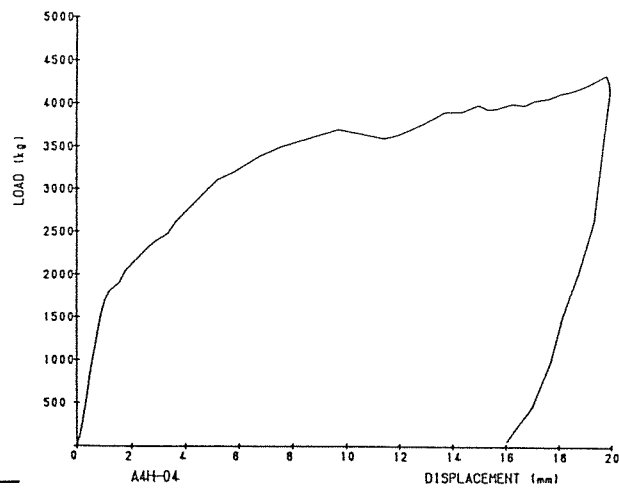
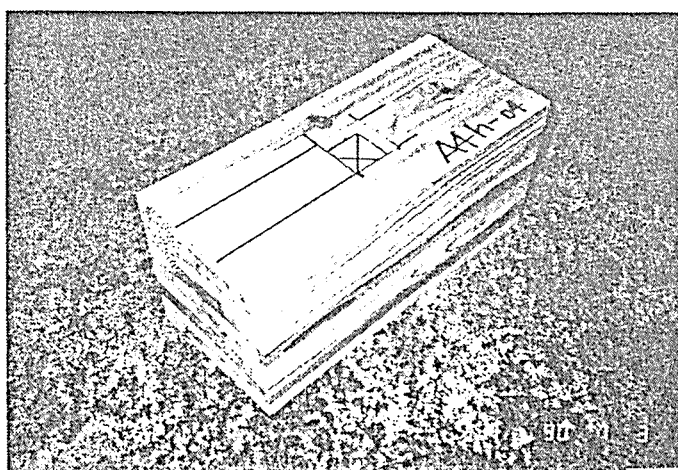
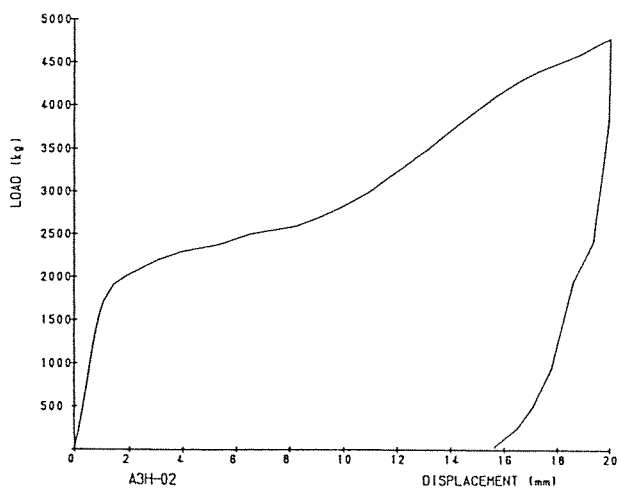
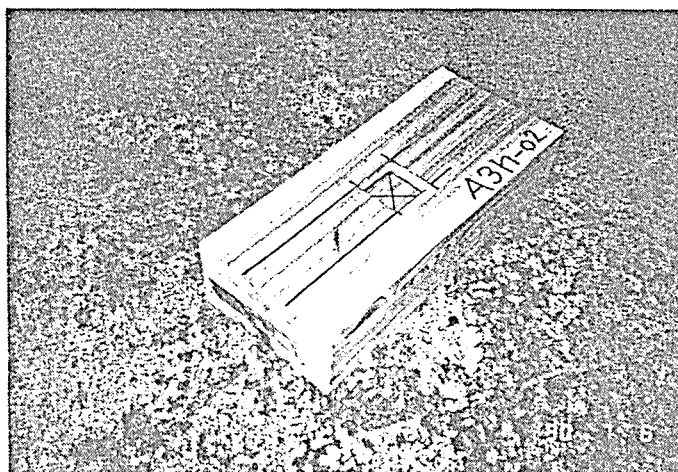
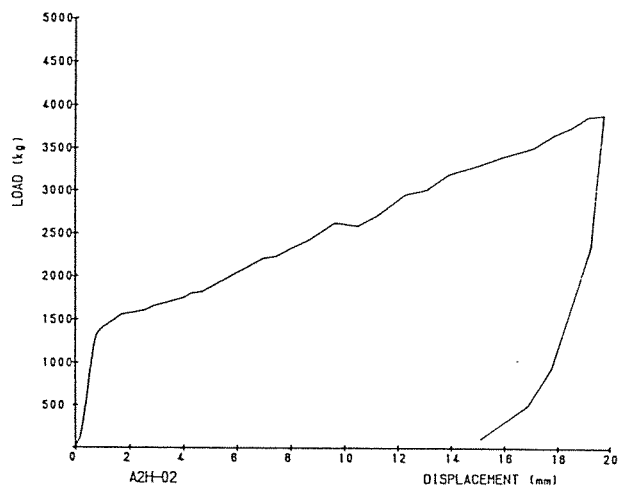
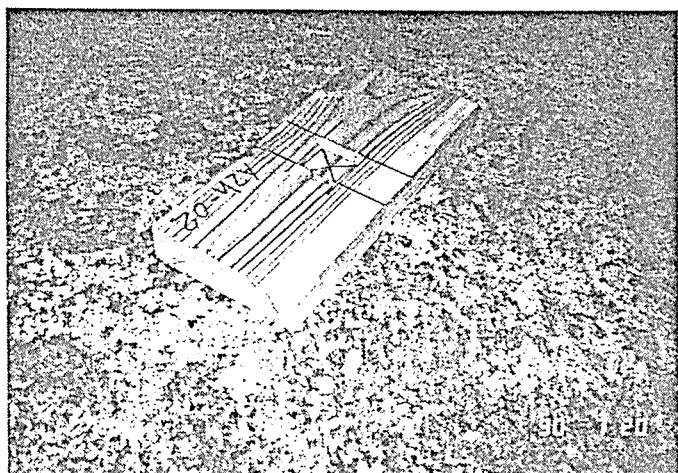
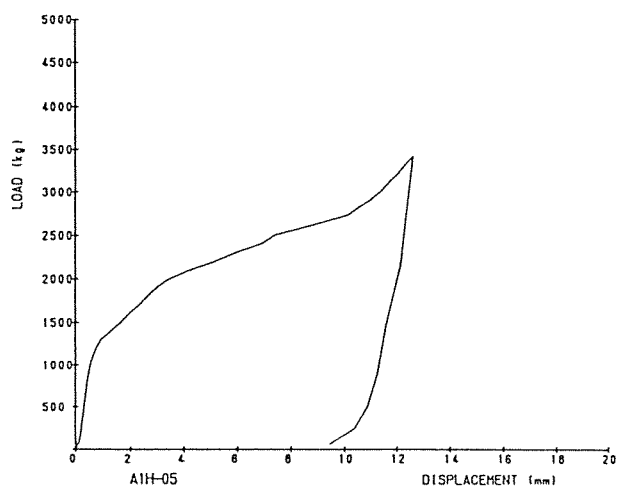
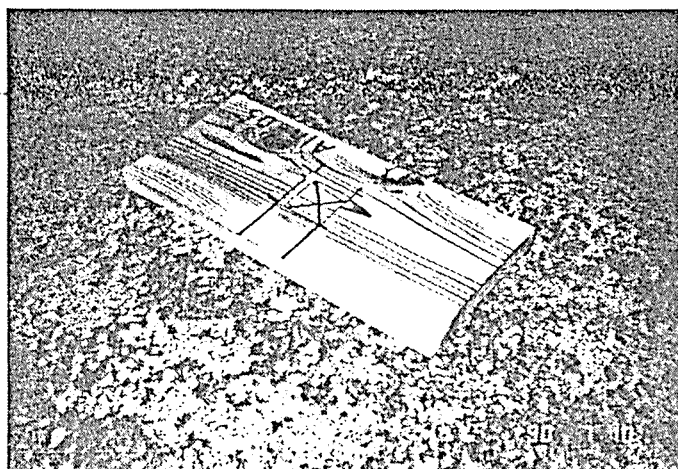


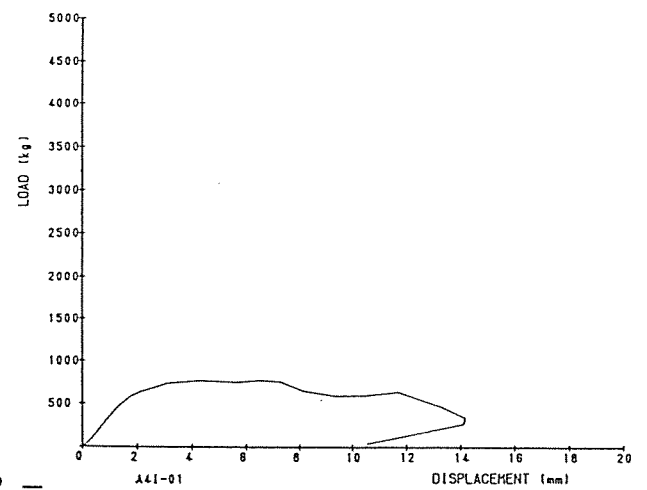
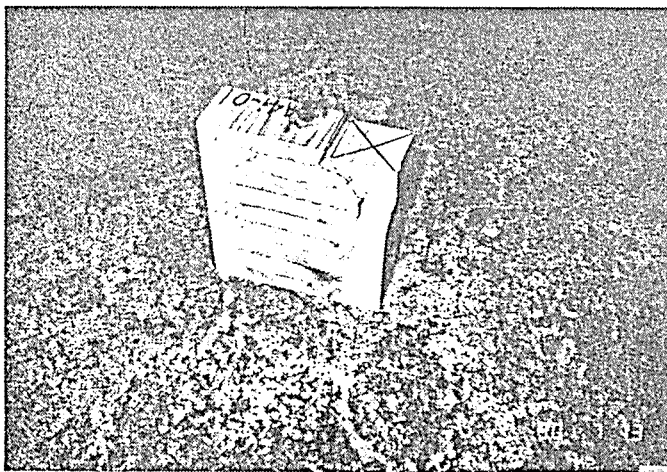
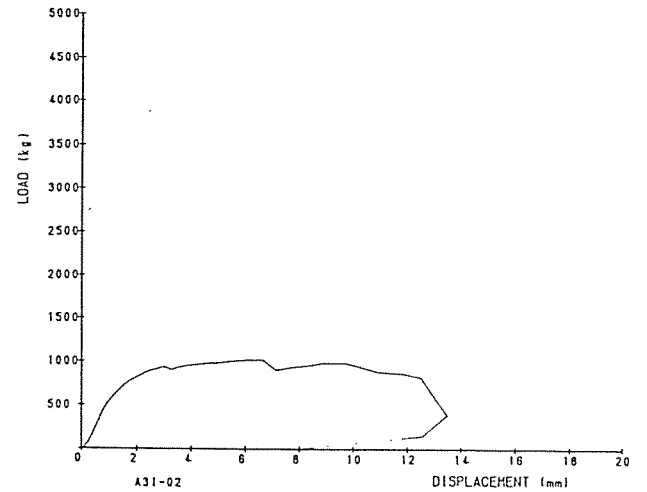
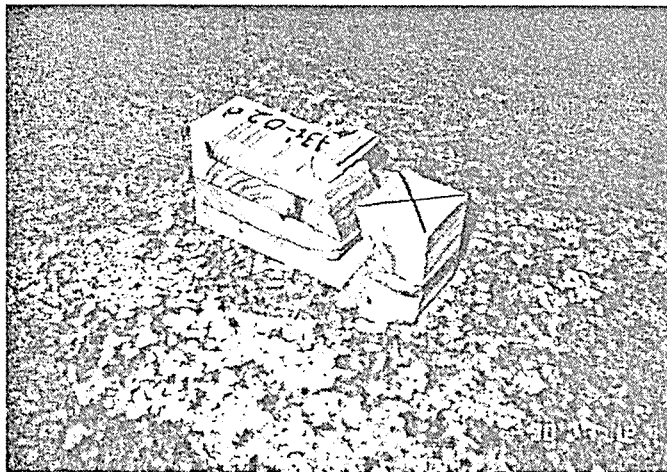
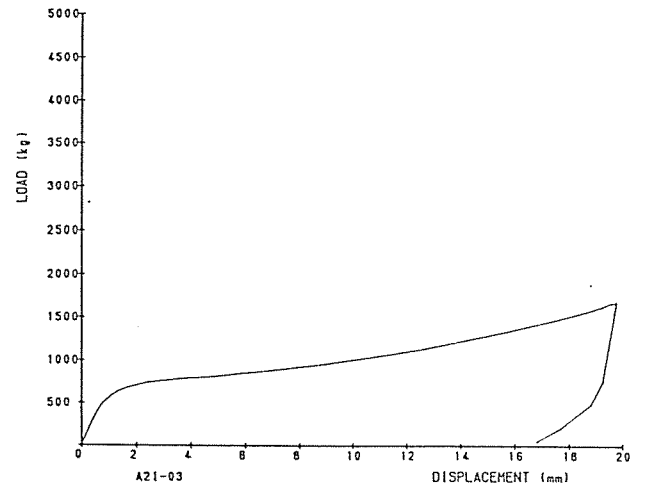
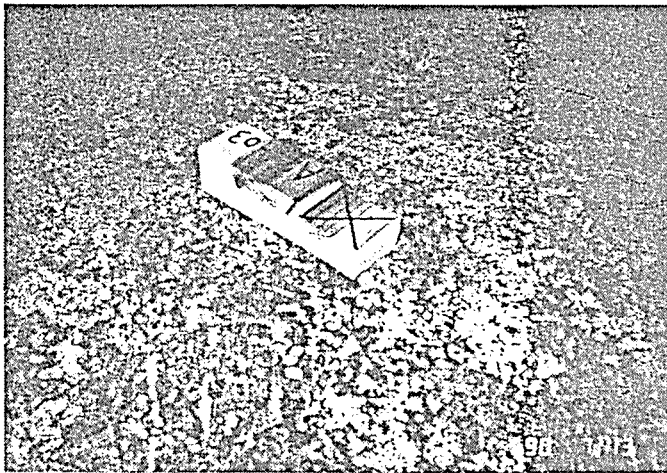
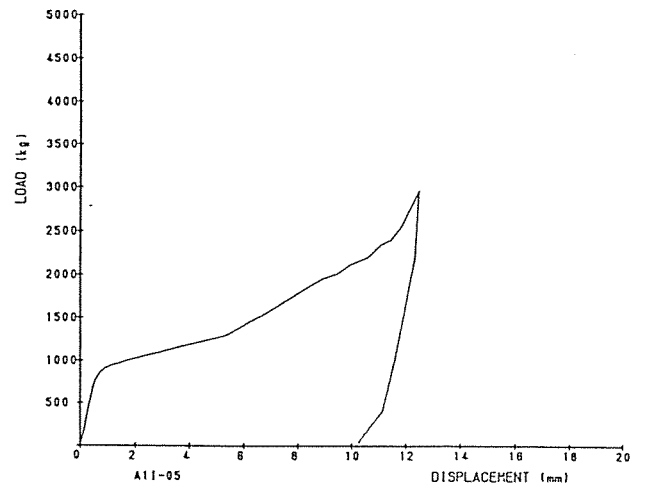
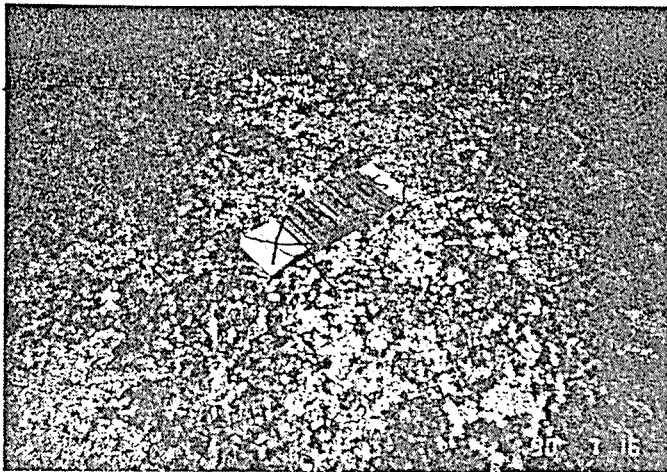


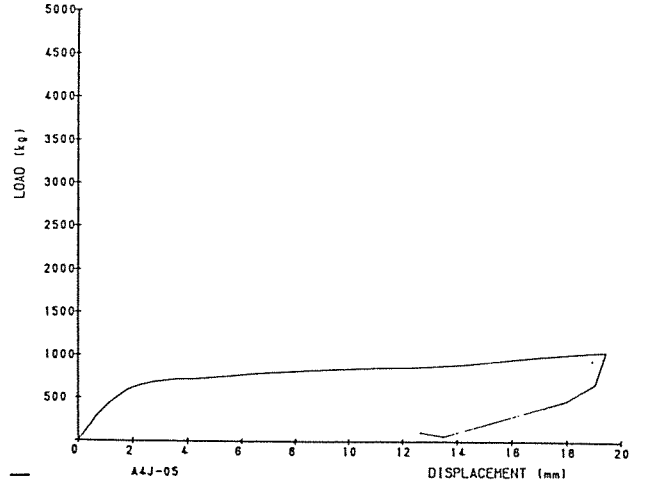
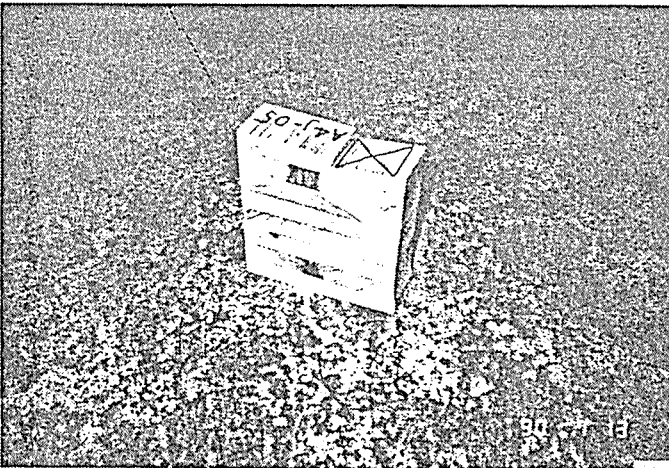
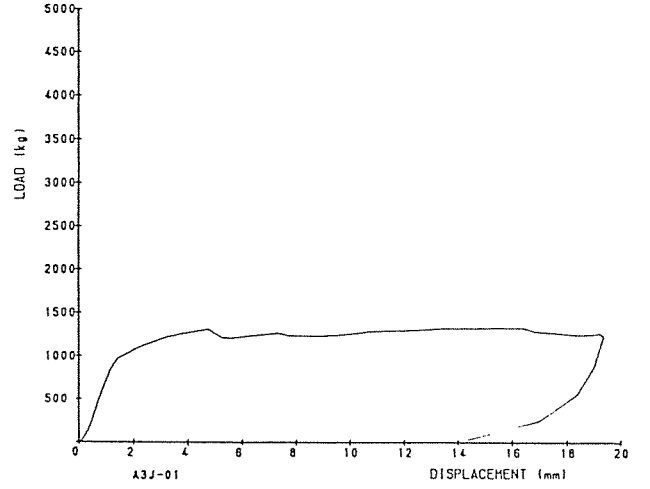
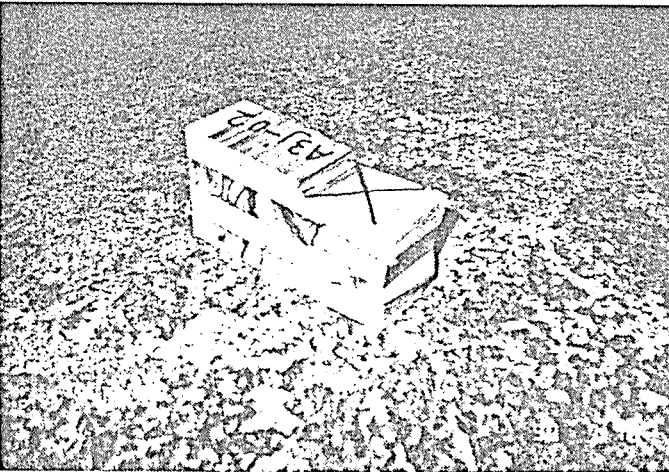
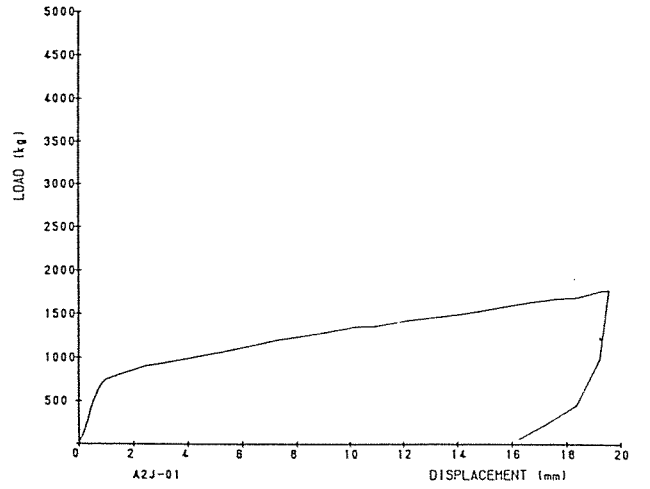
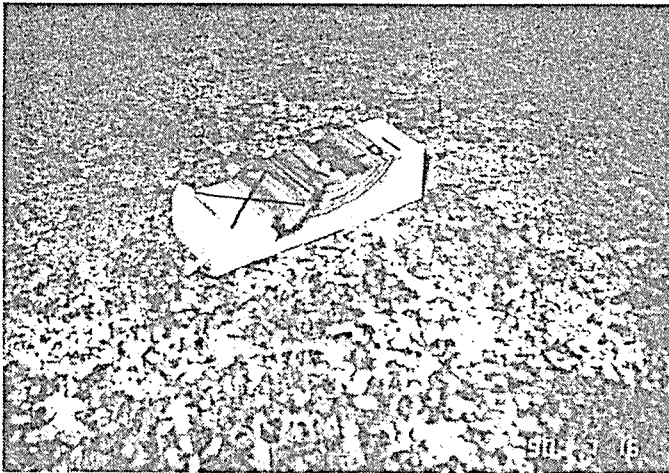
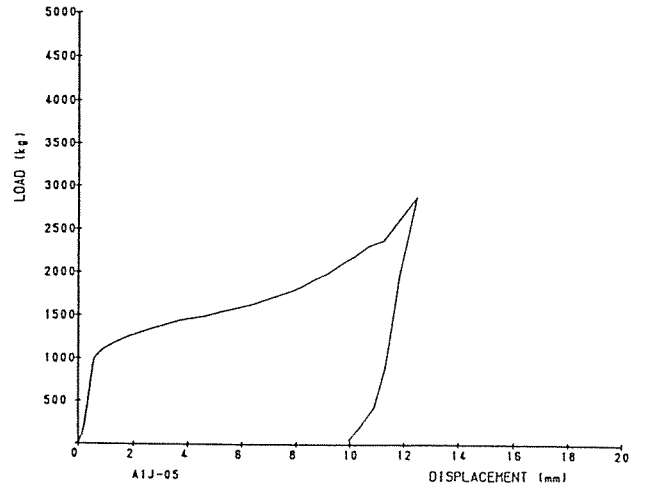
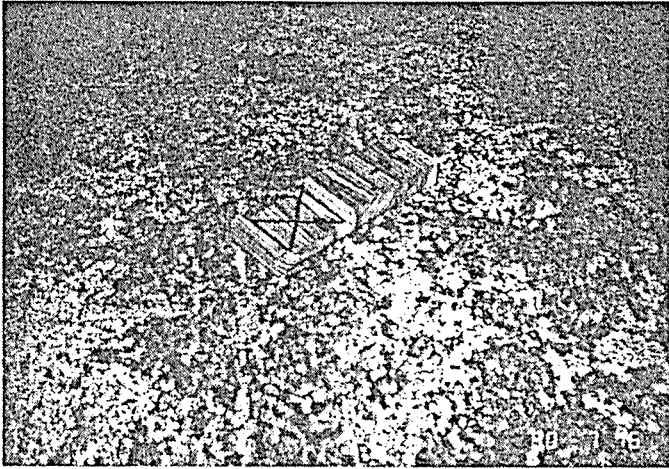




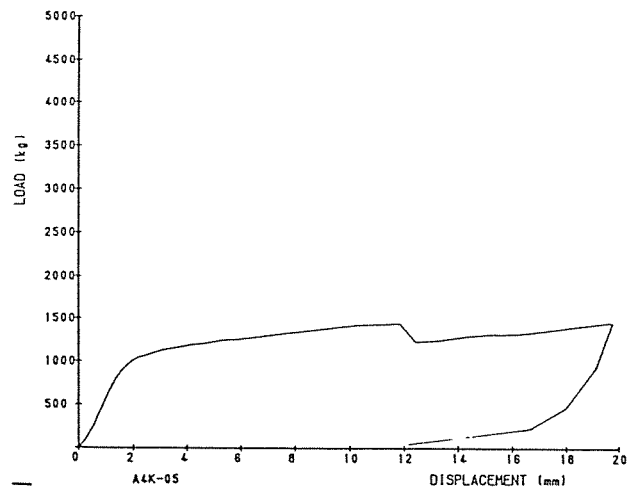
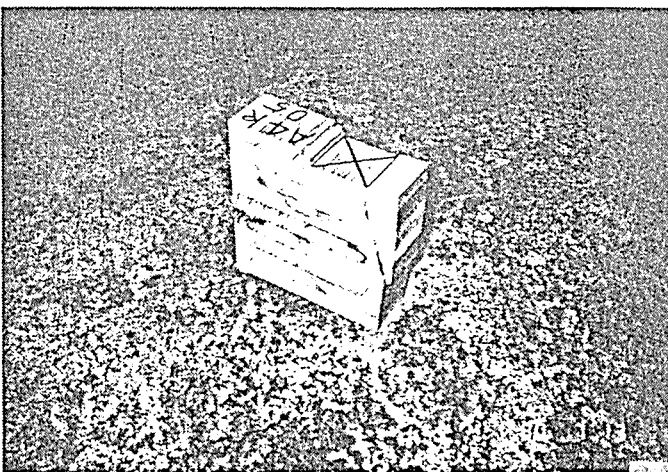
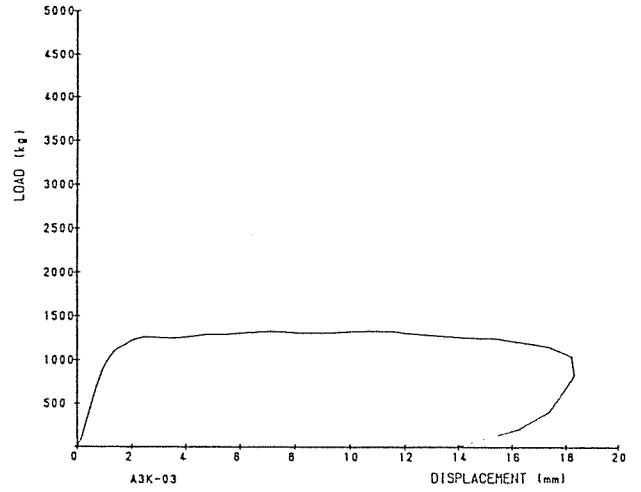
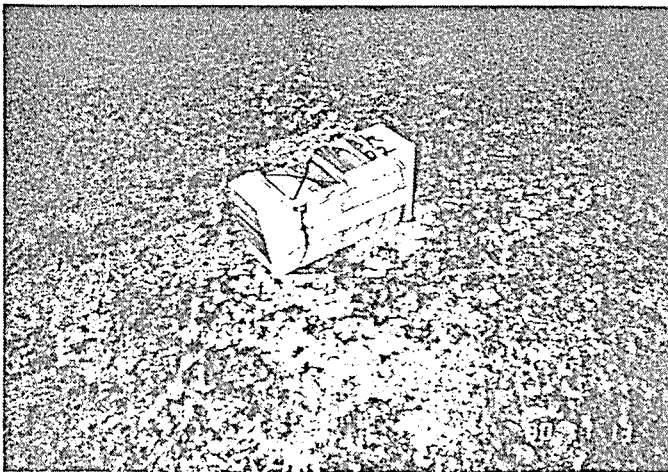
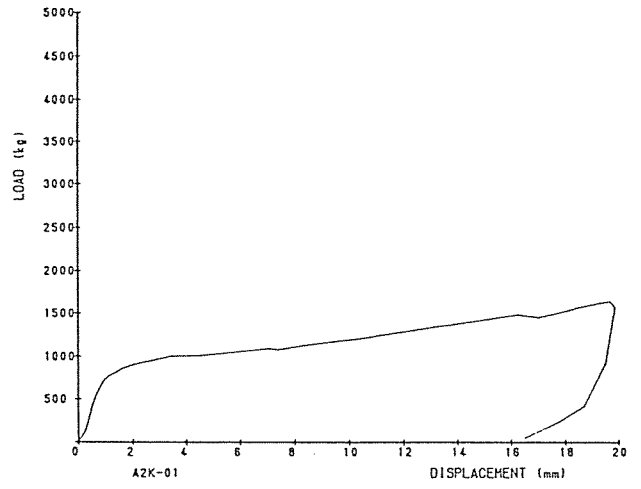
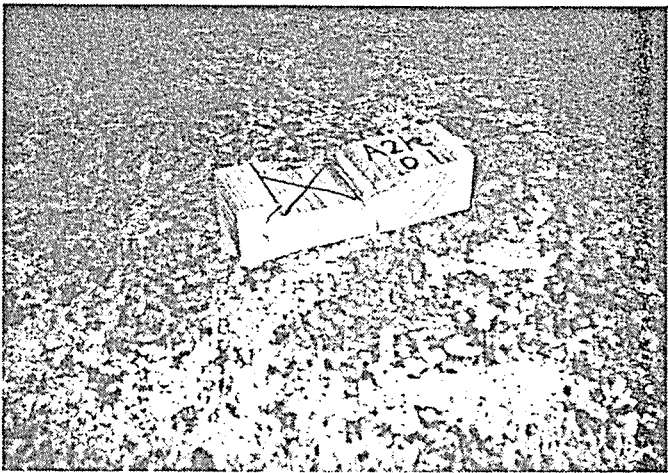
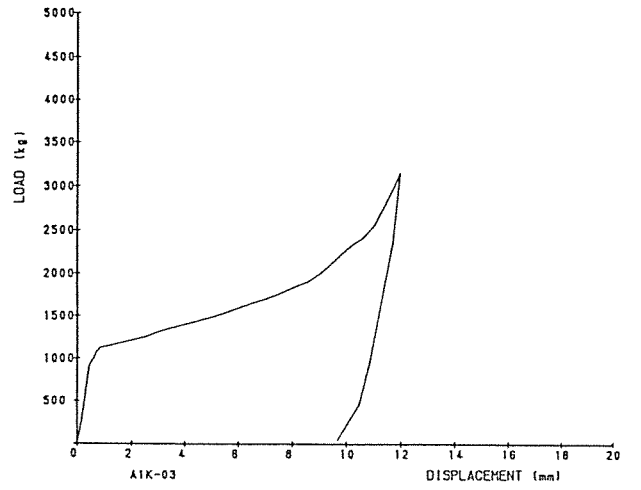
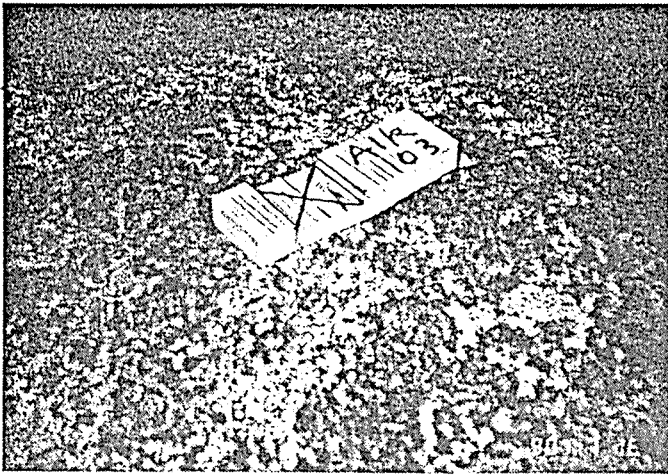




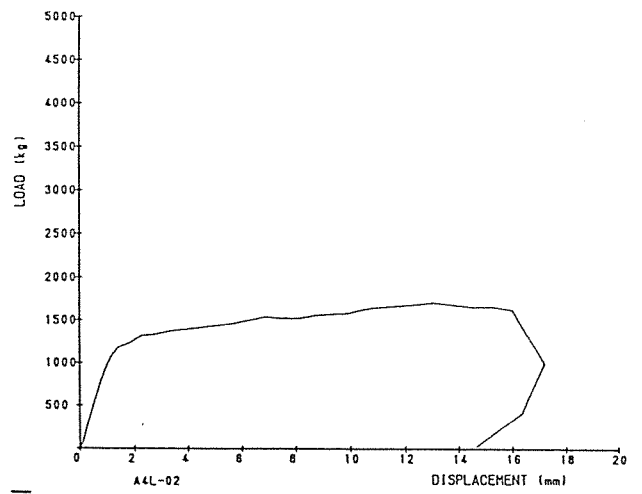
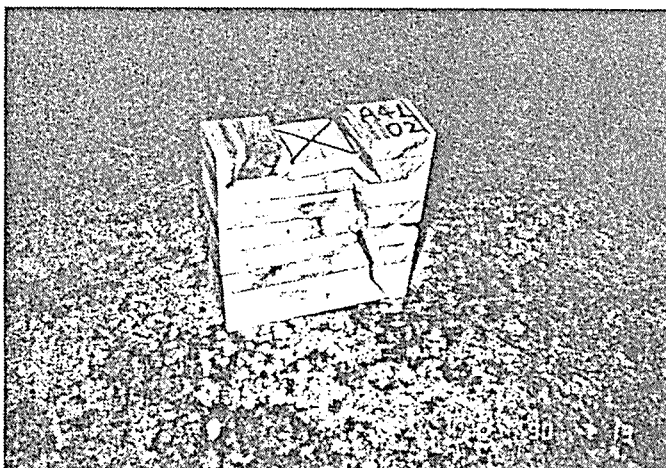
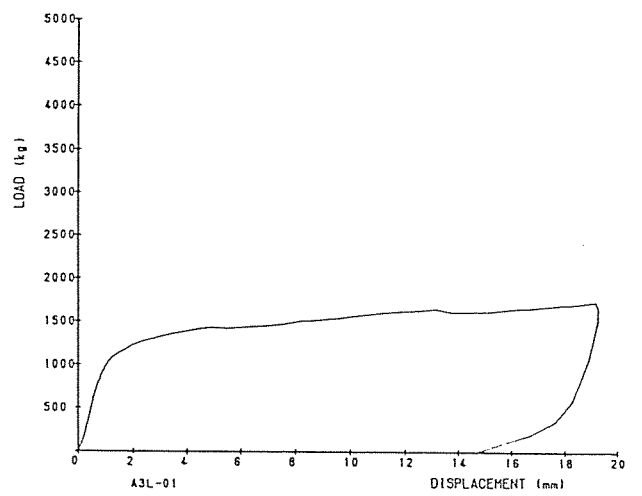
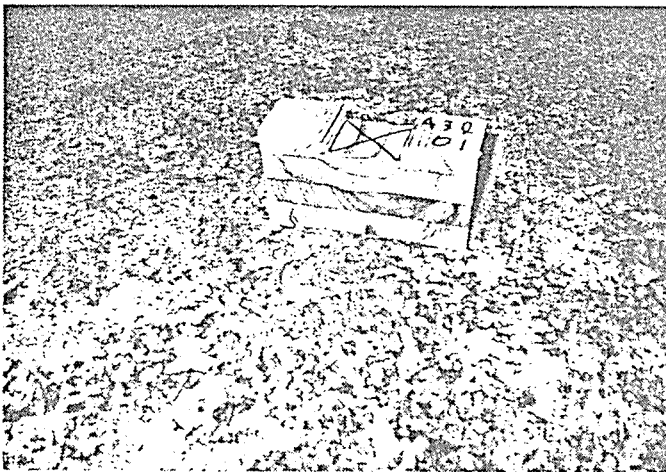
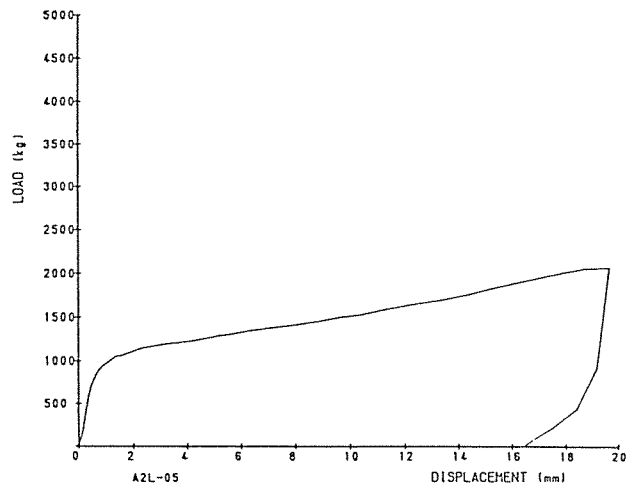
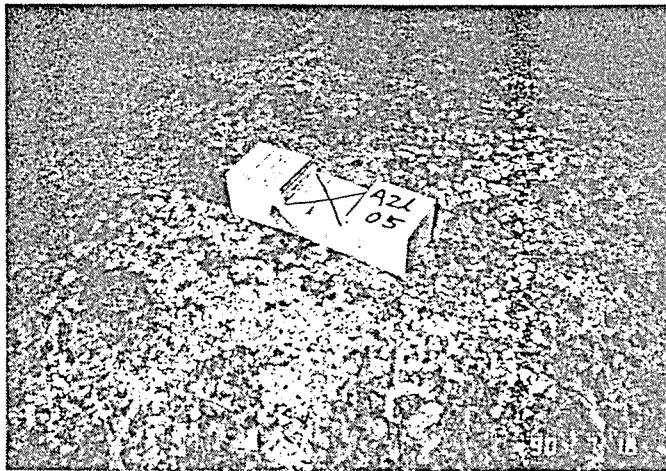
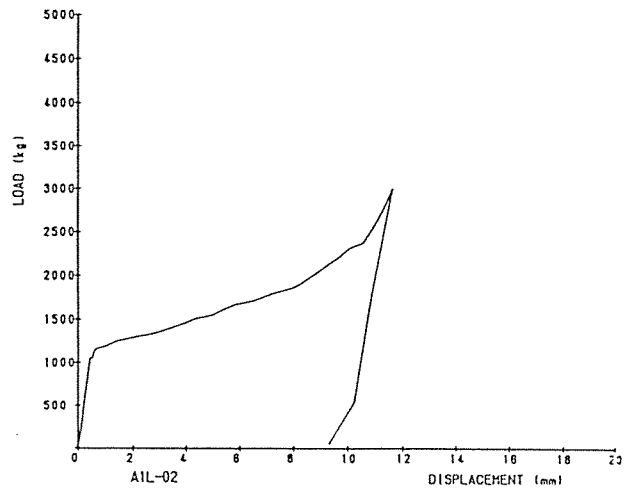
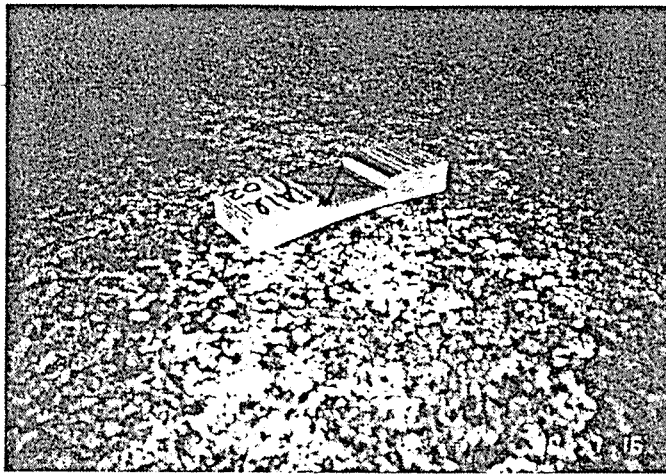


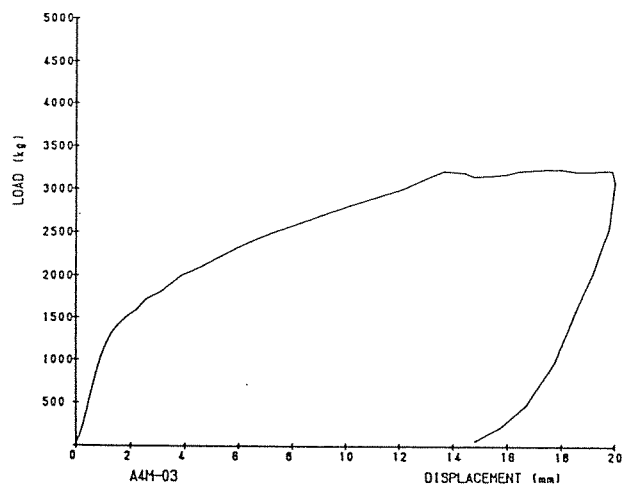
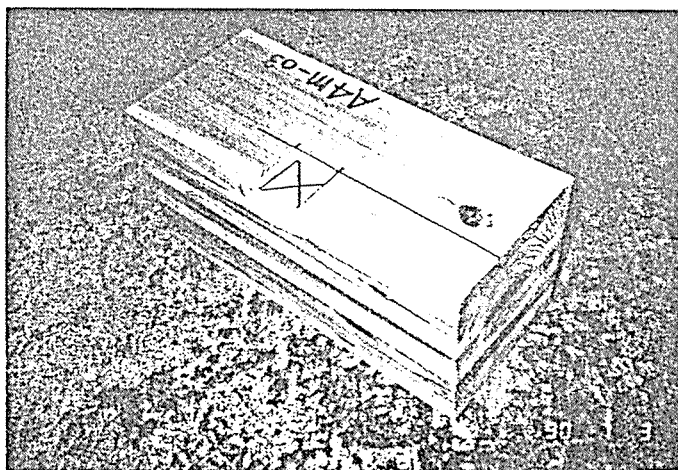
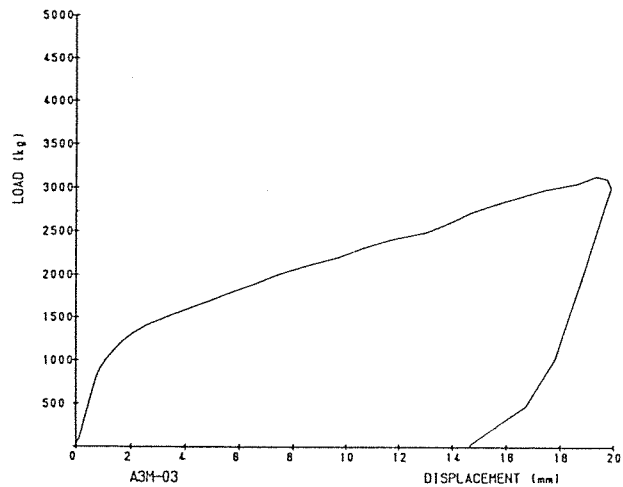
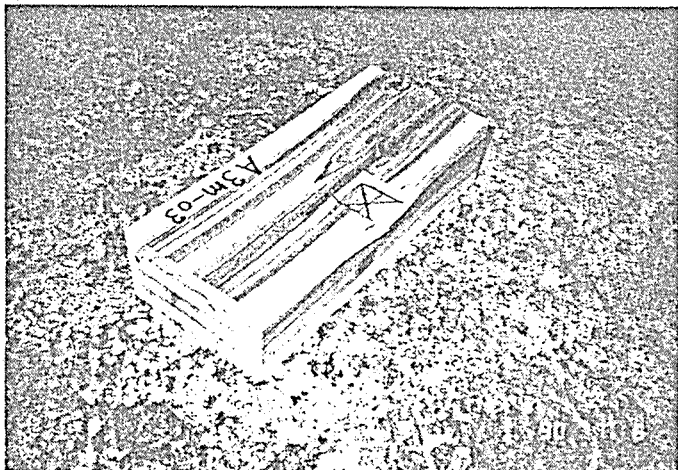
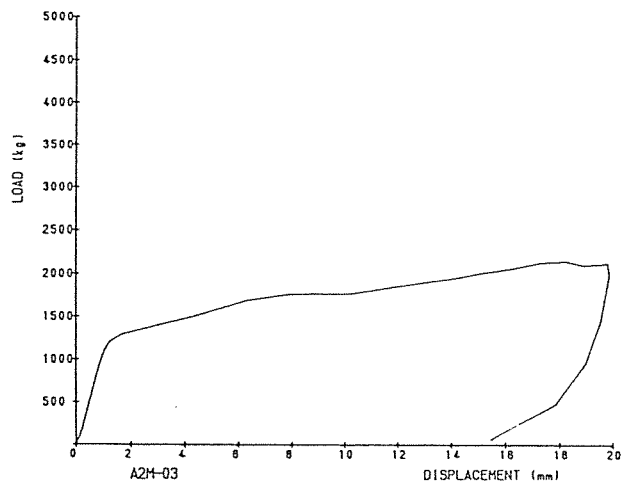
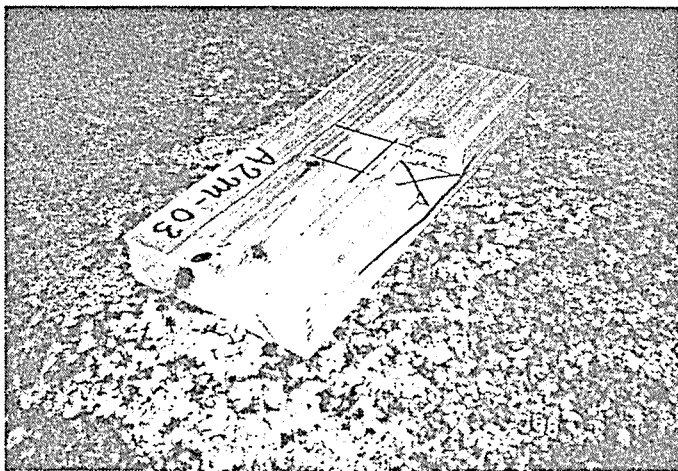
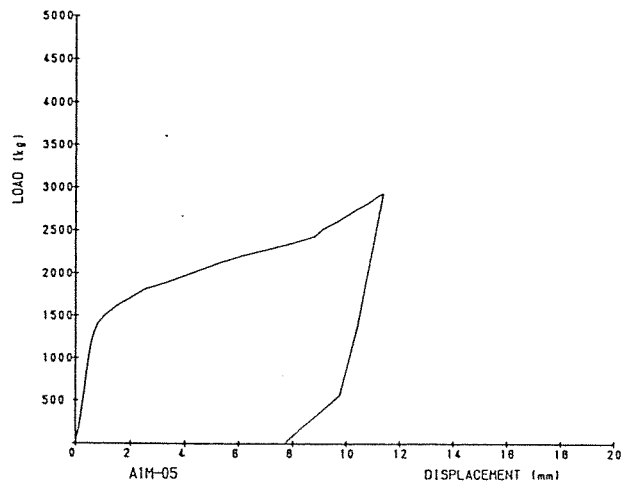
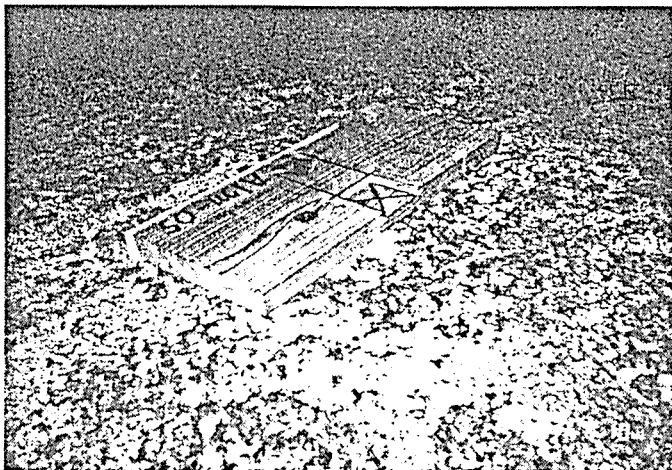


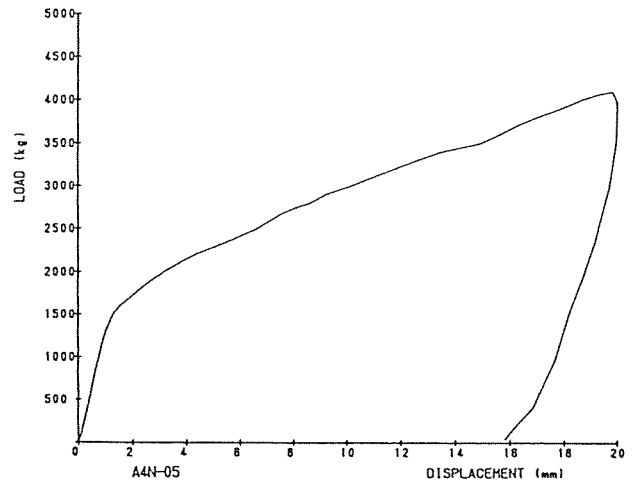
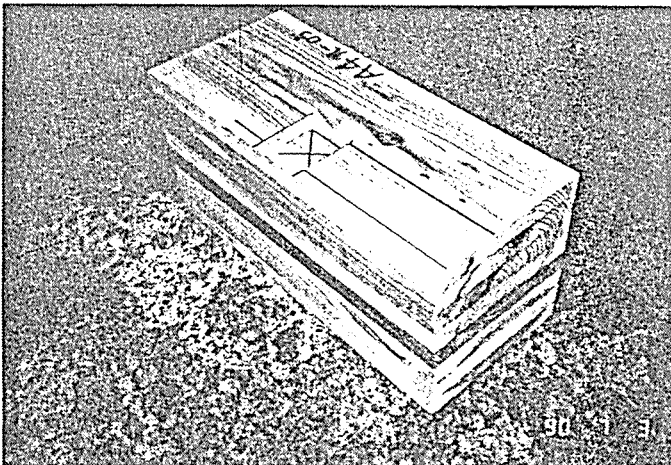
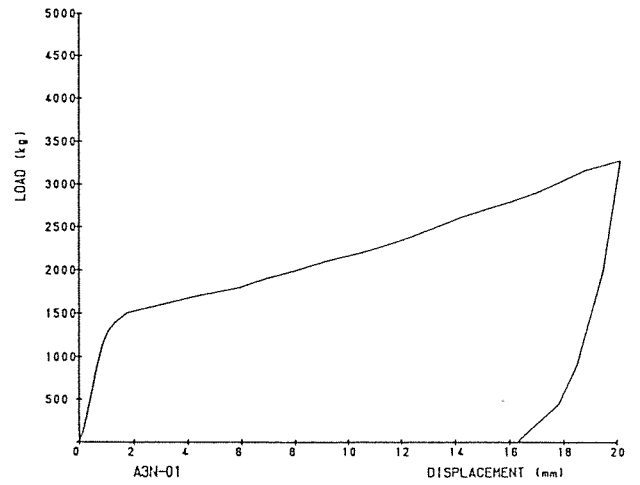
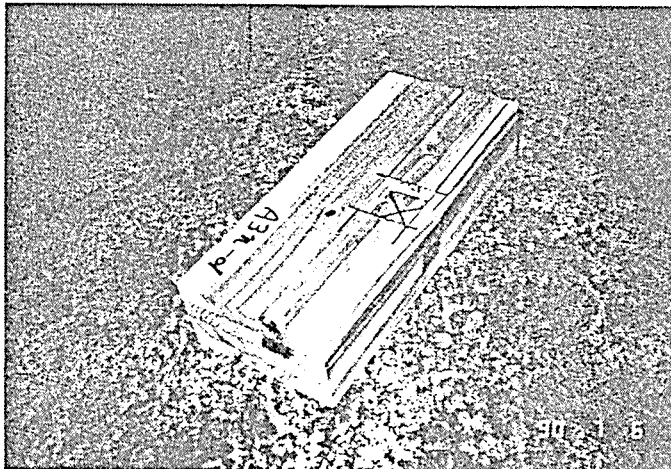
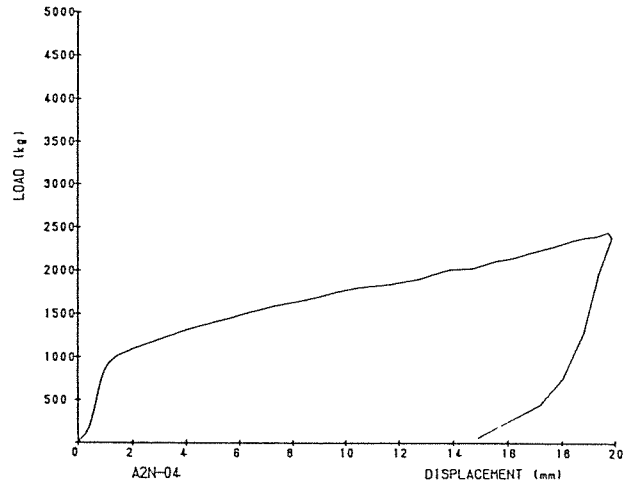
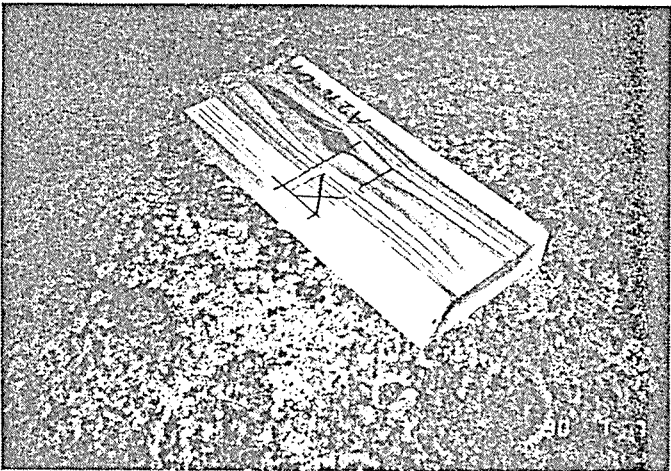
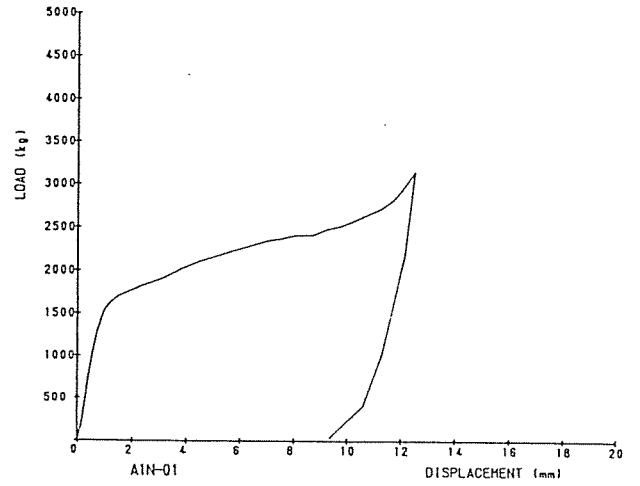
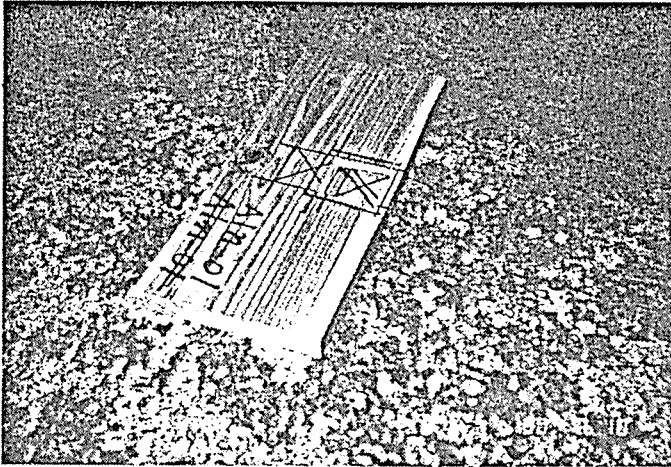


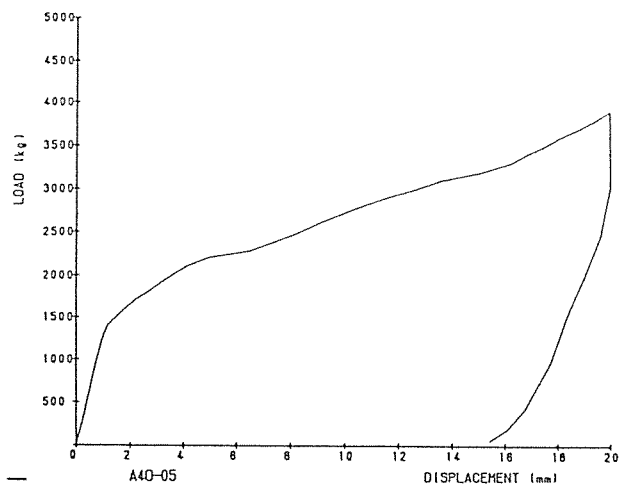
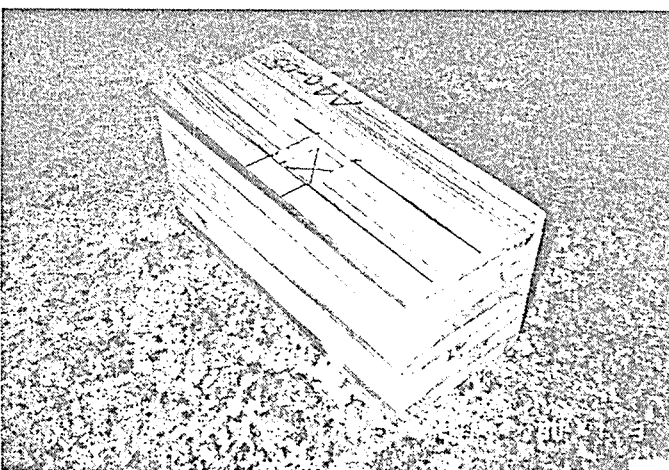
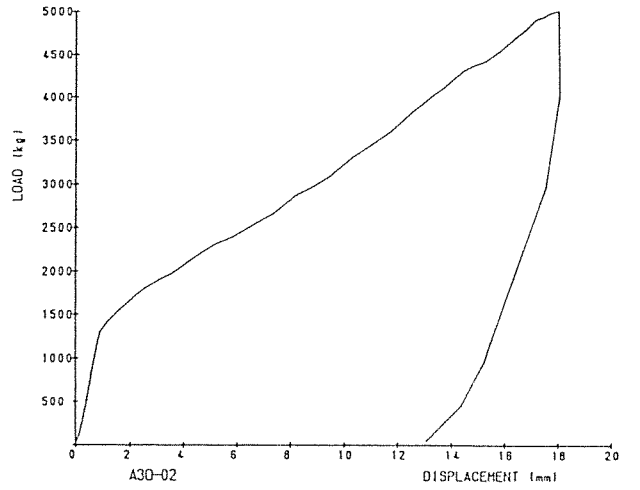
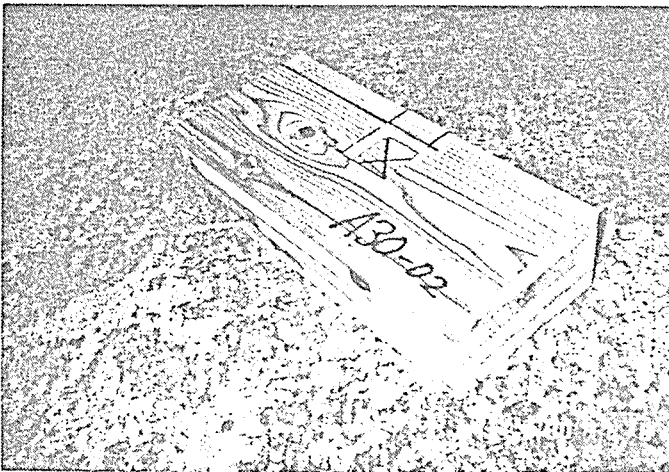
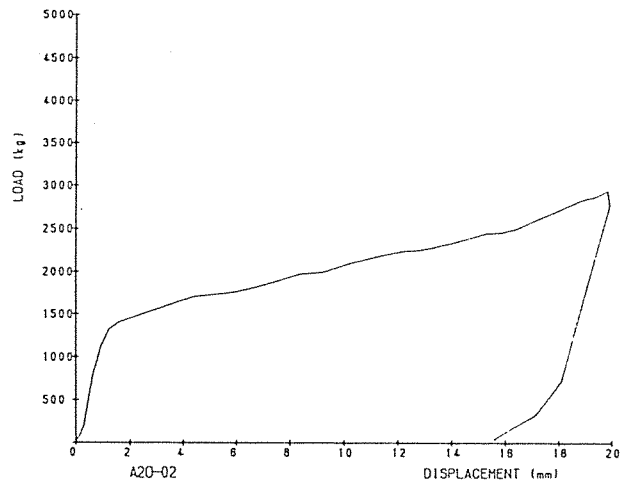
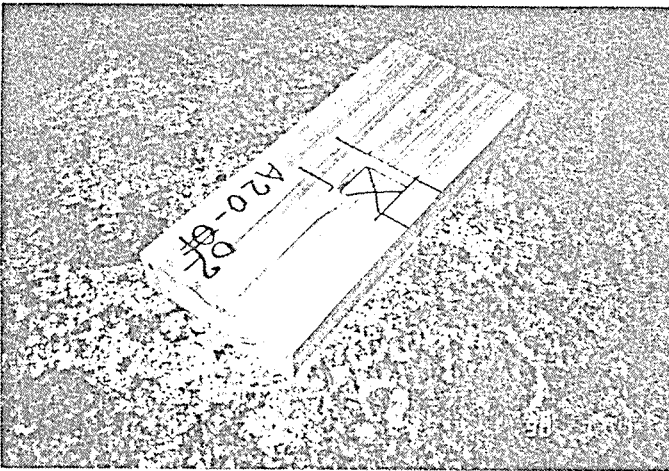
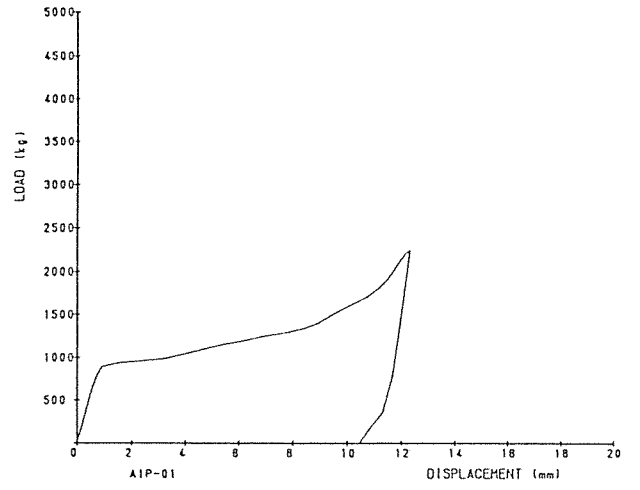
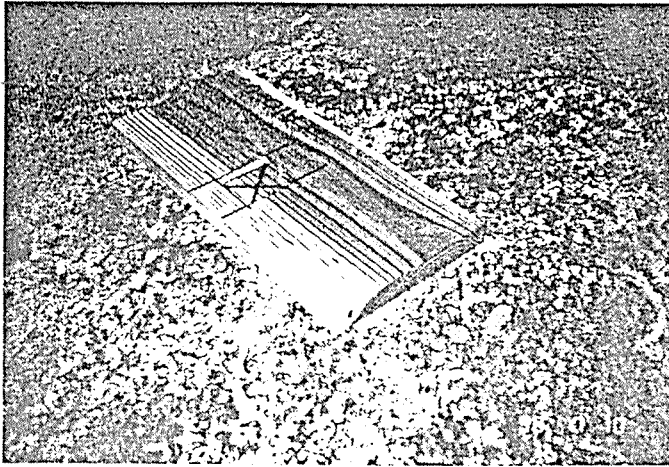




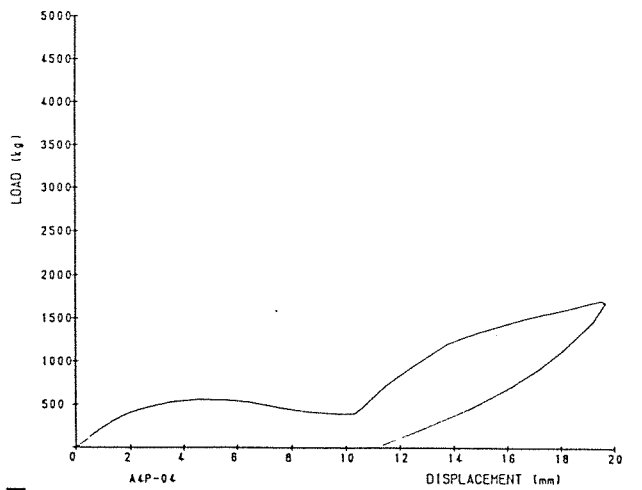
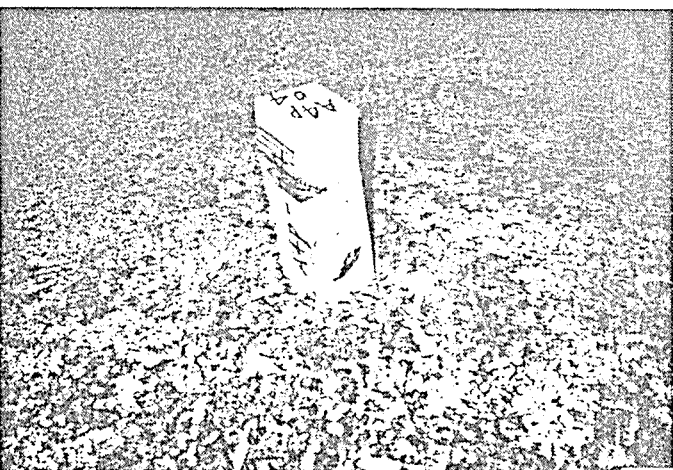
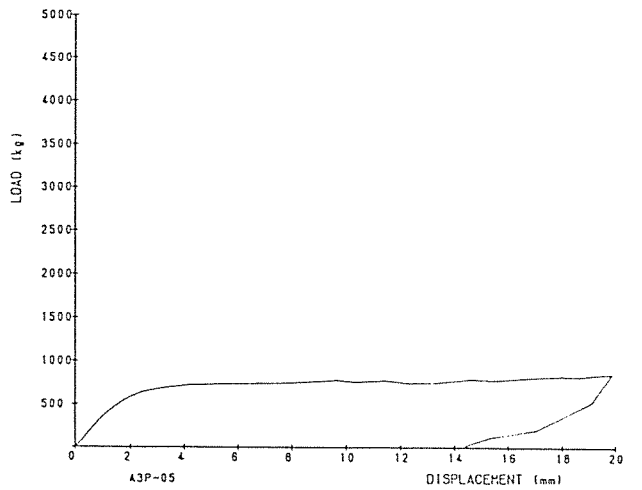
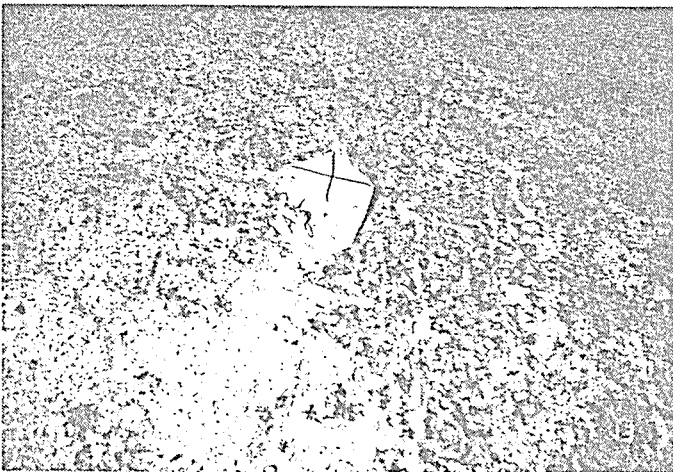
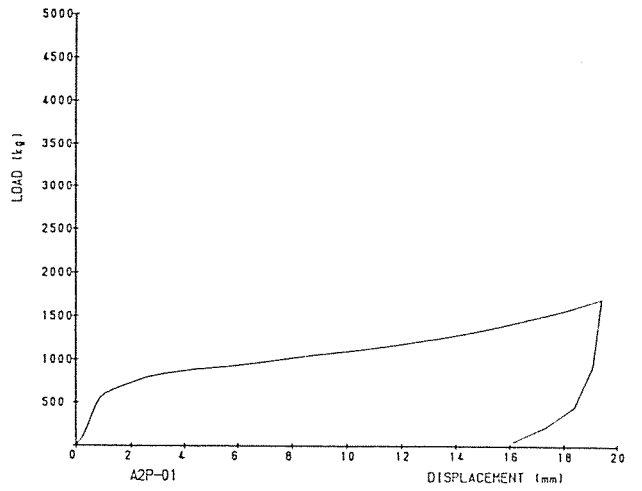
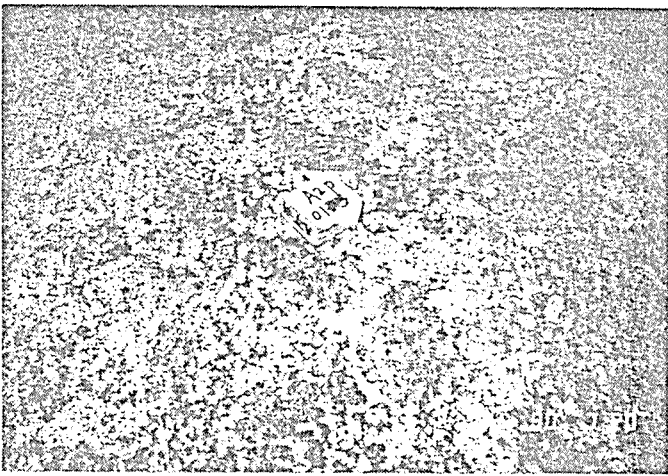
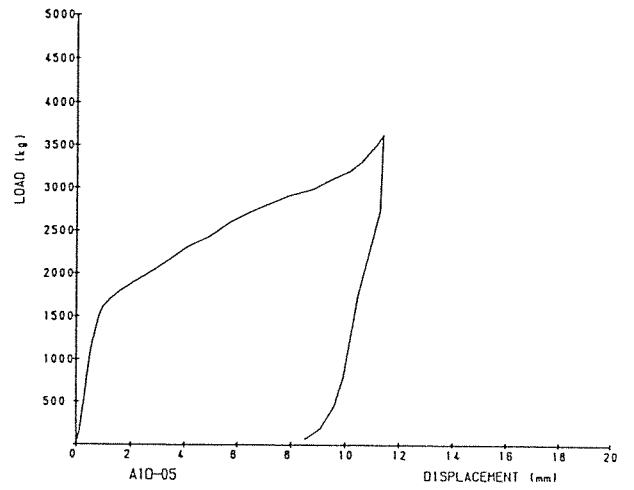
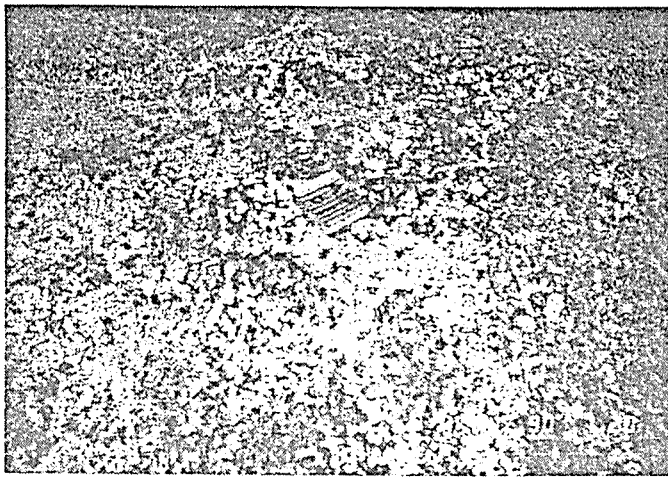












### 5.6. 初期剛性と弾性限界の調査方法

$i$ 番目の点 ( $0 \leq i \leq n$ )の  
変位  $\delta(i)$ 、荷重  $P(i)$ のとき、  
 $x_i = \delta(i)$   
 $y_i = P(i)$ とする。

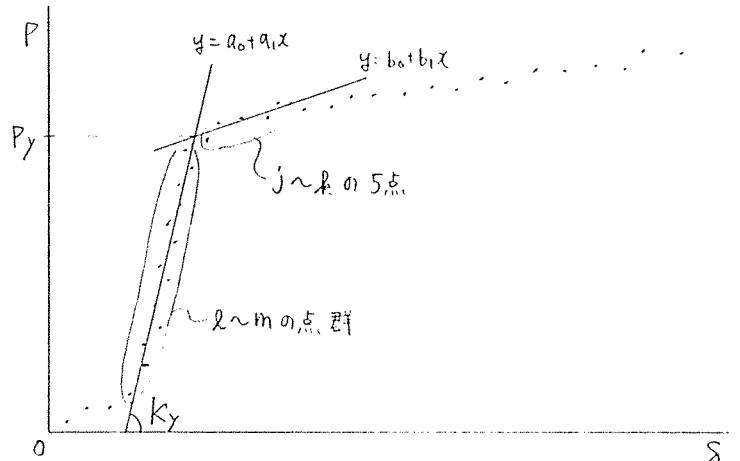
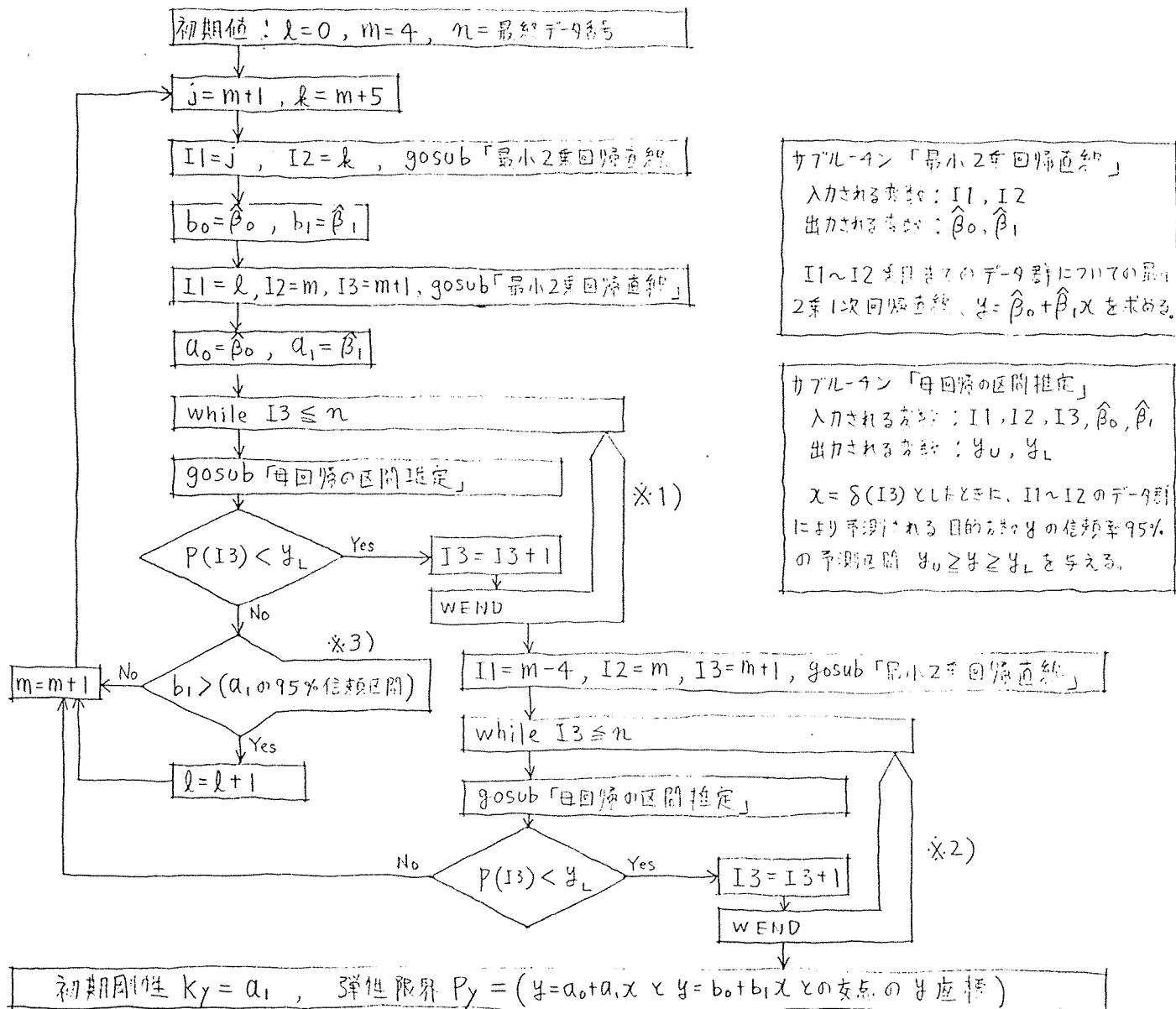


図2

実験データから初期剛性と弾性限界と客観的に導く方法として、以下のフローに示す方法をとった。図2はその補足説明図である。



- ※1と※2の違いは、※1は  $x$  から  $m$  までの全ての点における回帰直線に対して、 $m+1$  以上の全ての点が予測範囲よりグラフの下側にあるかどうかについてチェックしている。これに対し※2は、 $m-4$  から  $m$  までの5点について同様のチェックを行っている。※1だけでは、 $x$  から  $m$  までの点の数が増してゆくとともに予測区間の幅が狭くなってゆく ( $y_u - y_L$  が小さくなってゆく) ので、感覚的に弾性限界だと思われる範囲よりかなり低い荷重で  $P_y$  を出してしまうことが多かったので、※2を追加して、人間の目視による判断に進んでいる。
- ※3では、下記の式(3) を用いて、初期すべり(図2 での原点から3乗用の点まで)をとり除いている。
- サアル-チン「母回帰の区間推定」での  $y_u, y_L$  は、下記の式(4) で与えられる。

フロー中で用いられた統計解析の式の説明

① 偏差平方和

$$\left. \begin{aligned}
 S_{xx} &= \sum_{i=I1}^{I2} x_i^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=I1}^{I2} x_i \right)^2 & [N=I2-I1+1; I1からI2までのデータ数] \\
 S_{yy} &= \sum_{i=I1}^{I2} y_i^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=I1}^{I2} y_i \right)^2 \\
 S_{xy} &= \sum_{i=I1}^{I2} x_i y_i - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=I1}^{I2} x_i \right) \left( \sum_{i=I1}^{I2} y_i \right)
 \end{aligned} \right\} \text{----- (1)}$$

② 最小二乗正規方程式  $y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$  の解

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \quad \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad \text{----- (2)}$$

③ 回帰母数  $\beta_0, \beta_1$  の  $100(1-\alpha)\%$  信頼区間

$$\left. \begin{aligned}
 \beta_1 &\rightarrow \hat{\beta}_1 \pm t(N-2, \alpha) \sqrt{\frac{V_e}{S_{xx}}} \\
 \beta_0 &\rightarrow \hat{\beta}_0 \pm t(N-2, \alpha) \sqrt{\left( \frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}} \right) V_e} \\
 &\left[ \begin{array}{l} t(N-2, \alpha) : \text{自由度 } N-2, \text{ 両側確率 } \alpha \text{ の } t \text{ 分布値} \\ V_e = \frac{S_e}{N-2} : \text{誤差分散の不偏推定値} \quad \left( S_e = S_{yy} - \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}} : \text{残差平方和} \right) \end{array} \right]
 \end{aligned} \right\} \text{----- (3)}$$

④  $x = x_0$  と指定したときの目的変数  $y$  の値  $y_0$  の信頼率  $100(1-\alpha)\%$  の予測区間

$$(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_0) \pm t(N-2, \alpha) \sqrt{\left\{ 1 + \frac{1}{N} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right\} V_e} \quad \text{----- (4)}$$

## 5. 7. 実験結果の解析 その1 ----- 重回帰分析による副因子の影響の除去

## ① 重回帰方程式の解法

今回の実験では、縁端距離と材厚を主因子として、それらと初期剛性 および弾性限界荷重との関係を導くことが主目的である。そのため、心材辺材、含水率、年輪幅、比重といった副因子による変動をとり除く必要がある。副因子を、 $x_1 =$  心材 or 辺材、 $x_2 =$  含水率、 $x_3 =$  年輪幅、 $x_4 =$  比重 とおいたとき、初期剛性および弾性限界荷重を目的変数  $y$  とし、1次重回帰式の形として表わすと、

$$y = f(\psi) \cdot (a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4) + e \quad \text{----- (5)}$$

ここで、 $f(\psi)$ : 縁端距離、材厚を変数とする未知関数

$e$ : 残差

今回の実験においては、 $\psi$ の種類が64種類で、それぞれ5体ずつ実験を行っているので、 $\psi$ の種類を示す番号を  $k$ 、その中の試験体番号を  $i$ 、また4つの副因子の因子番号を  $j$  で表わして、式(5)をある1つの試験体 ( $k_i$ ) についての表示に直すと、

$$y_{k_i} = f(\psi_k) \cdot (a_0 + \sum_{j=1}^4 a_j x_{j k_i}) + e_{k_i} \quad \text{----- (6)}$$

4つの副因子による影響を最大限にとり除くように各係数  $a_j$  を決定することは、式(6)の残差  $e_{k_i}$  の320体についての平方和を最小化することに等しい。残差平方和  $S_e$  は、式(6)より

$$S_e = \sum_{k=1}^{64} \sum_{i=1}^5 \left\{ y_{k_i} - f(\psi_k) \cdot (a_0 + \sum_{j=1}^4 a_j x_{j k_i}) \right\}^2 \quad \text{----- (7)}$$

縁端距離、材厚による関数  $f(\psi)$  は未知なので、これも変数として扱おうと、式(7)は、 $a_0, a_1 \sim a_4$ , および  $f(\psi_1) \sim f(\psi_{63})$  の68変数を含む ( $f(\psi_{64})$  は、例えば  $=1$  としない) 解が定まらない。式(7)を最小化するには、

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{\partial S_e}{\partial a_0} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial S_e}{\partial a_4} = 0 \\ \frac{\partial S_e}{\partial f(\psi_1)} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial S_e}{\partial f(\psi_{63})} = 0 \end{array} \right] \quad \text{----- (8)}$$

68個の連立方程式(8)を満たす解の1つが、残差平方和  $S_e$  を最小化する解である。式(8)に式(7)を代入して、偏微分をした形で表わすと次式の様になる。



なお、 $f(\psi_k) = \alpha_k$  として表示した。

$$\left. \begin{aligned}
 &1 \text{ 番目の式} : \sum_{k=1}^{69} \left( \alpha_k \sum_{i=1}^5 y_{ki} \right) - \sum_{k=1}^{69} \left[ \alpha_k^2 \left\{ 5a_0 + \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{jki} \right) \right\} \right] = 0 \\
 &(1+Q) \text{ 番目の式} : \sum_{k=1}^{69} \left( \alpha_k \sum_{i=1}^5 x_{Qki} y_{ki} \right) - \sum_{k=1}^{69} \left[ \alpha_k^2 \left\{ a_0 \sum_{i=1}^5 x_{Qki} + \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{Qki} x_{jki} \right) \right\} \right] = 0 \\
 &\quad (Q=1 \sim 4) \\
 &(5+P) \text{ 番目の式} : 5\alpha_P a_0^2 - a_0 \sum_{i=1}^5 y_{Pi} - \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{jPi} y_{Pi} \right) + 2\alpha_P a_0 \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{jPi} \right) \\
 &\quad (P=1 \sim 63) \\
 &\quad + \alpha_P \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^4 \left( a_j \cdot a_l \sum_{i=1}^5 x_{jPi} \cdot x_{lPi} \right) = 0 \\
 &69 \text{ 番目の式} : \alpha_{69} = 1
 \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

式(9)は、68変数の3次の項までを含む非線形連立方程式となり、式(9)を最小化する解を唯一見出すのは極めて困難である。しかし、例えば、 $\alpha$ の数が17であれば、適切な解を見出すのは比較的簡単で、Newton-Raphson法を用いて、コンピュータで逐次近似計算をすることにより、求める解を得ることができる。 $\alpha$ がさらに1つ増えても、 $\alpha$ のとり得る範囲が工学的な意味から判断して、1桁以上異なることはまずないと考えられるため、1つ前の $\alpha$ の値を初期値として代入してやれば求める解へと収束するものと考えられる。このように、順次 $\alpha$ を1つずつ増やしてゆくやり方で、式(9)を解いた。なお、以下に、ヤコビアン要素の計算式を示しておく。

$$\left. \begin{aligned}
 &1 \text{ 番目の式を } f=0, (1+M) \text{ 番目の式を } g_M=0, (5+N) \text{ 番目の式を } h_N=0 \text{ とおくと、} \\
 &\frac{\partial f}{\partial a_0} = -5 \sum_{k=1}^{69} \alpha_k^2, \quad \frac{\partial f}{\partial a_g} = - \sum_{k=1}^{69} \left( \alpha_k^2 \sum_{i=1}^5 x_{gki} \right) \\
 &\frac{\partial f}{\partial \alpha_P} = \sum_{i=1}^5 y_{Pi} - 2\alpha_P \left\{ 5a_0 + \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{jPi} \right) \right\} \\
 &\frac{\partial g_M}{\partial a_0} = - \sum_{k=1}^{69} \left( \alpha_k^2 \sum_{i=1}^5 x_{Mki} \right), \quad \frac{\partial g_M}{\partial a_g} = - \sum_{k=1}^{69} \left( \alpha_k^2 \sum_{i=1}^5 x_{Mki} \cdot x_{gki} \right) \\
 &\frac{\partial g_M}{\partial \alpha_P} = \sum_{i=1}^5 x_{MPi} y_{Pi} - 2\alpha_P \left\{ a_0 \sum_{i=1}^5 x_{MPi} + \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{MPi} \cdot x_{jPi} \right) \right\} \\
 &\frac{\partial h_N}{\partial a_0} = 10\alpha_N a_0 - \sum_{i=1}^5 y_{Ni} + 2\alpha_N \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{jNi} \right) \\
 &\frac{\partial h_N}{\partial a_g} = 2\alpha_N \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{gNi} \cdot x_{jNi} \right) - \sum_{i=1}^5 x_{gNi} y_{Ni} + 2\alpha_N a_0 \sum_{i=1}^5 x_{gNi} \\
 &\frac{\partial h_N}{\partial \alpha_P} = 5a_0^2 + \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^4 \left( a_j a_l \sum_{i=1}^5 x_{jNi} \cdot x_{lNi} \right) + 2a_0 \sum_{j=1}^4 \left( a_j \sum_{i=1}^5 x_{jNi} \right)
 \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

式(10)を、初期剛性と弾性限界荷重について解いて得られた68変数の解を下に記す。

### 初期剛性

|               |               |                |               |               |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| X( 1)= 1.3293 | X( 2)= 0.1193 | X( 3)= -0.0469 | X( 4)= 0.1033 | X( 5)= 3.7235 |
| X( 6)= 7.7048 | X( 7)= 7.6070 | X( 8)= 8.5788  | X( 9)= 8.3896 | X(10)= 7.0246 |
| X(11)= 8.8453 | X(12)= 8.8288 | X(13)= 8.0725  | X(14)= 4.9257 | X(15)= 6.7951 |
| X(16)= 7.7815 | X(17)= 8.4617 | X(18)= 7.8272  | X(19)= 7.3826 | X(20)= 7.5691 |
| X(21)= 5.5341 | X(22)= 3.4401 | X(23)= 5.0458  | X(24)= 4.7784 | X(25)= 4.6447 |
| X(26)= 6.7260 | X(27)= 7.2654 | X(28)= 7.2395  | X(29)= 8.2968 | X(30)= 2.3112 |
| X(31)= 3.7682 | X(32)= 5.3782 | X(33)= 7.2229  | X(34)= 3.0099 | X(35)= 4.5294 |
| X(36)= 6.3754 | X(37)= 2.6654 | X(38)= 2.9736  | X(39)= 4.3340 | X(40)= 3.2923 |
| X(41)= 3.5640 | X(42)= 5.3311 | X(43)= 5.6983  | X(44)= 5.9522 | X(45)= 6.8678 |
| X(46)= 2.4789 | X(47)= 2.5830 | X(48)= 3.8160  | X(49)= 4.1866 | X(50)= 4.2178 |
| X(51)= 5.2008 | X(52)= 5.7063 | X(53)= 1.4969  | X(54)= 1.4186 | X(55)= 1.9517 |
| X(56)= 3.5014 | X(57)= 2.8798 | X(58)= 3.9374  | X(59)= 5.1676 | X(60)= 5.5853 |
| X(61)= 5.9524 | X(62)= 1.3247 | X(63)= 1.7845  | X(64)= 2.1558 | X(65)= 3.1868 |
| X(66)= 3.8263 | X(67)= 4.8960 | X(68)= 4.8275  |               |               |

### 弾性限界

|                |                |                |                |                 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| X( 1)= 51.9718 | X( 2)= 23.1411 | X( 3)= 11.8540 | X( 4)= 15.8004 | X( 5)= 396.5160 |
| X( 6)= 2.4767  | X( 7)= 2.4874  | X( 8)= 2.8392  | X( 9)= 2.6977  | X(10)= 2.9172   |
| X(11)= 3.3228  | X(12)= 3.5668  | X(13)= 2.6607  | X(14)= 2.1278  | X(15)= 2.2833   |
| X(16)= 2.4004  | X(17)= 2.4625  | X(18)= 3.0892  | X(19)= 3.0334  | X(20)= 2.9590   |
| X(21)= 2.1667  | X(22)= 1.4550  | X(23)= 2.1190  | X(24)= 2.6851  | X(25)= 2.1588   |
| X(26)= 2.8247  | X(27)= 3.1425  | X(28)= 2.2904  | X(29)= 2.9630  | X(30)= 1.4465   |
| X(31)= 1.6342  | X(32)= 1.9037  | X(33)= 2.3225  | X(34)= 2.3606  | X(35)= 2.5401   |
| X(36)= 2.4656  | X(37)= 1.5135  | X(38)= 2.0558  | X(39)= 2.5303  | X(40)= 2.8052   |
| X(41)= 2.6261  | X(42)= 2.8635  | X(43)= 3.2284  | X(44)= 2.9940  | X(45)= 2.9896   |
| X(46)= 1.9866  | X(47)= 1.8460  | X(48)= 2.0296  | X(49)= 2.5584  | X(50)= 2.4771   |
| X(51)= 3.0499  | X(52)= 3.3212  | X(53)= 1.3428  | X(54)= 1.4387  | X(55)= 1.7035   |
| X(56)= 2.2348  | X(57)= 2.6617  | X(58)= 3.2897  | X(59)= 3.2072  | X(60)= 3.3469   |
| X(61)= 2.9901  | X(62)= 1.6410  | X(63)= 1.3884  | X(64)= 2.1352  | X(65)= 2.5478   |
| X(66)= 2.4414  | X(67)= 3.6470  | X(68)= 2.5482  |                |                 |

そこで、 $a_0 = X(1)$ 、 $a_1 = X(2)$ 、 $a_2 = X(3)$ 、 $a_3 = X(4)$ 、 $a_4 = X(5)$ 、  
 $a_1 = X(6)$ 、 $\dots$ 、 $a_{63} = X(68)$ 、 $a_{64} = 1$  とある。

これより、式(2.42)にもとづき、 $\frac{y_{64i}}{a_{64}}$  と各因子  $x_1 \sim x_4$  について分散分析を行って見た。

■ 初期剛性と副因子との分散分析と重相関

$$F_{252}^1(0.05) = 3.88$$

$$F_{252}^1(0.01) = 6.74$$

分散分析表

| Source          | f (自由度) | S (変動)  | V (分散) | F <sub>0</sub> (分散比) | S' (純変動) | P (寄与率%) |
|-----------------|---------|---------|--------|----------------------|----------|----------|
| $x_1$ (花 or 辺材) | 1       | 5.0961  | 5.0961 | 17.86**              | 4.8107   | 5.8      |
| $x_2$ (含水率)     | 1       | 0.0043  | 0.0043 | 0.015                | -0.2811  | -0.3     |
| $x_3$ (年輪幅)     | 1       | 1.8756  | 1.8756 | 6.57*                | 1.5902   | 1.9      |
| $x_4$ (比重)      | 1       | 3.7058  | 3.7058 | 12.99**              | 3.4204   | 4.1      |
| e (残差)          | 252     | 71.9097 | 0.2854 | —                    | 73.0513  | 88.4     |
| T               | 256     | 82.5915 | 0.3226 | —                    | 82.5915  | 100.0    |

重相関係数および各因子の単相関係数

$$1\text{次重回帰式 } y_{ki} = a_k (1.3293 + 0.1193x_1 - 0.0469x_2 + 0.1033x_3 + 3.7235x_4)$$

$$\text{重相関係数 } r = 0.3678$$

$$\text{各単相関係数 } r_1 = 0.2483 \quad r_2 = 0.0072 \quad r_3 = 0.1507 \quad r_4 = 0.2118$$

■ 弾性限界と副因子との分散分析と重相関

$$F_{252}^1(0.05) = 3.88$$

$$F_{252}^1(0.01) = 6.74$$

分散分析表

| Source          | f (自由度) | S (変動)  | V (分散)  | F <sub>0</sub> (分散比) | S' (純変動) | P (寄与率%) |
|-----------------|---------|---------|---------|----------------------|----------|----------|
| $x_1$ (花 or 辺材) | 1       | 202913  | 202913  | 41.19**              | 197987   | 10.1     |
| $x_2$ (含水率)     | 1       | 223073  | 223073  | 45.28**              | 218147   | 11.1     |
| $x_3$ (年輪幅)     | 1       | 186597  | 186597  | 37.88**              | 181671   | 9.2      |
| $x_4$ (比重)      | 1       | 108616  | 108616  | 22.05**              | 103687   | 5.3      |
| e (残差)          | 252     | 1241434 | 4926.33 | —                    | 1261139  | 64.4     |
| T               | 256     | 1962632 | 7666.53 | —                    | 1962632  | 100.0    |

重相関係数および各因子の単相関

$$1\text{次重回帰式 } y_{ki} = a_k (51.9718 + 23.1411x_1 + 11.8540x_2 + 15.8004x_3 + 396.5160x_4)$$

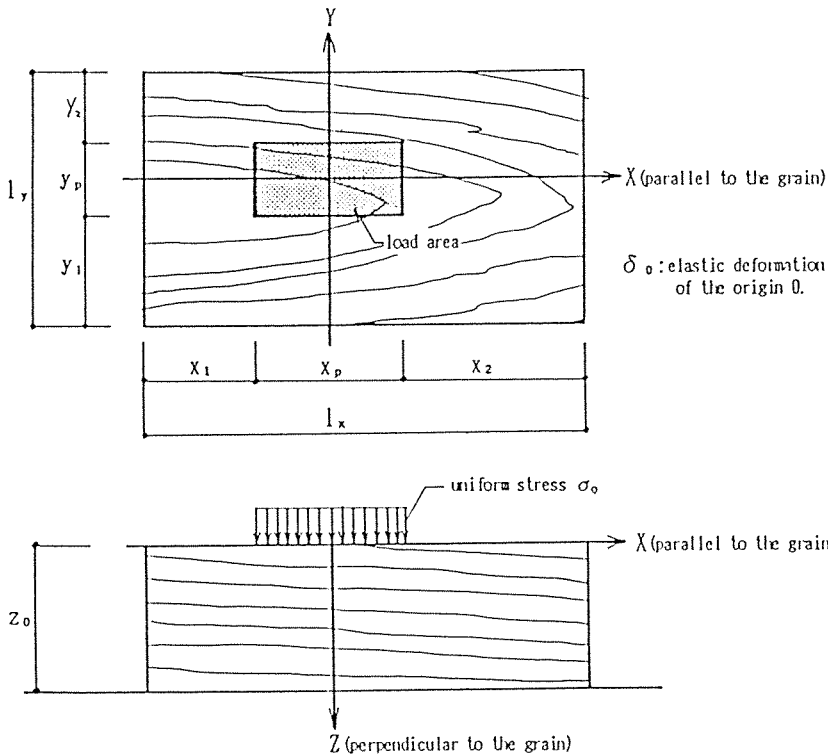
$$\text{重相関係数 } r = 0.5073$$

$$\text{各単相関係数 } r_1 = 0.3215 \quad r_2 = 0.3371 \quad r_3 = 0.3083 \quad r_4 = 0.2353$$

5.8. 実験結果の解析 その2 ----- メリニリ理論式との比較

副因子による影響をとり除いた初期剛性と弾性限界荷重の実験結果と、初期剛性の理論値との比較を次ページ以降の一覧表にした。材厚や終端距離などの関数の形での、繊維に直交方向の部分圧縮による弾性変形についての理論式は、下式<sup>注1)</sup>を用いた。なお、下式において、木構造計算規準の記述にもとづき、 $E_{//}/E_{\perp ALL} = 25$ とした。また、杉材の  $E_{\perp ALL} = 1400 \text{ kg/cm}^2$  と仮の値を代入した。

注1) M. Inayama et al, "STUDY ON ELASTIC DEFORMATION PERPENDICULAR TO THE GRAIN IN WOOD", International Timber Engineering Conference, 1990



式(11)の準備計算

$$N = \left( \frac{E_{//}}{E_{\perp ALL}} \right)^{1/2}$$

$$X_1 = \frac{x_1}{N z_0}$$

$$X_p = \frac{x_p}{N z_0}$$

$$X_L = \frac{l_x}{N z_0}$$

$$Y_1 = \frac{y_1}{z_0}$$

$$Y_p = \frac{y_p}{z_0}$$

$$Y_L = \frac{l_y}{z_0}$$

3

$$\delta_0 = \frac{\sigma_0 z_0}{E_{\perp ALL}} C_f$$

$$C_f = \frac{1}{\pi} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^4 \{ f(X_{a,k}, Y_{a,k}) - f(X_{a,k}, Y_{b,k}) - f(X_{b,k}, Y_{a,k}) + f(X_{b,k}, Y_{b,k}) \}$$

$$f(X, Y) = X \log \left| \frac{(Y + (X^2 + Y^2)^{1/2})(X^2 + 1)^{1/2}}{X(Y + (X^2 + Y^2 + 1)^{1/2})} \right| + Y \log \left| \frac{(X + (X^2 + Y^2)^{1/2})(Y^2 + 1)^{1/2}}{Y(X + (X^2 + Y^2 + 1)^{1/2})} \right| + \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{XY}{(X^2 + Y^2 + 1)^{1/2}} \right\} \quad (11)$$

$$X_{a,1} = X_{a,2} = 2iX_L - 2X_1 - \frac{3}{2} X_p \quad Y_{a,1} = Y_{a,3} = 2jY_L - 2Y_1 - \frac{3}{2} Y_p$$

$$X_{a,3} = X_{a,4} = 2iX_L - \frac{1}{2} X_p \quad Y_{a,2} = Y_{a,4} = 2jY_L - \frac{1}{2} Y_p$$

$$X_{b,k} = X_{a,k} + X_p \quad Y_{b,k} = Y_{a,k} + Y_p$$

副因子の影響を除いた初期剛性と弾性限界荷重および初期剛性の理論値

| 番号     | 初期剛性<br>(t/cm) | 弾性限界<br>(kg) | 初期剛性の理論値 |
|--------|----------------|--------------|----------|
| Ala-1  | 22.002934      | 1168.8739    | 23.2626  |
| Ala-2  | 13.977926      | 961.83453    | 23.2626  |
| Ala-3  | 25.456499      | 1056.7222    | 23.2626  |
| Ala-4  | 20.415306      | 825.10250    | 23.2626  |
| Ala-5  | 25.019020      | 1158.3764    | 23.2626  |
| Alb-1  | 24.209277      | 1166.6682    | 26.8951  |
| Alb-2  | 20.197911      | 1028.2354    | 26.8951  |
| Alb-3  | 20.206822      | 872.01368    | 26.8951  |
| Alb-4  | 22.627035      | 1160.1721    | 26.8951  |
| Alb-5  | 17.689098      | 921.34855    | 26.8951  |
| Alc-1  | 17.196979      | 911.96323    | 28.3576  |
| Alc-2  | 28.432564      | 1276.0125    | 28.3576  |
| Alc-3  | 27.762086      | 1386.8233    | 28.3576  |
| Alc-4  | 28.024927      | 1297.8981    | 28.3576  |
| Alc-5  | 17.208935      | 1054.7911    | 28.3576  |
| Alld-1 | 27.420995      | 1222.0115    | 28.7884  |
| Alld-2 | 16.668353      | 1292.1378    | 28.7884  |
| Alld-3 | 27.272076      | 1086.4111    | 28.7884  |
| Alld-4 | 20.398036      | 921.49625    | 28.7884  |
| Alld-5 | 25.448452      | 1132.3662    | 28.7884  |
| Ale-1  | 12.187428      | 1480.4503    | 23.6572  |
| Ale-2  | 17.834014      | 1158.1734    | 23.6572  |
| Ale-3  | 23.707094      | 1331.4369    | 23.6572  |
| Ale-4  | 21.373162      | 940.95974    | 23.6572  |
| Ale-5  | 22.908270      | 1204.4261    | 23.6572  |
| Alf-1  | 25.658707      | 1324.4437    | 27.3525  |
| Alf-2  | 24.625933      | 1353.9331    | 27.3525  |
| Alf-3  | 24.231261      | 1131.0240    | 27.3525  |
| Alf-4  | 23.737827      | 1821.3980    | 27.3525  |
| Alf-5  | 25.013784      | 1332.4776    | 27.3525  |
| Alg-1  | 24.858599      | 1245.3723    | 28.7719  |
| Alg-2  | 20.778504      | 1348.3789    | 28.7719  |
| Alg-3  | 27.214280      | 1849.5426    | 28.7719  |
| Alg-4  | 26.397915      | 1409.2783    | 28.7719  |
| Alg-5  | 23.328499      | 1614.1713    | 28.7719  |
| Alh-1  | 25.673609      | 1413.8259    | 29.1361  |
| Alh-2  | 23.897104      | 1048.3652    | 29.1361  |
| Alh-3  | 22.225512      | 1131.4025    | 29.1361  |
| Alh-4  | 19.199042      | 1035.2281    | 29.1361  |
| Alh-5  | 21.783043      | 968.13235    | 29.1361  |
| Ali-1  | 9.5664838      | 819.38483    | 17.8378  |
| Ali-2  | 13.496388      | 780.54537    | 17.8378  |
| Ali-3  | 14.979564      | 1366.0242    | 17.8378  |
| Ali-4  | 13.795008      | 864.26501    | 17.8378  |
| Ali-5  | 16.754853      | 615.52234    | 17.8378  |
| Alj-1  | 25.317513      | 867.34416    | 18.0855  |
| Alj-2  | 19.101662      | 1423.7851    | 18.0855  |
| Alj-3  | 13.402533      | 595.91201    | 18.0855  |
| Alj-4  | 13.335715      | 888.23514    | 18.0855  |
| Alj-5  | 23.374177      | 1007.0464    | 18.0855  |
| Alk-1  | 16.249421      | 845.59293    | 18.138   |
| Alk-2  | 29.086851      | 1227.3344    | 18.138   |
| Alk-3  | 25.353010      | 1143.7837    | 18.138   |
| Alk-4  | 16.136325      | 899.04283    | 18.138   |
| Alk-5  | 20.712920      | 884.66553    | 18.138   |
| Alld-1 | 25.356487      | 1239.8621    | 18.1491  |
| Alld-2 | 25.572984      | 1166.4814    | 18.1491  |
| Alld-3 | 26.498491      | 1300.1842    | 18.1491  |
| Alld-4 | 18.318127      | 764.49305    | 18.1491  |
| Alld-5 | 22.011169      | 742.83186    | 18.1491  |
| Alm-1  | 21.788614      | 1482.5923    | 28.9677  |
| Alm-2  | 25.495544      | 1288.9280    | 28.9677  |
| Alm-3  | 17.713751      | 1435.4995    | 28.9677  |
| Alm-4  | 21.765919      | 1116.2529    | 28.9677  |
| Alm-5  | 21.790185      | 1176.4909    | 28.9677  |
| Aln-1  | 20.521879      | 1103.6672    | 29.1103  |
| Aln-2  | 19.969206      | 1339.9304    | 29.1103  |
| Aln-3  | 23.792682      | 1409.1408    | 29.1103  |
| Aln-4  | 20.456934      | 1198.2807    | 29.1103  |
| Aln-5  | 18.022502      | 1331.0941    | 29.1103  |
| Allo-1 | 25.276377      | 1484.0946    | 29.1345  |
| Allo-2 | 18.332538      | 1037.0783    | 29.1345  |
| Allo-3 | 19.807463      | 1132.0900    | 29.1345  |
| Allo-4 | 19.150905      | 1216.9024    | 29.1345  |
| Allo-5 | 22.792546      | 1343.9923    | 29.1345  |
| Alp-1  | 10.565153      | 917.19043    | 17.5072  |
| Alp-2  | 23.461416      | 939.40592    | 17.5072  |
| Alp-3  | 14.470384      | 1105.3935    | 17.5072  |
| Alp-4  | 14.687306      | 722.30779    | 17.5072  |
| Alp-5  | 14.948840      | 859.55505    | 17.5072  |

|       |            |           |         |
|-------|------------|-----------|---------|
| A2a-1 | 8.1145016  | 563.29213 | 15.3311 |
| A2a-2 | 7.8075655  | 578.17221 | 15.3311 |
| A2a-3 | 7.3178721  | 602.34805 | 15.3311 |
| A2a-4 | 6.6466333  | 714.07259 | 15.3311 |
| A2a-5 | 17.697219  | 585.77036 | 15.3311 |
| A2b-1 | 9.1124932  | 1001.2392 | 17.8448 |
| A2b-2 | 18.247164  | 855.23742 | 17.8448 |
| A2b-3 | 16.264659  | 724.59241 | 17.8448 |
| A2b-4 | 15.418585  | 802.80296 | 17.8448 |
| A2b-5 | 10.421085  | 877.43783 | 17.8448 |
| A2c-1 | 11.636373  | 778.22653 | 19.7256 |
| A2c-2 | 14.830012  | 1428.4920 | 19.7256 |
| A2c-3 | 14.596544  | 1403.1337 | 19.7256 |
| A2c-4 | 12.398531  | 983.13087 | 19.7256 |
| A2c-5 | 13.180797  | 1082.7114 | 19.7256 |
| A2d-1 | 11.704572  | 754.04919 | 20.9487 |
| A2d-2 | 12.989355  | 673.06148 | 20.9487 |
| A2d-3 | 13.947393  | 1207.6563 | 20.9487 |
| A2d-4 | 14.258885  | 1197.0424 | 20.9487 |
| A2d-5 | 11.960700  | 786.80573 | 20.9487 |
| A2e-1 | 20.651947  | 1042.5937 | 16.4765 |
| A2e-2 | 15.177252  | 1507.2155 | 16.4765 |
| A2e-3 | 13.7114029 | 1273.8733 | 16.4765 |
| A2e-4 | 20.757666  | 1000.5992 | 16.4765 |
| A2e-5 | 23.879183  | 992.50754 | 16.4765 |
| A2f-1 | 21.620678  | 1059.2046 | 19.2507 |
| A2f-2 | 19.920273  | 1299.1244 | 19.2507 |
| A2f-3 | 19.956369  | 1648.4459 | 19.2507 |
| A2f-4 | 20.127778  | 1095.6896 | 19.2507 |
| A2f-5 | 19.548673  | 1490.0430 | 19.2507 |
| A2g-1 | 26.439096  | 949.11686 | 21.1716 |
| A2g-2 | 18.793827  | 808.79954 | 21.1716 |
| A2g-3 | 19.303817  | 873.16130 | 21.1716 |
| A2g-4 | 16.004909  | 919.90256 | 21.1716 |
| A2g-5 | 20.434354  | 1065.7702 | 21.1716 |
| A2h-1 | 23.445568  | 1196.9953 | 22.2242 |
| A2h-2 | 21.472638  | 1148.0641 | 22.2242 |
| A2h-3 | 20.079688  | 1152.0170 | 22.2242 |
| A2h-4 | 22.559885  | 1231.9554 | 22.2242 |
| A2h-5 | 27.399940  | 1465.0489 | 22.2242 |
| A2i-1 | 6.0855669  | 629.65814 | 9.4686  |
| A2i-2 | 6.7661654  | 550.30859 | 9.4686  |
| A2i-3 | 7.5850983  | 557.93147 | 9.4686  |
| A2i-4 | 5.7115819  | 648.64557 | 9.4686  |
| A2i-5 | 5.9399757  | 662.55339 | 9.4686  |
| A2j-1 | 8.4737822  | 748.81841 | 9.9381  |
| A2j-2 | 14.898663  | 622.83945 | 9.9381  |
| A2j-3 | 12.087357  | 761.52369 | 9.9381  |
| A2j-4 | 11.573256  | 693.81583 | 9.9381  |
| A2j-5 | 6.3783718  | 606.22153 | 9.9381  |
| A2k-1 | 10.590501  | 751.95348 | 10.1015 |
| A2k-2 | 23.985106  | 927.55629 | 10.1015 |
| A2k-3 | 12.737436  | 722.19763 | 10.1015 |
| A2k-4 | 16.292319  | 1053.7806 | 10.1015 |
| A2k-5 | 12.130700  | 595.36452 | 10.1015 |
| A2l-1 | 17.273669  | 853.62593 | 10.1397 |
| A2l-2 | 23.720060  | 1231.4678 | 10.1397 |
| A2l-3 | 22.246780  | 918.90589 | 10.1397 |
| A2l-4 | 20.636732  | 758.64589 | 10.1397 |
| A2l-5 | 16.353038  | 1125.2927 | 10.1397 |
| A2m-1 | 10.843954  | 1160.5371 | 21.6265 |
| A2m-2 | 11.170178  | 1143.0697 | 21.6265 |
| A2m-3 | 11.546787  | 1222.3049 | 21.6265 |
| A2m-4 | 3.1933336  | 649.71184 | 21.6265 |
| A2m-5 | 9.5100161  | 994.76996 | 21.6265 |
| A2n-1 | 13.412972  | 1115.7085 | 22.0753 |
| A2n-2 | 11.853488  | 991.37879 | 22.0753 |
| A2n-3 | 11.469236  | 976.39601 | 22.0753 |
| A2n-4 | 13.776653  | 1076.7837 | 22.0753 |
| A2n-5 | 12.506715  | 1178.6262 | 22.0753 |
| A2o-1 | 18.730508  | 939.48154 | 22.177  |
| A2o-2 | 17.336179  | 1204.4042 | 22.177  |
| A2o-3 | 19.506407  | 1005.5822 | 22.177  |
| A2o-4 | 14.741492  | 1101.2645 | 22.177  |
| A2o-5 | 18.622130  | 935.69496 | 22.177  |
| A2p-1 | 8.4681933  | 548.99611 | 8.7526  |
| A2p-2 | 8.1005988  | 713.43664 | 8.7526  |
| A2p-3 | 5.9428410  | 804.71225 | 8.7526  |
| A2p-4 | 5.9764532  | 529.91995 | 8.7526  |
| A2p-5 | 8.5632058  | 628.02594 | 8.7526  |

|      |   |           |           |         |
|------|---|-----------|-----------|---------|
| A3a- | 1 | 5.7214948 | 718.44854 | 11.0018 |
| A3a- | 2 | 4.9178971 | 908.67295 | 11.0018 |
| A3a- | 3 | 12.128813 | 1059.2258 | 11.0018 |
| A3a- | 4 | 11.649840 | 998.40298 | 11.0018 |
| A3a- | 5 | 6.6097060 | 609.69631 | 11.0018 |
| A3b- | 1 | 15.440960 | 1284.5959 | 12.4614 |
| A3b- | 2 | 11.766634 | 1289.4028 | 12.4614 |
| A3b- | 3 | 7.6436307 | 759.97565 | 12.4614 |
| A3b- | 4 | 17.348036 | 1196.5004 | 12.4614 |
| A3b- | 5 | 7.8913515 | 747.00520 | 12.4614 |
| A3c- | 1 | 10.360516 | 1208.4900 | 13.8141 |
| A3c- | 2 | 8.7979063 | 1103.1499 | 13.8141 |
| A3c- | 3 | 10.054324 | 1173.7755 | 13.8141 |
| A3c- | 4 | 8.2330016 | 1430.1609 | 13.8141 |
| A3c- | 5 | 8.4102954 | 954.38472 | 13.8141 |
| A3d- | 1 | 10.151287 | 1004.8511 | 15.2942 |
| A3d- | 2 | 9.3455447 | 1126.0332 | 15.2942 |
| A3d- | 3 | 10.068961 | 1159.6838 | 15.2942 |
| A3d- | 4 | 9.7380802 | 1051.0257 | 15.2942 |
| A3d- | 5 | 10.286144 | 1179.9599 | 15.2942 |
| A3e- | 1 | 13.716979 | 1218.4876 | 13.2948 |
| A3e- | 2 | 14.948690 | 1280.6665 | 13.2948 |
| A3e- | 3 | 13.195081 | 1156.7701 | 13.2948 |
| A3e- | 4 | 14.737648 | 1354.0568 | 13.2948 |
| A3e- | 5 | 17.381523 | 986.32848 | 13.2948 |
| A3f- | 1 | 15.041326 | 1372.3430 | 15.2718 |
| A3f- | 2 | 17.355310 | 1627.0909 | 15.2718 |
| A3f- | 3 | 16.463653 | 1400.2203 | 15.2718 |
| A3f- | 4 | 14.325036 | 1469.1067 | 15.2718 |
| A3f- | 5 | 16.089868 | 949.66979 | 15.2718 |
| A3g- | 1 | 14.986376 | 973.99950 | 16.9318 |
| A3g- | 2 | 16.709686 | 1536.1481 | 16.9318 |
| A3g- | 3 | 16.226337 | 1288.8237 | 16.9318 |
| A3g- | 4 | 17.152380 | 1125.9477 | 16.9318 |
| A3g- | 5 | 17.668729 | 1338.5090 | 16.9318 |
| A3h- | 1 | 20.421974 | 1249.1706 | 18.3996 |
| A3h- | 2 | 17.869404 | 1309.2208 | 18.3996 |
| A3h- | 3 | 20.282409 | 1182.7545 | 18.3996 |
| A3h- | 4 | 18.642806 | 1326.8317 | 18.3996 |
| A3h- | 5 | 18.480405 | 1189.6765 | 18.3996 |
| A3i- | 1 | 6.8087839 | 776.35630 | 5.4295  |
| A3i- | 2 | 5.7133346 | 810.29311 | 5.4295  |
| A3i- | 3 | 6.4479872 | 888.22729 | 5.4295  |
| A3i- | 4 | 7.1655153 | 714.53895 | 5.4295  |
| A3i- | 5 | 8.3204391 | 968.74159 | 5.4295  |
| A3j- | 1 | 8.3803837 | 921.31860 | 5.9267  |
| A3j- | 2 | 6.9050831 | 555.42980 | 5.9267  |
| A3j- | 3 | 7.1562108 | 875.07770 | 5.9267  |
| A3j- | 4 | 8.1799863 | 736.62052 | 5.9267  |
| A3j- | 5 | 5.3244185 | 807.21284 | 5.9267  |
| A3k- | 1 | 12.210400 | 760.45272 | 6.2443  |
| A3k- | 2 | 11.230659 | 700.06171 | 6.2443  |
| A3k- | 3 | 9.9301379 | 966.83893 | 6.2443  |
| A3k- | 4 | 10.530426 | 901.52361 | 6.2443  |
| A3k- | 5 | 9.2589069 | 926.94860 | 6.2443  |
| A3l- | 1 | 12.284713 | 857.91379 | 6.3624  |
| A3l- | 2 | 12.380765 | 973.95035 | 6.3624  |
| A3l- | 3 | 17.127315 | 1322.8830 | 6.3624  |
| A3l- | 4 | 8.6244639 | 1080.9656 | 6.3624  |
| A3l- | 5 | 7.9232252 | 1138.1959 | 6.3624  |
| A3m- | 1 | 11.863156 | 963.48041 | 17.0522 |
| A3m- | 2 | 13.194939 | 1223.9157 | 17.0522 |
| A3m- | 3 | 10.669430 | 931.16953 | 17.0522 |
| A3m- | 4 | 10.817747 | 936.44619 | 17.0522 |
| A3m- | 5 | 12.246408 | 1178.8453 | 17.0522 |
| A3n- | 1 | 12.809061 | 1454.3300 | 17.8447 |
| A3n- | 2 | 14.539298 | 1304.8471 | 17.8447 |
| A3n- | 3 | 15.399178 | 1133.7200 | 17.8447 |
| A3n- | 4 | 13.796772 | 1255.5859 | 17.8447 |
| A3n- | 5 | 15.866135 | 1265.4950 | 17.8447 |
| A3o- | 1 | 15.479999 | 1256.4389 | 18.2504 |
| A3o- | 2 | 16.345288 | 1344.6051 | 18.2504 |
| A3o- | 3 | 16.072085 | 1320.0986 | 18.2504 |
| A3o- | 4 | 16.263845 | 1175.2037 | 18.2504 |
| A3o- | 5 | 15.273463 | 1854.7900 | 18.2504 |
| A3p- | 1 | 4.3170615 | 536.37835 | 4.3762  |
| A3p- | 2 | 3.7054960 | 805.38367 | 4.3762  |
| A3p- | 3 | 4.5649383 | 546.95099 | 4.3762  |
| A3p- | 4 | 4.5951820 | 406.48009 | 4.3762  |
| A3p- | 5 | 3.6391094 | 518.78333 | 4.3762  |

|      |   |           |           |         |
|------|---|-----------|-----------|---------|
| A4a- | 1 | 3.4426097 | 763.07305 | 7.9304  |
| A4a- | 2 | 4.0864276 | 498.22356 | 7.9304  |
| A4a- | 3 | 4.3928532 | 637.70233 | 7.9304  |
| A4a- | 4 | 3.7092114 | 779.87739 | 7.9304  |
| A4a- | 5 | 4.1404938 | 375.53321 | 7.9304  |
| A4b- | 1 | 6.0642910 | 614.63367 | 8.685   |
| A4b- | 2 | 5.2602818 | 739.35449 | 8.685   |
| A4b- | 3 | 5.6678010 | 623.70469 | 8.685   |
| A4b- | 4 | 5.0891516 | 666.82137 | 8.685   |
| A4b- | 5 | 5.1334560 | 920.20433 | 8.685   |
| A4c- | 1 | 7.2946541 | 771.78252 | 9.3796  |
| A4c- | 2 | 6.5254801 | 869.79570 | 9.3796  |
| A4c- | 3 | 13.434885 | 934.93365 | 9.3796  |
| A4c- | 4 | 14.733654 | 1136.5050 | 9.3796  |
| A4c- | 5 | 6.5190043 | 953.51600 | 9.3796  |
| A4d- | 1 | 7.7106538 | 1042.9952 | 10.1991 |
| A4d- | 2 | 7.9420244 | 880.41084 | 10.1991 |
| A4d- | 3 | 7.8167390 | 1509.8188 | 10.1991 |
| A4d- | 4 | 9.1970224 | 1074.6744 | 10.1991 |
| A4d- | 5 | 7.4217237 | 1082.3040 | 10.1991 |
| A4e- | 1 | 10.384024 | 747.67511 | 11.356  |
| A4e- | 2 | 11.477236 | 1502.7771 | 11.356  |
| A4e- | 3 | 10.627552 | 1565.6081 | 11.356  |
| A4e- | 4 | 11.211431 | 1573.8598 | 11.356  |
| A4e- | 5 | 11.104395 | 1588.6166 | 11.356  |
| A4f- | 1 | 14.495015 | 1152.5367 | 12.8222 |
| A4f- | 2 | 13.552492 | 1448.8158 | 12.8222 |
| A4f- | 3 | 15.698340 | 1581.7479 | 12.8222 |
| A4f- | 4 | 14.982680 | 1096.2884 | 12.8222 |
| A4f- | 5 | 13.301273 | 1409.1673 | 12.8222 |
| A4g- | 1 | 13.771718 | 1601.8847 | 14.0268 |
| A4g- | 2 | 16.851759 | 1328.8298 | 14.0268 |
| A4g- | 3 | 15.970397 | 1210.7707 | 14.0268 |
| A4g- | 4 | 14.213736 | 1306.2233 | 14.0268 |
| A4g- | 5 | 17.010876 | 1593.2663 | 14.0268 |
| A4h- | 1 | 16.477877 | 948.83695 | 15.2003 |
| A4h- | 2 | 16.221111 | 1305.1682 | 15.2003 |
| A4h- | 3 | 17.353728 | 1251.4882 | 15.2003 |
| A4h- | 4 | 17.579961 | 1641.1262 | 15.2003 |
| A4h- | 5 | 15.030790 | 1099.9996 | 15.2003 |
| A4i- | 1 | 3.4355873 | 521.55392 | 3.3933  |
| A4i- | 2 | 3.8790363 | 662.26113 | 3.3933  |
| A4i- | 3 | 3.5869243 | 625.34164 | 3.3933  |
| A4i- | 4 | 3.8204711 | 647.17636 | 3.3933  |
| A4i- | 5 | 3.7363831 | 1012.2106 | 3.3933  |
| A4j- | 1 | 5.6975129 | 659.08211 | 3.7111  |
| A4j- | 2 | 6.2193928 | 642.04025 | 3.7111  |
| A4j- | 3 | 4.7936600 | 692.56353 | 3.7111  |
| A4j- | 4 | 4.5731204 | 522.54176 | 3.7111  |
| A4j- | 5 | 3.5947686 | 433.41586 | 3.7111  |
| A4k- | 1 | 5.9778534 | 938.24378 | 4.0029  |
| A4k- | 2 | 5.0687870 | 1082.5135 | 4.0029  |
| A4k- | 3 | 5.8912134 | 722.42384 | 4.0029  |
| A4k- | 4 | 6.3287332 | 739.95661 | 4.0029  |
| A4k- | 5 | 6.7824886 | 986.32075 | 4.0029  |
| A4l- | 1 | 8.5138230 | 1093.1884 | 4.1638  |
| A4l- | 2 | 10.086573 | 1171.3152 | 4.1638  |
| A4l- | 3 | 7.3944018 | 913.10485 | 4.1638  |
| A4l- | 4 | 9.4048622 | 1183.7973 | 4.1638  |
| A4l- | 5 | 9.0697957 | 1004.0591 | 4.1638  |
| A4m- | 1 | 11.431606 | 931.71592 | 13.4506 |
| A4m- | 2 | 11.643681 | 1631.8980 | 13.4506 |
| A4m- | 3 | 11.553646 | 1135.2964 | 13.4506 |
| A4m- | 4 | 8.7660826 | 627.81999 | 13.4506 |
| A4m- | 5 | 9.8253459 | 810.98057 | 13.4506 |
| A4n- | 1 | 14.197081 | 1614.4681 | 14.2093 |
| A4n- | 2 | 14.600847 | 1484.9617 | 14.2093 |
| A4n- | 3 | 12.368713 | 1716.3650 | 14.2093 |
| A4n- | 4 | 12.434686 | 1320.3085 | 14.2093 |
| A4n- | 5 | 14.726036 | 1531.7728 | 14.2093 |
| A4o- | 1 | 10.872244 | 1104.9666 | 14.839  |
| A4o- | 2 | 13.406913 | 945.63881 | 14.839  |
| A4o- | 3 | 11.518771 | 984.65814 | 14.839  |
| A4o- | 4 | 17.276210 | 1127.1960 | 14.839  |
| A4o- | 5 | 14.144335 | 1180.5127 | 14.839  |
| A4p- | 1 | 2.2277232 | 419.04743 | 2.1878  |
| A4p- | 2 | 2.5886159 | 440.09764 | 2.1878  |
| A4p- | 3 | 2.1475579 | 500.98522 | 2.1878  |
| A4p- | 4 | 2.4031612 | 343.88285 | 2.1878  |
| A4p- | 5 | 2.4827557 | 404.00151 | 2.1878  |

## ■ 初期剛性の実験値と理論値との分散分析

$x$  を理論値、 $y$  を実験値とする。

$$\begin{aligned} x \text{ の変動 } S_{xx} &= \sum (x_i - \bar{x})^2 = 17980.993 & x \text{ の分散 } s_{xx} &= \frac{1}{n} S_{xx} = 56.1906 \\ x \text{ と } y \text{ の共変動 } S_{xy} &= \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 12195.604 & x \text{ と } y \text{ の共分散 } s_{xy} &= \frac{1}{n} S_{xy} = 38.1113 \\ y \text{ の変動 } S_{yy} &= S_T = \sum (y_i - \bar{y})^2 = 13635.406 & y \text{ の分散 } s_{yy} &= \frac{1}{n} S_{yy} = 42.6106 \\ S_x &= \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}} = 8271.665 & x \text{ の標準偏差 } s_x &= \sqrt{s_{xx}} = 7.4960 \\ S_e &= S_T - S_x = 5363.741 & y \text{ の標準偏差 } s_y &= \sqrt{s_{yy}} = 6.5277 \end{aligned}$$

分散分析表

$$F_{318}^1(0.05) = 3.8723$$

$$F_{318}^1(0.01) = 6.7246$$

|         | f (自由度) | S' (変動)   | V (不偏分散) | F <sub>0</sub> (分散比) | S' (純変動)  | P (寄与率(%)) |
|---------|---------|-----------|----------|----------------------|-----------|------------|
| x (理論値) | 1       | 8271.665  | 8271.665 | 490.405**            | 8254.798  | 60.5       |
| e (残差)  | 318     | 5363.741  | 16.867   | —                    | 5380.608  | 39.5       |
| T       | 319     | 13635.406 | 42.744   |                      | 13635.406 | 100.0      |

∴ 分散分析の結果、理論値  $x$  は、実験値  $y$  に対し、危険率 1% 以下で有意であると判断できる。

両者の相関

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{s_x \cdot s_y} = 0.779$$

$$z = \frac{1}{2} \log \frac{1+0.779}{1-0.779} = 1.043$$

$$\xi_u = z + \frac{u(\alpha)}{\sqrt{n-3}} = 1.043 + \frac{1.960}{\sqrt{317}} = 1.153 \quad \xi_L = z - \frac{u(\alpha)}{\sqrt{n-3}} = 0.933$$

$$\rho_u = \frac{e^{2\xi_u} - 1}{e^{2\xi_u} + 1} = 0.819 \quad \rho_L = \frac{e^{2\xi_L} - 1}{e^{2\xi_L} + 1} = 0.732$$

∴ これより、理論値  $x$  と実験値  $y$  の相関係数の 95% 信頼区間は、 $r = 0.819 \sim 0.732$

$$y = ax \text{ としたとき、 } a = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} = \frac{83491.028}{97347.939} = 0.858$$

ここで理論値に用いたヤング係数は  $E_{\perp ALL} = 1400 \text{ kg/cm}^2$  としたので、今日の試験体の平均的な繊維軸に直交方向の全面圧縮のヤング係数は、

$$\therefore E_{\perp ALL} = 0.858 \times 1400 \doteq 1200 \text{ kg/cm}^2$$

## 5.9. まとめ

今回の320体の杉のめりこみ圧縮試験により、その性状について様々な傾向が明らかにされた。主な点をまとめると以下の様になる。

◦ めりこみ圧縮変形の性状は、だいたい図4に示す様な、バイリニア形のP- $\delta$ グラフとなる。

◦ 端距離が少なくとも片方に十分存在する場合には、図4の①の様に、塑性変形の進行とともに、徐々に荷重が増してゆく。

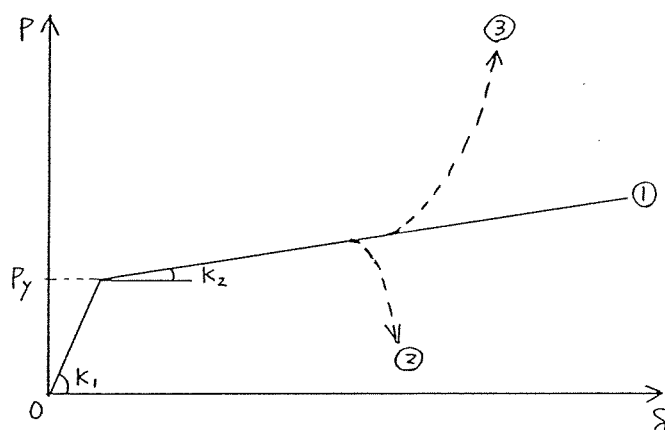


図4

◦ 圧縮部の両側の端距離がほとんどない場合には、図4の③の様に、割れ、せん断などの脆性破壊が、変形が10mm程度で生じる。

◦ 縁距離の有無は、このような破壊性状や塑性変形性状にはあまり影響しない。

◦ 材厚の1/2程度までめりこみ変形が進行すると、図4の③の様に、材がつぶれきて固くなってしまいうため、急激に剛性が高くなり始める。

◦ 今回測定した副因子（芯材or辺材，含水率，年輪幅，比重）が初期剛性 $k_1$ に及ぼす影響は、分散分析の寄与率で、合計約12%程度であった。同じく、弾性限界荷重 $P_y$ に及ぼす影響は、寄与率の合計で約36%程度であった。

◦ 副因子の影響を除いた初期剛性の実験値と、理論値を比較した結果、両者の相関係数の95%信頼区間は、0.82～0.93であった。其理論値で説明できる変動の寄与率は、約60%となった。これは、材厚、縁端距離の変化がめりこみ変形（弾性域のみ）に及ぼす影響が、今回の実験の全体の変動のうち、半分以上を占めている、ということが出来る。

◦ 今回の杉材の試験体の、繊維に直交方向の全面圧縮に換算したヤング係数を逆算した結果、 $E_{LALL} = 1200 \text{ kg/cm}^2$  という、かなり柔らかな値となった。