

平成7年度 農林水産省補助事業  
木質建築資材技術国際化対策事業

# 先進木質建築資材性能評価事業報告書

平成8年3月

財団法人 日本住宅・木材技術センター



## まえがき

自然環境に対する意識の高まりから、低質森林資源を利用した工業製品の性格の強いP S L、O S B等の生産割合が今後増加する傾向にある。一方、これらの建築資材は、外国で開発されたものが多く、諸外国から利用の要請が増加している。

本事業は、こうした状況に対応するため、国産材等を原料とする先進的な木質建築資材の性能評価を行い、木質建築資材の製造にかかる技術の進展に資するものである。

本報告書の第1編は、実大三層O S Bの適正熱圧条件の検討や耐久性の検討など、前年度に引続いている課題に加え、木質パネルの面内寸法安定性や高断熱性低密度ファイバーボードの開発などの新たな課題についても調査・研究を進め、その成果を取りまとめた。

事業の実施に当たっては、「木質建材国際化対策委員会」を設置して調査・検討をしていただいた。

第2編は、名古屋大学農学部教授平嶋義彦氏のご協力を得て、孔あき合板を用いた耐力壁の水平せん断試験を行い、耐力に与える孔の影響について、実験結果を取りまとめた。

第3編は、T T E一級建築士事務所所長友井政利氏のご協力を得て、木造建築物に対する建築基準の性能規定の面で世界で最も先進的なカナダの例を参考にしつつ、我が国の実状に合致した木造建築の性能規定の方向を明らかにした。

限られた期間内で精力的に調査・検討をいただいた同上委員会の委員各位並びに平嶋義彦、友井政利両氏に対しまして、厚く御礼申し上げます。

### 木質建材国際化対策委員会 委員名簿

委員長	川井秀一	京都大学木質科学研究所 教授
委員	梶田 熙	京都府立大学農学部 教授
〃	鈴木滋彦	静岡大学農学部 助教授
〃	関野 登	岩手大学農学部 助教授
〃	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
〃	堀江秀夫	北海道立林産試験場 技術部成形科長
〃	秋山禎孝	日本合板工業組合連合会 常務理事
〃	安藤直人	木質住宅研究所 代表
〃	原 敬夫	日本繊維板工業会 業務部長
協力委員	浅石英昭	石巻合板工業株式会社 常務取締役
〃	井上宏夫	段谷産業株式会社本社工場開発部素材開発室 室長
〃	上田達一郎	ホクシン株式会社東京営業所 所長
〃	木谷良明	永大産業株式会社研究開発部 主任研究員
〃	斉藤吉之	東京ボード工業株式会社 主任
〃	永富 辨	ニチハ株式会社開発部 課長
〃	藤原邦彦	株式会社イワクラ営業開発室建材部
〃	大亦宏和	日本ノボパン工業株式会社 取締役技術開発室長
〃	斉藤修治	大新合板工業株式会社開発室 室長
〃	森 和雄	三井木材工業株式会社 開発部
〃	九谷峰弘	住友林業株式会社事業開発部
〃	山本繁章	大倉工業株式会社第二工場

平成8年3月

財団法人 日本住宅・木材技術センター  
理事長 岡 勝 男



## ◇ 要 約

国産材等を原料とする先進的な木質建築資材の性能評価を行い、木質建築資材の製造にかかる技術の進展に資するために、次のとおり調査・検討を行い、その結果を取りまとめた。

- 1 前年度に引続いて実大三層OSBの適正熱圧条件と耐久性の検討などに加えて、木質パネルの面内寸法安定性や高断熱性低密度ファイバーボードの開発に取り組んだ。

また、合板、OSB、PB、FB等9種の内外装用パネルの感湿範囲の平衡含水率の測定等平面方向の膨張、収縮に関する試験、検討を行った。

- 2 軸組に合板を釘着した耐力壁は、構造耐力上優れたものと評価されているが、壁内結露を引き起こすなど耐久性の面から問題が指摘されている。この対策の一つとして合板に孔をあけることが考えられるが、この場合は耐力の低下が予想されるので、孔あき合板を用いた耐力壁の水平せん断試験を行った。
- 3 木造建築物に対する建築基準の性能規定の面で世界での最も先進的なカナダの例を参考にしつつ、我が国の実状に合致した木造建築の性能規定の方向を検討した。

## ◇ キーワード

OSB、パーティクル、ストランド、クリープ、木質パネル、面内寸法安定性、平衡含水率、ファイバーボード、接着剤、孔あき合板、耐力壁、せん断力、信頼性解析、限界状態設計法、許容応力度設計法、ソフトコンバージョン、



# 目 次

第1編 木質ボードの性能評価	1
第1章 市販ボード原料を芯層にトドマツストランドを 表層に用いた実大三層OSBの適正製造条件	1
1.1 トドマツを表層ストランドに用いた小型OSBによる適正製造 条件の検討	1
1.1.1 ストランドおよびパーティクルの製造	1
1.1.2 小型OSBの製造試験	2
1.1.3 小型OSBの性能試験方法と結果	4
1.2 実大OSBの製造・性能試験	8
1.2.1 実大OSBの製造方法	8
1.2.2 実大OSBの性能試験方法と結果	9
1.3 北海道産の原料による日本型OSBの総合評価	12
1.3.1 日本型OSBの特徴	12
1.3.2 北海道産の原料による日本型OSBのコスト試算	14
第2章 三層OSBクリープ特性	16
1 実験方法	16
1.1 供試材料	16
1.2 パーティクルの作成と乾燥	16
1.3 ボードの製造方法	16
1.4 静的曲げおよび曲げクリープ試験方法	17
1.4.1 試験片の採取と調湿	17
1.4.2 常態曲げ試験方法	17
1.4.3 曲げクリープ試験方法	17
2 結果および考察	18
2.1 ボード表面でのパーティクルの配向角	18
2.2 ボード比重と含水率について	19
2.3 静的曲げ性能	20
2.4 曲げクリープ性能	22
2.4.1 短時間クリープ試験	22
2.4.2 実験式による曲げクリープ曲線の表示	27
2.4.3 長時間クリープと短時間クリープによるその推定	29
第3章 木質パネルの面内寸法安定性	33
3.1 調査・研究の背景と必要性	33
3.2 本研究の目的	33
3.2.1 製造後の養生の実態把握、および実際使用時の含水率変化 の把握	34
3.2.2 各種木質パネルのLEのランク付け	34
3.2.3 LEの測定方法と評価方法	34
3.3 調査・研究の方法と結果	35
3.3.1 工場出荷時のパネル含水率調査	35
3.3.2 木質パネルの平衡含水率(EMC)	40
3.3.3 LEの測定	44
3.4 おわりに	46

第4章 高断熱性低密度ファイバーボードの開発	48
1 ボードの低密度化はどこまで可能か？	48
1.1 ボードの低密度化の限界	48
1.2 どのような用途があるか？	50
1.3 どのような製造技術が必要か？	50
2 発泡性フェノール樹脂接着剤を用いた低密度ファイバーボード	51
2.1 はじめに	51
2.2 実験	51
2.2.1 接着剤の最適熱圧条件の検討	51
2.2.2 ファイバーボードの製造	51
2.2.3 材質試験	52
2.3 結果および考察	52
2.3.1 接着剤の最適熱圧条件	52
2.3.2 ファイバーボードの力学的性質	54
2.3.3 ファイバーボードの寸法安定性	57
2.4 結論	57
3 インシアネート樹脂接着剤／発泡剤を用いた低密度ファイバーボード	60
3.1 はじめに	60
3.2 実験	60
3.2.1 ファイバーボードの製造	60
3.2.2 材質試験	60
3.3 結果と考察	60
3.3.1 ファイバーボードの力学的性質	60
3.3.2 ファイバーボードの寸法安定性	65
3.4 結論	65
4 低密度ファイバーボードの断熱・吸音・縦圧縮性能	65
4.1 はじめに	65
4.2 実験	66
4.3 結果と考察	66
4.4 結論	70
第5章 海外における木質建材の規格	72
第2編 孔あき合板を用いた耐力壁のせん断性能	90
1 はじめに	90
2 試験方法	90
3 試験結果と検討	91
4 結論	93
5 おわりに	93
第3編 先進木質資材強度性能の評価方法	117
1 はじめに	117
2 許容応力度設計法と限界状態設計法	118
3 信頼性解析を基にした限界状態設計法の基本概念	121
4 木構造の信頼性レベルについて	131
5 ソフトコンバージョンによる限界状態設計法	134
6 設計応力と材料の強度性能	137
7 部材の設計	138
8 木質材料の強度性能評価のあり方	140
9 今後の課題	141

## 第1章 市販ボード原料を芯層にトドマツストランドを表層に用いた実大三層OSBの 適正製造条件

昨年度は、我が国で安定して大量に得られるスギとトドマツを表層ストランドの原料とし、芯層には安価な市販パーティクル（原料は建築解体材等）を用いた三層表層配向ボードを日本型OSBと位置付け、その実大サイズ（厚さ12mm、寸法：1m×2m）での製造試験およびその性能試験を行った。その結果、試作OSBの強度性能は十分なものの吸水厚さ膨張率が大きく、この点の改善が必要なことが分かった。

このため今年度は、吸水厚さ膨張率の改善を行い、かつコストを押し上げないことを目標に、日本型OSBの適正製造条件について検討した。

### 1. 1 トドマツを表層ストランドに用いた小型OSBによる適正製造条件の検討

既往の文献1-6)から、製造コストを上げずに吸水厚膨張率の改善が図られると思われるストランド厚さ、接着剤添加率、マット含水率、熱圧温度を因子とした製造実験を行った。製造した小型OSBは、表層トドマツ・ストランド、芯層パーティクルともランダムなボードで、昨年度の製造試験における「三層ランダムボード」に相当する。

#### 1. 1. 1 ストランドおよびパーティクルの製造

表層用ストランドの原料には、トドマツ大径木から得られた製材（厚さ24mm、幅150mm、長さ3.65m、気乾比重0.43）を用い、ディスクフレイカーにより表1-1に示した形状の2種類の厚さのストランドを製造した。なお、ストランドの形状測定は、厚さ毎に乾燥状態のフレイク100枚について行った。

芯層用パーティクルの原料には、(財)札幌市環境事業公社が市販している建築解体材チップを用いた。この解体材チップは、建築解体材等から手作業で木材のみ（柱・梁・合板等）を選別し、異物を除去した後、ハンマークラッシャーで粉碎し、7~40mmの篩で分級選別した木チップである。この建築解体材チップの樹種構成を四分法により重量構成率で調べた結果、エゾマツ・トドマツ針葉樹88%、ラワン製材7%、ラワン合板5%であった。この解体材チップ（含水率30%前後）を遠心リング型チッパー（パールマン社製、刃出し0.6mm）で切削した後、2.2mmと4.3mm目開きの篩で分級し（4.3mm未満かつ2.2mm以上）、図1-1に示した粒度分布の芯層用パーティクルを得た。なお、粒度分布は乾燥状態のパーティクルを3回測定したときの平均値である。

以上の表層用ストランド及び芯層用パーティクルを含水率約2%に乾燥した後、製造試験に用いた。

表 1 - 1 表層用ストランドの形状

設定厚さ	実測した形状
0.3mm	厚さ0.28(0.17~0.41)mm×長さ60.1(57.8~61.0)mm×幅23.0(19.6~25.1)mm
0.5mm	厚さ0.49(0.40~0.70)mm×長さ60.1(51.4~61.0)mm×幅24.1(19.5~26.3)mm

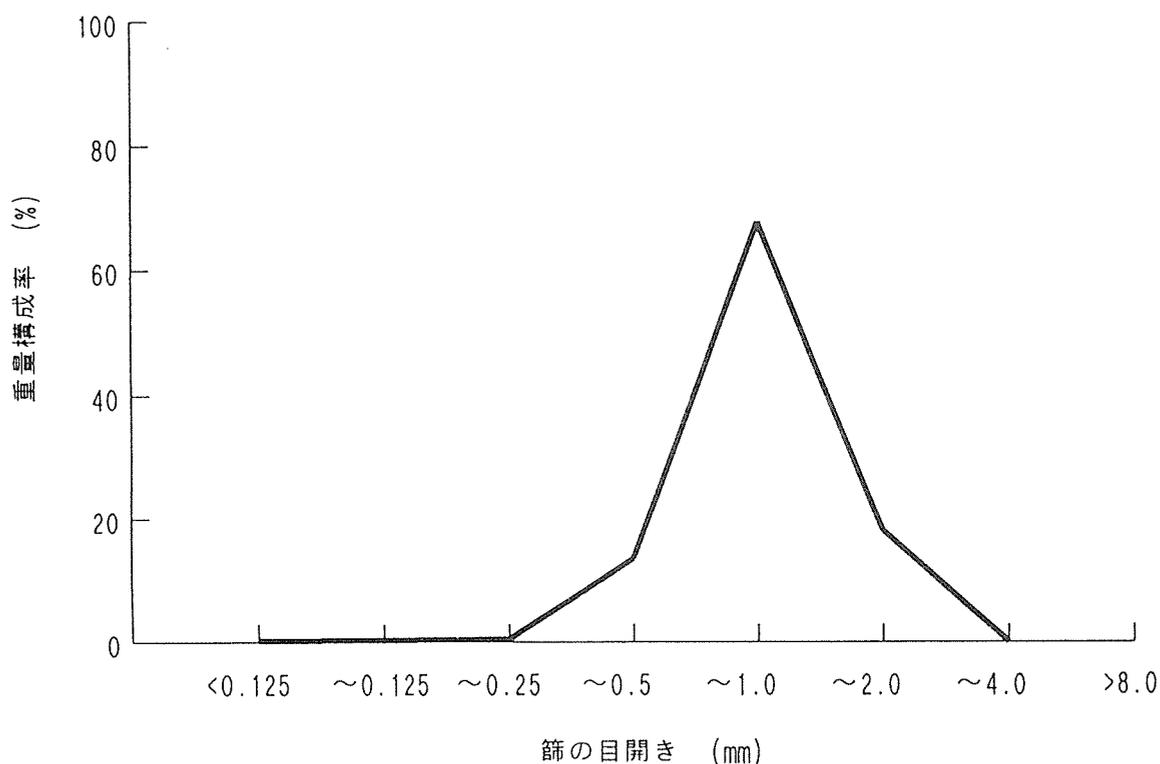


図 1 - 1 芯層用パーティクルの粒度分布

### 1. 1. 2 小型OSBの製造試験

昨年度と同様に、ボード厚さは12mm、比重は0.65、層構成は表層1：芯層4：表層1の三層構成（重量比）、接着剤はメラミンユリア共縮合樹脂である。

また、実験因子は次のとおりである。表層ストランドの厚さは、昨年度とほぼ同じ0.5mmと薄い0.3mmの2水準、長さは60mmとした。接着剤添加率は、ボード全体としては全乾木質重量の10%一定であるが、表層と芯層の添加率は表層が多い16.5%（表層）：7%（芯層）と等量の10%（表層）：10%（芯層）の2水準とした。マット含水率は、芯層は7.5%一定であるが、表層については一般的な9%と高い17%および25%の3水準とした。熱圧温度は、一般的な170℃と高温の200℃および230℃の3水準とした。

製造手順は、次のとおりである。

接着剤の添加は、エアレス・スプレーガンと回転型ドラムブレンダーを用いて行った。また、表層および芯層マット含水率の調整は、接着剤溶液に水を加えることにより行った。ワックスは一切添加しなかった。

フォーミングは、表層用ストランドおよび芯層用パーティクルともランダムに30cm×35cmの木枠内に手蒔きした。

なお、各条件のボードの製造順番は所定の熱圧温度毎にランダムとし、合計72枚の小型ボードを製造した。熱圧時の初期圧は、45kgf/cm<sup>2</sup>前後であった。

表 1 - 2 ボードの製造条件

実験因子	水準数	水準		
		1	2	3
A : 表層ストランドの厚さ	2	0.3mm	0.5mm	
B : 接着剤の表層と芯層の添加率	2	16.5%	7%	10% : 10%
C : 表層マット含水率	3	9%	17%	25%
D : 熱圧温度	3	170℃	200℃	230℃

設定ボード寸法	: 厚さ12mm×30cm×35cm
設定ボード比重	: 0.65
設定ボード層構成	: 表層1 : 芯層4 : 表層1の三層構成(重量比)
接着剤の種類	: メラミンユリア共縮合樹脂 (三井東圧化学(株)製 U-814 固形分率65.8%)
添加率	: ボード全体としては全乾原料重量の10%
硬化剤の種類	: 塩化アンモニウム
添加率	: 表層は0.4%、芯層は0.8%(接着剤固形分に対して)
ワックス	: 無添加
フォーミング	: 表層・芯層とも手蒔きでランダム
圧縮速度	: 4mm/秒
熱圧時間	: 6分(圧抜き時間30秒を含む)
繰返し数	: 2

### 1. 1. 3 小型OSBの性能試験方法と結果

製造したボードは、20℃相対湿度65%の恒温恒湿室内で4週間調湿した後、JIS A 5908「パーティクルボード」(1994)に準拠した常態曲げ試験片 2、剥離強さ試験片 2、吸水厚さ膨張率試験片 4を各ボードから採取し、試験に供した。

表1-3 試作した小型OSBの性能試験結果

因子A 表層 ストラト の厚さ (mm)	因子B 表層芯層 接着剤 添加率	因子C 表層 マット 含水率	因子D 熱 圧 温 度	因子D 吸水厚さ 膨張率 TS	因子D 熱 圧 温 度	因子A 表層 ストラト の厚さ (mm)	因子B 表層芯層 接着剤 添加率	因子C 表層 マット 含水率	常態 曲げ MOE* (tf/cnf)	MOR* (kgf/cnf)	剥離 強さ IB* (kgf/cnf)
0.3	16.5%:7%	9	170	19.0	170	0.3	16.5%:7%	9	44.9	350	3.2
	16.5%:7%	9	200	15.0		0.3	16.5%:7%	17	41.6	362	5.3
	16.5%:7%	9	230	12.7		0.3	16.5%:7%	25	45.2	393	5.1
	16.5%:7%	17	170	15.3		0.3	10%:10%	9	41.1	322	1.4
	16.5%:7%	17	200	12.8		0.3	10%:10%	17	45.1	374	4.2
	16.5%:7%	17	230	12.3		0.3	10%:10%	25	45.9	333	3.3
	16.5%:7%	25	170	13.6		0.5	16.5%:7%	9	39.1	294	5.9
	16.5%:7%	25	200	12.7		0.5	16.5%:7%	17	44.4	341	5.3
	16.5%:7%	25	230	11.5		0.5	16.5%:7%	25	43.0	319	5.6
	10%:10%	9	170	20.5		0.5	10%:10%	9	38.7	297	6.2
	10%:10%	9	200	16.0		0.5	10%:10%	17	42.2	350	7.0
	10%:10%	9	230	13.5		0.5	10%:10%	25	45.5	364	6.6
	10%:10%	17	170	15.9	200	0.3	16.5%:7%	9	43.3	352	5.5
	10%:10%	17	200	13.6		0.3	16.5%:7%	17	46.5	452	5.1
	10%:10%	17	230	12.3		0.3	16.5%:7%	25	43.6	371	3.7
	10%:10%	25	170	14.1		0.3	10%:10%	9	47.4	397	3.0
	10%:10%	25	200	13.5		0.3	10%:10%	17	44.9	373	5.5
	10%:10%	25	230	11.6		0.3	10%:10%	25	46.3	359	5.2
0.5	16.5%:7%	9	170	19.4		0.5	16.5%:7%	9	41.0	311	6.5
	16.5%:7%	9	200	17.0		0.5	16.5%:7%	17	39.4	290	5.3
	16.5%:7%	9	230	13.5		0.5	16.5%:7%	25	38.7	313	5.4
	16.5%:7%	17	170	16.6		0.5	10%:10%	9	41.8	383	7.0
	16.5%:7%	17	200	14.4		0.5	10%:10%	17	45.6	341	7.9
	16.5%:7%	17	230	13.1		0.5	10%:10%	25	41.3	309	7.1
	16.5%:7%	25	170	15.0	230	0.3	16.5%:7%	9	43.6	353	4.8
	16.5%:7%	25	200	14.1		0.3	16.5%:7%	17	41.2	342	5.5
	16.5%:7%	25	230	12.1		0.3	16.5%:7%	25	37.6	330	2.9
	10%:10%	9	170	18.0		0.3	10%:10%	9	44.5	321	3.5
	10%:10%	9	200	17.3		0.3	10%:10%	17	46.5	395	4.2
	10%:10%	9	230	14.6		0.3	10%:10%	25	43.2	358	2.7
	10%:10%	17	170	16.4		0.5	16.5%:7%	9	41.6	357	6.3
	10%:10%	17	200	14.6		0.5	16.5%:7%	17	42.3	268	5.8
	10%:10%	17	230	13.3		0.5	16.5%:7%	25	40.1	292	6.3
	10%:10%	25	170	14.2		0.5	10%:10%	9	42.5	326	6.9
	10%:10%	25	200	14.1		0.5	10%:10%	17	40.5	332	8.0
	10%:10%	25	230	12.3		0.5	10%:10%	25	42.6	294	7.1

\*: 実測した強度値に設定比重0.65/実測比重の係数を乗じて、設定比重のときの強度に補正した値である。

試験時の平均比重は、常態曲げ試験片が0.65(0.60~0.68)、剥離強さ試験片が0.64 (0.58~0.69)であり、吸水厚さ膨張率試験片の平均含水率は 8.6( 7.1~ 9.7)%であった。

性能試験結果(平均値)を表1-3に示す。

この結果をもとに、この試験の目標である日本型OSBの吸水厚さ膨張率の改善、および構造用としての強度性能の付与の面から、各因子の影響について考察した。具体的には、他の実験因子と交互作用がないと思われる因子毎に三元配置法の分散分析を行い、危険率1%で有意となった因子の要因効果図から考察した。図1-2は、吸水厚さ膨張率に影響を及ぼす因子を検討するため、因子A(表層ストランドの厚さ)毎に三元配置法の分散分析を行った結果、危険率1%で有意となった因子の要因効果図である。また、図1-3は、強度性能に影響を及ぼす因子を検討するため、因子D(熱圧温度)毎に三元配置法の分散分析を行った結果、危険率1%で有意となった因子の要因効果図である。

これらの検討結果から、実大の日本型OSBの適正製造条件を決定した。

(1) 吸水厚さ膨張率に影響を及ぼす因子の検討

図1-2から、因子B(表層芯層RC)はストランドの厚さ0.3mmの場合のみ影響し、因子C(表層MC)は25%、因子D(熱圧温度)は230℃の条件のとき吸水厚さ膨張率は最小となることが分かる。また、因子Aは0.5mmよりも0.3mmの方が吸水厚さ膨張率は小さくなった。

このことから、既往の研究結果と同様に、表層ストランド厚さは薄い方が、表層マット含水率は高い方が、熱圧温度は高い方が、吸水厚さ膨張率の性能が向上することが分かった。

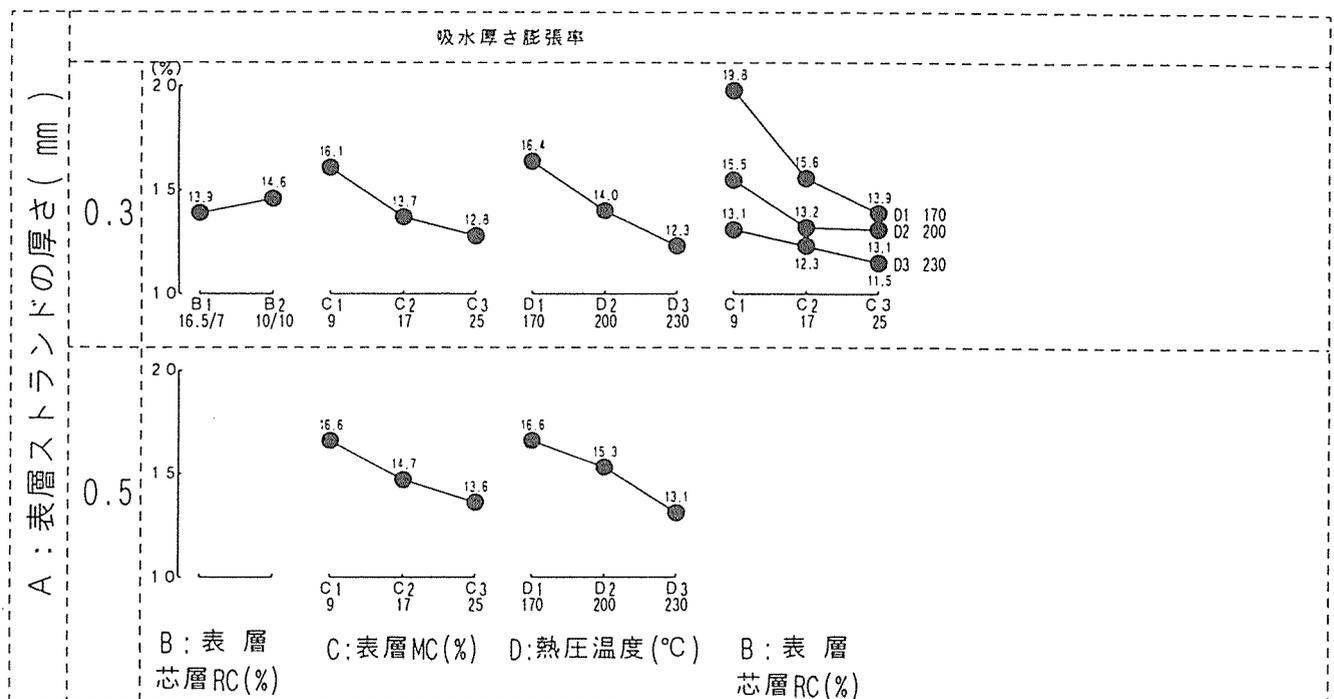


図1-2 吸水厚さ膨張率に関して危険率1%で有意となった因子の要因効果図

(2) 強度性能に影響を及ぼす因子の検討

図1-3から、熱圧温度毎に違いはあるが、次のような傾向がみられた。

曲げ性能については、因子Aが大きく影響し0.5mmよりも0.3mmが高強度となり、因子Bの影響は小さい。因子Cの影響はない。

剥離強さについては、因子Aが大きく影響し、曲げ性能とは逆に0.3mmよりも0.5mmが高強度となっている。因子Bは因子Aと交互作用がある。因子Cの影響は小さい。

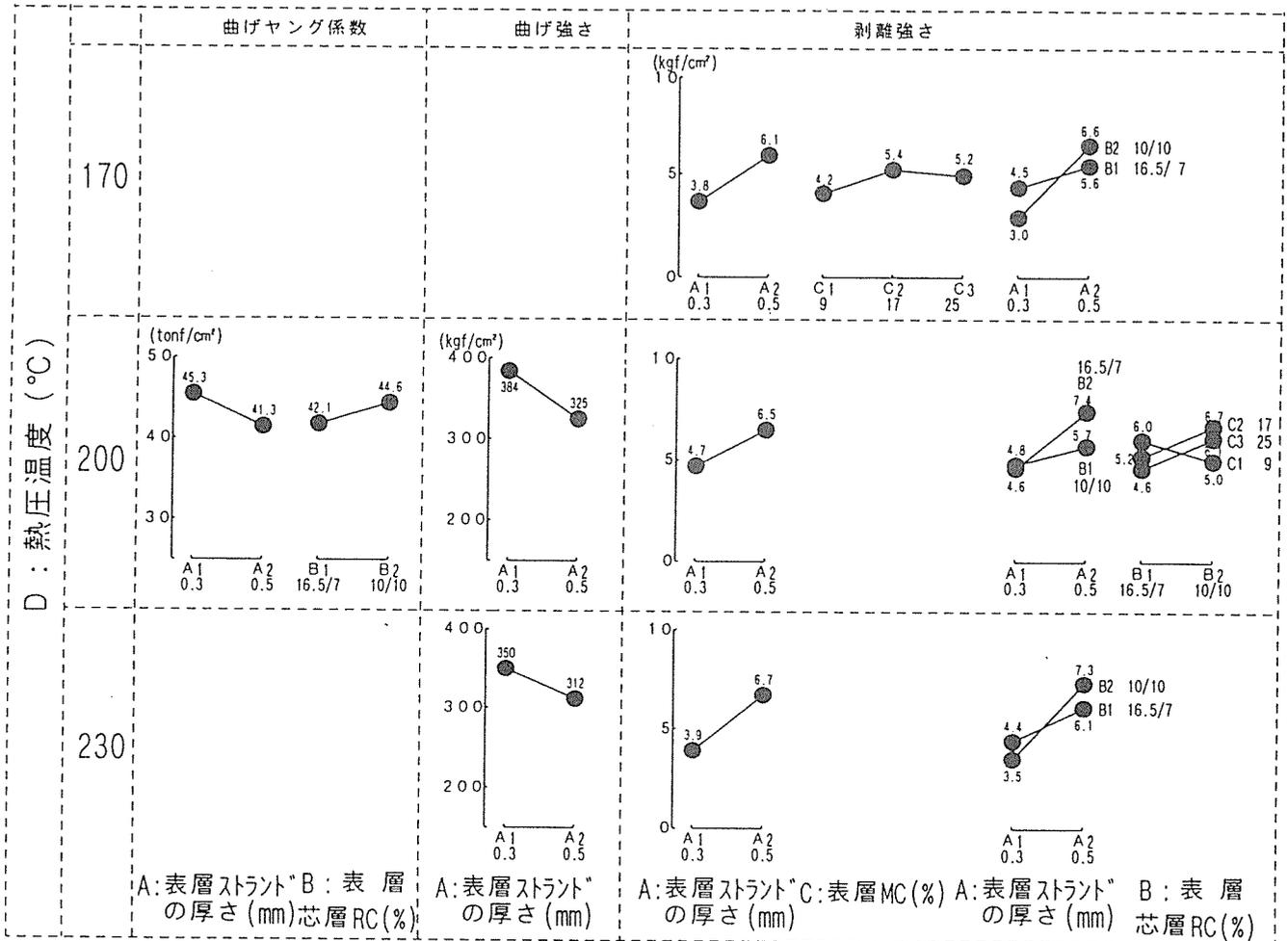


図1-3 強度性能に関して危険率 1%で有意となった因子の要因効果図

(3) 実大OSBの適正製造条件

今回の試作OSBは構造用を目標にしていることから、一定の強度性能を持つ条件を優先し、その中で吸水厚さ膨張率が最小となる条件を適正製造条件とした。曲げヤング係数40tonf/cm<sup>2</sup>以上、曲げ強さ300kgf/cm<sup>2</sup>以上、剥離強さ6.0kgf/cm<sup>2</sup>以上を今回のランダム配向の構造用OSBの目標強度性能として、この条件を満足した試験体のみの性能試験結果を表1-4に示した。

この表から、吸水厚さ膨張率が最小な製造条件（表層ストラットの厚さ 0.5mm、表層と芯層の接着剤添加率10%：10%、表層マット含水率17%、熱圧温度 230°C）を適正製造条件とした。

表 1 - 4 目標強度性能以上の試作OSBの性能試験結果

TSに 関する 順位	因子A	因子B	因子C	因子D	吸水厚さ 膨張率 TS (%)	常態 曲げ		剥離 強さ IB (kgf/cm <sup>2</sup> )
	表層 ストラット 厚さ (mm)	表層芯層 接着剤 添加率	表層 マット 含水率 (%)	熱圧 温度 (°C)		MOE (tf/cm <sup>2</sup> )	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	
1	0.5	10%:10%	17	230	13.3	40.5	332	8.0
2	0.5	16.5%:7%	9	230	13.5	41.6	357	6.3
3	0.5	10%:10%	25	200	14.1	41.3	309	7.1
4	0.5	10%:10%	25	170	14.2	45.5	364	6.6
5	0.5	10%:10%	9	230	14.6	42.5	326	6.9
6	0.5	10%:10%	17	200	14.6	45.6	341	7.9
7	0.5	10%:10%	17	170	16.4	42.2	350	7.0
8	0.5	16.5%:7%	9	200	17.0	41.0	311	6.5
9	0.5	10%:10%	9	200	17.3	41.8	383	7.0

一方、この適正製造条件の内、熱圧温度については実大OSBの製造に用いる大型ホットプレスの最高温度が170°Cであるため、実大OSBでは熱圧温度170°Cを採用することとした。この熱圧温度170°Cでの小型OSBの吸水厚さ膨張率は16.4%であり、昨年度の実大OSBの吸水厚さ膨張率13.1%よりも大きな値となっている。これは、今回の小型OSBが無ワックスのためであり、昨年度と同程度のワックスを添加すれば改善効果が明確になるとと思われる。

#### 参考文献

- 1) 森山 実ほか3名：パーティクルボードの吸水厚さ膨張率の低減について  
日本木材学会北海道支部講演集，14，25-27（1982）
- 2) 松本 章ほか3名：パーティクルボード製造における削片形状のボード材質に及ぼす影響  
北林産試月報，366，12-18（1982）
- 3) 波岡保夫ほか1名：ウリア樹脂パーティクルボードの熱圧条件  
日本木材学会北海道支部講演集，12，36-38（1980）
- 4) ヴィセンテ・マリーほか4名：パーティクルボード製造に関する研究（第1報）  
木材学会誌，32(6)，425-431（1986）
- 5) 高村憲男：ファイバーボードの熱圧乾固に関する研究（第3報）  
木材学会誌，14(2)，75-81（1967）
- 6) 藤本英人ほか3名：マレイン酸・グリセリン(MG)混合物処理パーティクルボードの寸法安定性  
木材学会誌，37(5)，456-461（1991）

## 1. 2 実大OSBの製造・性能試験

前節での小型OSBによる適正製造条件の検討結果から、実大OSBの製造条件は表層ストランド厚さ 0.5mm、接着剤の表層と芯層の添加率10%：10%、表層マット含水率17%、熱圧温度 170℃（本来は 230℃が適正だが、使用プレスの最高温度が 170℃のため）とした。しかし、実際の熱圧時、表層にパンクを生じたため、表層マット含水率を17%から15%に低下させた条件で製造した。

表層ストランドの樹種は、昨年度用いたトドマツとスギを用いた。ただし、スギの産地は昨年度と異なり北海道渡島地方産である。

また、製造した実大OSBは、昨年度の製造試験における「三層ランダムボード」に相当する。

### 1. 2. 1 実大OSBの製造方法

表層用ストランドの原料には北海道産トドマツ製材およびスギ製材（厚さ24mm×幅 150mm×長さ 3.65m）を用い、ディスクフレイカーによりストランドを製造した。なお、ストランドの長さは60mmであり、昨年度の長さ80mmと異なっている。表1-5に乾燥状態のストランド 100枚について行った形状測定結果を示す。

芯層には、前節と同じパーティクルを用いた。

以上の表層用ストランド及び芯層用パーティクルを含水率約 2%に乾燥した後、製造試験に用いた。

表1-5 表層用ストランドの形状

樹種	実測した形状・気乾比重			
	厚さ	長さ	幅	気乾比重
トドマツ	0.49(0.40~0.69)mm	59.8(59.0~60.7)mm	23.4(10.2~26.2)mm	0.44
スギ	0.46(0.32~0.60)mm	59.7(54.5~61.4)mm	22.4(6.3~24.7)mm	0.42

表1-6に示す実大OSBの製造条件を示す。

接着剤の添加は、エアレス・スプレーガンとバッチ式羽根付き混合機を用いて行った。接着剤溶液には、所定の表層および芯層マット含水率になるように水を加え、またワックスも添加した。フォーミングは、表層用ストランドおよび芯層用パーティクルともランダムに90cm×90cmの木枠内に手蒔きした。

なお、各条件のボードの製造順番はランダムとし、表層トドマツOSB 2枚、表層スギ

表 1 - 5 実大 O S B の製造条件

---

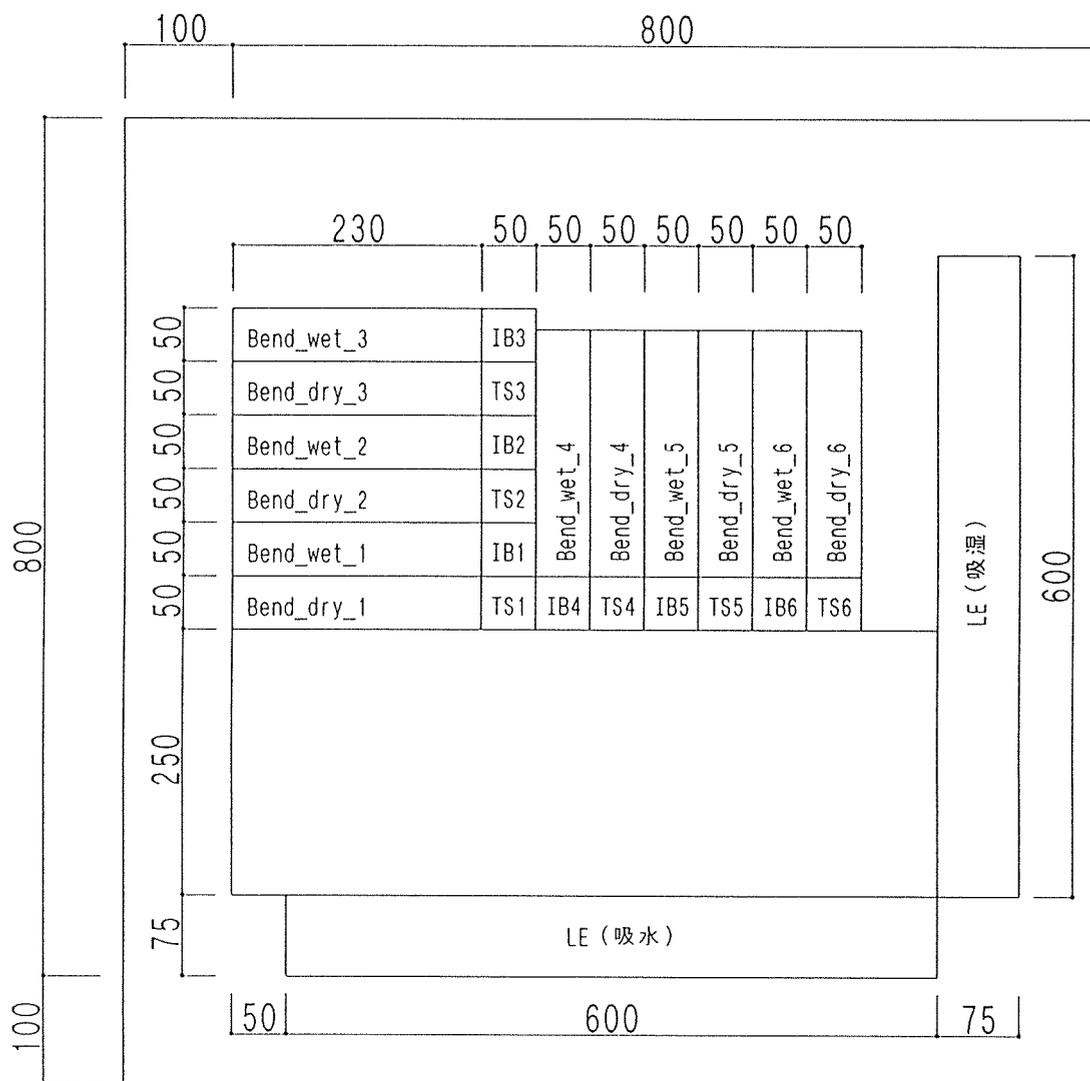
○原料	表層ストランド : 北海道産トドマツ、北海道産スギ 芯層パーティクル : 建築解体材等からのパーティクル
○設定ボード層構成	表層 1 : 芯層 4 : 表層 1 の三層構成 (重量比)
比重	: 0.65
寸法	: 12mm × 90cm × 90cm
○接着剤等	接着剤 : メラミン・ユリア共縮合樹脂 (三井東圧化学(株)製 ユーロイト <sup>®</sup> U-814、固形分率65.9%) 表層 : 10%、芯層 : 10% 添加 (絶乾木質重量に対して) 硬化剤 : 塩化アンモニウム (接着剤の固形分重量に対して添加) 表層 : 0.4%、芯層 : 0.8% 添加
	ワックス : エマルジョン型 (三菱化学(株) ダイアプルーフ、固形分率45%) 表層 : 0.5%、芯層 : 0.5% 添加 (絶乾木質重量に対して)
○マット含水率	表層 : 15%、芯層 : 7.5%
○熱圧条件	温度 : 170 °C 時間 : 6 分 (圧抜き30秒を含む)
○ボード枚数	: 表層トドマツ 2枚 表層スギ 2枚

---

### 1. 2. 2 実大 O S B の性能試験方法と結果

製造したボードは、20℃相対湿度65%の恒温恒湿室内で 4週間調湿した後、JIS A 5908「パーティクルボード」(1994)に準拠した常態曲げ試験片 6、湿潤時曲げB試験片 6、剥離強さ試験片 6、吸水厚さ膨張率試験片 6を、JIS A 5905「繊維板」(1994)に準拠した吸水長さ変化率試験片 1 (ただし、試験片寸法は規格より大きい75mm × 600mmとした)を各ボードから採取し、試験に供した。

試験片の木取り図を図 1 - 4 に示す。



(単位：mm)

図1-4 実大OSBからのJIS試験片の木取り図

試作した実大OSBの性能試験結果を表1-7に示す。

また、昨年度試作ボードと今年度試作ボードの性能比較（JIS試験の平均値）を表1-8に示す。この表から、目標とした日本型OSBの性能向上が達成でき、特に表層トドマツOSBの場合、ワックス添加率が少量の0.5%にもかかわらず吸水厚さ膨張率の大幅な改善が達成できた。この結果は、今回採用した製造条件が適正であったことを裏付けているものと思われる。

表 1 - 7 実大 O S B の性能試験結果

表層樹種	試験項目	測定項目	mean	min.	max.	s. d.	n
			トマツ	気乾含水率	MC_ad (%)	9.5	9.3
	気乾比重	SG_ad	0.667	0.593	0.731	0.0361	50
	剥離	IB (kgf/cm <sup>2</sup> )	9.9	8.5	11.3	0.795	12
	常態曲げ	MOE_dry (tonf/cm <sup>2</sup> )	43.7	39.1	48.7	2.510	12
		MOR_dry (kgf/cm <sup>2</sup> )	338	225	432	65.011	12
	湿潤時曲げ	MOE_wet (tonf/cm <sup>2</sup> )	22.2	19.6	25.3	1.628	12
		MOR_wet (kgf/cm <sup>2</sup> )	212	185	249	21.410	12
	吸水厚さ	WA_1day (%)	18.8	17.6	20.5	0.953	12
		TS_1day (%)	6.1	4.0	8.1	1.207	12
		WA_7days (%)	51.3	47.5	58.4	3.076	12
		TS_7days (%)	17.3	13.2	18.9	1.476	12
	吸水長さ	MC_ad (%)	9.4	9.3	9.4	0.0350	2
		MC_1day (%)	20.6	20.4	20.8	0.1893	2
		LE_1day (%)	0.12	0.11	0.13	0.0109	2
		MC_7days (%)	58.7	58.6	58.9	0.1091	2
		LE_7days (%)	0.15	0.13	0.17	0.0181	2
スギ	気乾含水率	MC_ad (%)	9.5	9.2	9.9	0.177	12
	気乾比重	SG_ad	0.665	0.579	0.768	0.0386	50
	剥離	IB (kgf/cm <sup>2</sup> )	8.6	7.1	11.7	1.231	12
	常態曲げ	MOE_dry (tonf/cm <sup>2</sup> )	38.5	27.9	43.4	4.246	12
		MOR_dry (kgf/cm <sup>2</sup> )	312	222	435	57.312	12
	湿潤時曲げ	MOE_wet (tonf/cm <sup>2</sup> )	19.0	15.8	22.7	2.295	12
		MOR_wet (kgf/cm <sup>2</sup> )	198	137	228	26.725	12
	吸水厚さ	WA_1day (%)	25.3	22.3	27.8	1.790	12
		TS_1day (%)	10.5	8.2	13.1	1.648	12
		WA_7days (%)	59.7	54.0	66.6	4.315	12
		TS_7days (%)	19.9	17.4	22.2	1.794	12
	吸水長さ	MC_ad (%)	9.7	9.6	9.8	0.0622	2
		MC_1day (%)	25.9	25.5	26.2	0.3282	2
		LE_1day (%)	0.16	0.16	0.16	0.0010	2
MC_7days (%)		69.3	69.0	69.5	0.2410	2	
LE_7days (%)		0.22	0.22	0.22	0.0015	2	

表 1 - 8 昨年度と今年度の実大 O S B (三層ランダムボード) の性能比較

	昨年度の試験結果		今年度の試験結果		今年度/昨年度	
	表層トマツ	表層スギ	表層トマツ	表層スギ	表層トマツ	表層スギ
気乾比重	0.65	0.64	0.67	0.67	1.03	1.05
IB (kgf/cm <sup>2</sup> )	6.5	6.0	9.9	8.6	1.52	1.43
常態 MOE (tonf/cm <sup>2</sup> )	28	35	44	39	1.57	1.11
MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	229	236	338	312	1.48	1.32
湿潤時 MOE (tonf/cm <sup>2</sup> )	14	16	22	19	1.57	1.19
MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	124	143	212	198	1.71	1.38
TS (%)	13.1	17.0	6.1	10.5	0.47	0.62

## 1.3 北海道産の原料による日本型OSBの総合評価

### 1.3.1 日本型OSBの特徴

平成5・6年度の海外調査で得られた「OSB製造実態とその使用状況」から、北米で生産されている構造用OSBの製造コストは非常に安いことが分かった。この北米産OSBに対抗するものとして、我が国で安定して大量に得られるスギとトドマツを表層ストランドの原料とし、芯層には安価な市販パーティクル（原料は建築解体材等）を用いた三層表層配向ボードを日本型OSBと結論付けた。

日本型OSBの特徴は、次のとおりである。

#### ①安価な原料を用いている

原料の4/6の芯層には安価な建築解体材チップを利用できる。

#### ②既存パーティクルボード生産設備が一部使用可能である

原料の4/6の芯層にはパーティクルを用いるため、一般的なパーティクルボード生産装置が一部利用できる。

#### ③北米産の輸入OSBよりも高品質である

適正な製造条件、メラミン・ユリア共縮合樹脂の10%添加及びワックス0.5%添加により高強度および高い寸法安定性を付与している。

昨年度の三層ランダムボードと三層表層配向ボードとの強度比、および今回試作した実大OSB（三層ランダムボード）の性能試験結果から、日本型OSB（三層表層配向ボード）の曲げ性能を推定した結果を表1-9に示す。なお、輸入OSB・国産構造用合板の値は、昨年度の報告書より引用した。

今回試作した実大OSBのストランド長は60mmと短いものであったが、輸入OSB並に100mm程度のストランドを用いればさらに曲げ強度性能は向上し、表層を配向しない三層ランダムボードでも十分な構造用ボードとなると思われる。また、三層ランダムボードであれば配向装置が不要となり、パーティクルボード製造装置の利用率が高まることから、さらに低コスト化が図られるものと思われる。

一方、今回の試験では実験条件を整えるために、製材品から切削した均一なストランドを用い、熱圧時間は実生産ラインの標準と思われる15秒/mm（厚さ12mmボードの場合3分）の倍の30秒/mmであることから、今後、これらの点を実生産に近づけた場合の検討も必要と思われる。

表1-9 日本型OSB（三層表層配向ボード）と競合品との品質比較

品 質	日本型OSB		輸 入 国 産 OSB (アスペン)	国 産 構造用合板 (ラジアータパイン)		
	表層 トドマツ	表層 スギ				
気乾比重	0.67	0.67	0.64	0.57		
IB (kgf/cm <sup>3</sup> )	9.9	8.6	4.2	13.1		
常 態	MOE (tonf/cm <sup>2</sup> )	∥	85*	60*	49	65
		⊥	27*	20*	24	55
	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	∥	652*	462*	336	562
		⊥	214*	176*	230	542
湿潤時	MOE (tonf/cm <sup>2</sup> )	∥	37*	29*	17	42
		⊥	13*	10*	9	35
	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	∥	316*	292*	156	280
		⊥	131*	126*	108	274
TS (%)	6.1	10.5	16.8	5.2		

(注) \*: 三層ランダムボードの測定値を基に表層配向ボードの曲げ性能を推定した値  
厚さはどのボードも12mm

### 1.3.2 北海道産の原料による日本型OSBのコスト試算

日本型OSBの高い品質については表1-7, 9で明らかであるが、市場性を得るためには生産コストが適正でなければならない。このため、年間生産量10万m<sup>3</sup>の日本型OSB工場を新設した場合について、製品のコスト試算を行った。

コスト試算の前提として、今回の試作試験結果でスギよりも高品質であったトドマツを表層原料に採用し、工場立地は原料確保の安定性から北海道とする。また、試算には土地所得費を含めない。

製品の概要は、次のとおりである。

製品： 表層トドマツストランド（原木をフレーカーによりストランド化）  
芯層パーティクル（解体材チップをチップパーによりパーティクル化）  
三層構成（表層1：芯層4：表層1の重量比）  
接着剤添加率 10.0%（全乾木質重量に対して）  
ワックス添加率 0.5%（全乾木質重量に対して）  
寸法：厚さ12mm×3尺×6尺  
比重：0.65

生産量： 100,000m<sup>3</sup>/年（6,355,703枚/年）

コスト試算のための係数は、次の資料等を参考とした。

表層用トドマツ原木価格：北海道内のパルプ用トドマツ・カラマツ原木価格  
（生材原木価格8,000円/m<sup>3</sup>→21,622円/ドライton）

芯層用解体材チップ価格：（財）札幌市環境事業公社の販売価格  
（生材チップ価格4,000円/ton→5,600円/ドライton）

接着剤・ワックス価格：流通価格の推定値  
（メラミン・ユリア共縮合樹脂150,000円/ドライton、  
ワックス200,000円/ドライton）

生産工程中の歩留り：平成5年度木質建築資材国際化対策事業報告書  
1.2.3 北米におけるOSB生産動向と製造コスト

機械設備費及び従業員数：スズ社の年間生産量11万m<sup>3</sup>MDF生産工場の基本仕様

（機械設備：50億円（=40億円+付帯設備10億円）

従業員：工場60人（=15人/ライン×4組）、  
事務管理10人）

賃金：北海道の雇用に関する統計資料  
（工場従業員 4,400,000円/年/人、  
事務管理要員6,000,000円/年/人）

コスト試算結果を、表1-10に示す。なお、土地取得費は除外している。

試算結果としての売上原価は、厚さ12.0mm×3尺×6尺のボード1枚当たり743円(=37,391円/m<sup>3</sup>)となり、これに売上原価の5%を利潤と仮定して加算すると、ボード1枚当たり780円(=39,261円/m<sup>3</sup>)が工場出荷価格となる。同様の試算を、厚さ9.5mm×3尺×6尺のボードについても行うと、工場出荷価格はボード1枚当たり640円(=40,615円/m<sup>3</sup>)となった。

一方、我が国では厚さ9.5mm×3尺×6尺の輸入OSBが最も流通しており、北海道内でのこの輸入OSBの間屋入り価格は650円/枚前後(運賃を含まず)である。このことから、日本型OSBは輸入品と競合できるものと思われる。ただし、平成5年度の海外調査から輸入OSBの利潤は大きく、競合品が現れた場合には値下げする可能性が高い。

以上の検討から、価格だけではなく、日本型OSBの高い品質が評価され、年間生産量10万m<sup>3</sup>を消費できる用途を確立することができれば、日本型OSBの工場立地は可能と思われる。

表1-10 年間生産量10万m<sup>3</sup>の日本型OSBのコスト試算結果  
(製品寸法：厚さ12mm×3尺×6尺)

		金額(千円)	使用数量	単価・他	円/枚
原 材 料	原木	451,091	20,863 t	21,622 (円/t)	90
	解体材チップ	231,069	41,262 t	5,600 (円/t)	46
	接着剤	835,561	5,570 t	150,000 (円/t)	166
	ワックス	55,704	279 t	200,000 (円/t)	11
	小計	1,573,425			313
経 費	労務費	264,000	60 人	4,400,000 (円/年/人)	52
	燃料・電力費	295,455	59,091 t	5,000 (円/t)	59
	減価償却費 機械	450,000		50 億円×0.9÷10年	89
	建物	45,000		10 億円×0.9÷20年	9
	修繕費	160,000		機械設備(3%)、建物(1%)	32
	保険料	30,000		60 億円の0.5%	6
	その他経費	126,805		その他経費を除く製造原価の4.5%	25
小計	1,371,259			273	
製造原価		2,944,685			585
管 理 費	人件費	60,000	10 人	6,000,000 円/年/人	12
	支払い 長期利息	150,000		60 億円の6% 10年	30
	短期利息	39,262		製造原価の1/3に対し4%	8
	租税公課	42,000		60 億円の1.4%÷2	8
	その他経費	503,160		100 (円/枚)	100
小計	794,422			158	
売上原価		3,739,107			743

= 37,391 円/m<sup>3</sup>

## 第2章 三層OSBのクリープ特性

### はじめに

わが国でのOSB生産の可能性を探る研究の一環として、その有効利用が問題となっているスギ間伐材を原料としてストランド・パーティクルを作成し、それをボードの表層用として配向させたものを、心層には現在ボード工場で実際に用いられている梱包廃材や建築解体材を原料としたパーティクルを用いた3層構成で表層配向のパーティクルボードを製造し、そのボードの静的曲げ性能およびクリープ性能について、特にそれらの性能に及ぼす表層パーティクルの長さおよびボードに占める表層パーティクルの割合（層構成比）の影響について検討した。特に、クリープ特性については、測定時間を比較的短時間の2880分（2日間）、比較的長時間の20,220分（約2週間）の2種類とした。

### 1 実験方法

#### 1.1 供試材料

供試材料はスギ (*Cryptomeria japonica*) 間伐材（気乾比重は0.34）で、比重測定時の含水率は10.25%であった。供試接着剤はPタイプ用のメラミン・ユリア共縮合樹脂（ユーロイドU-814、三井東圧化学工業（株）製）で、不揮発分は65.31%であった。また、耐水剤として濃度50%のパラフィンワックスエマルジョン（セロゾール686、中京油脂（株）製）を用いた。

#### 1.2 パーティクルの作製と乾燥

スギ丸太から垂直円盤型ディスクフレイカーを用いて、厚さ0.6mm、幅を20mm一定として、長さを50、100、150mmの3水準とした表層用ストランド・パーティクルを作製した。それらを天日乾燥、次いで60℃に調整した熱風乾燥機で約2日間乾燥して含水率を約3%としておいた。また心層用としては、現在実際にボードの製造に供されている梱包廃材や建築解体材を原料としたパーティクルを用いたが、寸法は0.11mm×13.4mm×20.9mmであった。この場合も天日乾燥、次いで60℃に調整した熱風乾燥機で約2日間乾燥し、含水率を約3%としておいた。

#### 1.3 ボードの製造方法

本実験では、製造するボードの厚さを12mm、大きさを40cm×40cmとし、目標ボード比重を0.6とした。表層パーティクルの含脂率は10%、心層のそれは8%とし、熱圧直前のマット含水率をそれぞれ15%、10%とした。ボードの層構成比は、1:6:1、1:4:1、1:2:1の3水準とした。なお、3層構成ボードの表層パーティクルのみを配向させたが、配向型枠のプレート間隔を20mmとして自由落下距離が20mmとなるように調整しながら配向させた。また、非配向（ランダム）の場合はムラが生じないように注意しながら手まきで散布堆積した。

フォーミングしたマットは直ちにホットプレスを用いて、圧縮温度170℃、圧縮圧力35kgf/cm<sup>2</sup>、圧縮時間8分の条件で圧縮してボードとした。なお、圧縮の際にはボード厚さを一定にするため、12mm厚のディスタンスバーを用いた。

#### 1. 4 静的曲げおよび曲げクリープ試験方法

##### 1. 4. 1 試験片の採取と調湿

製造したボードは、実験室内に約2週間以上放置後、幅50mm、長さ350mmの試験片をボード1枚あて7個採取した。なお、配向性ボードの場合には試験片の長辺を配向方向に平行にして採取したもの（以後、平行（∥）ボードという）と、配向方向に直交にして採取したもの（以後、直交（⊥）ボードという）の2種類を用意した。採取した試験片は、直ちに20℃、65%RHの恒温恒湿室に約3週間入れて、重量が平衡になるまで充分調湿した。ボード比重と含水率は、曲げ試験および曲げクリープ試験に供する試験片について調湿後常法により測定した。

##### 1. 4. 2 常態曲げ試験方法

常態曲げ試験は、温度20℃、湿度65%の恒温恒湿室に設置されている最大荷重10トンのインストロン万能試験機（1185型、インストロン社製）を用いて、3点集中荷重方式によって行った。なお、スパン長は30cmである。

##### 1. 4. 3 曲げクリープ試験方法

曲げクリープ試験は、3点荷重方式（スパン長は30cm）として、温度20℃、湿度65%の恒温恒湿室内で行った。試験片に負荷する荷重の大きさは、ボード比重を参考にしてその対となるボードの曲げ試験結果から得られた比例限度荷重の約1/5とした。また、スパンの中央のたわみ量は、差動トランス（精度1/100mm）を介して自記記録計に記録した。なお、曲げクリープ試験に用いた荷重は荷重-たわみ曲線の比例域内にあるので、

次式によりクリープコンプライアンス ( $J(t)$ ) を算出した。

$$J(t) = (4bh^3y(t)) / PL^3 \text{ ----- (1)}$$

ここで、 $b$ と $h$ は試験片の幅 (cm) と厚さ (cm)、 $y(t)$  は負荷後  $t$  時間のたわみ量 (cm)、 $P$ は負荷した荷重 (kgf)、 $L$ はスパン長 (cm) である。

## 2 結果および考察

### 2. 1 ボード表面でのパーティクルの配向角

本実験ではパーティクルを機械的な方法でなるべく一定条件で一方向に配向するようにした。曲げ試験片を用いてパーティクルの配向角を測定した結果を表2-1に示した。配向性ボードの平行方向の配向角はいずれの場合も10度以内であり、かなり配向の程度は良好である。また、パーティクルの長さが短いほど配向角が若干大きい傾向がある。一般に、パーティクルの配向の程度は配向装置のプレート間隔(20mm)とプレートの下部からマット上面までの距離、すなわち、自由落下距離とに影響されるが、パーティクルの長さが長い方がプレート間隔にそってコール板にそのままの状態で落下するので、配向の程度が良好となるものとみられる。

表2-1 ボード表面でのパーティクルの配向角

パーティクルの長さ (mm)	方向	1:2:1	1:4:1	1:6:1
50	∥	7.31± 9.42	8.62± 8.76	5.05± 7.05
	⊥	82.83±12.31	84.31± 7.33	86.14± 6.67
	R	44.38±29.49	46.14±29.39	46.67±28.50
100	∥	5.95± 6.70	8.00± 9.68	4.31± 5.56
	⊥	85.35± 4.37	84.92± 8.49	87.46± 6.50
	R	49.66±24.37	42.34±28.06	40.30±30.31
150	∥	5.44± 5.92	4.51± 5.79	3.34± 4.51
	⊥	86.38± 4.53	87.05± 8.17	88.31± 3.65
	R	54.97±23.47	41.09±27.20	52.71±27.92

また、層構成比については、ボードに占める表層パーティクルの割合が50% (1:2:1) よりは25% (1:6:1) の方がやや平均配向角が小さい傾向があるが、これは自由落下距離が影響したものとみられる。直交方向の平均配向角は83~88度の範囲内に

あり、ランダムボードのそれは44～53度の範囲内にある。

## 2.2 ボード比重と含水率について

曲げ試験を行なう前の試験片は、温湿度条件が20℃、65%RHの恒温恒湿室で調湿した後、重量と寸法を測定してボード比重を算出した。その結果を表2-2に示した。表にみられるように、ボード比重にはほとんど差異は認められない。これは目標ボード比重を0.60として、ボード製造時に1枚のボードを製造するに要するパーティクルの重量、所定の接着剤量、パラフィン・ワックス量を規制したことによるものであり、ほぼ目標のボード比重のものが得られたことを示している。

表2-2 ボードの比重

パーティクルの長さ (mm)	方向	1:2:1	1:4:1	1:6:1
50	∥	0.61±0.02	0.59±0.02	0.60±0.02
	⊥	0.59±0.02	0.59±0.03	0.61±0.02
	R	0.61±0.02	0.59±0.02	0.59±0.01
100	∥	0.56±0.02	0.59±0.02	0.60±0.02
	⊥	0.56±0.03	0.58±0.02	0.59±0.03
	R	0.53±0.01	0.59±0.02	0.60±0.02
150	∥	0.55±0.02	0.60±0.01	0.60±0.03
	⊥	0.56±0.04	0.59±0.02	0.59±0.03
	R	0.59±0.02	0.60±0.02	0.59±0.03

表2-3 ボードの含水率

パーティクルの長さ (mm)	方向	1:2:1	1:4:1	1:6:1
50	∥	9.56±0.07	9.70±0.09	9.91±0.09
	⊥	9.93±0.06	9.76±0.08	9.90±0.07
	R	9.68±0.04	9.73±0.07	9.94±0.09
100	∥	9.37±0.09	9.51±0.06	9.75±0.07
	⊥	9.42±0.04	9.72±0.12	9.59±0.06
	R	9.60±0.17	9.72±0.08	9.64±0.07
150	∥	9.51±0.08	9.59±0.10	9.78±0.09
	⊥	9.55±0.06	9.71±0.10	9.73±0.04
	R	9.48±0.08	9.74±0.08	9.77±0.08

また、ボードの含水率は、いずれも含水率は9.4～9.9%の範囲内にあり、ボード間で含水率に有意の差異は認められない(表2-3)。なお、3層構成のボードの心層に用いた建築解体材を主体とするパーティクルのみで製造した単層ボード(コアボード)の比重は0.61、含水率は10.59%であった。

### 2.3 静的曲げ性能

3層構成の表層のみ配向したボードの平行方向ならびに直交方向、表層をランダム配向したボードの常態曲げヤング係数(MOE)の結果を図2-1に、常態曲げ強さ(MOR)の結果を図3-2に示した。ボードの配向方向のMOEは、表層用パーティクルの割合が少なくなるにしたがって低下する傾向が認められ、特に表層用パーティクルの長さが50mmの場合にその傾向が顕著である。なお、50mm長さのパーティクルだけを用いた単層配向性ボードの配向方向のMOEは $74.8 \pm 1.6 \text{ ton/cm}^2$ であるが<sup>3)</sup>、この値は本実験での層構成比が1:2:1のボードの配向方向のそれに近い値である。また、ランダムボードのMOEの値は、配向性ボードのその約1/2となっている。一方、配向性ボードの直交方向のMOEは、配向性ボードの層構成比の影響はほとんど受けないが、心層パーティクルは配向していないので、直交方向のMOEは10～15  $\text{ton/cm}^2$ とやや小さく、この点用途や使い方によって問題となる場合がある。また心層パーティクルのみの単層ボードのMOEの値は層構成比1:6:1(表層のパーティクルの割合:25%)のそれに近い値を示している。

配向性ボードの平行方向と直交方向との比(異方度、 $\parallel/\perp$ )は、およそ4～5に達している。配向性ボードの配向方向のMOEは、心層用単層ランダム・パーティクルボードのその約3～4倍に達するのに対して、前者と同じ構成をもつランダムな3層ボードのMOEは、心層用単層パーティクルボードのそれに比べると約1.5～2倍大きい程度である。また50mm長さの表層用パーティクルのランダム単層ボードのMOEは $32.9 \pm 3.1 \text{ tonf/cm}^2$ であり<sup>3)</sup>、表層用パーティクルの配向がボードのMOEに大きな影響を与えていることがわかる。

以上のように、本実験では心層用パーティクルの表層用パーティクルに対する重量比率を50～75%の範囲について検討したが、心層用パーティクルの増加による配向方向のMOEの低下は約20%程度で極めて少なく、建築解体材を主たる原料とした場合においても配向効果の大きい、MOEの優れたボードを製造し得ることを示唆している。

MORの結果も、MOEの場合と同様の傾向が認められ、表層用パーティクルの配向効果が認められ、配向性ボードの配向方向のMORはランダムボードのその約2.5～3倍に達している。層構成比についてみると、50mm表層用パーティクルの割合が50%(1:2:1)の場合に最も高い配向方向のMORが得られ、これが25%に低下すると配向効果が低下する。層構成比を1:4:1とした場合には、配向性ボードの配向方向のM

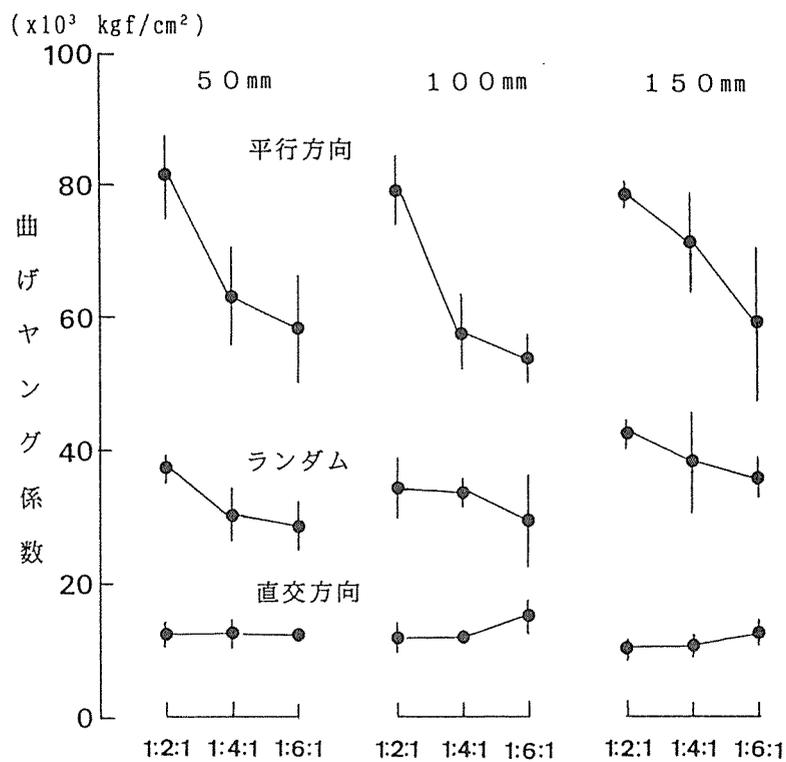


図2-1 常態曲げヤング係数 (MOE)

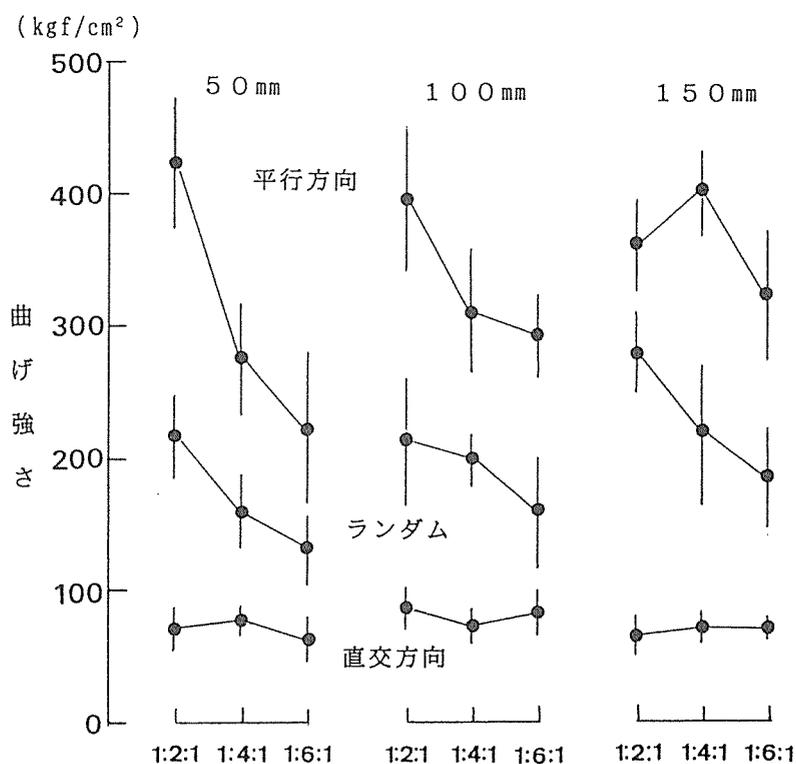


図2-2 常態曲げ強さ (MOR)

ORは表層用パーティクルの長さが大きくなるほど増加するが、400 kgf/cm<sup>2</sup>程度である。なお、50mm表層用パーティクルの単層配向性ボードの配向方向のMORは、約377 kgf/cm<sup>2</sup>である<sup>3)</sup>。一方、配向性ボードの直交方向のMORは、65~87 kgf/cm<sup>2</sup>程度の値が得られかなり低い。

## 2. 4 曲げクリープ性能

### 2. 4. 1 短時間クリープ試験

クリープ測定に用いた荷重は、静的曲げ試験における荷重-たわみ曲線の比例域内にあったので、クリープ試験で得られたたわみ量を(1)式によりクリープコンプライアンスに換算して検討することにしたが、得られたクリープコンプライアンスと時間の関係を図2-3~12に示した。図中のプロットは、6個の試験片の平均値を示し、その標準偏差を縦線として記入し、実線はこれらの点をなめらかに結んだものである。これらの図にみられるように、層構成比ごとにみると、直交ボード、ランダムボード、平行ボードの順にクリープコンプライアンスは小さくなり、すなわち、小さなクリープ変形を示す。また、一部のボードを除いて、層構成比を一定とした場合、表層用パーティクルの長さが長くな

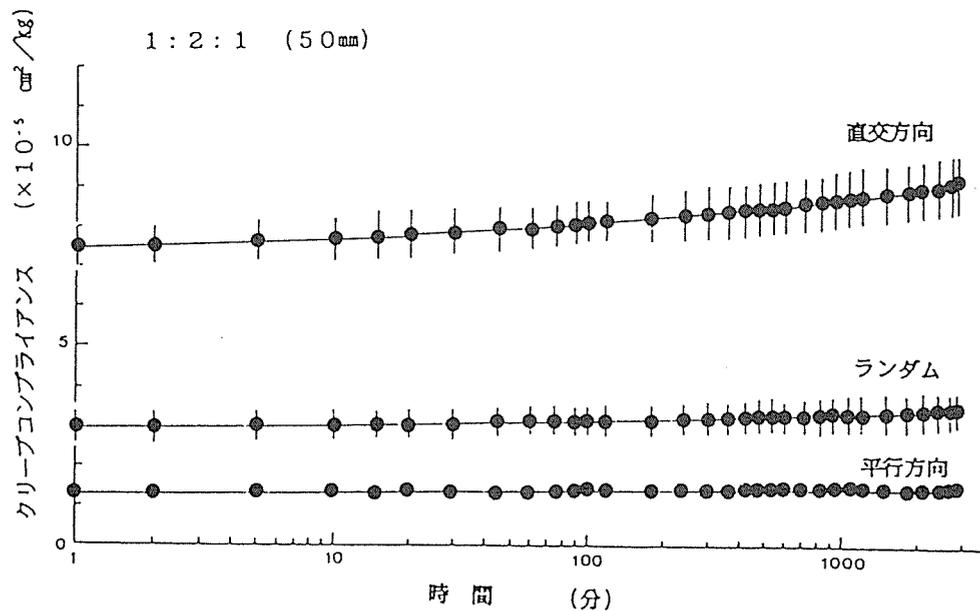


図2-3 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:2:1、50mm)

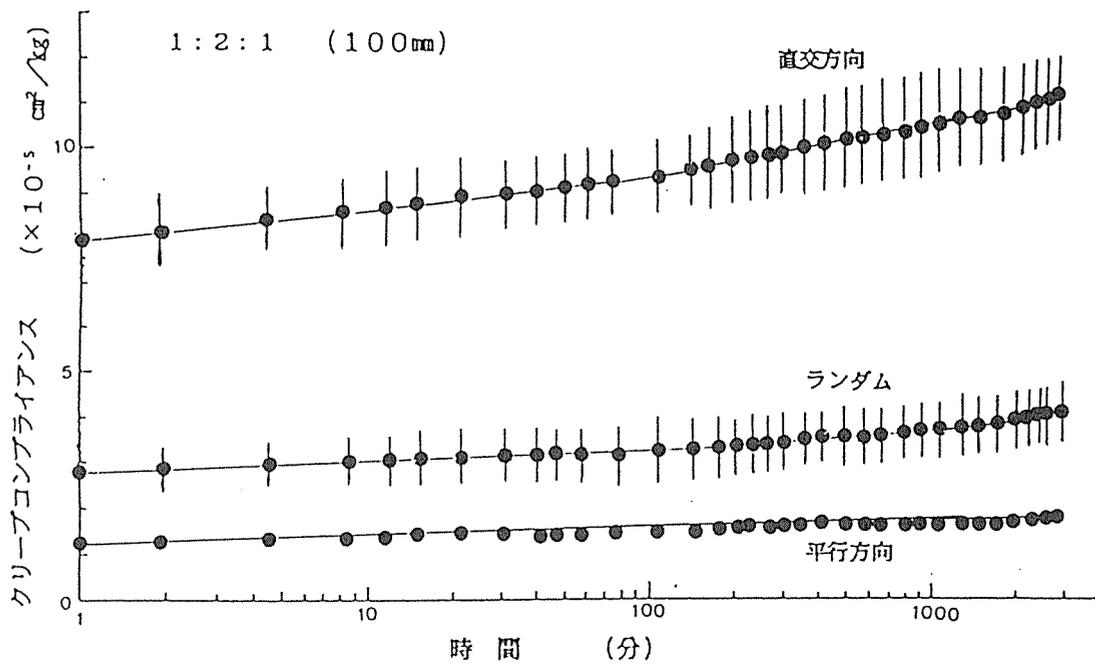


図2-4 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:2:1、100mm)

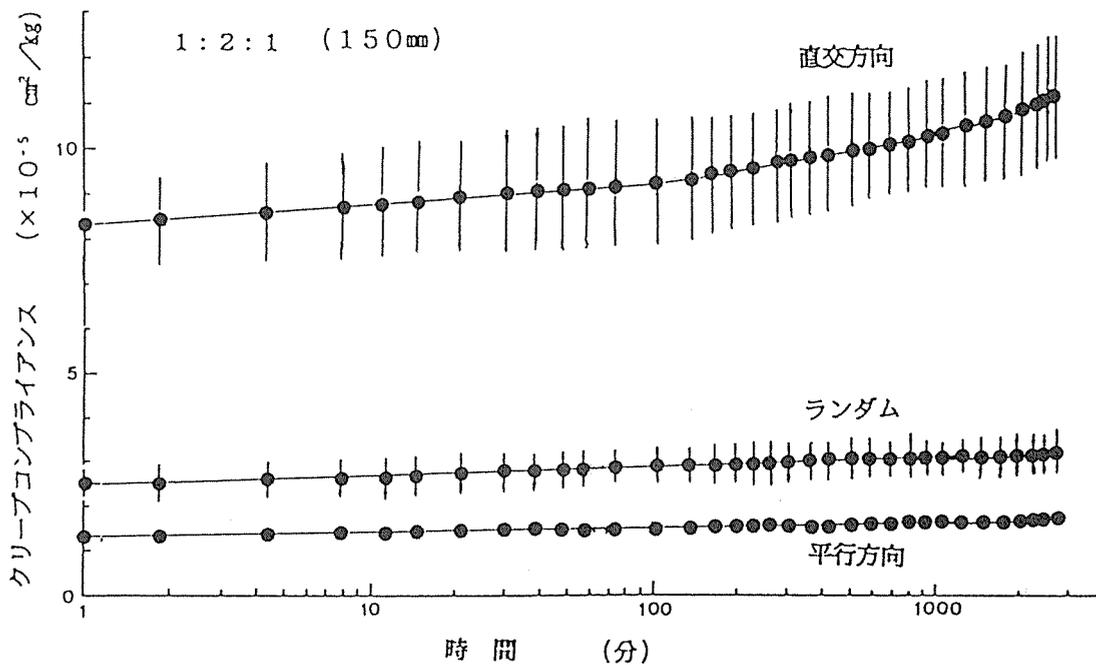


図2-5 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:2:1、150mm)

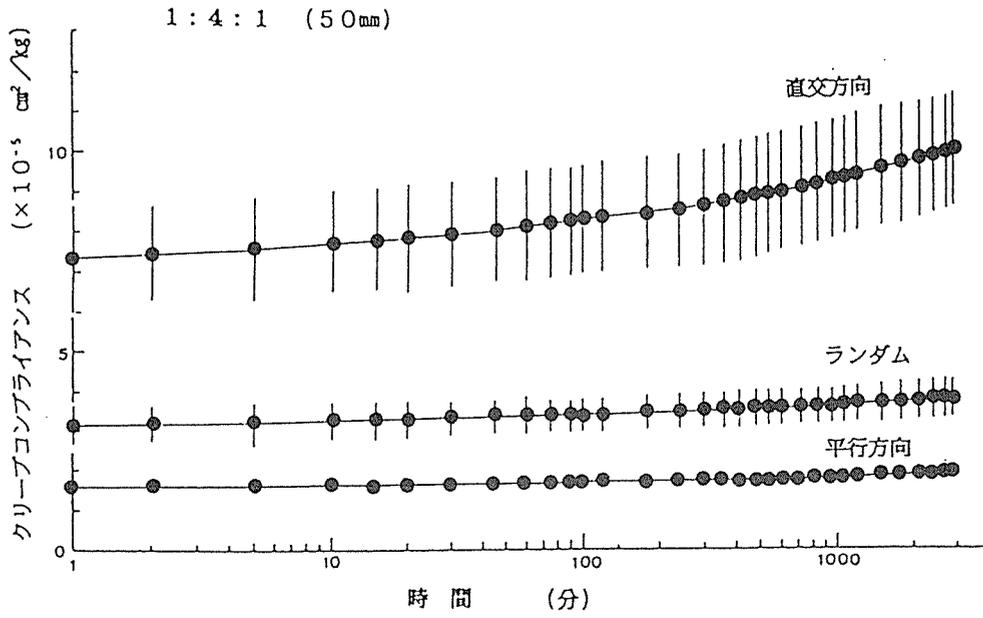


図2-6 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:4:1、50mm)

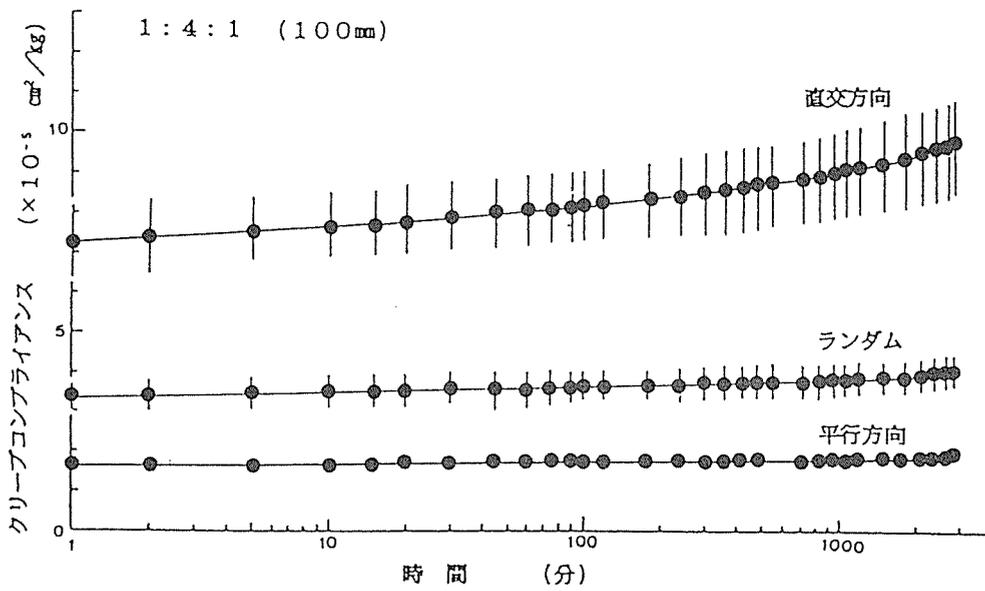


図2-7 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:4:1、100mm)

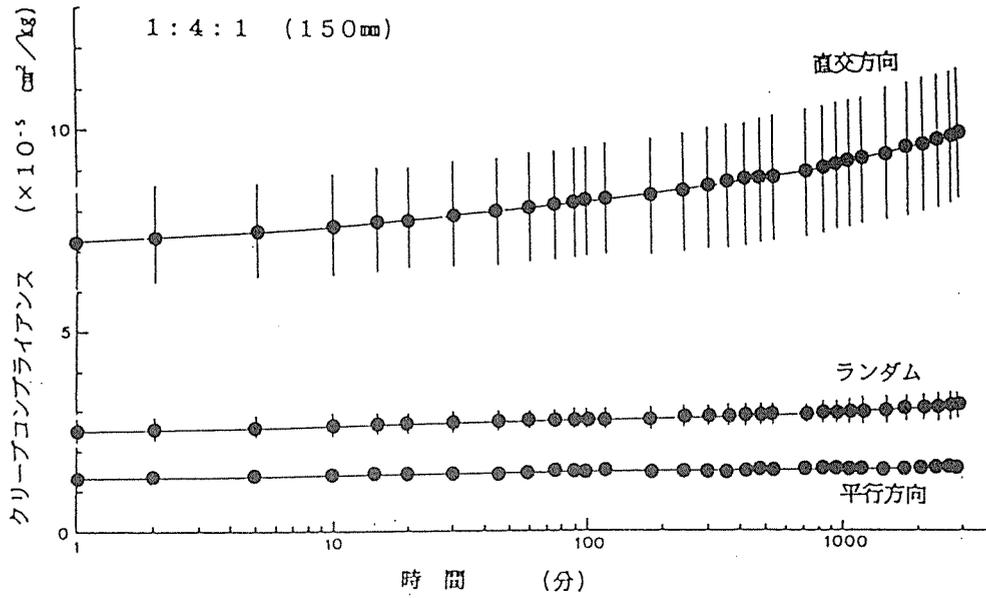


図 2-8 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:4:1、150mm)

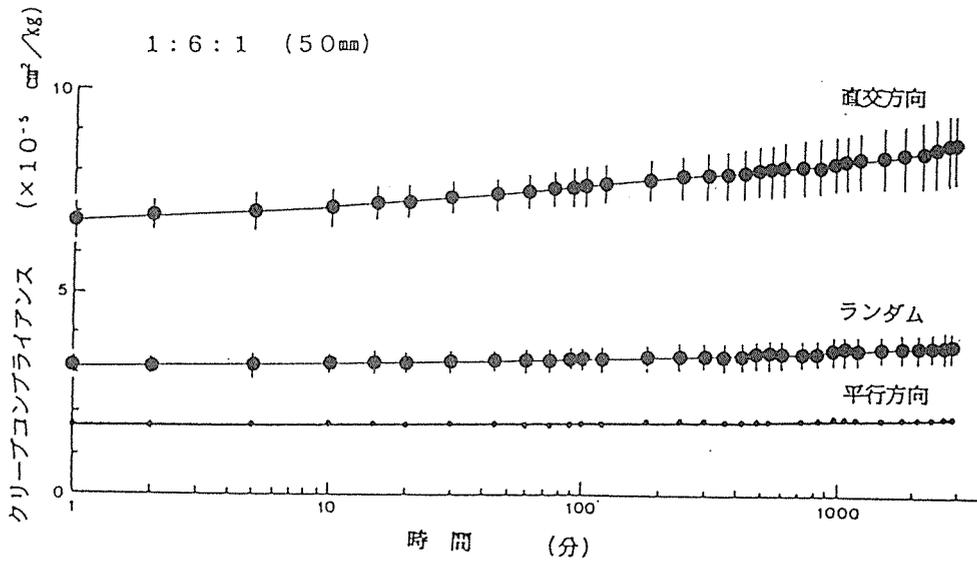


図 2-9 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:6:1、50mm)

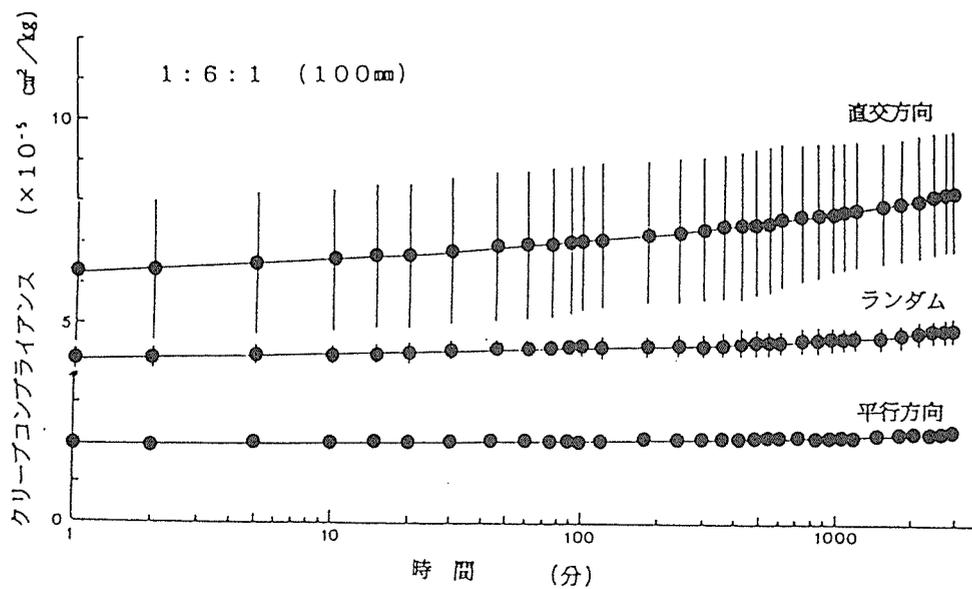


図2-10 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:6:1、100mm)

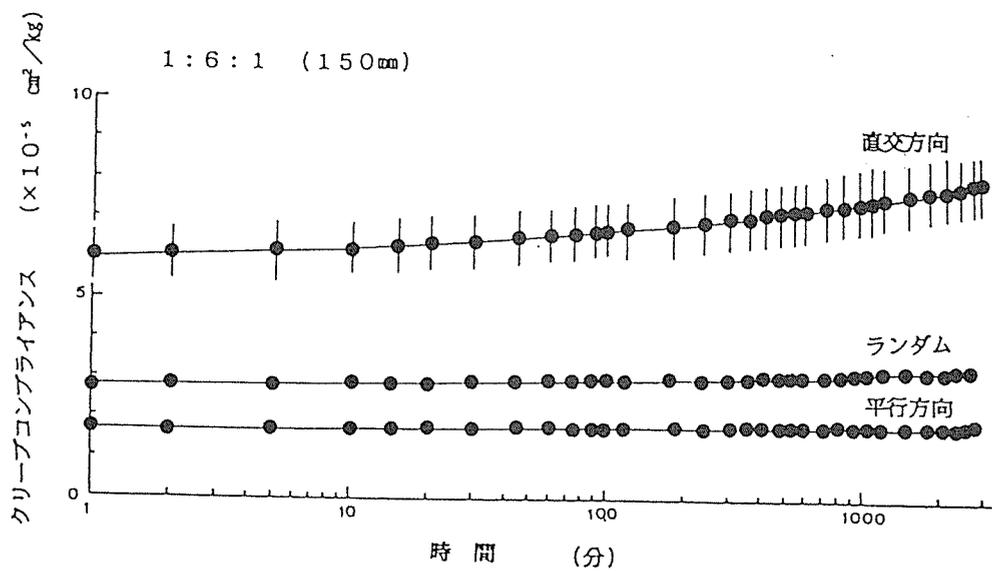


図2-11 クリープコンプライアンスと時間の関係 (1:6:1、150mm)

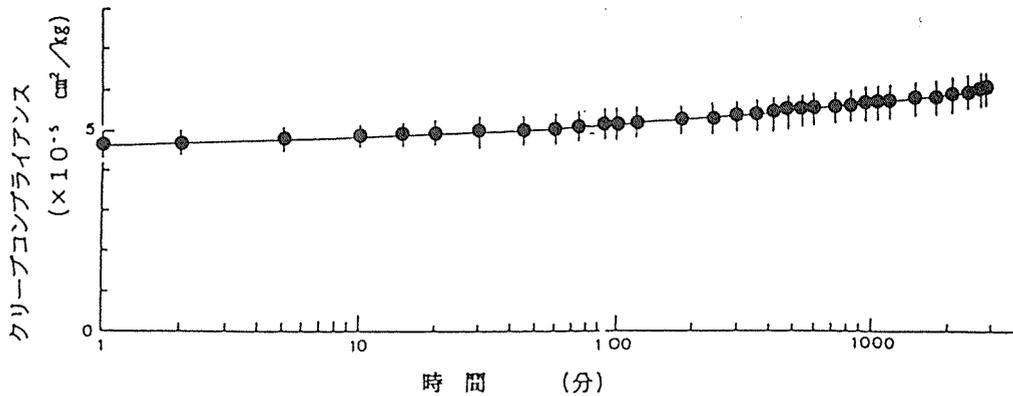


図2-12 クリープコンプライアンスと時間の関係（心層単層）

るとともにクリープコンプライアンスが減少する傾向が認められた。

一方、表層用パーティクルの長さを一定とした場合、いずれの長さの場合とも、クリープコンプライアンスは層構成比が小さくなるほど、すなわち、ボード1枚に占める表層用パーティクルの割合が多くなるほど小さい変形を示しており、クリープ変形に対する表層用パーティクルの長さおよびその層構成比の影響が明確に現われていることがわかる。

次に、負荷直後の瞬間クリープコンプライアンス（以後、 $J(0)$ とする）と負荷後1200分のクリープコンプライアンス（以後、 $J(1200)$ とする）について表2-5に示した。 $J(0)$ および $J(1200)$ の値に関しても常態曲げ性能の項で記したと同じような傾向がある。

また、 $J(0)$ の異方度（ $\perp/\parallel$ ）の値は3.2～5.6の範囲にあり、曲げ性能の異方度とはほぼ同じ傾向であるが、構成比が1:2:1の場合の異方度がやや大きい傾向が認められた。また、 $J(1200)$ の異方度の値はそれよりは大きくなり、4～6の範囲にある。このような配向性ボードの強度的性質の異方度は特にパーティクルの配向の程度に大きく影響されるとみられ、さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

なお、瞬間弾性たわみと除荷直後のクリープ回復たわみの量はほぼ一致したので、瞬間弾性コンプライアンスは常態曲げ試験で得られたMOEの逆数に対応すると考えられ、 $J(0)$ と $1/\text{MOE}$ の関係について検討したが、両者間の相関性は極めて良好であった。

#### 2. 4. 2 実験式による曲げクリープ曲線の表示

木材や木質材料の曲げクリープでは、クリープたわみ $\delta_c$ をクリープ時間 $t$ の関数として次式で表わすことが多い。

$$\delta_c = A t^N \text{ ----- (2)}$$

表2-5 J(0)とJ(1200)の値 (x10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/kgf)

パーティクルの長さ (mm)	方向	1:2:1		1:4:1		1:6:1	
		J(0)	J(1200)	J(0)	J(1200)	J(0)	J(1200)
50	∥	1.28	1.45	1.54	1.83	1.66	1.92
	⊥	7.20	8.79	6.98	9.36	6.65	8.34
	R	2.90	3.35	3.05	3.63	3.05	3.64
100	∥	1.30	1.55	1.57	1.83	1.90	2.20
	⊥	7.97	10.40	6.95	9.15	6.01	7.85
	R	2.89	3.41	3.30	3.89	3.02	3.67
150	∥	1.28	1.48	1.31	1.51	1.64	1.86
	⊥	8.21	10.33	7.14	9.30	5.71	7.52
	R	2.57	2.97	2.50	2.99	2.73	4.24

17・ボード J(0):4.50, J(1200):5.79

ここで、AとNはパラメータである。ここでは、たわみをクリープコンプライアンスに換算したので、(3)式の代わりに次式を用いることにした。

$$J(t) = J(0) + at^n \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$Jc(t) = J(t) - J(0) = at^n \quad \text{-----} \quad (4)$$

ここで、aとnは実験に基づくパラメータである。

(4) 式中のパラメータaとnを、log Jc(t)とlog(t)との回帰直線式から求め、これらの値とJ(0)の値を(3)式に代入して各条件ごとに実験式を求め、それらの結果を表3-6に示した。

パラメータaは、負荷1分後のクリープコンプライアンスを表わている。また、nの値は0.20から0.32の範囲にあり、総平均値は0.25である。中井<sup>5)</sup>は、ボード比重が0.72~0.77の市販のパーティクルボードのクリープ実験で、n=0.27の値を、また、池田ら<sup>6)</sup>はボード比重が0.5~0.8の実験室ボードでn=0.29とし、ボード比重やパーティクルの長さに関係なく、ほぼ一定とみることができるとしている。本実験で得られた値は、これらの値に近似している。

クリープコンプライアンスに及ぼすパーティクルの長さや層構成比の影響を総括的にみるために、表2-6に示した実験式を用いて、負荷1200分後のクリープコンプライアンスJ(1200)を求め、この値とその最低値J(1200)minとの比を表2-7に示した。なお、J(1200)minは、パーティクルの長さが50mm、層構成比1:2:1の場合で、

表2-6 J(t)=J(0)+at^nとして示した平均クリープ曲線の実験式

ハ°-ティクル の長さ(mm)	方向	1:2:1	1:4:1	1:6:1
50	∥	1.28+0.033t <sup>0.24</sup> (0.997)	1.54+0.057t <sup>0.23</sup> (0.999)	1.66+0.044t <sup>0.23</sup> (0.996)
	⊥	7.20+0.278t <sup>0.25</sup> (0.964)	6.98+0.399t <sup>0.25</sup> (0.955)	6.65+0.249t <sup>0.28</sup> (0.951)
	R	2.90+0.077t <sup>0.25</sup> (0.995)	3.05+0.099t <sup>0.25</sup> (0.994)	3.05+0.063t <sup>0.26</sup> (0.995)
100	∥	1.30+0.042t <sup>0.25</sup> (0.993)	1.57+0.063t <sup>0.20</sup> (0.997)	1.90+0.062t <sup>0.22</sup> (0.997)
	⊥	7.97+0.413t <sup>0.25</sup> (0.942)	6.95+0.387t <sup>0.25</sup> (0.933)	6.01+0.284t <sup>0.27</sup> (0.943)
	R	2.89+0.087t <sup>0.25</sup> (0.991)	3.30+0.091t <sup>0.27</sup> (0.996)	3.02+0.075t <sup>0.31</sup> (0.994)
150	∥	1.28+0.036t <sup>0.24</sup> (0.992)	1.31+0.044t <sup>0.21</sup> (0.998)	1.64+0.049t <sup>0.21</sup> (0.998)
	⊥	8.21+0.386t <sup>0.24</sup> (0.951)	7.14+0.238t <sup>0.32</sup> (0.936)	5.71+0.157t <sup>0.30</sup> (0.937)
	R	2.57+0.068t <sup>0.25</sup> (0.996)	2.50+0.077t <sup>0.26</sup> (0.998)	2.73+0.063t <sup>0.27</sup> (0.990)

( )内は相関係数を示す。

そのクリープコンプライアンス  
の値は  $1.46 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kgf}$   
である。

2.4.3 長時間クリープと  
短時間クリープによるその推定

木材のクリープ限度を求める  
ために、JISではクリープ測  
定時間として200時間以上と  
定めているが、本実験では約2  
週間(337時間)を長時間ク  
リープの測定時間とした。長時

表2-7 表2-6の実験式より算出した  
J(1200)の最低値に対する比

ハ°-ティクルの長さ (mm)	方向	1:2:1	1:4:1	1:6:1
50	∥	1.00	1.25	1.29
	⊥	6.05	6.39	5.79
	R	2.29	2.49	2.36
100	∥	1.06	1.25	1.50
	⊥	7.12	6.32	5.44
	R	2.33	2.68	2.53
150	∥	1.01	1.03	1.27
	⊥	7.07	6.46	4.81
	R	2.03	2.05	2.16

最低値:  $1.46 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kgf}$

間クリープのクリープ曲線は、図2-3~12に示したものと類似している。そこで、長時間クリープと短時間クリープとの関係を検討するために、短時間クリープでの負荷2880分後までの測定値から(3)式のパラメータaとnを求め、同式から負荷後20220分までのクリープ曲線を算出し、これ(図中の実線)と実測値(図中の黒丸)との関係を図2-13~15に示した。

長時間クリープのクリープ曲線は、図2-3~11に示したものと類似の曲線を示している。また、これらの図にみられるように、算出した曲線と実測値とは、パラメータのaとnを求めた回帰直線の相関係数が0.99以上の場合に、比較的よい適合を示すことが明らかであり、短時間(2880分)クリープの測定結果から、長時間(20220分)のクリープ挙動が推定可能である。

しかし、ここで検討したものは、20°C、65%RHの定常状態でのクリープ挙動であり、実際にこのようなボードを使用する場合には、非定常状態でのクリープ挙動が重要となるので、クリープ挙動に及ぼす含水率の影響など、非定常状態でのボードのクリープ挙動について明らかにする必要がある。

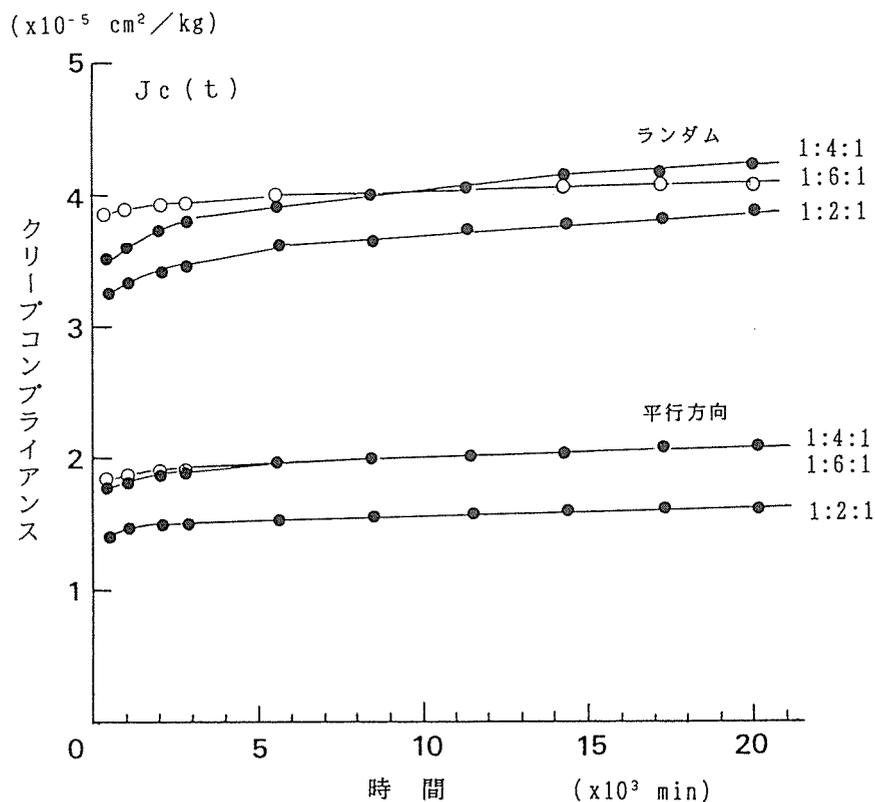


図2-13 長時間クリープ(50mm)

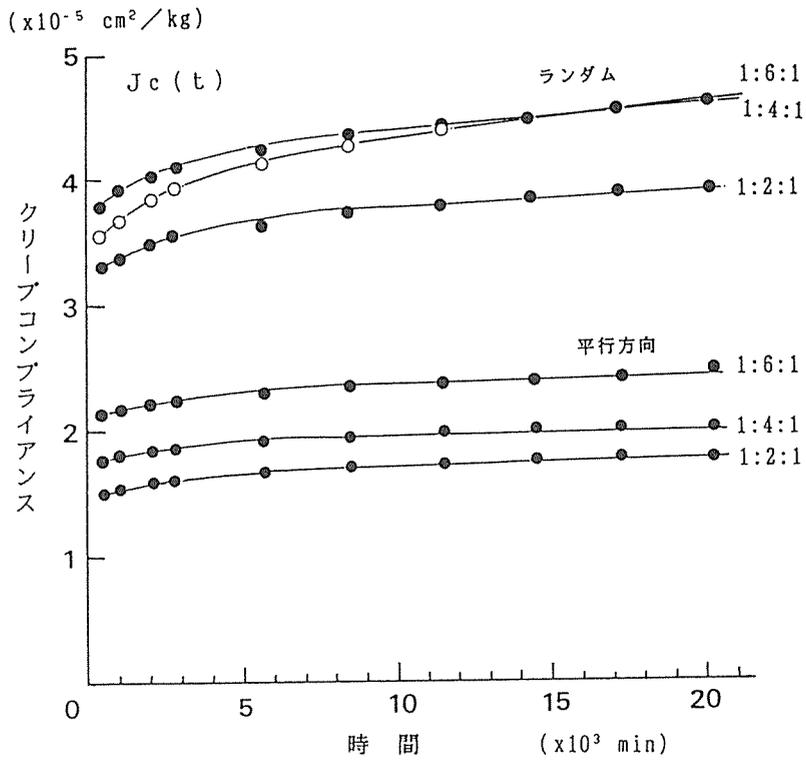


図2-14 長時間クリープ (100mm)

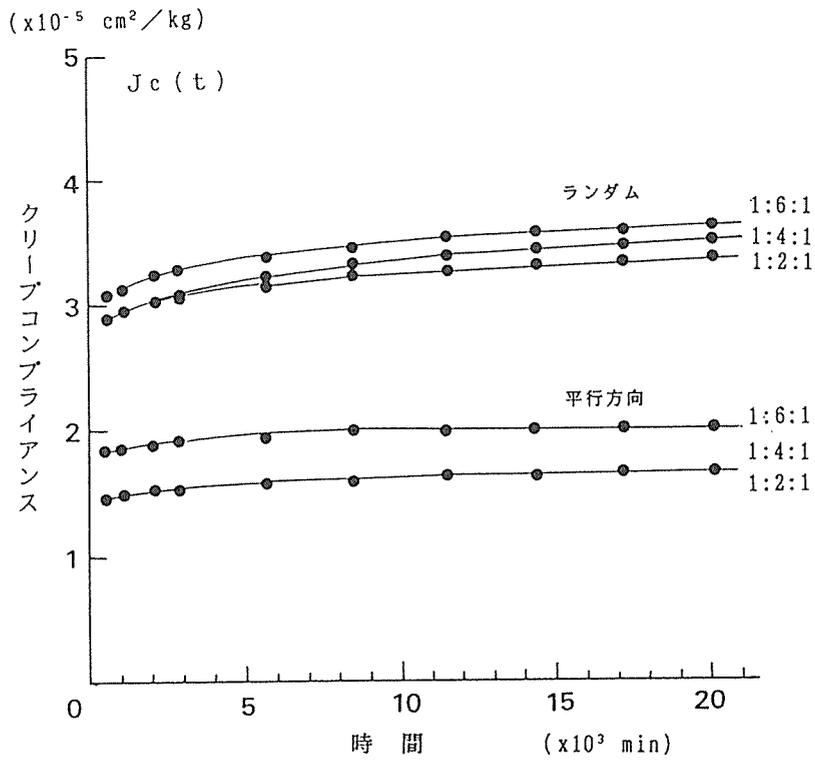


図2-15 長時間クリープ (150mm)

## 参考文献

- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：“木質建築資材国際化対策事業報告書”（1994）
- 2) 梶田 熙：木材工業、42（12）、15-18（1987）
- 3) Hiromu Kajita：Orientted Particleboard with Sugi Thinnings I. Effects of Degree of Particle Alignment and Board Density on Physical and Mechanical Properties. Mokuzaigakkaishi, 33, 865-871（1987）
- 4) 朴 厚植、梶田 熙、矢野浩之：材料、45（4）、（1996）
- 5) 中井 孝：木材工業、33、247、（1978）
- 6) 池田友寿、竹村富男：木材学会誌、25（5）、332-337（1979）
- 7) C.E.Shuler and R.A.Kelly: Forest Prod.J., 26, 24(1976)
- 8) S.Avramidis and L.A.Smith: Holzforschung, 43(2)131-133(1989)
- 9) A.F.Halligan and A.P.Schniewind: Forest Prod.J., 22(4), 41(1972)
- 10) J.H.Pu, R.C.Tang and C.Y.Hse: Forest Prod.J., 44(11/12), 45(1994)

## 第3章 木質パネルの面内寸法安定性

### 3.1 調査・研究の背景と必要性

従来、木質パネルの寸法安定性といえば、厚さ方向の安定性が問われてきた。合板は別として、パーティクルボードやファイバーボードでは、その熱圧成型過程で一時的に変形固定されたエレメントが吸脱湿あるいは吸脱水の繰り返しにより厚さ回復し、接着結合の破壊を伴いながらパネルの厚さ膨張と強度性能の劣化が生じてくる。木質パネルを構造用パネルとして使用する場合、耐水性の問題は依然として重要な課題であり、種々の寸法安定化技術が検討されている<sup>1)</sup>。

一方、木質パネルの面内寸法安定性が最近になって問題視されるようになった。その理由のひとつは建築用のパネル材料や長尺の内装部材（例えば幅木、廻り縁など）として、木質パネルのシェアーは増加の一途にあるため、実際使用上の種々のトラブルが目立ってきたことにある。具体例としては、木質パネルを床下地とした場合の仕上げ材の目地の開閉の問題<sup>2)</sup>、長尺部材の目地の隙間のように平面的なものから、ドア・扉パネルのそりやねじれといった立体的な変形まで様々である。また、最近の木質住宅では、省エネルギー性や居住性の観点から気密性が求められており、木質パネル部材の寸法安定性は住宅の気密性にも関わってくるであろう。

面内寸法安定性を考えるとき、温度や水分の刺激は屋外暴露のような厳しいものではなく、実際の使用環境下での温湿度変化を対象とすべきであろう。したがって、木質パネルが使用される温湿度環境について、そのデータ蓄積と活用が不可欠となる。また、種々の木質パネルが温湿度変化に対してどの程度の線膨張を示すのかを知り、ランク付けを行えば、適材適所への使用が可能になる。一方、現行のJIS（パーティクルボード；A 5908、繊維板；A 5905）には線膨張率の基準が設けられていないが、面内寸法安定性の測定方法・評価方法が確立されれば、これらをJISその他（例えば自主製品規格の策定）に取り込み、ユーザーが使用しやすい環境を整備することが可能であろう。

### 3.2 本研究の目的

本研究の目的を整理すると、次の3項目となる。

- ①木質パネル製造後の養生の実態把握、および実際使用時の含水率変化の把握
- ②各種木質パネルの線膨張率（LE）のランク付け
- ③LEの測定方法および評価方法の確立

これらの3項目について、それぞれ具体的な調査・研究の進め方、考え方を以下に記述する。

### 3.2.1 製造後の養生の実態把握、および実際使用時の含水率変化の把握

#### (1) 養生の実態把握

木質パネルを住宅部材に使用する際、施工時のパネルの含水率を実際使用中に変化する含水率の中間的な値に設定しておけば、吸放湿に由来するパネル伸縮による大きなトラブルは避けられるであろう。すなわち、施工に至るまでのパネルの調湿が重要となる。この問題は、パネルメーカーの出荷時の含水率の問題と、ユーザーの資材管理の問題に分けられる。本年度は、国内のパネルメーカーに対して、製造直後および出荷時の含水率と工場内での養生方法に関する調査を行い、実態の把握に努めた。

#### (2) 実際使用時の含水率変化の把握

実際使用時のパネルの含水率変化を把握するには、①実際使用されている部材を回収、あるいはその場で含水率を調べる方法と、②周囲温湿度データを調べて、その材料の平衡含水率（EMC）から推定する方法がある。①は大変な労力を要する作業であるが、これまでにいくつかの報告例がある。②に関しては、周囲温湿度データの収集が①と同様に労力を要するが、既往の報告を整理すれば、大略はつかめるだろう。ここで必要となるのが、木質パネルのEMCデータである。木質パネルのEMCは何件か報告されているが、活用するのに十分な蓄積とは言えない。そこで、本年度は既報のEMCデータを概観するとともに、後述する9種類の市販木質パネルについてEMC測定を開始した。

### 3.2.2 各種木質パネルのLEのランク付け

木質パネルのLEに関する既往の報告には次のような特徴がある。

- ① LEの報告件数は、厚さ膨張率（TS）の報告件数より圧倒的に少ない（特定の実験室製ボードあるいは数種の市販ボードに対して、厚さ膨張率測定のみで測定しておいたという程度のものも多い）。
- ② 水分の与え方（吸湿の場合では相対湿度の変化幅、吸水では温度と時間）が報告ごとに異なっている場合が多い。
- ③ 含水率1%あたりのLEとしてデータが与えられることも多いが、ボードのEMCが不明な場合には、周囲温湿度の変化に対しての実際の線膨張が算出できない。

したがって、多数の木質パネルのLEを同じ条件の下で測定し、評価する必要がある。本研究では、後述する9種類の市販木質パネルについて、吸湿によるLEを測定し、各パネルのLEの特徴を見出すことを試みた。

### 3.2.3 LEの測定方法と評価方法

#### (1) 測定装置の試作

装置の試作で最初に問題となるのは、試験体の寸法である。外国の例を見てみると、北米の自主製品規格（PS2-92）では、長さ1040mm×幅75mmの試験体寸法を基準にしている。これより短い試験体も許されるが、最小長さは300mmとなっている。試験体の長さが長い程、

すなわち標点間隔が長い程、寸法の読み取り精度が低くても良いという利点がある。しかし、大きな試験体は取り扱いが面倒という短所もある。

本研究では、取り扱い易い寸法として、長さ300mm×幅75mmの試験体を対象に、測定装置の試作を行った。その際、試験体の長さ変化を1/100mm精度で、作業性が良く、かつ再現性が良い測定ができるように工夫した。なお、大型試験体（長さ900mm程度）用の測定装置も今後（来年度）試作する予定であり、同一ロットの試験体を用いて、試験体寸法がLEに及ぼす影響を検討する予定である。

## (2) 含水率変化の促進

LEの測定方法としては、なるべく簡便な方法が望ましい。試験体を吸湿あるいは脱湿させて含水率を変化させる方法は、実際使用下の吸湿線膨張、脱湿線収縮を最もよく再現する。しかし、調湿に長時間を要するため、試験方法としては現実的とは言えない。そこで、含水率変化の促進として、常温常圧吸水、常温減圧吸水、温水常圧吸水、煮沸吸水を取り上げる。これらの促進処理で得られるLEを吸湿によるLEと比較し、簡便なLEの測定方法を検討する。

## 3.3 調査・研究の方法と結果

### 3.3.1 工場出荷時のパネル含水率調査

#### (1) 調査方法

国内の木質パネルメーカー6社（PBおよびMDF）に対して、製造直後および養生後のパネル含水率、養生方法などの調査を行った（調査期間：平成7年12月～8年2月）。

調査対象とするパネルは、

- ・ 3種類の接着剤（Uタイプ、Mタイプ、Pタイプ）
- ・ 2種類の比重（低比重13タイプ、高比重18タイプ）
- ・ 3種類の厚さ（薄物、中庸、厚物）

の合計18種類（3×2×3）とした。これら18種類のパネルのうち、各社で該当するパネルについて、表3-1に示す調査票にパネルの製造条件や製造後の養生方法を記入してもらった。また、含水率の測定は、以下のような方法で行ってもらい、表3-2に示す調査票に回答してもらった。

- ・ 製造直後の含水率：パネルが熱板プレスから出て、冷却された時点の含水率。原板中央付近および端部付近から各1個の含水率試片（10cm×10cm）を採取し、絶乾法により含水率を算出する。パネル1種類につき、測定を1～3回繰り返す。
- ・ 出荷直前の含水率：養生、保管の後、研削・裁断された製品について、原板中央付近の製品、および原板端部付近の製品から各1個の含水率試片（10cm×10cm）を採取し、絶乾法により含水率を算出する。パネル1種類につき、測定を1～3回繰り返す。

表 3 - 1 パネル含水率の調査票 ( 1 )

ボードの区分			実際のボード製造条件								
タイプ	比重	厚さ	表 層			芯 層			設定 比重	設定 厚さ (mm)	調湿・養生・保管 などの具体的方法
			接着剤		ワックス 添加率 (%)	接着剤		ワックス 添加率 (%)			
			種 類	添加率 (%)		種 類	添加率 (%)				
U	低	薄物									
		中物									
		厚物									
	高	薄物									
		中物									
		厚物									
M	低	薄物									
		中物									
		厚物									
	高	薄物									
		中物									
		厚物									
P	低	薄物									
		中物									
		厚物									
	高	薄物									
		中物									
		厚物									

表 3 - 2 パネル含水率の調査票 ( 2 )

区分			含水率の測定結果													
タイプ	比重	厚さ	①製造直後(冷却後)の原板						②出荷直前の製品							
			原板中央付近から採取			原板端部付近から採取			原板中央付近の製品			原板端部付近の製品				
			No.	乾燥前重量 (g)	乾燥後重量 (g)	含水率 (%)	乾燥前重量 (g)	乾燥後重量 (g)	含水率 (%)	No.	乾燥前重量 (g)	乾燥後重量 (g)	含水率 (%)	乾燥前重量 (g)	乾燥後重量 (g)	含水率 (%)
U	低	薄	1													
			2													
			3													
	中		1													
			2													
			3													
	厚		1													
			2													
			3													
高	薄	1														
		2														
		3														
	中		1													
			2													
			3													
厚		1														
		2														
		3														
M	低	薄	1													
			2													
			3													
	中		1													
			2													
			3													
	厚		1													
			2													
			3													
高	薄	1														
		2														
		3														
	中		1													
			2													
			3													
厚		1														
		2														
		3														
P	低	薄	1													
			2													
			3													
	中		1													
			2													
			3													
	厚		1													
			2													
			3													
高	薄	1														
		2														
		3														
	中		1													
			2													
			3													
厚		1														
		2														
		3														

## (2) 調査結果

パーティクルボード（A～D社）、MDF（E，F社）の製造直後および出荷直前の含水率を図3-1に示す。製造直後（冷却後）のボード含水率は、パーティクルボードで概ね6～9%の範囲に、MDFで約5%であった。製造直後でも、このように比較的高い含水率レベルにあることは大変興味深い。なぜなら、パーティクルやファイバーを過度に乾燥させずに成板すなわちエレメント間の接着が完了すれば、その後のエレメントの膨潤収縮に由来する接着点の内部応力が低減されると考えられるからである。このことは、これらのパネルの接着耐久性に影響を及ぼすであろう。また、上記の含水率はボードの厚さ方向の平均含水率であることから、内層の含水率はさらに高い含水率レベルにあると考えられる。このことは、次の観点から興味深い事実である。成板時の熱圧により、エレメントは圧縮変形を受け、この変形はエレメントの水分減少によるドライグセットで一時的に固定されている。この一時的な固定の程度が、水分変化量とどのような関係にあるかが問題となる。仮に、水分変化量が小さいほど固定の程度が小さいとすれば、内層含水率を高いレベルに保持したまま成板を終了することは、ボードの厚さ方向の寸法安定性にマイナス要因となるかも知れない。このあたりは大変複雑な問題であり、今後十分に検討する必要がある。

工場出荷直前の含水率は、パーティクルボードで概ね6～9%の範囲にあり、範囲そのものは製造直後の含水率とほとんど変わらない。しかし、図3-1に見るように製造後の養生で含水率が最大4%程度上昇している場合や、逆に1～2%減少している場合もある。これらは、製造直後の含水率とその後の養生での温湿度環境で決まってくる。養生・保管は、各社とも空調設備のない倉庫内で行われており、調査時期が冬季で、比較的乾燥していることもあって、このような実態となっていると言える。なお、養生期間は、最短3日、最長12日間で、平均で7日間であった。

今回の調査では、ボード製造直後の含水率が比較的高いという実態が明らかとなった。各社とも含水率を高めるような製造条件を採用していると推察され、養生期間の短縮や、製品がユーザーに渡った後の含水率との差を少なくして寸法精度を保証する努力がなされていると解釈できる。

□ 製造直後    ▨ 出荷直前

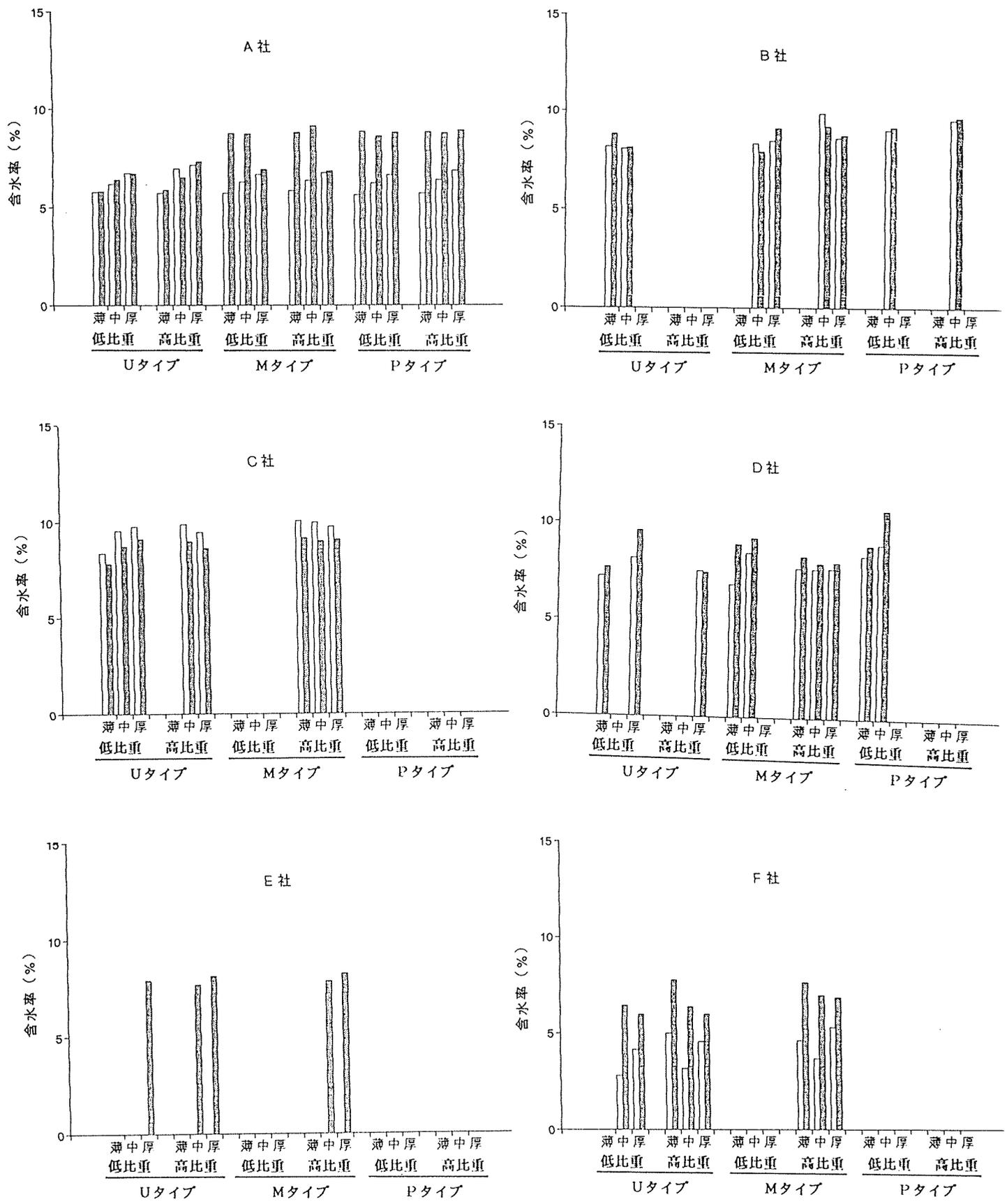


図 3 - 1 ボード工場における製品含水率の調査結果

### 3.3.2 木質パネルの平衡含水率（EMC）

#### (1) 既往のデータ

パーティクルボードやファイバーボードの吸湿性は、木材素材と異なる傾向がある。何種類かの木質パネルについて、EMCや吸湿等温曲線が測定され、木材素材と比較されているが、一般に、木材素材と比べると吸湿性が低いことが報告されている<sup>3, 4)</sup>。

木質パネルの吸湿性は、熱圧成型による原料の吸湿性の変化と、使用される接着剤やその他の添加物の吸湿性とその添加量に依存するであろう。このような観点から、種々の温度で熱圧された木材小片の吸湿性を測定し、各種接着剤の吸湿性データと組み合わせて、パネルの含水率曲線を推定している報告がある<sup>4)</sup>。図1は、その報告からの引用で、熱圧条件（温度、時間）と接着剤の種類により、パネルのEMCが異なることが示されている。すなわち、熱圧温度が高く小片の吸湿性が低下するほど、使用する接着剤の吸湿性が低いほど、パネルのEMCは低くなる。たとえば、200℃10分の熱圧条件で成型されたイソシアネートパネル（含脂率10%）と原料木材のEMCの差は2～3%となっている。

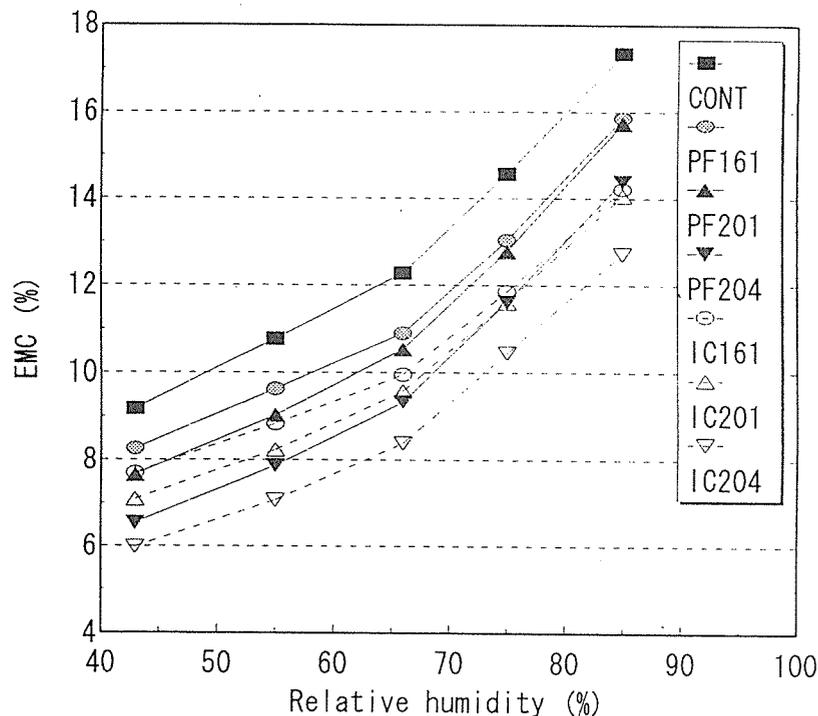


図3-2 フェノール樹脂(PF)およびイソシアネート樹脂(IC)パーティクルボードの平衡含水率曲線  
注) 図中の記号、例えばPF161は、160℃で10分間熱圧されたパネルを示す。

#### (2) 対象とする温湿度変化範囲

各種木質パネルのEMCデータを測定し、それを活用しようとする場合、目的の項で述べたように、対象とすべき温湿度変化範囲を決定することが重要となる。本研究では、以

下に示す考え方で、温湿度変化範囲の概略を想定した。

実際使用環境下では、人為的な低温低湿、高温高湿条件も有り得るが、本実験ではこれらは対象外とする。すなわち、通常の建築部材や家具材料としての周囲温湿度条件を想定する。これらの材料の使用環境下では高度な断湿が行われない限り、絶対湿度の変動域は比較的小さいといえる。したがって、まず考慮すべきは、絶対湿度の年間の変動幅である。いま、外気絶対湿度の一例として、岩手県盛岡地域の外気絶対湿度の年内変動を図3-3（文献6）に示す。絶対湿度変化域は3 mmHg（2月）～18 mmHg（8月）である。一般に、湿流は、冬季では室内→室外、夏季では室外→室内となるため、木質パネルが使用される部位によっては、その部位での絶対湿度変化幅を狭めて設定してもよいかも知れない。そこで、一案として、絶対湿度変化域を5～25 mmHgに設定する。つぎに温度を設定すれば相对湿度変化幅が決定される。いま、温度を10, 20, 30, 40℃の4水準とすると、対象とすべき温湿度範囲は以下ようになる。

- 10℃ : RH 54%～100%
- 20℃ : RH 29%～100%
- 30℃ : RH 16%～79%
- 40℃ : RH 9%～45%

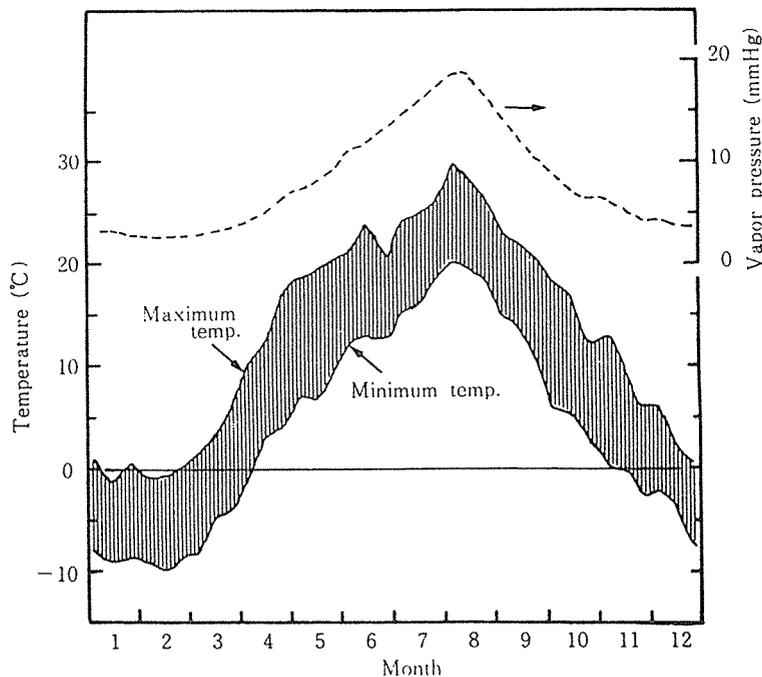


図3-3 外気絶対湿度の年内変動の一例（岩手県盛岡地域、1982-1986の平均）

この温湿度範囲でのEMCを測定すれば、実際使用時のパネル含水率の変化範囲を推定する際に、ほぼ十分なデータと言えよう。ただし、我が国は亜熱帯から亜寒帯まで、地理的に広く分布する。したがって、地域ごとに区分した温湿度変化範囲を設定すべきである

が、これは今後の課題とする。

一方、実際使用下の木質パネルの含水率は、周囲温湿度変動のために、常に非平衡状態にある。しかも、過去の含水率履歴が影響する（ヒステレシス）ため、ある時点の含水率は同一温湿度環境下でも変動がある。しかし、この変動は吸着および脱着等温曲線に見られるヒステレシスの範囲内にあると考えてよい。したがって、EMCの測定に当たって、吸着および脱着等温曲線を求めておけば必要かつ充分と言える。

### (3) 供試パネル

EMC測定に供試したパネルは、9種類の市販木質パネルであり、その概要を表3-3に示す。これらのパネルは、後に示すLE測定パネルと同一ロットのものである。各パネルにつき、5枚の3尺×3尺原板より、30cm×30cmの試料を1原板につき1枚、計5枚採取した。これらの試料を、厚さ2mm×幅12mm（パネル厚さ）×長さ20mmの小型のサンプルに加工し、パネル1種類につき、約600gのサンプルを用意した。この操作は、吸湿平衡に達する時間を短縮させるためのものであり、この程度のサンプル寸法では、約10日間の調湿で周囲の温湿度に平衡となることが経験的に分かっている。

表3-3 EMC測定に供試した木質パネルの概要

パネル (レジンタイプ)	比重	備考
P B	P F	三層ボード 表層含脂率：13% 内層含脂率：8%
	U M F	
	U F	
O S B	P F	粉末PF、含脂率2%（表内層とも）
M D F	M U F	なし
	U F	
南洋材合板	P F	なし
	M U F	
針葉樹合板	M U F	なし

注) パネルの厚さは、O S Bが9.5mm、その他は12mmである。

#### (4) EMC測定方法

大型の秤量ビン（直径5 cm程度、高さ8 cm程度）にサンプルを約30 g採取して、1試験体とした。パネル1種類につき8試験体を用意し、10、20、30および40℃での測定にそれぞれ2試験体ずつ配分した。各温度での相対湿度のステップ変化は以下の条件とした。

10℃ → 57%RH(Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), 76%RH(NaCl), 87%RH(KCl), 96%RH(KNO<sub>3</sub>)

以上4ステップ

20℃ → 33%RH(MgCl<sub>2</sub>), 43%RH(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), 54%RH(Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), 75%RH(NaCl), 85%RH(KCl)  
95%RH(KNO<sub>3</sub>) 以上6ステップ

30℃ → 11%RH(LiCl), 33%RH(MgCl<sub>2</sub>), 43%RH(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), 51%RH(Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), 75%RH(NaCl)

以上5ステップ

40℃ → 11%RH(LiCl), 31%RH(MgCl<sub>2</sub>), 42%RH(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

以上3ステップ

調湿は各温度に設定した恒温装置内に飽和塩入りデシケータを設置して行なった。デシケータ内の空気は一定時間毎に攪拌した（30分ごとに1分間程度の攪拌）。

<測定手順>

1. 予め秤量ビン（蓋を含む）の重量を測定しておく（1 mgまで）。
2. 試験体（秤量ビンを含む）を真空乾燥機（五酸化燐、40℃）を用い全乾にし、サンプルの全乾重量を測定する（1mgまで）。
3. 設定した温度レベルで相対湿度を数段階に設定し、試験体を吸湿させる。各ステップでの暴露時間は10日間とし、平衡重量を測定する。
4. 吸湿過程を終了した試験体を、10℃、96%RHの高湿状態に10日間暴露し（10℃での測定では不要）、続いて脱湿過程でのEMCの測定に移る。脱湿ステップの刻みは吸湿の場合と同様。
5. 脱湿ステップ終了後、105℃で12時間乾燥し、サンプルの全乾重量を求める。この重量は初期の減圧乾燥による全乾重量のチェック用とする。
6. 各相対湿度でのEMCを算出し（小数点以下2桁まで）、吸着および脱着等温曲線を作成する。近似式の適用を検討する。

サンプルの入手に時間を要したため、EMCの測定開始は、平成8年2月上旬となった。全測定が終了するのは平成8年7月末である。したがって、データの解析結果は来年度の報告書で取りまとめる。

### 3.3.3 LEの測定

#### (1) 試作装置の概要と測定精度

LE測定装置の概観を写真3-1に示す。この装置は、試験体固定台と測定先端部を円錐状に加工したデジタルキャリパースからなる。試験体固定台は、下台と押さえ板から構成され、押さえ板により試験体の反り等を矯正するようになっている。また、押さえ板は、3本のバネ付きボルトにより、浮いており、試験体の出し入れが容易となるよう工夫してある。また、押さえ板には、基準間隔孔（中心間隔250.00mm）が設けてある。

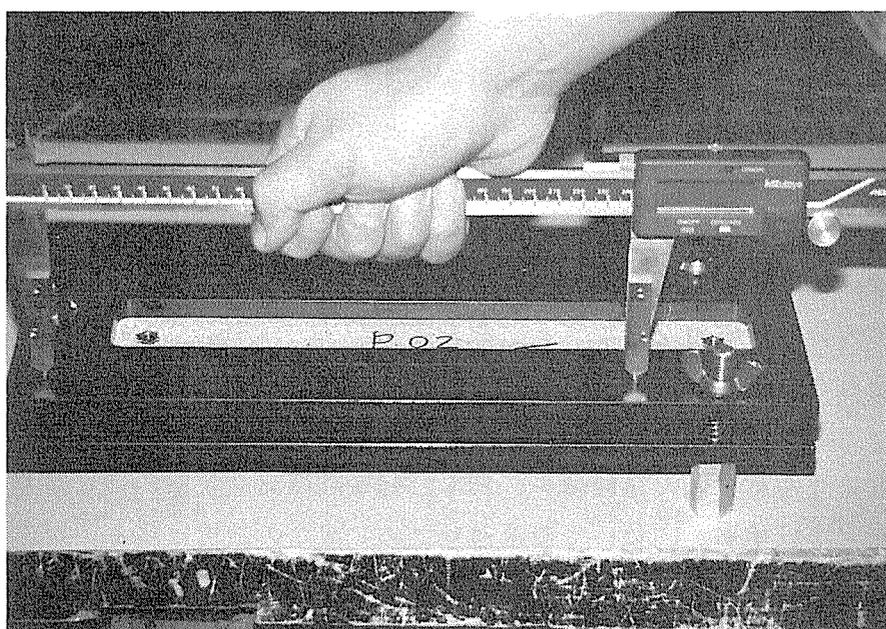


写真3-1 LE測定装置の概観

次に、この装置による長さ測定値の再現性を検討した。デジタルキャリパースの持ち方や、標点間隔孔または基準間隔孔へのキャリパース先端の当て方を種々検討した結果、以下のことが分かった。

- ①写真3-1のように、キャリパースの本尺部を持ち、上から軽く押し当てると、測定値の再現性がよい。
- ②基準間隔孔または標点間隔孔にキャリパース先端を押し当てるときは、キャリパースの間隔をそれらより若干（1mm以内）小さくして、キャリパースが開く方向に動きながら間隔孔にフィットさせると測定値の再現性がよい。

このように、長さ測定時に若干の注意を要するが、上記の方法で、2人の測定者がそれぞれ50回、測定を繰り返した結果、寸法測定の再現性は、表3-4のようになった。

表 3 - 4 試作装置による寸法測定値の再現性

	初期寸法との差異 (mm)				合計
	± 0.00	± 0.01	± 0.02	± 0.03	
測定者 A	3 5	1 4	0	1	5 0 回
測定者 B	3 4	1 4	2	0	5 0 回

測定回数の96-98%までが、±1/100mmの値が再現されおり、ほぼ満足できる再現性をもつ装置が試作できたと言える。ここで、LE測定に必要な読みとり精度について考えてみる。標点間隔を250mmに対して、1%、0.1%、0.01%の長さ変化量は、それぞれ2.5mm、0.25mm、0.025mmとなる。したがって、本装置では、0.01%刻みでのLEデータが測定できることになり、比較的小さな含水率変化（例えば、4～5%の変化）に対しても対応できると考えられる。

## (2) 供試パネルと試験体の調製

LE測定に供試したパネルは、EMC測定と共通の市販木質パネル9種類である（表3-3参照）。試験片の寸法は、長さ300mm×幅75mmとした。試験片の長さ方向は、パネルの抄造方向と一致させた。ただし、合板とOSBの試験体は、長さ方向が抄造方向および抄造直角方向の2種類とした。次項で述べる各種水分の付与条件（全5条件）につき各パネルとも5試験体ずつを用意した。なお、試験体の分配に際しては、5試験片の平均比重が条件間でほぼ等しくなるよう留意した。

各試験体の気乾比重を測定した後、幅の中央部に、間隔を250mmとする標点を設けた。標点はスチール製の鬼目ナット（外径9mm（突起部を含む外径は12mm）、内径5mm、長さ13mm、メッキ処理済み）を用い、予め試験体にドリルで先孔（径10mm）をあけてから、プラスチックハンマーで打ち込んだ。

## (3) 吸湿条件、水分の各種付与方法および測定手順

### ① 標点間隔の初期値と全乾重量：

上記のように準備した試験体を、40℃に設定した乾燥器内でほぼ恒量となるまで予備乾燥し、続いて真空乾燥器（40℃、乾燥剤として五酸化リンを用いる）を用いて全乾にした。この操作は、急速な乾燥によるパネルの収縮がLEに及ぼす影響を極力排除しようとする目的で行った。全乾状態の試験体の標点間隔を測定し、これを初期値とした。また、試験体の全乾重量を測定し、後述する吸湿時の含水率および吸水率を算出

する際に用いた。なお、この全乾重量は、試験体の先孔による重量損失とナットによる重量増加が含まれるが、差し引きの重量増加は5 g程度であり、これは試験体重量の3%以下の値となる。したがって、以後、算出される含水率や吸水率にはその値の3%以下の誤差が含まれるが、ほとんど問題はないと言える。

#### ②吸湿条件：

試験体の吸湿は、温度20℃で、相対湿度を33%、66%、95%の3ステップに変化させて行った。調湿には飽和塩水溶液（MgCl<sub>2</sub>, NaNO<sub>2</sub>, KNO<sub>3</sub>）の入ったデシケータを用いた。また、95%RHまで吸湿させた後、20℃の水中で、最長96時間浸せきした後、LEを測定した。

#### ③水分の各種付与方法：

- ・常温常圧吸水：20℃の水中で、最長192時間浸せきし、経過時間とLEの関係を求めた。
- ・常温減圧吸水：76cmHgに達した時点から、30分および2時間の減圧吸水処理を行い、さらに最長96時間、20℃の水中に浸せきし、経過時間とLEの関係を求めた。
- ・温水常圧吸水：70℃の温水に最長24時間浸せきし、経過時間とLEの関係を求めた。
- ・煮沸吸水：沸騰水中に最長4時間浸せきし、経過時間とLEの関係を求めた。

#### ④LEの算出

上記の②および③の処理の各時点で、標点間隔および試験体重量を測定し、LEと含水率または吸水率を算出する。また、一連の処理が終了した試験体について、105℃で全乾した時の標点間隔を測定し、この値に基づくLEを算出して、標点間隔の初期値に基づくLEとの比較を行った。

ただし、本年度は測定装置の試作にかなりの時間を要し、LEの測定データの収集は平成8年2月の開始となった。したがって、データの収集および解析は来年度の報告書で取りまとめる。

### 3.4 おわりに

木質パネルの面内寸法安定性について、調査・研究の必要性、本研究で設定した3つの目的、およびそれらの実験方法を中心に述べてきた。また、我が国では、LEの測定方法や測定器具の基準が設定されていないため、本年度はLE測定方法や器具の開発に重点を置いた。試作されたLE測定器具は満足のいく測定精度を持つことが分かった。来年度は、現在進行中のEMCおよびLEデータを取りまとめ、木質パネルのLE測定方法・評価方法の確立に向けて検討を進める予定である。

## 文 献

- 1) 関野 登、井上雅文：木材工業、51(5)、印刷中、(1996).
- 2) 須藤哲也、他 3 名：木材工業、51(2)、64-68 (1996).
- 3) 信田 聡：木材学会誌、37、981-985 (1991).
- 4) Kollmann, F.: "Holzspanwerkstoffe", Springer-Verlag, 1966, p546.
- 5) Sekino, N. and Irle, A. M.: Mokuzai Gakkaishi, 42, 43-50 (1996).
- 6) 関野 登：岩手大学農学部演習林報告、21, 85-112 (1990).

## 第4章 高断熱性低密度ファイバーボードの開発

京都大学木質科学研究所

川井秀一

### 1. ボードの低密度化はどこまで可能か？

#### 1.1 ボードの低密度化の限界について

ファイバーボードの低密度化はどの程度まで可能であろうか？湿式抄造法で製造されたこれまでのインシュレーションボード（IFB）は、 $0.25\sim 0.30\text{g/cm}^3$ である。図4-1は、木質ファイバーを含む各種の繊維と建築材料の密度を示したものであるが、木質ファイバーは各種繊維のなかでも最も密度が小さい原料ではあるが、その製品においては、IFBをポリウレタンフォームやポリスチレンフォームなどのプラスチック発泡体やガラスウールと比べるとわかるように、未だ十分低い密度に達しているとは言い難い。

パーティクルボードにおける低密度化の可能性も、著者らのこれまでの検討によれば<sup>4) - 8)</sup>、むしろファイバーボードより難しく、 $0.3\text{g/cm}^3$ 程度の密度が限界である。このときの結果によると、マットの見かけ密度がパーティクルボードの低密度化に大きく影響を及ぼすばかりでなく、その材質を決める重要な因子であることが明らかにされている。さらに、この見かけ密度は、繊維の密度や形状・形態など原料状態に依存する値であることも明らかにされている。ちなみに、各種繊維の形状・形態および力学的性質を表4-1に示す。<sup>9)</sup>したがって、ファイバーボードの低密度化の場合も、当然これらの因子の影響が大きいことが予測される。すなわち、原料ファイバーの密度が低く、長くて屈曲性に富み、嵩持ちの良いファイバーがボードの低密度化には望ましいと推定される。

ボードの低密度化には、パネルの厚さ方向の構造的な工夫も大変有効である。中密度ファイバーボード（MDF）の製造では、材質を制御する方法の1つとしてマットの厚さ方向の密度に傾斜構造を持たせることが重要な技術になりつつある。単板や合板のオーバーレイによるサンドイッチ構造によって、パネルの剛性や強度を高め、軽量・高剛性・高強度をもつ構造用複合パネルの製造が可能になると考えられる。ハネカム構造などの3次元立体構造もまた、パネル全体の低密度化に有効であろう。

いずれにしても、このような低密度ファイバーボードの製造では、ファイバー・その他の原料相互のコンタクトが低いために、接触面積が小さくなることが予想され、このため十分な接着結合力を得ることが難しい。したがって、接着剤は低密着状態の原料下でも大きな結合力を発揮する発泡型の接着剤が望ましい。イソシアネート系樹脂接着剤は反応性が高く、水との反応で炭酸ガスを放出して発泡するので、これまでも低密度パーティクルボードの製造に応用されている。<sup>4) - 8)</sup> さらに、

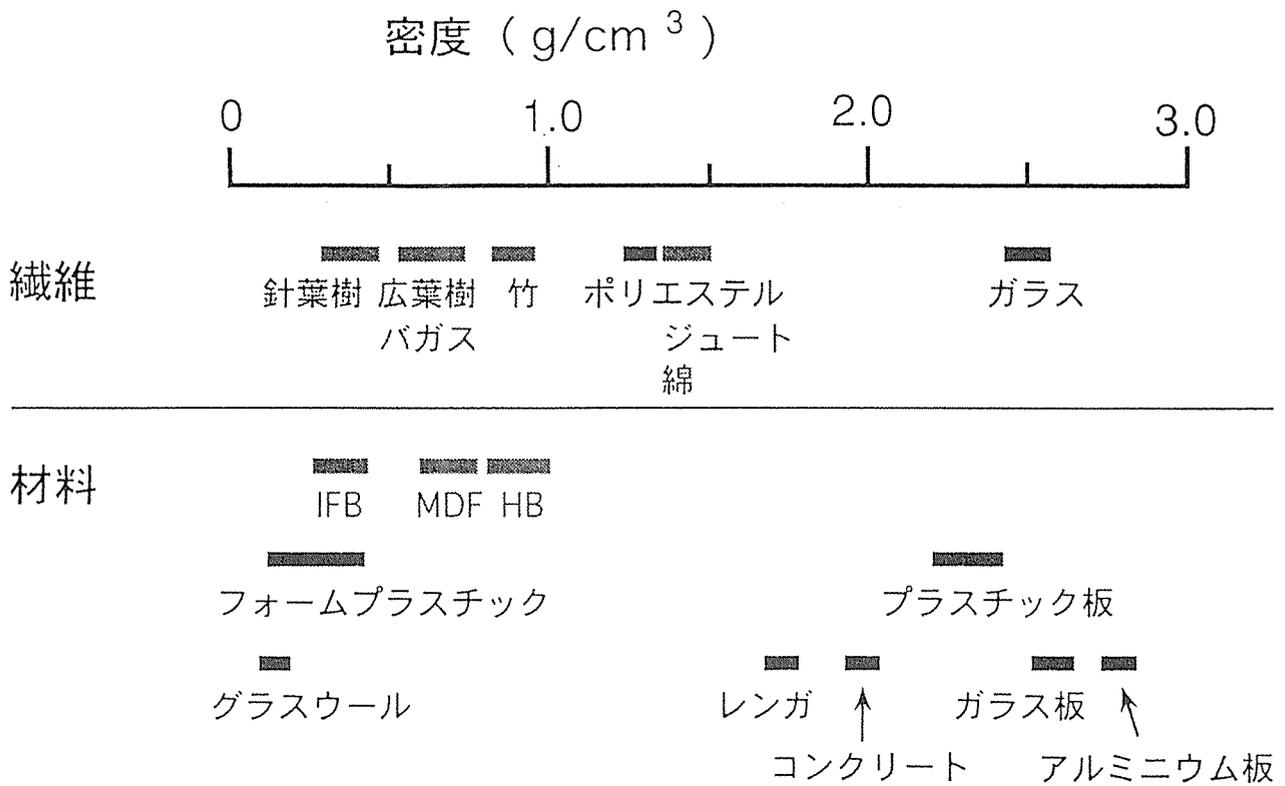


図4-1 各種繊維と建築材料の密度

表4-1 各種繊維の形状・形態および力学的性質

(括弧内の数値：標準偏差)

種類	比重	長さ mm	直径 mm	長径比 (長さ/直径)	ヤング率 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	破壊伸度 (伸び率)%
竹	0.80	29.96 (12.49)	0.13 (0.05)	272.01 (164.64)	196.37 (109.85)	5657.86 (109.85)	2.86 (0.92)
ジュート	1.45	39.45 (8.16)	0.05 (0.01)	1141.28 (533.72)	331.46 (177.09)	8827.04 (3814.64)	1.72 (0.50)
ポリエステル	1.38	67.05 (2.60)	0.03 (0.00)	2187.38 (146.61)	83.53 (49.12)	9456.50 (1343.73)	22.95 (6.15)
ガラス (束)	2.50	48.07 (0.68)	0.05 (0.01)	1102.83 (254.49)	>800	>25000	<4.00
*綿	1.50	20.00— 35.00	0.02— 0.05	700.00— 1000.00		2160.00	7.9
**木 南洋材 (sw)	0.60	2.25— 4.13	0.03— 0.05	60.00— 100.00	80.00— 140.00	1000.00— 1800.00	

\* データは繊維学会編「繊維物理学」より

\*\* データは日本材料学会木質材料部門委員会編「木材工学辞典」より

重炭酸ナトリウムなど、一定温度のもとで炭酸ガスを放出する添加剤を加えることによって、フェノール樹脂やユリア樹脂接着剤でも発泡性を有するものが最近開発されている。また、耐水性を問題にしなければ、でんぷん系接着剤もタッキネスが大きく、水蒸気を与えると膨張して低密着状態にある原料を接着することが可能である。

### 1.2 どのような用途があるか？

ハードボード（HB）、MDFおよびIFBなど、密度の異なるファイバーボードでは、それぞれ異なる用途開発がされている。低密度ファイバーボードは、IFBのカテゴリーに属するので、これと同様な用途が考えられる。すなわち、断熱・吸音材料としてより優れた性能を発揮することが期待されるほか、縦圧縮ヤング率が大きければ、豊材料としても使用することができる。そのほか、廃棄安全性やリサイクル性など地球環境保全や公害問題などによって、使用が制限されつつあるプラスチック系の梱包材の代替する材料としても期待される。

MDFは、現在最も注目されている木質材料であるが、自動車部材の成形材料として、家具材や造作材の化粧下地材料として、用途が広がりつつある。低密度ファイバーボードでは、性能を整えば、これらの用途に用いられる可能性があることはもちろん、厚物複合パネルのコア材に用いれば、軽量・高断熱・高強度パネルとして壁・床・屋根材などの構造用途に使用することができる。

### 1.3 どのような製造技術が必要か？

低密度ファイバーボードのような断熱性の高い材料を製造するには、効率の良い熱圧技術の開発が重要である。とくに、厚物が要求される場合には、従来のホットプレスでは、極めて効率が悪く、熱圧に長時間を要するので、これに替わる技術開発が必要になってくる。目下のところ、高周波加熱やマイクロ加熱など、電磁波加熱技術や高圧水蒸気を利用した蒸気噴射プレスなどが考えられる。とくに、後者の蒸気噴射プレスは、イソシアネート接着剤を用いる場合には、接着剤の発泡を促すので有利である。

強度・剛性ならびに寸法安定性を付与するための技術開発も重要である。このためには、性能や特性の異なる各種繊維を要求に応じて混合し、混抄する技術が重要である。このほか、面内寸法安定性や剛性を改善するのに効果的な技術として繊維の配向技術が考えられる。木質ファイバーを、機械的方法で配向させることは極めて困難であり、これまでは主として電気的な特性を応用した方法が研究されている。<sup>10) 11)</sup>しかし、木質ファイバーは、解繊の過程で損傷を受けて屈曲しているために、十分な配向効果を得るのはかなり難しい。ランドフォーマーのように気流に乗せて繊維を運び、配向させながらシート状にフォーミングし、これを積層するような新たな技術開発が望まれる。

そのほか、深絞りの可能なモールド成形技術も、部材生産のための応用技術と

して重要である。

以上のように、低密度ファイバーボードを製造には、基本的な生産技術のほか、周辺技術や応用技術の開発と用途開発とを組み合わせながら展開することが必要であり、多くの検討すべき課題が山積している。

本研究では、蒸気噴射プレス法を適用し<sup>12) 13)</sup>、各種発泡系接着剤や形態の異なる木質ファイバーを用いて、ファイバーボードの低密度化の可能性を追及すると共に、その基礎的な材質を明らかにすることを目指した。さらに、厚さの異なる単板をオーバーレイして、軽量構造用複合パネルを試作し、その材質上の長を明らかにすることを目指した。すなわち、最終的には、蒸気噴射式連続プレスを適用して厚さ100mmの高断熱・高剛性パネルの製造を目標にしているためである。<sup>14) 15)</sup>

## 2. 発泡性フェノール樹脂接着剤を用いた低密度ファイバーボード

### 2.1 はじめに

最近、フェノール樹脂やユリア樹脂においても、重炭酸ナトリウムの添加などにより発泡性を有する樹脂（接着剤）が開発されている。とくに、前者の場合、耐水性や耐久性が期待できるほか、製造された発泡体は独立気泡を形成して比較的硬いので、構造用複合パネルのコア材料にも用いられている。

発泡性フェノール樹脂を接着剤に用い、密度0.05～0.35g/cm<sup>3</sup>のファイバーボードを蒸気噴射プレス法によって製造し、その材質を検討した。

### 2.2 実験

#### 2.2.1 接着剤の最適熱圧条件の検討

用いた接着剤は群栄化学工業（株）製発泡性フェノール樹脂PGA-4404である。この接着剤は加熱によって熔融し、28倍に発泡して硬化する。仕様によると、接着剤は加熱温度70～80℃で一旦熔融し、約100℃で発泡を開始、110℃で硬化を開始するが、実用的には130～150℃で硬化する。

予備的に、接着剤の最適熱圧条件を検討するために、75.6gの接着剤を300×300×3mmのマットに形成したのち、各種条件下の熱盤プレスおよび蒸気噴射プレスをを用いて加熱、発泡硬化させた。なお、蒸気プレスでの加熱の場合、ディスタンスバーを兼ねた厚さ12mmのアルミ板枠をシール材に用いて、プレス内の蒸気圧力を保持した。

#### 2.2.2 ファイバーボードの製造

供試原料はPDDRで解繊された針葉樹ファイバーである。気乾ファイバーをサンプルカードで十分にほぐしたのち、所定量を高速攪拌器付ブレンダーに入れ、粉末状発泡性フェノール樹脂接着剤を添加、均一に攪拌混合した。接着剤を混合したファイバーを手撒き散布し、マットを形成した。なお、接着剤の添加量は、5%、10%、

15%および20%の4水準とした。

熱圧には、蒸気噴射プレスを使用した。2.2.1の結果をもとに、熱圧条件を次のように定めた。すなわち、1) 所定厚さに到達後、蒸気噴射(5sec, 3.5kgf/cm<sup>2</sup>)、2) 内部蒸気を解放しながらホットプレス(85sec)、3) 蒸気噴射(30sec, 6kgf/cm<sup>2</sup>)、4) 内部蒸気の解放、ホットプレス(30sec)後解圧。したがって、総熱圧時間は2.5分である。熱圧には厚さ10mmのアルミ板枠をシール材に用いて、プレス内の蒸気圧力を保持した。ボード寸法は300mm×300mm×10mm、また目標密度は0.30、0.20、および0.10kgf/cm<sup>3</sup>である。

### 2.2.3 材質試験

熱圧成形されたファイバーボードを調湿したのち、JIS A 5906に準じて、常態および湿潤B曲げ試験、はく離強度試験を行った。なお、厚さ膨張試験については、試片を一旦全乾状態にしたのち、24時間吸水試験を行い、続いて乾燥→煮沸→乾燥の繰返し促進劣化試験を行ない、厚さ変化を調べた。

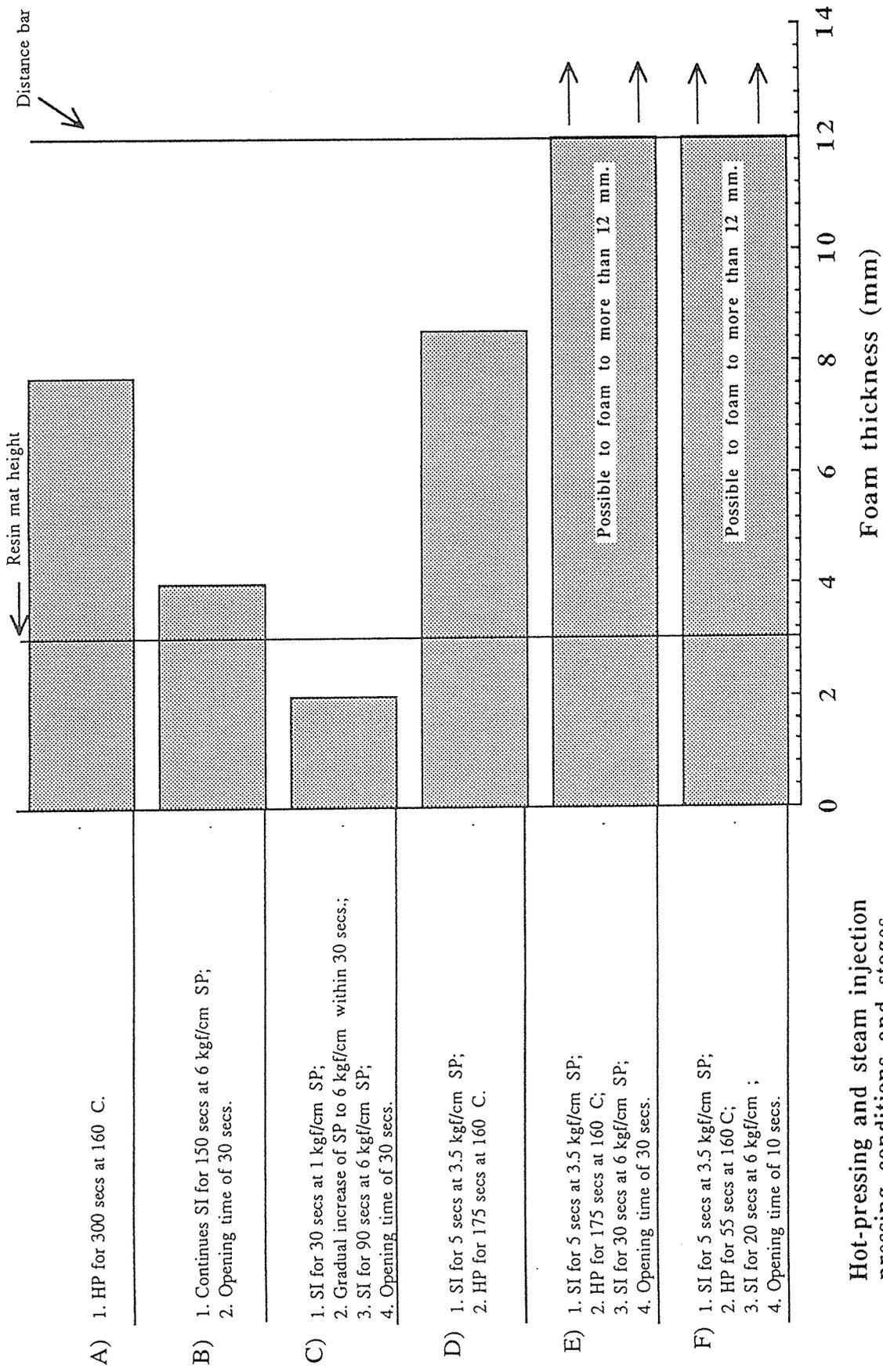
## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 接着剤の最適熱圧条件

上述したように、この接着剤は加熱温度70~80℃で一旦熔融し、110~120℃で発泡を開始、160℃で硬化する。したがって、接着剤に十分な発泡を促すには、熔融・発泡・硬化のプロセスに適合する加熱温度と時間を設定することが必要である。

各種条件下の熱盤プレスおよび蒸気噴射プレスを用いて加熱、発泡硬化させた硬化物の発泡度(厚さ)を図4-2に示す。ホットプレスを適用した場合(図中、加熱条件A)には、熱盤に接している部分のみが発泡し、均一な発泡成形体が得られなかった。接着剤をファイバーマット全体に均一に発泡硬化させるには、マット内部を全体にわたって均一に加熱することが必要である。とくに、100mm前後の厚物ボードの成形を目指している場合には、蒸気噴射プレスの適用が不可欠であると思われる。

図4-2より、蒸気プレスを適用した場合、硬化物の発泡度は、条件により大きく異なることがわかる。すなわち、加熱初期の温度が高い場合(図中、加熱条件B)には、発泡と同時に硬化も進行するために、硬化物は十分に発泡しない。これに対して、初期加熱温度が低い場合(図中、加熱条件C)には、熔融のみが起こり、その後の昇温で硬化するために、元のマットの高さよりかえって低いものになっている。フェノールの硬化は縮合反応であるために、飽和蒸気や凝縮水の存在は反応を遅らせることが明らかにされている。加熱条件D-Fでは、初期温度を均一に発泡温度にまで昇温させたのち、蒸気を排出し、熱盤による加熱をしたものである。加熱条件DおよびEでは、加熱の最終段階において再び高压蒸気を導入して、樹脂の硬化を促進する条件を導入している。期待通り、加熱条件D-Fでは、硬化物の発泡度は高く、とくに、加熱条件EおよびFでの発泡性が優れ、硬化物の厚さは元の



Hot-pressing and steam injection  
pressing conditions and stages.

図4-2 各種条件下におけるフェノール樹脂硬化物の発泡度

Legend: SP - Steam pressure  
HP - Hot-press  
SI - Steam injection

マット厚さの4倍以上に達している。

したがって、熱圧条件については、加熱条件EあるいはFのようなプロセスを経るのが合理的であると推定される。さらに、熱圧時間については未だ十分明らかではないが、1~2分程度まで短縮が可能なようである。

### 2.3.2 ファイバーボードの力学的性質

ファイバーボードの常態曲げヤング率および曲げ強度を図4-3および図4-4にそれぞれ示す。また、湿潤曲げ試験の結果を図4-5および図4-6に示した。さらに、はく離強度の結果を図4-7に示す。

力学的性能はいずれもボード密度の依存性が大きく、密度の低下とともに強度は低下するが、従来のファイバーボードに比べると、低密度にもかかわらず曲げ強度が大きく、とくに曲げヤング率が高いことが注目される。当然ながら、同一密度のボードでは、接着剤の添加率が高いもののほうが、高い力学的性能を示し、とくにはく離強度については、この傾向が顕著に認められる。

なお、湿潤強度は、常態に比べると、大変低いものとなっている。これが、高圧蒸気処理による影響であるのか、それとも低密度ファイバーボード固有の特性であるのか、現在のところ明らかではないが、今後の検討課題である。

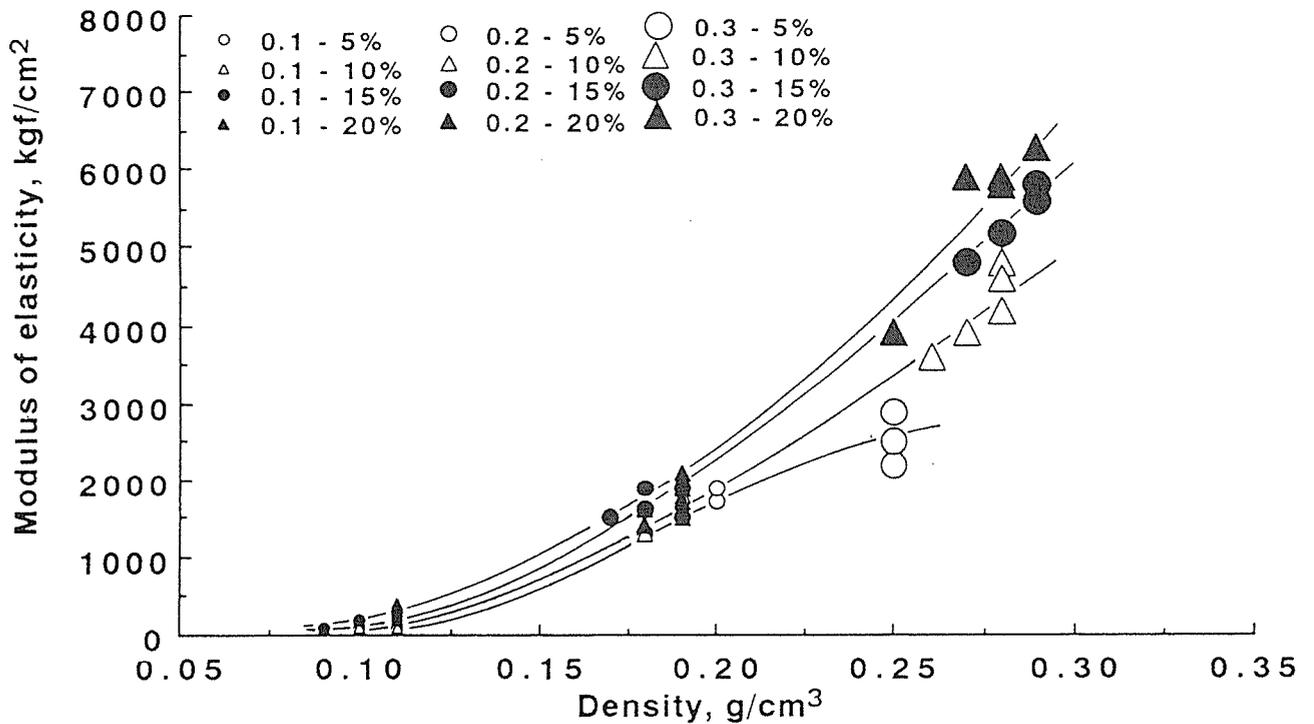


図4-3 ファイバーボードの常態曲げヤング率

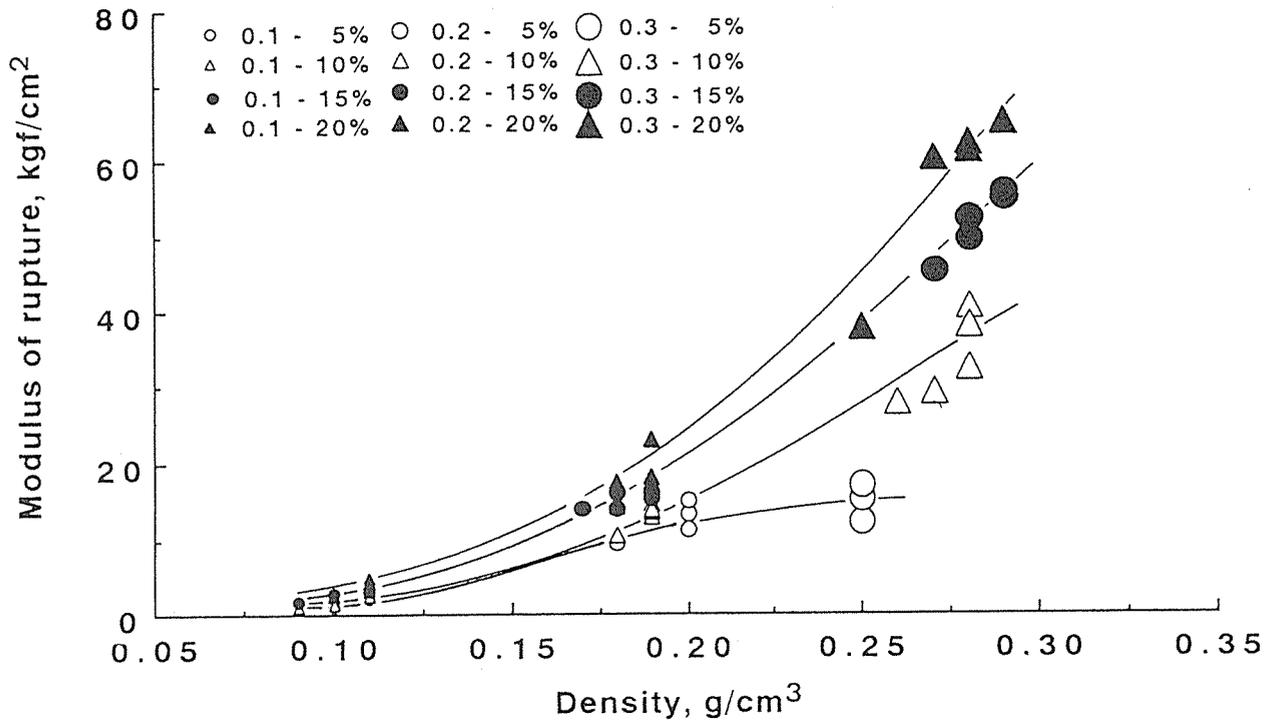


図4-4 ファイバーボードの常態曲げ強度

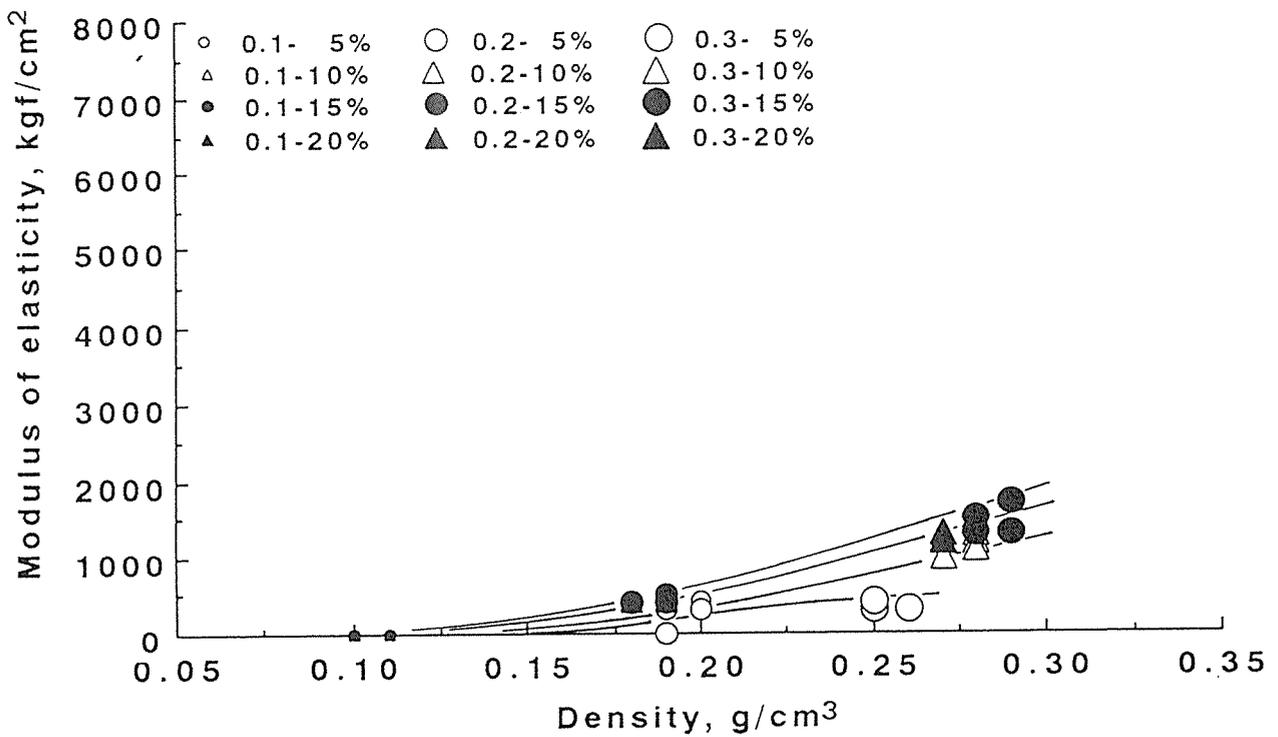


図4-5 ファイバーボードの湿潤曲げヤング率

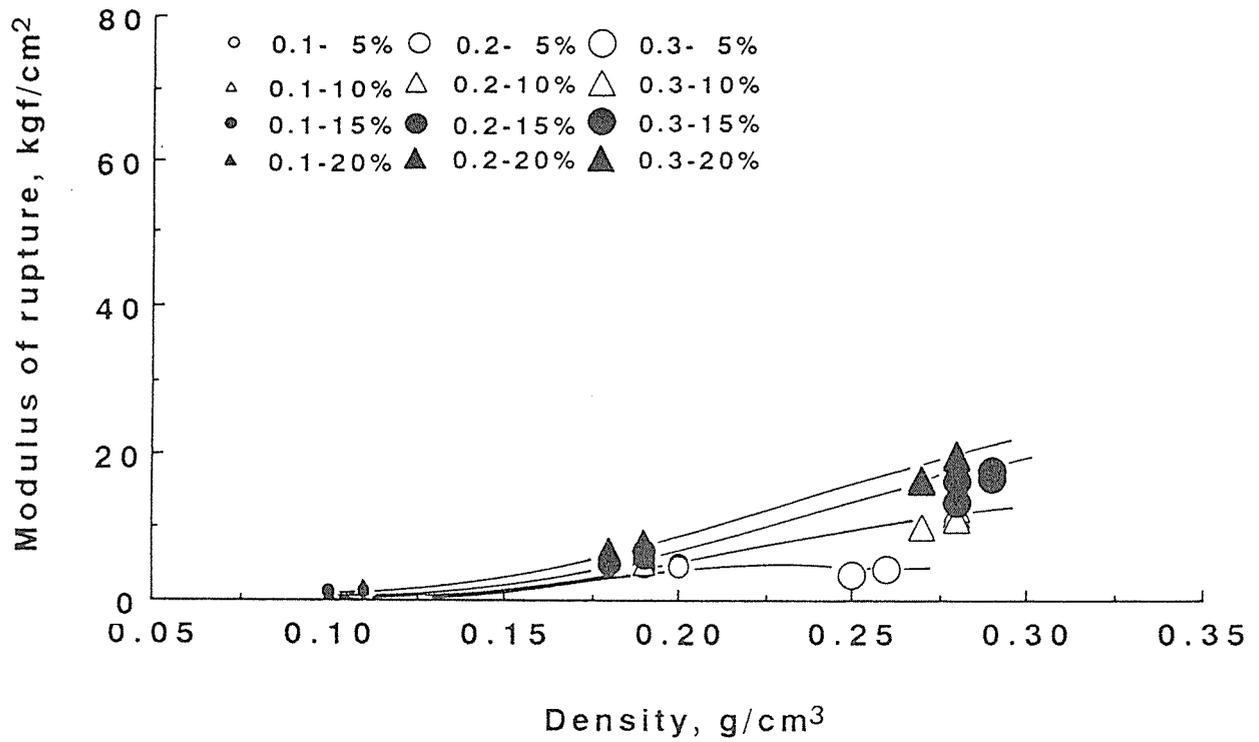


図4-6 ファイバーボードの湿潤曲げ強度

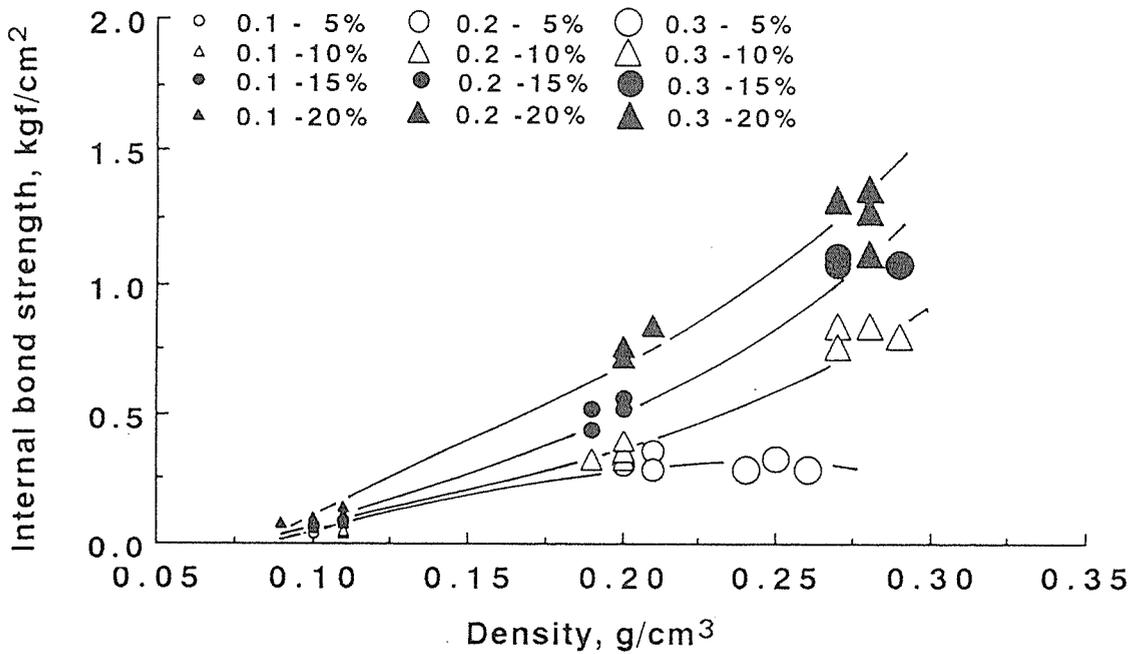


図4-7 ファイバーボードのはく離強度

### 2.3.3 ファイバーボードの寸法安定性

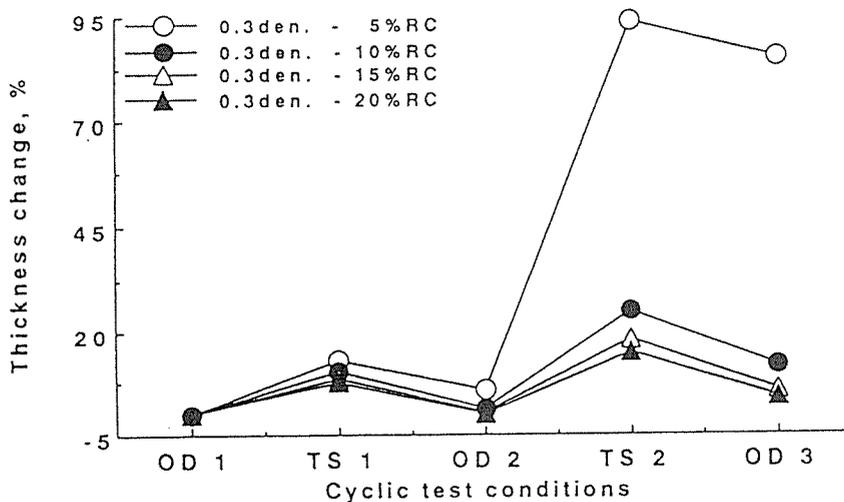
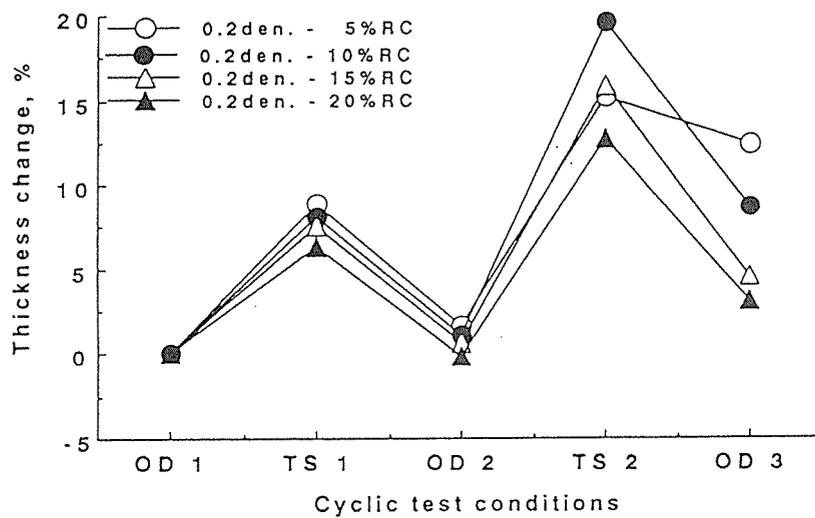
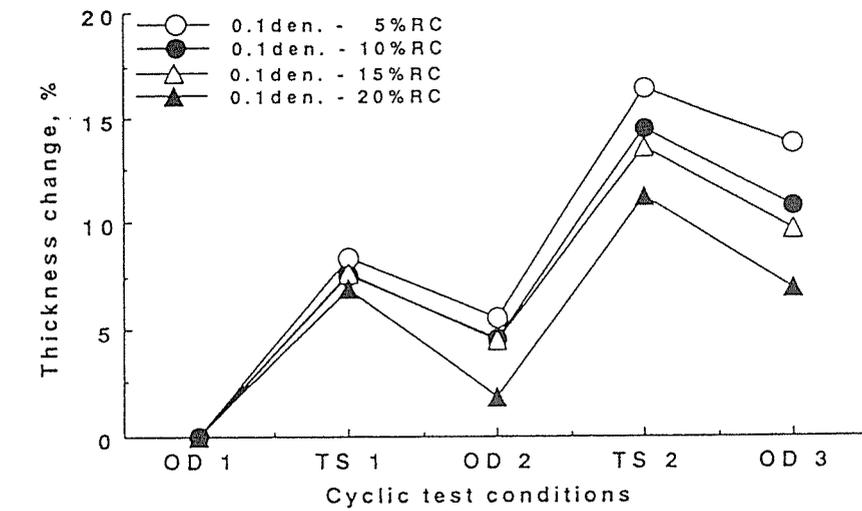
湿潤→乾燥繰返し促進劣化処理における厚さ変化を図4-8に示す。全乾状態からの24時間吸水時における厚さ膨張率はいずれも10%以下であり、全般に良好な値を示している。厚さ膨張率は、接着剤の増加と共に、小さくなる傾向が見られ、密度については密度0.20g/cm<sup>3</sup>の場合に極小値が得られた。密度の増加がもたらす接着力の増加が吸水時の厚さ膨張の抑制効果を与えると同時に、圧縮率の増加による吸水時内部応力の増大、厚さ膨張率の促進効果が相殺作用した結果と考えられる。

また、図より密度0.20g/cm<sup>3</sup>のボードにおける、煮沸→乾燥後のスプリングバックは、接着剤添加率が15%以上の場合には5%以下に留まっており、接着剤添加率が10%以下の場合においても、10%前後に過ぎないことがわかる。

図4-9は、煮沸時の線膨張率を示している。ボード密度が大きく(0.30g/cm<sup>3</sup>)、接着剤の添加率が小さい(5%)場合を除いて、いずれのボードの線膨張率も0.4%以下であり、通常のMDFと同等以上の値を示した。とくに、添加率が15%-20%のボードの線膨張率は0.2-0.3%であり、高い面内寸法安定性を示している。

## 2.4 結論

発泡性フェノール樹脂接着剤と蒸気噴射プレスを組み合わせることによって、密度0.10-0.30程度の低密度ファイバーボードを効率良く製造できることが明らかとなった。



OD : 3 days oven drying at 60 C  
 TS1: 24 h water immersion at 25 C  
 TS2 : 2 h boiling followed by 1 h water immersion.

図4-8 湿潤→乾燥繰返し促進劣化処理における厚さ変化

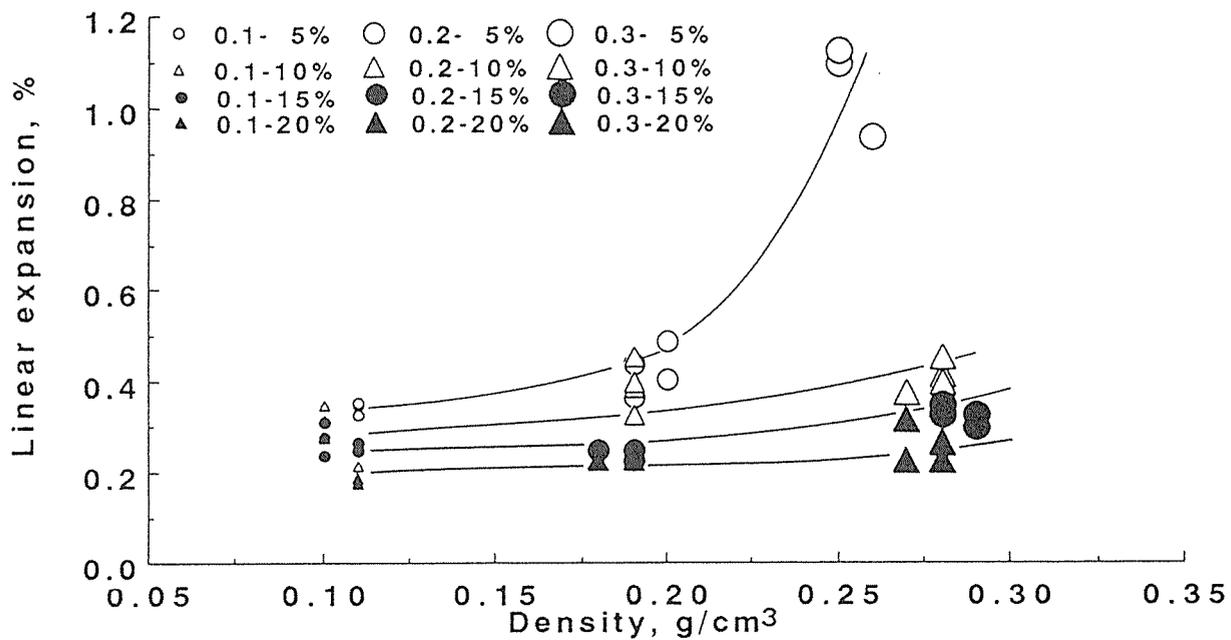


図4-9 煮沸条件下の線膨張率

### 3. イソシアネート樹脂接着剤／発泡剤を用いた低密度ファイバーボード

#### 3.1 はじめに

イソシアネート樹脂系接着剤は水との反応で炭酸ガスを放出して発泡するため、嵩持ち効果により低比重のボードの製造に適していると考えられる。特に、蒸気噴射プレスを応用すれば、高圧水蒸気によって発泡が促されるほか、厚物のボード製造にも有利である。これまでに低密度パーティクルボードの製造に応用されている。<sup>4)~8)</sup>

本研究では、構造用複合パネルのコア材の開発を目標として、蒸気噴射プレスを用いて、イソシアネート樹脂系の接着剤および発泡剤を用いた場合の密度0.05~0.4g/cm<sup>3</sup>程度の低密度ファイバーボードを製造し、その材質を明らかにした。

#### 3.2 実験

##### 3.2.1 ファイバーボードの製造

供試試料はPDDRで解繊されたラジアータパイン (*Pinus radiata* D.Don) のファイバーである。試料を予めサンプルカードで十分ほぐしたのち、気流循環式パイプ型ブレンダーにより結合剤を噴霧添加した。<sup>16)</sup> 用いた結合剤は、イソシアネート樹脂系の接着剤 (群栄化学工業(株)製UL-4811、以下 IC-B) およびイソシアネート樹脂系発泡剤 (日本ポリウレタン (株) 製HBN-003、以下 IC-F) の2種類であり、添加率を10%および30%の2水準とした。

ファイバーマットフォーマーを用いて、所定量のファイバーを散布してマットを形成し<sup>16)</sup>、蒸気噴射プレス (蒸気圧力6kgf/cm<sup>2</sup>、160℃) により目標密度0.05~0.4g/cm<sup>3</sup>程度のボードを熱圧成型した。ボード寸法は360×370×12mmとし、ディスタンス・バーを兼ねた厚さ12mmのアルミ板枠を蒸気のシール材とした。プレス条件は、IC-Fの30%の場合のみ蒸気噴射時間5分 (総熱圧時間5.5分) とし、その他の条件では蒸気噴射時間2.5分 (総熱圧時間3分) とした。前者の場合には、接着剤の添加量が多いので、発泡時間を十分に取るために蒸気噴射時間を長くしている。

##### 3.2.2 材質試験

成型したファイバーボードを調湿したのち、JIS A5905に準じて、曲げ強さ試験、はく離強さ試験を行った。また、厚さ膨張試験については、気乾状態から24時間吸水を行い、続いて乾燥→24時間、70℃温水吸水→乾燥→気乾の繰り返し促進劣化試験を行い、厚さ変化を調べた。

#### 3.3 結果と考察

##### 3.3.1 ファイバーボードの力学的性質

ファイバーボードの常態曲げヤング率および曲げ強度を、図4-10および図4-11にそれぞれ示した。さらにははく離強度の結果を図4-12に示した。

力学的性質はいずれもボード密度の依存性が大きく、密度の低下と共に低下する

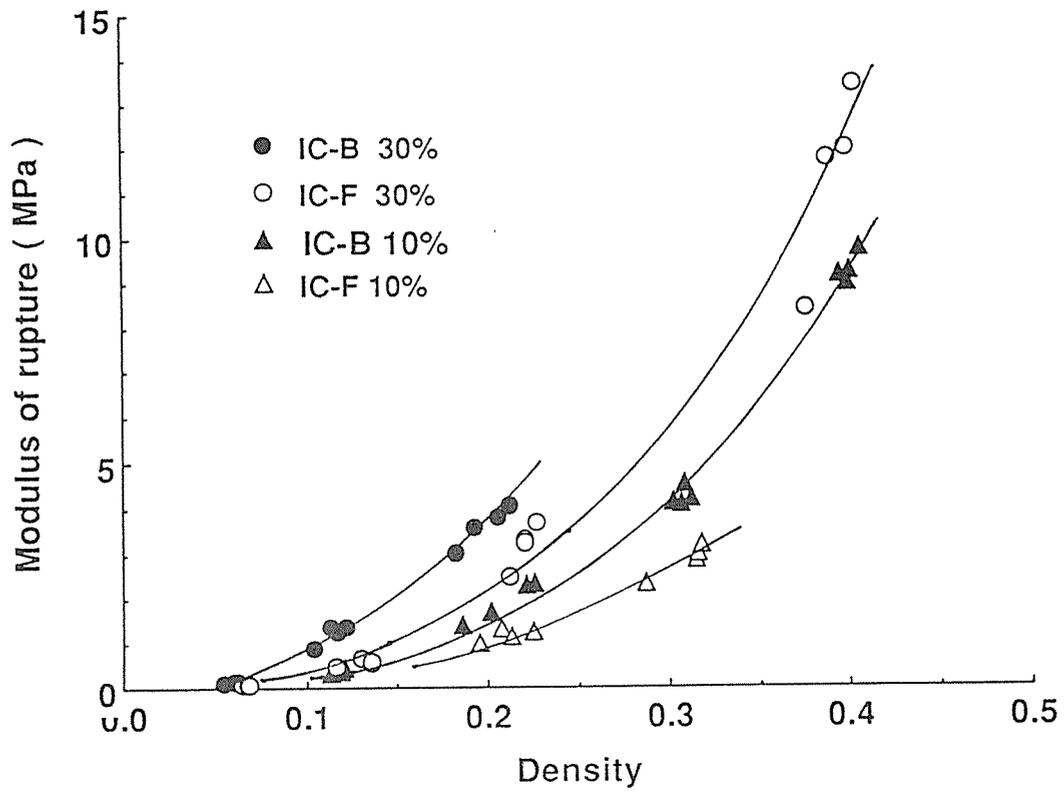


図4-10 ファイバーボードの常態曲げヤング率

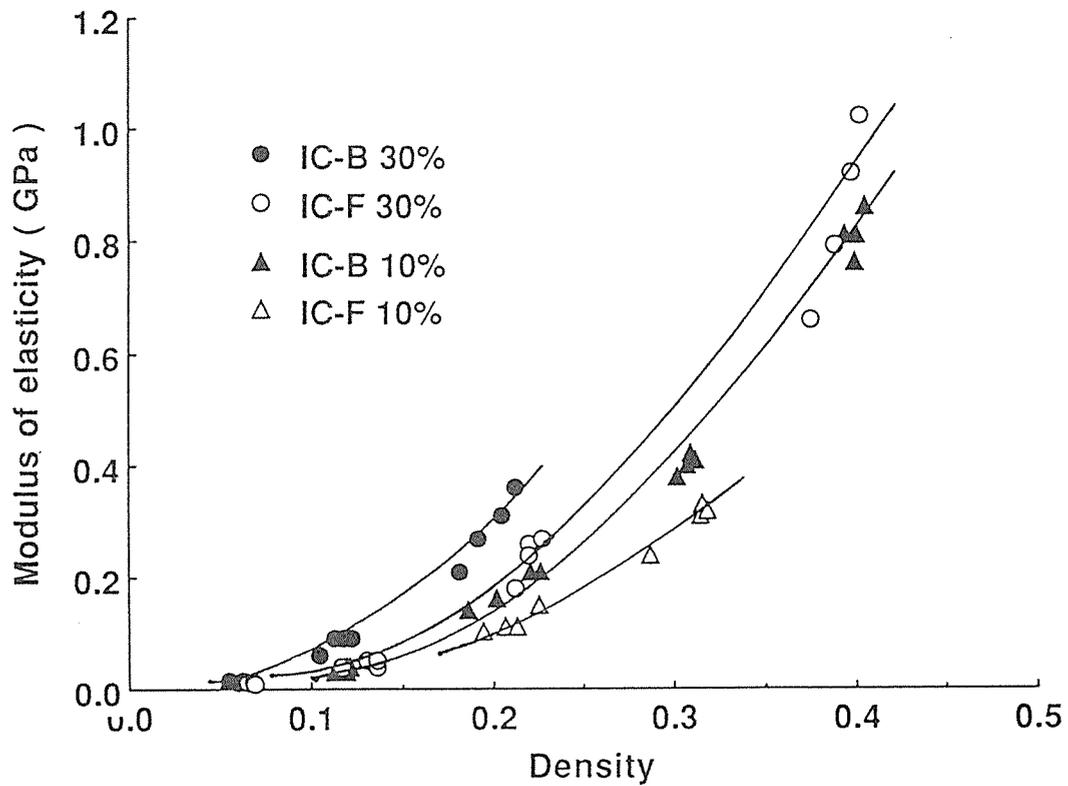


図4-11 ファイバーボードの常態曲げ強度

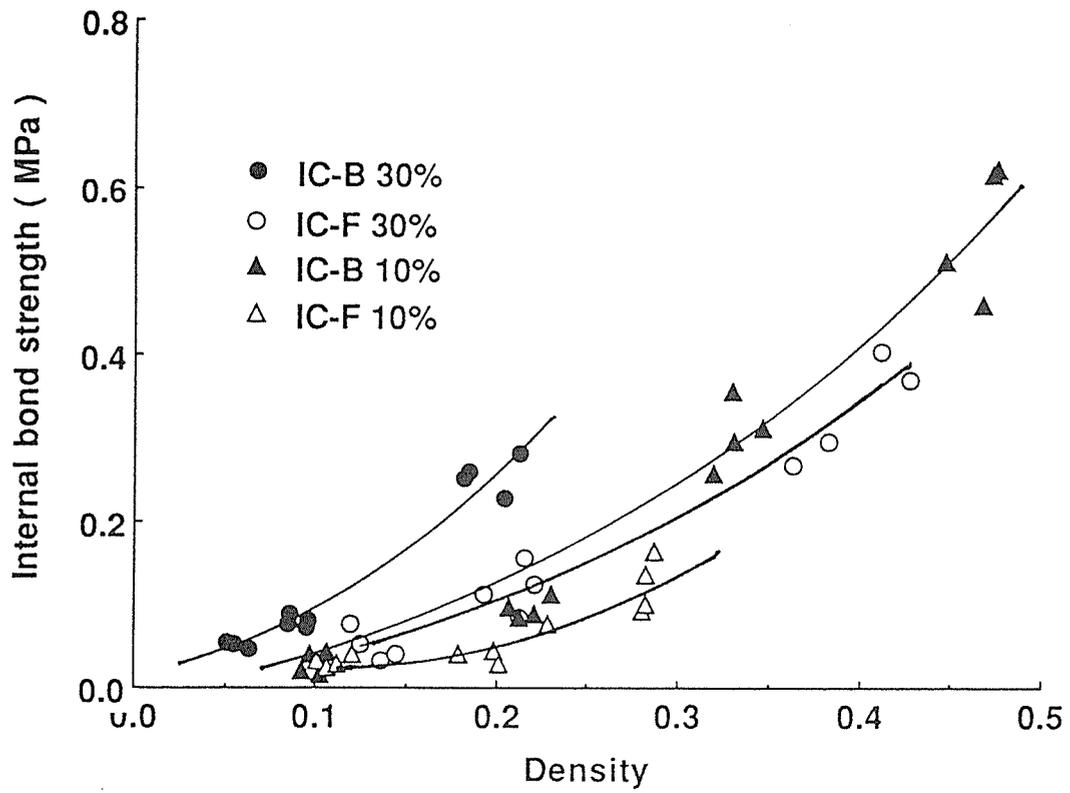


図4-12 ファイバーボードのはく離強度

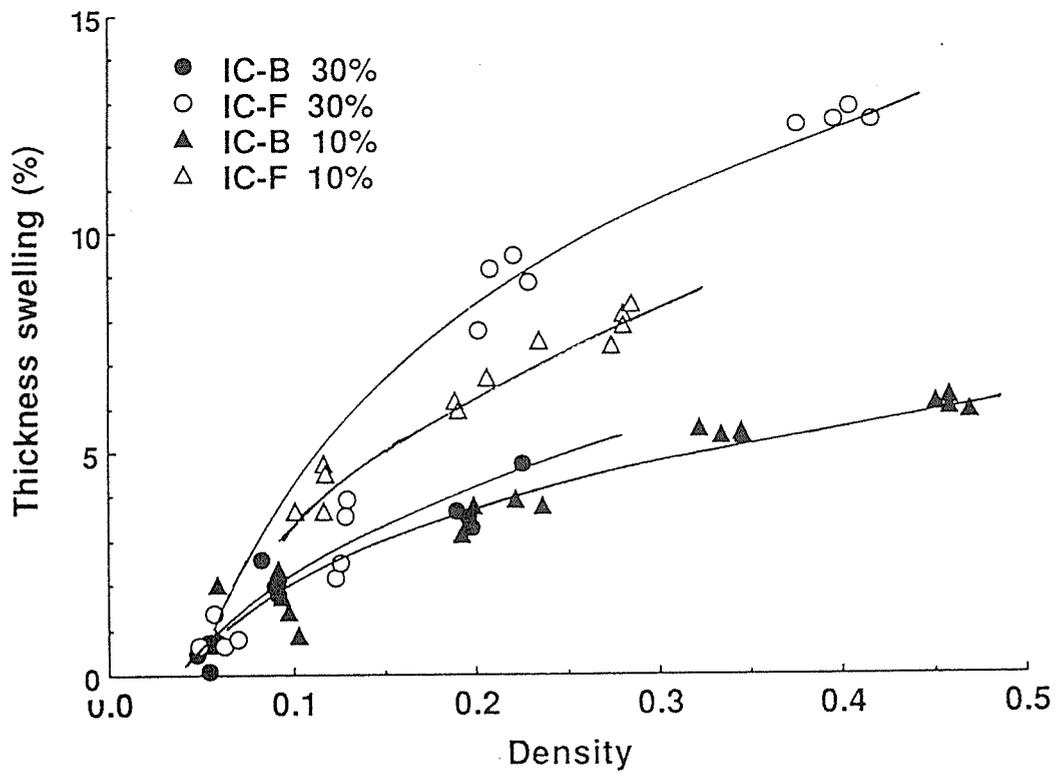


図4-13 24時間吸水厚さ膨張率

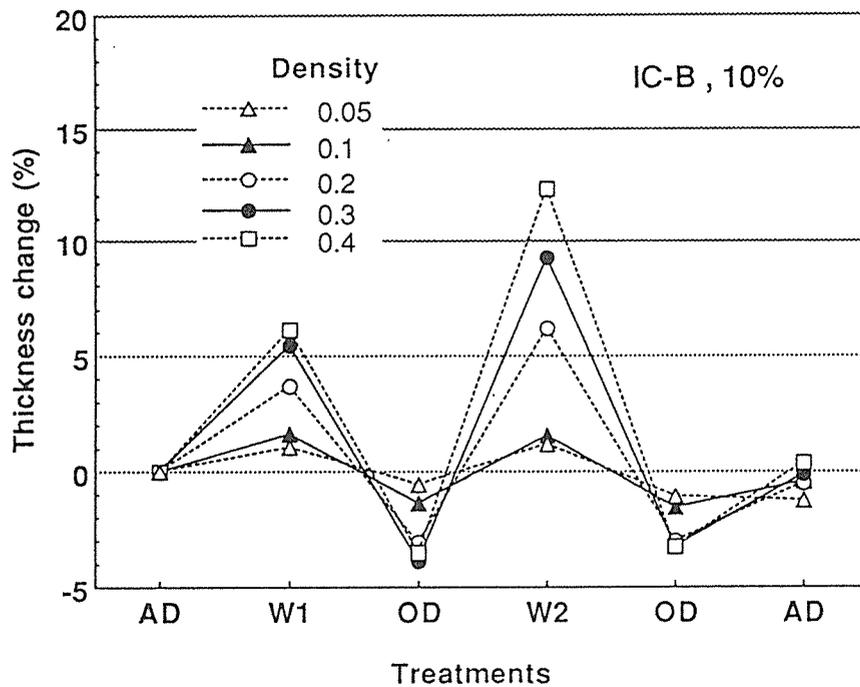


図4-14 湿潤一乾燥繰返し促進劣化処理における厚さ変化 (IC-B, 10%)

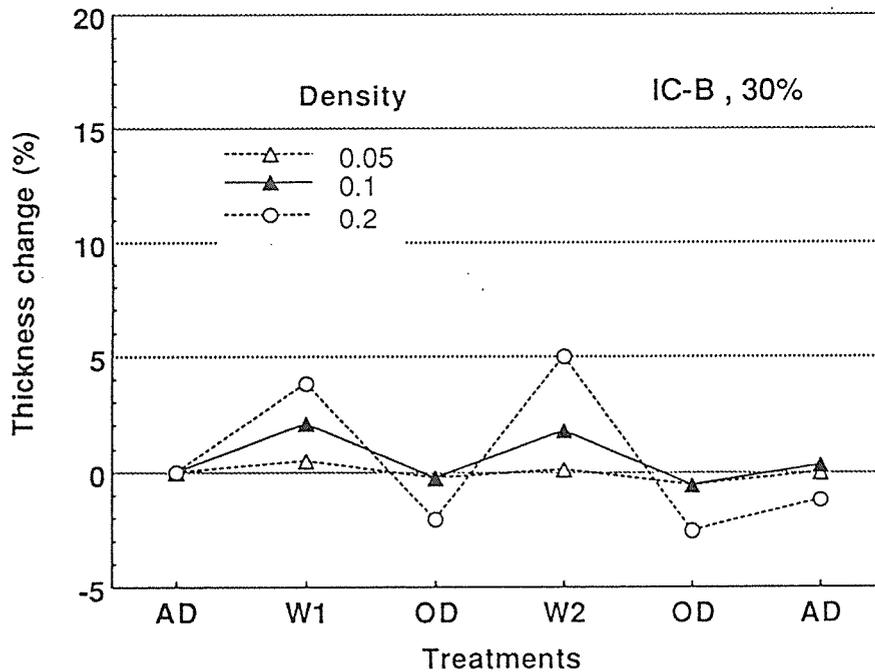


図4-15 湿潤一乾燥繰返し促進劣化処理における厚さ変化 (IC-B, 30%)

Notes: AD : Air-dry condition,  
 W1: Water-soaking at 20 °C for 24h,  
 W2: Water-soaking at 70 °C for 24h,  
 OD: Oven-dry condition at 60 °C for 24h.

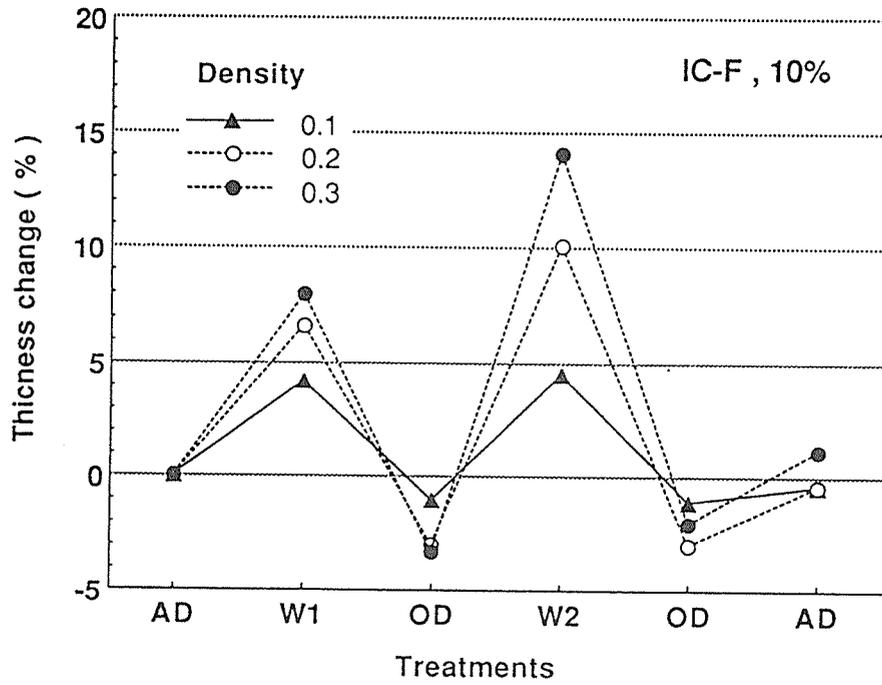


図4-16 湿潤-乾燥繰返し促進劣化処理における厚さ変化 (IC-F, 10%)

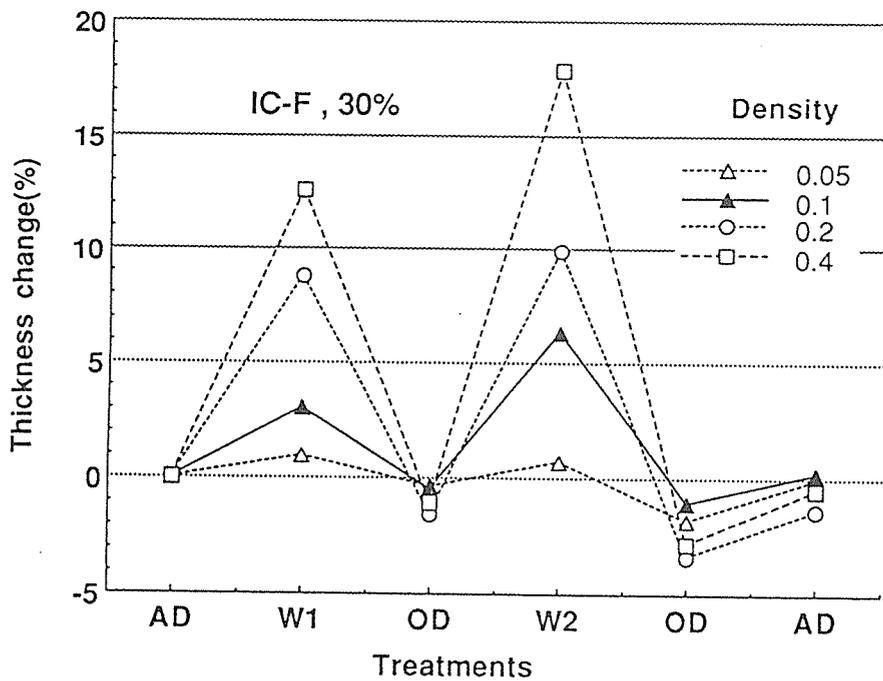


図4-17 湿潤-乾燥繰返し促進劣化処理における厚さ変化 (IC-F, 30%)

Notes: AD : Air-dry condition,  
 W1: Water-soaking at 20 °C for 24h,  
 W2: Water-soaking at 70 °C for 24h,  
 OD: Oven-dry condition at 60 °C for 24h.

が、結合剤の性質や添加量にも大きく影響される。すなわち、結合剤の種類により、同一添加率の場合にはIC-B>IC-Fの関係が認められ、当然ながら、接着剤添加率の増加によって強度は大きく増加する。

いま、前章の発泡性フェノール樹脂接着剤を10%添加したボードのそれと比較すると、IC-Bのボードが低密度の場合でも比較的大きい強度が得られ、およそ2倍程度の値を示している。

はく離強度も同様に、密度や接着剤添加率の影響が大きく、密度の低下に伴い、また、接着剤添加率の低下に伴い、はく離強度も低下する。密度0.2g/cm<sup>3</sup>以下のボードを構造用途に用いるには、添加率が30%程度あることが望ましい。また、前章の発泡性フェノール樹脂接着剤を用いたボードと比べると、イソシアネート樹脂結合剤が、はるかに高いはく離強度を示し、さらに言えば、発泡よりも接着に重点が置かれたイソシアネートがより優れている。

### 3.3.2 ファイバーボードの寸法安定性

24時間吸水厚さ膨張率と密度の関係を図4-13に示した。24時間吸水厚さ膨張率もボード密度の依存性が大きく、低密度ボードほど値が小さくなっている。また結合剤の添加率よりも、種類による影響の方が大きい。IC-Bの場合には密度0.2g/cm<sup>3</sup>以下のボードの厚さ膨張率は5%以下であり、優れた寸法安定性を示した。

湿潤-乾燥繰り返し促進劣化処理における厚さ変化率を図4-14~図4-17に示した。ボード密度が大きいほど、厚さ変化率は大きくなってはいるが、いずれの場合も乾燥により最終的には、ほぼはじめの厚さに戻っており非常に優れた寸法安定性を示した。結合剤の種類ではIC-Bの方がIC-Fの場合よりも値が小さかったが、添加率の影響はあまり見られなかった。

発泡剤を使用した場合に、発泡が連続的に発生しなかったのは、発泡剤の量に対してエレメントの比表面積が大きいことなどが考えられるが、詳しいことは現在のところ明らかでなく、今後の検討課題としたい。

## 3.4 結論

結合剤として、イソシアネート樹脂接着剤を用いた方が、イソシアネート発泡剤あるいは発泡性フェノール樹脂接着剤よりも、高い強度と優れた寸法安定性をもつ低密度ファイバーボードが製造できることが明らかとなった。

## 4. 低密度ファイバーボードの断熱・吸音・縦圧縮性能

### 4.1 はじめに

2節において、発泡性フェノール樹脂接着剤を用いた低密度ファイバーボードの製造技術と基礎的な材質を検討した。本節では、低密度ファイバーボードの断熱材料、吸音材料あるいは緩衝材料としての諸特性を調べるために、熱伝導率、吸音率および縦圧縮ヤング率を求めた。

## 4.2 実験

実験に用いた試料は、第2節において製造された、密度 $0.10\text{--}0.30\text{g/cm}^3$ のファイバーボードである。

熱伝導率は、ASTM C 518-76 (Steady State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter) に準じて、1試料につき2熱流計方式の定常法によって測定し、低温板および高温板の温度はそれぞれ $25^\circ\text{C}$ および $35^\circ\text{C}$ とした。試料の寸法は $50\text{mm}\phi$ である。

吸音率の測定は、図4-18のような装置を用いて、音響管法による垂直入射吸音率を求めた。試料寸法は $84\text{mm}\phi$ とし、厚さ方向を4枚重ねて、約 $39\text{mm}$ として測定を行った。<sup>17)</sup>

縦圧縮ヤング率は、加硫ゴムの動的性質試験方法 (JIS K 6394) に準じて、共振法により求めた。すなわち、図4-19に示されるように、加振器によって試料の厚さ方向に圧縮振動を与えて、共振ピーク周波数を求め、縦ヤング率を算出した。試料寸法は $76\text{mm}\phi$ である。

## 4.3 結果と考察

低密度ファイバーボードの熱伝導率を図4-20に示す。図には、インシュレーションボードや合板、ハードボードなど比重の異なる木質材料およびグラスウールやポリスチレンフォームなどの断熱材料のデータを併せて掲載し、比較に供した。<sup>18)</sup>一連の木質材料の熱伝導率は、密度の低下と共に低下する傾向が明らかである。また、低密度ファイバーボードの熱伝導率は $0.03\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 程度であり、グラスウール等の断熱材料と同等であることがわかる。一方、外気温の変動に対して室温を一定に保つ保温性能の優劣は、熱拡散率 (熱伝導率を密度および比熱で除した値) で表される。<sup>7)</sup>いま、これらの値を、低密度ファイバーボード、フォームポリスチレン、およびグラスウールについて求めると、それぞれ $0.0007\text{m}^2/\text{h}$ 、 $0.004\text{m}^2/\text{h}$ および $0.01\text{m}^2/\text{h}$ である。したがって、低密度ファイバーボードの熱拡散率は一般的な断熱材料の $1/5\sim 1/15$ に過ぎず、優れた保温性能をもつことがわかる。

低密度ファイバーボードの垂直入射吸音率を図4-21に示す。低密度ファイバーボードの吸音率は、密度によって周波数特性が多少異なるものの、総じて $700\text{Hz}$ 以下の吸音率は十分ではないが、 $700\text{Hz}$ 以上における $70\%$ 以上の値を示した。これらを全体としてみれば、同密度・同厚さのグラスウールやロックウールと同等程度のせいなのを有すると推定される。

低密度ファイバーボードの縦圧縮ヤング率を図4-22に示す。当然ながら、縦圧縮ヤング率は密度の増加と共に増大し、また接着剤添加率の増加に伴い増加する。ロックウールの縦ヤング率が、 $0.04\text{g/cm}^3$ および $0.20\text{g/cm}^3$ の密度についてそれぞれ $1.6\times 10^4\text{Pa}$ および $8.0\times 10^4\text{Pa}$ 、また、グラスウールの縦ヤング率が、 $0.032\text{g/cm}^3$ および $0.96\text{g/cm}^3$ の密度についてそれぞれ $3.4\times 10^3\text{Pa}$ および $6.5\times 10^4\text{Pa}$ であることを考える

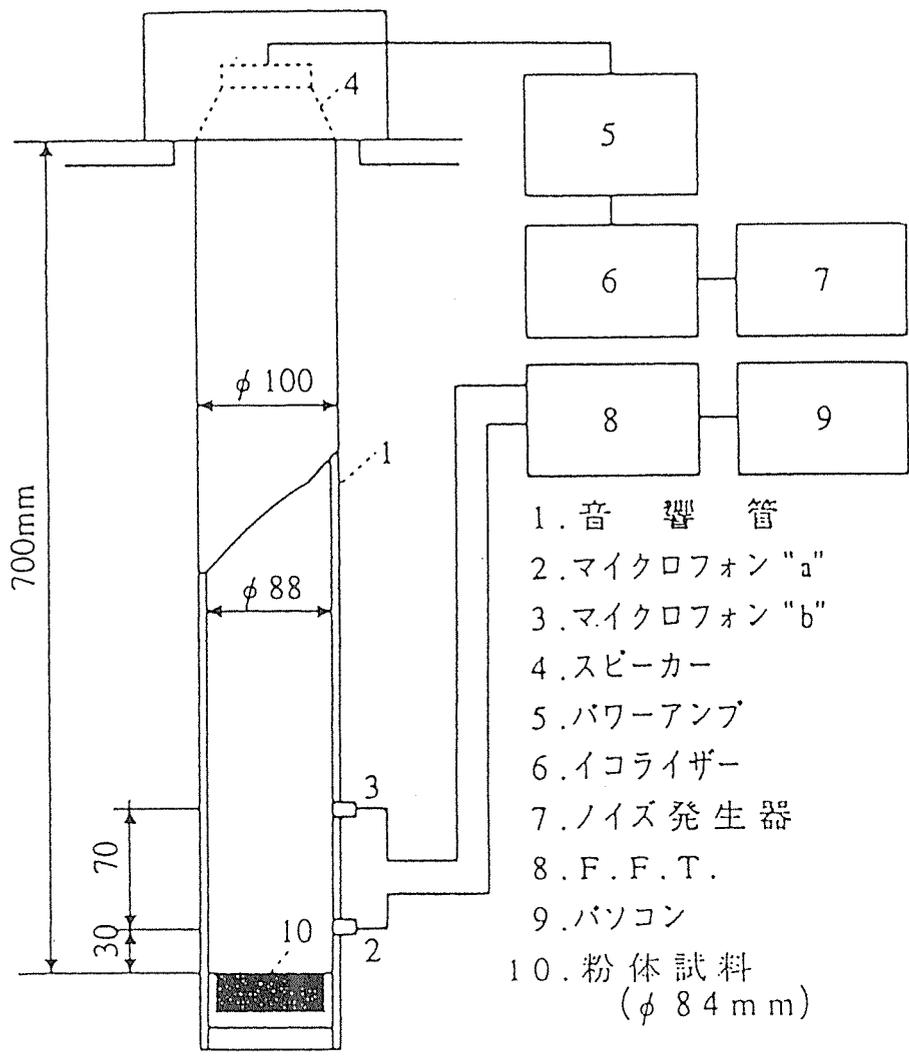
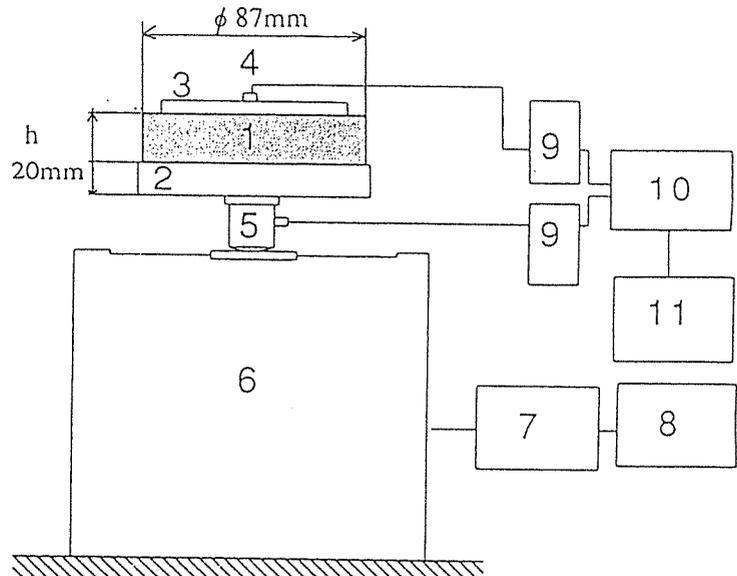


図4-18 音響管法による垂直入射吸音率の測定法



- 1。試料、 2。試料取り付け板、 3。鉄板（マス）  
 4。加速度計、 5。加速度計、 6。加振器、  
 7。パワーアンプ、 8。ノイズジェネレータ、  
 9。チャージアンプ、 10。FFT、 11。パソコン

図4-19 加硫ゴムの動的性質試験方法（JIS K 6394）を応用した木質ボードの縦圧縮ヤング率の測定

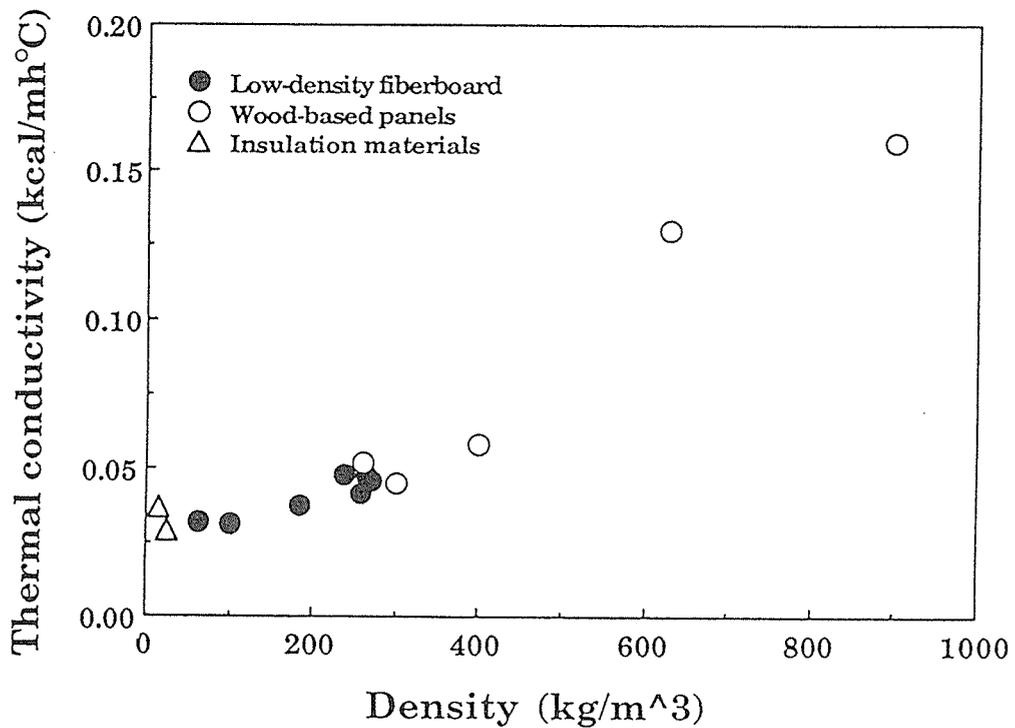


図4-20 低密度ファイバーボードの熱伝導率

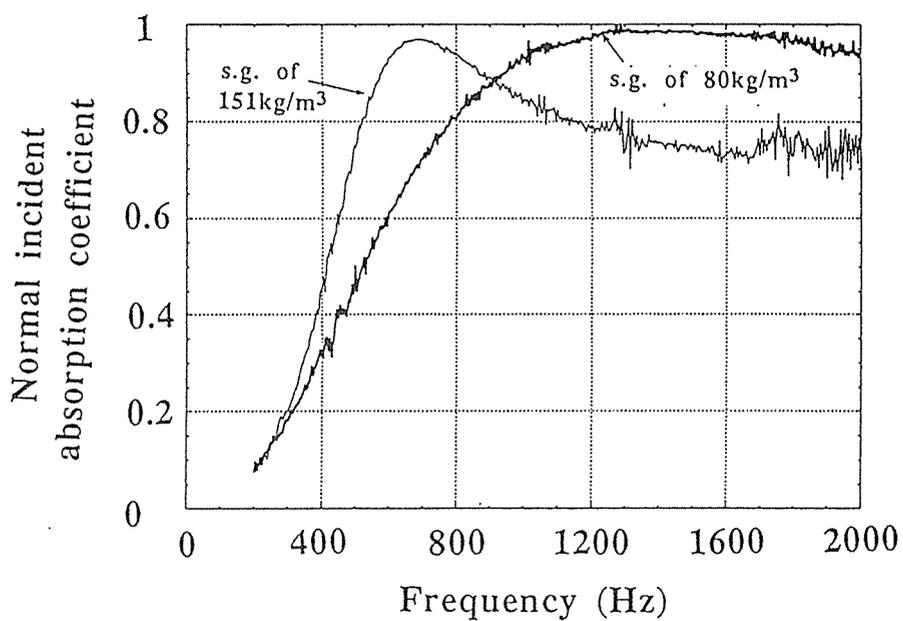


図4-21 低密度ファイバーボードの垂直入射吸音率

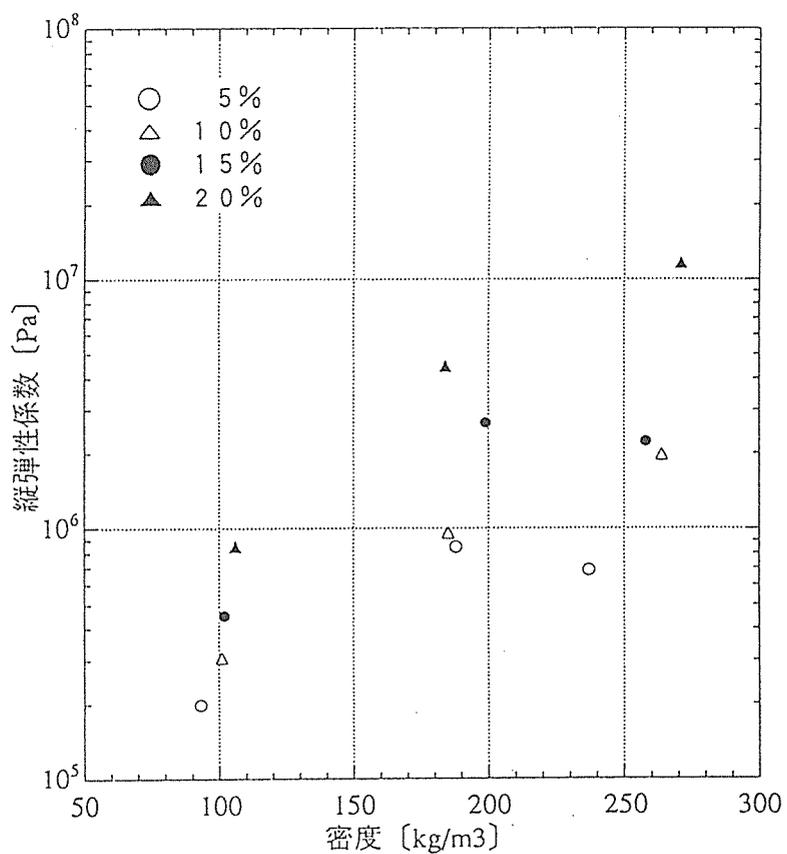


図4-22 低密度ファイバーボードの縦圧縮ヤング率

と、比較的高い値が得られたと言える。

#### 4.4 結論

低密度ファイバーボードの熱伝導率、吸音率および縦圧縮ヤング率を求め、この材料が断熱材料、吸音材料として大変優れているが明らかになった。

## 文 献

- 1) 森光正：APAST, No.9, 7-11 (1993)
- 2) 青木務：木材工業、49 (1)、24-27 (1994)
- 3) 西村拓也、伏谷賢美、森光正：木材工業、50 (8)、357-361 (1995)
- 4) 川井秀一、須田久美、中路誠、佐々木光：木材学会誌、32 (11)、876-882 (1986)
- 5) 須田久美、川井秀一、佐々木光：木材学会誌、33 (5)、376-381 (1987)
- 6) 川井秀一、須田久美、佐々木光：木材学会誌、33 (5)、385-392 (1987)
- 7) 川井秀一、佐々木光、石原茂久、高橋徹、中路誠：木材学会誌、34 (12)、973-980 (1988)
- 8) Kawai, S.; Sasaki, H.: Low-Density Particleboard, Current Japanese Materials Research, Vol.11, Current research on Wood and Wood-Based Materials, ed. N. Shiraishi, H. Kajita, and M. Norimoto, 1993, p.33-42, Elsevier Applied Science, London and New York..
- 9) 張敏、岸本、川井秀一、佐々木光：木材研究・資料
- 10) 川井秀一、佐々木光：木材学会誌、35 (3)、218-226 (1989)
- 11) Pulido, O.; Kawai, S.; Yoshida, Y.; Sasaki, H.: *Mokuzai Gakkaishi*, 36 (1), 29-35 (1990)
- 12) Sasaki, H.; Kawai, S.; Subiyanto, B.; Hata, T.: Steam-Injection Pressing Technology, Current Japanese Materials Research, Vol.11, Current Research on Wood and Wood-Based Materials ed. N. Shiraishi, H. Kajita, and M. Norimoto, 1993, p.43-54, Elsevier Applied Science, London and New York.
- 13) Sasaki, H.; Kawai, H.; Umemura, K.; Eusebio, D. A.; Kuroki, Y.: Proc. of the Second Pacific Rim Bio-Based Composite Symposium, p.9-16, Nov. 6-9, 1994, Vancouver.
- 14) 柳川靖夫、川井秀一、王潜、佐々木光、近藤正巳、白井文朗：木材学会誌、41 (5)、474-482 (1995).
- 15) 柳川靖夫、川井秀一、王潜、佐々木光、近藤正巳、白井文朗：木材学会誌、41 (5)、483-489 (1995).
- 16) 張敏、川井秀一、佐々木光、山脇敏幸、吉田弥寿郎、柏原将人：複合ファイバーによる木質ボードの製造とその性質 (第2報) ボード製造装置の試作とそれによる竹・木材複合ファイバーボードの性質、木材学会誌、41 (10)、903-911 (1995) .
- 17) 奥平有三：粉体層の吸音特性と分布常数回路を用いたシミュレーション、粉砕、37、105-110 (1993)
- 18) 川井秀一：低比重パーティクルボードの製造技術と性質、木材研究・資料、24、31-44 (1988)

## 第5章 海外における木質建材の規格

近年、木質構造の設計法が従来からの許容応力設計法から、構造信頼性工学に基づいた限界状態設計法（米国では荷重耐力係数設計法 L R F D と呼ばれる）へと移行するのが世界的な趨勢となってきた。これらの新しい設計法では、従来からの許容応力度に相当する値として、基準耐力値（Reference resistance：ただしこれは米国における用語）が必要となる。本報告では、米国における基準耐力値の算出方法の規格である ASTM D5457-93 の抄訳を掲載する。

### ASTM D5457-93

#### 荷重・耐力係数設計法における木質材料および構造接合部の基準耐力値の計算法

本規格は規定番号 D5457 として発行されているものである。規定番号に続く番号は採用された最初の年、あるいは最終の改訂年を示している。かっこの内の番号は再承認の最終年を示している。上部のイプシロン記号は最終の改訂または再承認後に行われた編集者による変更を示している。

#### 序文

荷重・耐力係数設計法は、信頼性理論の概念を用いて、設計者が使い易いような手順にまとめ上げた構造設計法である。その基本となる設計式には、いくつかの材料特性パラメータに基づいた基準耐力値が必要である。必要とされる材料特性データを計算するための標準的な方法は重要である。それによってすべての木質材料は同等に扱われることになる。この仕様書は LRF D の基準耐力値の計算に必要な手法を示したものである。

（脚注 1）この仕様書は、ASTM 委員会 D - 7（木材）の管轄下であり、また小委員会 D 07.02（製材とエンジニアードウッドプロダクツ）が直接の責任を有する。

現行の版は 1993 年 10 月 15 日に承認され、1993 年 12 月に刊行された。

（脚注 2）ASTM 規格の年鑑、巻 04.09

（脚注 3）ASTM 規格の年鑑、巻 04.09 と 15.08

## 第 1 章 範囲

1.1 この仕様書には、荷重・耐力係数設計法（LRFD）における木質材料および構造接合部の基準耐力値の計算手法が述べられている。この仕様書に基づいて得られた基準耐力値は、ASCE7-88の荷重組み合わせ方法に規定された構造設計に適用することが出来る。

1.2 この仕様書の解説は、付録 X I に示されている。

## 第 2 章 引用された文書

### 2.1 ASTM規格

- D 9 木材に関する専門用語。
- D 1 4 3 無欠点小試験体の試験方法。
- D 1 9 8 構造用寸法の木材の静的試験方法
- D 1 0 3 7 木質ファイバーおよびパーティクルパネルの特性評価方法
- D 1 7 6 1 接合金具の試験方法。
- D 1 9 9 0 実大試験体のイングレード試験から得られた目視区分製材品の許容特性の評価方法。
- D 2 7 1 8 平坦なシート状の構造用パネルの試験方法（ローリングシェアー）。
- D 2 9 1 5 構造用木材の各等級の許容特性を評価する方法。
- D 3 0 4 3 構造用パネルの曲げ試験。
- D 3 5 0 0 構造用パネルの引張試験。
- D 3 5 0 1 合板の圧縮試験。
- D 4 7 6 1 木材および構造用木質材料の機械的特性の試験方法。
- D 5 0 5 5 木製 I ビームの構造耐力を決定あるいはモニターするための仕様書。
- E 1 0 5 材料の確率的サンプリング方法。

### 2.2 ASCEの規格

ASCE 7 - 8 8 建築物およびその他の構造物に対する最小設計荷重

（脚注 4）ASTM規格の年鑑、巻07.02および14.02

（脚注 5）345東47番街、ニューヨーク10017-2398、アメリカ土木学会より入手可能。

## 第 3 章 用語

**3.1 定義**—木材用語の標準的な定義は、D 9 の用語集に記載されている。

3.1.1 変動係数、 $CV_w$ —変動の相対的な指標。この仕様書では、 $CV_w$ は2パラメータワイブル分布の形状パラメータに基づいたものであり、一般に用いられるような標本標準偏差を平均値で割った値ではない。

3.1.2 データ信頼係数、 $\Omega$ —サンプルの変動とサンプル数によって部材の耐力値を調整する係数。

3.1.3 分布のパーセント値、 $R_p$ —累積分布関数の  $p$  パーセントの値。

3.1.4 形式変換係数、 $K_F$ —耐力値を許容応力設計 (ASD) の形式からLRFDの形式に変換するときの係数

3.1.5 下限の裾野—全ての試験体からなるデータ群の中で最も低い特性値（例えば最小強度）を含む部分

3.1.6 基準耐力値、 $R_n$ —LRFDの設計式において、部材の耐力値（強度や耐力）を表現する値。

3.1.7 信頼性正規化係数、 $K_R$ —ある条件下において目標信頼性指標を達成するための基準耐力値を確立するための係数。

3.1.8 耐力係数—LRFDの設計式の耐力側に用いる係数。

## 第4章 サンプリング

4.1 解析や本仕様書の実行のためのサンプルは、推測がなされる母集団を代表するものでなければならない。製造の変動と材料の変動は両方とも考慮しなければならない。E 1 0 5 の原則は維持されていなければならない。D 2 9 1 5 の方法はサンプリング計画を確立するためのものである。変動が少なく、また製造の変動によって結果が大きく影響されるようなサンプリング手法では、特に注意が必要である。サンプリング計画は変動要因の相対的な大きさに影響される。

4.1.1 品質管理プログラムから得られたデータは、もし4.1の条件が満たされているのなら、使用することが出来る。

4.1.2 多数のデータ群からのデータが統合される場合やグループ化される場合、それらのデータをグループ化するための条件は、4.1の規定を満足していなければならない。製造規格の中でその手法が可能な場合には、使用されなければならない。

### 4.2 サンプルの量

4.2.1 全ての試験体が破壊試験されるデータ群の場合、最少の試験体数は30である。

-----  
ノート 1 - 集団の特性を推定できる信頼区間は、サンプル数が少ないほど小さくなる。60以下のサンプル数では、集団を代表するサンプルとするために、特にサンプリングに注意しなければならない。  
-----

4.2.2 下限の裾野におけるデータ群については、 $n=600$ 以下で、最低60個が破壊していることが要求される（これは少なくとも分布の10%以下であることを表している）。サンプル数が600以上の場合、最低限、分布の10%が必要である（例えば、 $n=720$ の場合、下限の裾野で72個の破壊試験体となる）。下限の裾野のデータ群のために計画されたパラメータ推定手法のみが使われなければならない（付録 X 2 参照）

## 第 5 章 試験

5.1 試験は適正な標準試験方法にしたがって行われなければならない。試験は使用中の製品の能力を代表するデータを得るためのものでなければならない。

5.2 定期的な特性評価 - 製品の特性が成文化された時の状態のままであるかどうかを確かめるために定期的な試験を行うことが推奨される。

## 第 6 章 LRFDの基準耐力値

6.1 LRFDの基準耐力値の導き方がこの章で示される。基準耐力値を導き出すために必要なパラメータも示される。これらのパラメータには、分布のパーセント値、変動係数、データ信頼係数、信頼性正規化係数が含まれる。基準耐力値の導き方の一例が X 1.7 に示される。

### 6.2 基準耐力値、 $R_n$ -

次の式によって、LRFDの基準耐力値を導く：

$$R_n = R_p \times \Omega \times K_R \quad (1)$$

ここで：

$R_p$  = 分布のパーセント推定値

$\Omega$  = データ信頼係数

$K_R$  = 信頼性正規化係数

### 6.3 分布パーセント推定値、 $R_p$

6.3.1 式 (2) は、2パラメータワイブル分布のパーセント値を計算するために

用いられる。パーセント値は推定される特性に依存する。

$$R_p = \eta \{-\ln(1-p)\}^{1/\alpha} \quad (2)$$

ここで：

$\eta$  = ワイブルの尺度パラメータ

$p$  = 例えば、0.05のような値で示されるパーセント値

$\alpha$  = ワイブルの形状パラメータ

6.3.2 2パラメータワイブル分布の形状 ( $\alpha$ ) と尺度 ( $\eta$ ) パラメータは、材料耐力値の分布を決めるために必要である。一般的な推定手法のアルゴリズムは付録 X 2 に示される。

#### 6.4 変動係数、 $CV_w$ -

材料の変動係数は、データ信頼係数  $\Omega$  と信頼性正規化係数  $K_R$  を決定する際に必要である。 $CV_w$  はワイブル分布の形状パラメータから次式により推定される。

$$CV_w = \alpha^{-0.92} \quad (3)$$

-----  
ノート 2 - 0.09~0.50の間で、上の概算値は、 $CV_w$  の正確な値と1%以内の精度を示す。 $CV_w$  と  $\alpha$  の正確な関係は付録 X 3 に示される。

#### 6.5 データ信頼係数、 $\Omega$ -

データ信頼係数  $\Omega$  はデータ群に関連した不確実さを説明するものである。この係数は、変動係数とサンプル数と基準パーセント値の関数である。表 1 は下限 5% 推定値に対するデータ信頼係数を示したものである。

-----  
ノート 3 - 分布の許容限界が  $\Omega$  と一致している場合、データ信頼係数は一定である。  
-----

表1 75%の信頼限界をもった2パラメータワイブル分布に対する、 $R_{0.05}$ のデータ信頼係数、 $\Omega$

C V <sub>w</sub>	サンプル数, n									
	30	40	50	60	100	200	500	1000	2000	5000
0.10	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1.0
0.15	0.95	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99
0.20	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99
0.25	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99
0.30	0.84	0.86	0.88	0.89	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99
0.35	0.81	0.84	0.86	0.87	0.90	0.93	0.96	0.97	0.98	0.99
0.40	0.79	0.81	0.84	0.85	0.89	0.92	0.95	0.96	0.97	0.98
0.45	0.76	0.79	0.82	0.85	0.87	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98
0.50	0.73	0.77	0.80	0.81	0.86	0.90	0.94	0.95	0.97	0.98

\*内挿は許される。CV<sub>w</sub>値が0.10以下の場合には、0.10の値を用いる。

### 6.6 信頼性正規化係数、 $K_R$

信頼性正規化係数 $K_R$ は、分布の推定値（例えば、 $R_{0.05}$ ）を、目標信頼性指標に調整するために用いられる。信頼性正規化係数は寸法係数によって調整された耐力値 $\phi$ 。（表2）に対する、計算された耐力係数 $\phi$ 。（付録X1）の比率である。この調整係数はCV<sub>w</sub>の関数であり、特定の目標信頼性指標のために算出されるものである。表3に示された $K_R$ の値は、活荷重-死荷重の比が3の時に計算された耐力係数 $\phi$ を表している。 $\beta = 2.4$ 以上の目標信頼性指標に対する信頼性正規化係数の計算方法はZahnによって示されている。

表2 LRFDの耐力係数、 $\phi$ 。

適用	特性	$\phi$ 。
部材	圧縮 <sup>^</sup>	0.90
	曲げ	0.85
	引張（軸方向）	0.80
	せん断, 引張（半径方向）	0.75
接合部	すべて	0.65

<sup>^</sup> 繊維方向、半径方向、およびめり込み

（脚注6）ワイブル、W：「材料強度の統計理論」1939年

（脚注7）木質構造のLRFD、ASCE、1988年

（脚注8）ザーン、J：「信頼性解析のためのFORTRANプログラム」FPL GTR-72、FPL

表3 5パーセント値に基づく信頼性正規化係数  $K_R$

CV <sub>w</sub> , %	$K_R$					
	Compression and Bearing	Bending	Tension Parallel	Shear (Lumber)	Shear (SCL)	Shear (I-joist)
10	1.303	1.248	1.326	0.724	0.943	1.253
11	1.307	1.252	1.330	0.727	0.946	1.257
12	1.308	1.253	1.331	0.727	0.947	1.258
13	1.306	1.251	1.329	0.726	0.945	1.256
14	1.299	1.244	1.322	0.722	0.940	1.249
15	1.289	1.235	1.312	0.717	0.933	1.240
16	1.279	1.225	1.302	0.711	0.926	1.230
17	1.265	1.212	1.288	0.704	0.916	1.217
18	1.252	1.199	1.274	0.696	0.906	1.204
19	1.237	1.185	1.259	0.688	0.895	1.190
20	1.219	1.168	1.241	0.678	0.882	1.173
21	1.204	1.153	1.225	0.669	0.871	1.158
22	1.186	1.136	1.207	0.659	0.858	1.141
23	1.169	1.120	1.190	0.650	0.846	1.125
24	1.152	1.104	1.173	0.641	0.834	1.109
25	1.135	1.087	1.155	0.631	0.821	1.092
26	1.118	1.071	1.138	0.622	0.809	1.076
27	1.105	1.059	1.125	0.615	0.800	1.063
28	1.084	1.038	1.103	0.603	0.784	1.042
29	1.066	1.021	1.085	0.593	0.771	1.025
30	1.049	1.005	1.068	0.583	0.759	1.009

### 6.7 形式変換

6.7.1 ある荷重条件において信頼性指標を達成するために設計値を調整する  $K_R$  を用いる代わりに、建築コードに認定された許容応力度設計 (ASD) から形式変換に基づいてLRFDの基準耐力値を求めてもよい。この方法によって得られた基準耐力値が信頼性指標を達成するかどうかについては、保証の限りではない。

ノート4 - コード認定されたASDの値を求めるために用いられる基準の例は、

D143、D198、D1037、D1761、D2718、D2719、D3043、D3500、D3501、D4761、D1990、D5055に示されている。

6.7.2 標準化を目的とするとき、形式変換基準耐力値は、ある基準条件における基本的なASDとLRFDの式のキャリブレーション (断面係数、断面積、許容荷重耐力などとして定義された) から得られた数学的な変換に基づかなければならない。基

準条件は予期される荷重の範囲での設計能力を変更できるように、また荷重比が最少となるように選択しなければならない

6.7.3 6.6に与えられたように同一の荷重係数と荷重比に基づいて、またASDの荷重継続期間係数の1.15とLRFDの時間効果係数0.80を考慮すると、形式変換係数 $K_F$ は以下のように示される。

$$K_F = \frac{2.16}{\phi} \quad (4)$$

6.7.4 ASDの繊維方向の圧縮値は荷重継続期間の調整を受けないので、式(4)の分子の値は1.875で一定である。

6.7.5 形式変換基準耐力値は、ASDの耐力値(標準的な10年間の期間に基づいた)に $K_F$ を乗じることによって計算される。

6.7.6 形式変換の例 -

一面せん断ボルトのASDの設計値は800lbfである。表2から、特定のLRFD耐力係数は0.65である。式(4)を用いると、LRFDのボルトの設計値は次のようになる。

$$R_n = \left[ \frac{2.16}{0.65} \right] \times 800$$
$$R_n = 2658 \text{ lbf}$$

## 第7章 結果の表示

7.1 サンプル計画と規格に従った試験法を報告しなさい。下限の裾野のデータ群が用いられる際には、計算に用いたデータのサンプル数を報告しなさい。計算された変動係数を用いて形状および尺度パラメータを報告しなさい。また、平均と標準偏差(計算された変動係数から導かれたもの)を報告しなさい。データのプロットと当てはめたワイブル分布も含めなさい。これらの基本的なパラメータに加えて、データ信頼係数、計算されたパーセント値、信頼性正規化係数と基準耐力値を報告しなさい。

## 第8章 キーワード

8.1 荷重・耐力係数設計法(LRFD) ; 基準耐力値 ; 木質

## 付 録

### ( 必須ではない情報 )

#### X 1 . テキストについての見解

##### X 1.1 導入部分についての見解

X 1.1.1 荷重・耐力係数設計法 (LRFD) は信頼性設計法 (RBD) として知られている構造設計方法の 1 種である。2 つの設計法の違いは重要である。RBD は、ある期間における部材の信頼性に関連した定量化を包含する、あるいは計算するものである。より高い信頼性とはより低い破壊の確率を意味する。もし、RBD を実際の構造物に当てはめようとする、実用上の問題が生じる。それは計算の際に、数学的な取扱いが簡易になるように、荷重や構造のレスポンスを理想化しなければならないことである。この理想化の過程は、最終的な計算を興味深くはあるものの、実際には適用不可能なものにしてしまう。LRFD は RBD のいくつかの基本的なコンセプトを選択して発展してきたものであり、それらを用いて現行の (許容応力度) 設計法の多くに見られるような形式に発展してきたものである。LRFD はこのようにして設計手法を改良してきた。LRFD によってもたらされた改良とは次のようなものである。

X 1.1.1.1 安全係数を評価するとき、いくつもの荷重形式の変動を考慮していること。

X 1.1.1.2 構造物における破壊モードを考慮していること。

X 1.1.1.3 (部材の能力) により近い材料の耐力値試験データを用いていること。

X 1.1.1.4 耐力値のバラツキを考慮していること。

X 1.1.2 数多くの木質材料の許容特性値を発展させてきたこれまでの規格は、ユーザーに対して母集団の下限 5 % 推定値を計算するいくつかの方法を提示してきた。この一つの数値が許容強度特性を決定する際の基礎となってきた。現実に行われている RBD は、材料分布の下限の正確な定義と、荷重分布の上限の正確な定義を必要とする。LRFD は現行の手法 (例えば、基準値や変動) よりも多くの情報を必要とするが、実質的には RBD より少ない。今日用いられている最も進んだ LRFD では、分布を表現するパラメータと分布の形を必要とするだけである。これらの改良によって、分布全体よりも分布の裾野の部分を表現することが、最も正確な分布の表現であることが分かってきた。このことによって、一般的な建築物では、耐力値の下限の裾野と荷重の上限の裾野が破壊確率に貢献することが明らかになってきた。

X 1.1.3 仮定された分布の形式が計算された LRFD の耐力係数に強い影響を及ぼすことが、シミュレーションによって明らかになった。しかしながら、この相違点の

多くは、標準的な分布が裾野のデータにうまくフィットできないことによるためである。分布のタイプを標準化することによって、この手段はこれらの係数の算出をするための明確な方法を与えることになった。

さらに、データの裾野のフィットを許すことによって、全体の分布を用いる方法よりも優れたデータの当てはめが可能となった。

X 1.1.4 2パラメータワイブル分布がこれらの計算の基礎となっているため、この仕様書のユーザーは統計的な決定を行なう必要がない。LRFDのためには、ユーザーはこの仕様書の中の等式を用いてワイブル分布に当てはめ、形状と尺度パラメータを計算しなければならない。基準耐力値の計算の最終ステップはこの仕様書の等式を注意深く読みとることだけである。

#### X 1.2 第1章、範囲についての見解一

この仕様書の中で示された計算手法は、一般的な統計的手法である。この仕様書は、ユーザーに対してLRFDの基準耐力値を導き出すのに必要な全ての計算手法を文書化したものである。信頼性はパラメータの変化によって影響を受けやすいので、LRFDの基準耐力値が統一された方法により得られたものであることを明確にする限定的な手法を、これらの計算方法は提供するものである。

#### X 1.3 4.1に対する見解一

いくつかの木質材料はバッチで試験すると非常に低い変動を示すことがある。このような場合、例えば、平均値の90%以上の5パーセンタイル値が算出されることもある。これは、高い変動を持った製品では、平均値の50%以下の5パーセンタイル値があることと対称的である。サンプリング計画も日々の品質管理手段も、材料源の変更や製造のわずかな変更によって分布に影響を与えやすいことを、この章では仕様書を用いるユーザーに対して警告している。

#### X 1.4 第5章試験法に対する見解一

ある特性に対する基準耐力値を算出するのに最も望ましくまた信頼できる方法は、その材料を直接試験することであるが、そのようなデータが存在しない時は、推定が行われる。存在しないデータを算出する最も良い方法は、既知の物理的相関を用いることである。例えば、ワイブルの理論を用いれば、試験していない寸法の材料の基準耐力値を推定することが出来る。統計的な相関関係はデータがない場合や十分に信頼できる物理的な相関が存在しないときに用いることが出来る。

線形あるいは非線形カーブの当てはめ方法は、与えられた特性とそれに影響される変数との統計的な関係を算出するのに使うことが出来る。

### X 1.5 第 6 章 LRFD の基準耐力値に対する見解一

X 1.5.1 多くの木質材料の許容応力度を設定する際の基本は、伝統的に下限 5 % 値に注目することであった。この章では、これらの値について注目している。ある等級の製品（接合部）は、平均値に基づいた許容応力度を持っていた。過去の手法を考慮することなく、耐力値の分布は信頼性手法に必要である。

X 1.5.2 式（4）は 2 つの他の算出方法と同等である。式（4）は  $R_n / F_x$  のグラフに基づいたもので、このグラフは区別された 3 つの荷重比の範囲（常時床、雪屋根、非雪屋根）における活荷重から得られる。ここで、 $R_n$  と  $F_x$  は LRFD と ASD の設計式から直接得られる値である。

$$\text{LRFD: } \lambda \phi R_n \geq 1.2D + 1.6L$$

$$\text{ASD: } K_d F_x \geq D + L$$

ここで：

$\lambda$  = 時間効果係数

$\phi$  = 耐力係数

$R_n$  = 基準耐力値

$D$ 、 $L$  = 死荷重及び活荷重の効果

$K_d$  = 荷重継続係数（ASD）

$F_x$  = 許容応力（ASD）

X 1.5.3 式（4）の分子の係数は 2.1 から 2.2 の範囲にあり、高い  $L / D$  比における非雪屋根が減ることに対して、低い  $L / D$  の床については増大するというバランスからエンジニアリングの判断によって得られたものである。

X 1.5.4 2 番目の算出において、2.16 という正確な係数は、 $R_n / F_x$  の比  $L / D = 3$ 、 $\lambda = 0.80$  と  $K_d = 1.15$  の代数的な解によって得られたものである。しかしながら、この代数的な等価式は、式（4）の基本と混同されるものではない。

### X 1.6 6.5、データ信頼性係数、 $\Omega$ に対する見解一

この係数は基準耐力値の信頼区間の比に基づくものである。さらに詳しく言えば、50 % の信頼度で推定するための、75 % の信頼限界でのパーセンタイル値である。注意すべきは、 $\Omega$  はたとえ裾野のあてはめがなされた場合であっても、完全なデータ群のサンプル数に基づくものである。

### X 1.7 6.6、信頼性正規化係数、 $K_R$ に対する見解一

X 1.7.1 LRFD への変換の目的は、設計者に簡単で使いやすい手順を示すことにある。設計者の便宜のために、ある耐力係数  $\phi_c$  が LRFD の仕様書の中に与えられる。

異なった $\phi_c$ の値を最小にするためには、耐力値の調整が必要である、なぜなら、計算された $\phi_c$ は固有の信頼性指標に関係し、それらは一般に固有の耐力係数とは異なるからである。目標信頼性を達成するために、信頼性正規化係数 $K_R$ を用いることが表の耐力値を発展させる中で必要となる。

X 1.7.2 信頼性正規化係数を用いることは、信頼性に基づいた変換を行うことを意味している。 $K_R$ を含む基本的な関係は曲げ部材の例で示される。

X 1.7.3 形式変換耐力にLRFD式を当てはめると、

$$\lambda \phi_c R_n \geq \sum \gamma_i Q_i$$

ここで：

$\phi_c$  = ある耐力係数

$\gamma_i$  = 荷重タイプが $i$ 番目の荷重係数

$Q_i$  = 荷重タイプが $i$ 番目の荷重効果

X 1.7.4 次に、計算された耐力係数 $\phi_c$ を用いて信頼性の計算レベルに耐力側が合致した時と同じ関係を考える。

$$\lambda \phi_c R_n \geq \sum \gamma_i Q_i$$

X 1.7.5 両方の式によって同じ目標信頼性が得られることが望ましいので、最初の式は信頼性正規化係数によって修正されなければならない。すなわち、

$$\lambda \phi_c K_R R_n = \lambda \phi_c R_n$$

次の比によって得られる信頼性正規化係数の定義により、

$$K_R = \phi_c / \phi_c$$

X 1.7.6 設計者は $\phi_c$ と $\phi_c$ の関係を気にする必要はない、なぜなら $K_R$ は表に与えられているからである。信頼性正規化はゆえに設計者にとって明確である。

X 1.7.7  $K_R$ の等式はラクウィッツ-ウィスラーのアルゴリズムを用いたレベル2の一次近似2次モーメント法により得られる。その手順は次の通りである。まず目標信頼性指標 $\beta$ を選び、ある $CV_w$ の範囲において信頼性解析を行う。算出された $\phi_c$ と $CV_w$ のプロットを作り、一定であるかどうかを確かめ、次に $CV_w$ の関数として $\phi_c$ を表にする。表2は、LRFD仕様書に対する耐力係数の例である。選択された目標信頼性指標は多くの工学的パラメータや判断に基づいたものである。例えば、その指標の一般的なレベルは基礎となる信頼性の計算方法や仮定した分布形状によって影響を受ける。計算された $\phi_c$ と $CV_w$ の間の関係に影響するその他のパラメータ、例えば目標の荷重条件（例えば活荷重や雪荷重）、適切な荷重比（例えば、活荷重と死荷重の比や雪荷重と死荷重の比）、面積などは重要である。目標指標は構

造の50年間の寿命に基づいて選ばれる。また、一連の主要な構造部材について検討される。目標信頼性指標2.4は、製品の5%値の曲げ強度特性に用いられる。 $K_R$ を決定するために「木質構造のLRFD-仮規格の報告」に与えられた荷重の分布を用いて死荷重+活荷重についての信頼性解析が行われた。この荷重条件と活荷重と死荷重の比が3であることが、ASCE 7-88の範囲に提案された構造物に用いられる木質材料の信頼性評価のための適切な基礎となった。

X 1.7.8 目標信頼性指標は、ASTMに記された除数(2.1)の場合について計算された。ASTMの除数が2.1からかなり離れている場合、その相違はASTMの試験における応力計算と実大部材の応力との差を説明する定量的な因子であると考えられている。その一例が、せん断に対する大きな除数の値である。4インチ平方のせん断試験体から得られた結果は、構造用寸法のそれと全く関係しない。したがって、この仕様書においては、ASTMの除数の違いは目標信頼性指標の違いを生み出さず、単に手順のどこにも示されていないその他の因子を調整するためのものであると仮定する。これにもとづいて、ASDに用いられているものと同様のLRFDにおける共通の尺度を保つことが必要である。

X 1.7.9 曲げに対する表中の $K_R$ の値は、この手法で決定されたものである。その他の特性に対する信頼性正規化係数は、曲げの $K_R$ 値をASTMのASDの調整係数に基づいてスケーリングする事によって得られたものである。

X 1.7.10 スケーリングは、その他の特性に対して同等の $\phi_c$ を、次のように与える。

$$\phi_c = [2.1 / A] [(K_R)(\phi_c)]_{\text{bending}}$$

ここで、Aは次の表より与えられる。

材料の特性	許容応力設計 調整係数、A
圧縮、めりこみ	1.9
曲げ、引張	2.1
せん断-製材	4.1
せん断-SCL	3.15
せん断-Iビーム	2.37

例えば、表 3 は  $CV = 17\%$  のときの曲げに対して 1.212 の  $K_R$  の値を与えている。

X 1.7.11 同じ変動係数の圧縮に対する  $K_R$  値は次のようにして決定される。

$$\phi_o = [2.1 / (1.9)] [(1.212)(0.85)] = 1.139$$

$$K_R = \phi_o / \phi_s = 1.139 / 0.9 = 1.265$$

X 1.7.12 許容応力設計に比較して、LRFDにおけるいくつかの変更点 ( $\beta$  の選択、荷重係数、時間効果係数、耐力の  $CV_w$ ) は設計法のある程度の変更を伴う。表 3 の係数はこれらの変数を何度も計算して得られたものである。これらの最終的な係数は、信頼性に基づく LRFD システムを導入することによって生じる変更を最小限に押さえるものである。もし雪荷重の屋根が  $S/D = 3$  で  $CV_w$  が  $\approx 17\%$  の時、(A SD に比較して) ほとんど同じ様な部材設計が生じる。表 3 の値の基礎になった決定の背景は、グロマラらによって議論されている。

-----

#### ノート X 1.1—LRFD の基準耐力の算出—

次の例は、 $\beta = 2.4$  の目標信頼性をもった曲げ部材に対する LRFD の基準耐力を与えるものである。式 (1) に示したように基準耐力 ( $R_n$ ) を計算するには、3 つの量の計算が必要である ( $R_p$ 、 $\Omega$ 、 $K_R$ )

$R_p$  の計算—式 (2) に示したように、 $R_p$  はワイブル分布の 2 つのパラメータ ( $\alpha$  と  $\eta$ ) の関数である。付録 X 2 では、これらのパラメータを求める 2 つの方法を示している。100 個の曲げ試験体の破壊応力のデータの例について、形状パラメータ ( $\alpha$ ) は 5.75 で、尺度パラメータ ( $\eta$ ) は 3425 psi であった。ワイブルのパラメータを式 (2) に代入し  $R_p$  を計算する。このデータ群では 5 パーセント値は 2043 psi であった。

$\Omega$  の計算—表 1 は色々なサンプル数と変動係数に対する  $\Omega$  の数値を与えるものである。上の例では、 $n=100$  で、変動係数は式 (3) に示された形状パラメータから直接計算される。 $\alpha = 5.75$  のとき、 $CV_w$  は 0.20 で、 $\Omega = 0.94$  である。

$K_R$  の計算—表 3 は色々な  $CV_w$  に対する  $K_R$  の数値を与えるものである。 $CV_w$  が 0.20 のこの例では、 $K_R$  は 1.168 である。式 (1) から、LRFD の基準耐力は次のようにして求められる。

$$R_n = [(0.94)(1.168)(2043)]$$

$$R_n = 2243 \text{ psi}$$

-----

## X 2 . パラメータの推定手法

### X 2 . 1 最尤法

X 2 . 1 . 1 この方法は、完全データの場合にも下限裾野のデータの場合にも、パラメータ推定のために用いられる。またこの方法は繰返しの手法に対する収束条件も定義している。

まず、 $n$ 個のデータのうち $n_c$ について（順に並べた後）

$$n_c = n - n_o$$

ここで：

$n_c$  = 解析に用いられるデータの数（完全データの場合は $n_c = n$ ）

$n_o$  = 用いないデータの数

各データポイントは最大のデータ値 $r_c$ に割り当てられる。

X 2 . 1 . 2 有効なデータからCV ( $s/x$ ) を計算する。このCVは推定手順の初期値にのみ用いられる。 $(1/\alpha)$ を用いてCVを推定する。

$$(1/\alpha) = \frac{\sum r_i^\alpha \ln(r_i) + n_o r_c^\alpha \ln(r_c)}{\sum r_i^\alpha + n_o r_c^\alpha} - \frac{\sum \ln(r_i)}{n_c}$$

その後、上の式を $\alpha$ を更新しながら、100回繰返す。あるいは、 $(1/\alpha)$ の絶対値の変化が0.00002以下になるまで繰返す。そして、

$$\eta = [ (\sum r_i^\alpha + n_o r_c^\alpha) / n_c ]^{(1/\alpha)}$$

ここで、すべての総和は $i = 1$ から $n_c$ までである。

### X 2 . 2 最小2乗法

X 2 . 2 . 1 この方法は、完全データの場合にも下限裾野のデータの場合にも、パラメータ推定のために用いられる。まず、 $n$ 個のデータのうち $n_c$ について（順に並べた後）

$n_c$  = 解析に用いられるデータの数（完全データの場合は $n_c = n$ ）

$$(1/\alpha) = \frac{n_c \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n_c \sum x_i x_i - \sum x_i \sum x_i}$$

また、

$$\eta = \exp [ (\sum y_i) / n_c - (1/\alpha) (\sum x_i) / n_c ]^{(1/\alpha)}$$

ここで、すべての総和は $i = 1$ から $n_c$ までである。

### X 3 . 正 確 な 変 動 係 数 の 計 算 方 法

X 3.1 変動係数は表 X 3.1 に示されたワイブルの形状と尺度パラメータの値を用いるか、コンピュータによる同等の関数を用いて計算することができる。

$$C V_w = \frac{\eta [\Gamma \{ 1 + 2 (1 / \alpha) \} - \Gamma \{ 1 + 2 (1 / \alpha) \} ]^{(1/2)}}{\eta \Gamma \{ 1 + (1 / \alpha) \}}$$

表 X 3 . 1    ガンマ関数の値

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx ; \Gamma(n+1) = n \Gamma(n)$$

n	Γ(n)	n	Γ(n)	n	Γ(n)	n	Γ(n)
1.00	1.00000	1.25	0.90640	1.50	0.88623	1.75	0.91906
1.01	0.99433	1.26	0.90440	1.51	0.88659	1.76	0.92137
1.02	0.98884	1.27	0.90250	1.52	0.88704	1.77	0.92376
1.03	0.98355	1.28	0.90072	1.53	0.88757	1.78	0.92623
1.04	0.97844	1.29	0.89904	1.54	0.88818	1.79	0.92877
1.05	0.97350	1.30	0.89747	1.55	0.88887	1.80	0.93138
1.06	0.96874	1.31	0.89600	1.56	0.88964	1.81	0.93408
1.07	0.96415	1.32	0.89464	1.57	0.89049	1.82	0.93685
1.08	0.95973	1.33	0.89338	1.58	0.89142	1.83	0.93969
1.09	0.95546	1.34	0.89222	1.59	0.89243	1.84	0.94261
1.10	0.95135	1.35	0.89115	1.60	0.89352	1.85	0.94561
1.11	0.94739	1.36	0.89018	1.61	0.89468	1.86	0.94869
1.12	0.94359	1.37	0.88931	1.62	0.89592	1.87	0.95184
1.13	0.93993	1.38	0.88854	1.63	0.89724	1.88	0.95507
1.14	0.93642	1.39	0.88785	1.64	0.89864	1.89	0.95838
1.15	0.93304	1.40	0.88726	1.65	0.90012	1.90	0.96177
1.16	0.92980	1.41	0.88676	1.66	0.90167	1.91	0.96523
1.17	0.92670	1.42	0.88636	1.67	0.90330	1.92	0.96878
1.18	0.92373	1.43	0.88604	1.68	0.90500	1.93	0.97240
1.19	0.92088	1.44	0.88580	1.69	0.90678	1.94	0.97610
1.20	0.91817	1.45	0.88565	1.70	0.90864	1.95	0.97988
1.21	0.91558	1.46	0.88560	1.71	0.91057	1.96	0.98374
1.22	0.91311	1.47	0.88563	1.72	0.91258	1.97	0.98768
1.23	0.91075	1.48	0.88575	1.73	0.91466	1.98	0.99171
1.24	0.90852	1.49	0.88595	1.74	0.91683	1.99	0.99581
						2.00	1.00000

アメリカ材料試験協会は、この規格の中で述べられた品目に関連して主張される特許権の有効性を尊重する立場にない。この規格の使用者に、このような特許権の有効性の決定および、権利の侵犯のリスクは、全く彼等の責任であることを明白に通知する。

この規格は、責任ある技術委員会によって改訂を受けることがあり、また、5年毎に再検討されねばならない。もし改訂されない場合は、再承認されたか、または撤廃されたかのいずれかである。

この規格の改訂、または追加規格に関する皆様の見解は尊重されます。ASTMの本部に宛ててお送り下さい。皆様の見解は、出席が可能な責任ある技術委員会の会合まで、注意深く考慮されることとなります。もし皆様が、見解が公平な聴聞を受けなかったと考えられるなら、その意見を〒19103 ペンシルバニア州、フィラデルフィア州、レース街、1916番地のASTM規格委員会にお知らせ下さい。

## あとがき

本事業委員会は、これまで国産OSBの可能性を検討し、市販ボード原料をコアに、小径間伐材から調製されたストランドをフェイスにした3層表層配向OSBの製造技術の確立を目指してきた。

平成7年度は、実大三層OSBの適性熱圧条件の検討や耐久性の検討など、昨年度に引続いて行われている課題に加え、木質パネルの面内寸法安定性や高断熱性低密度ファイバーボードの開発などの新たな課題にも取り組んだ。

本報告は、本年度に実施した調査・研究の成果を取りまとめたものである。関係各位の参考になれば、幸甚である。

なお、木質パネルの面内寸法安定性プロジェクトは、パネルの平面方向の膨張収縮に関する検討であり、社会的要請の強い今日的な課題である。ラワン／針葉樹合板からOSB、パーティクルボード、ファイバーボードにいたる9種類の内外装用パネルを対象試料として、感湿範囲の平衡含水率の測定をはじめ、線膨張率測定のための装置の試作、測定方法の検討などを行った。多くの研究機関に加え、ボード製造メーカーならびにハウスメーカー等、企業も参加し、総合的、組織的研究活動の端緒に着いたばかりであり、今後の研究の進展を期待したい。

最後に、ご多忙のなか時間をやりくりして調査、開発試験を実施し、会議に参加いただいた委員諸氏に心より厚く御礼申し上げます。また、調査資料の提供や測定用パネルの提供など、多くの便宜と協力を賜った企業各位に対し、厚く御礼申し上げます。

平成8年5月

木質建材国際化対策委員会  
委員長 川井秀一

## 第2編 孔あき合板を用いた耐力壁のせん断性能

### 1 はじめに

軸組に合板を釘着した耐力壁は、軸組と合板との力のやりとりを数多くの釘を通して行うため、筋違などによるものより応力の集中が少なく、構造耐力上優れたものと評価されている。しかし、この種の合板張り耐力壁は、軸組に直に合板を張らないと、その性能を発揮できないもので、これによって壁内換気をさまたげ、壁内結露を引き起こすなど耐朽性の面から問題が指摘されているところである。

その対応策の一つとして、合板に孔をあけ壁内換気を図るというものがある。しかし、合板は応力を分担する構造部材であり、これに孔をあけたものは耐力低下が予想される。この孔の影響についての研究は従来殆ど行われておらず、実用化を図るためには、実験などを含めた検討が必要である。

本研究は、孔あき合板を用いた耐力壁の水平せん断試験を行い、耐力に与える孔の影響を調べようとするものである。

### 2 試験方法

耐力壁のせん断性能をみるため、JIS A1414面内せん断試験Aを行うことにした。

試験体軸組寸法は、図1に示すように2440×1820mmで、柱、土台、桁は断面105×105mmのJAS構造用1級集成材（スプルース）である。柱間隔は910mmで間柱は用いていない。合板は厚さ9mm（5プライ）構造用合板1級で、寸法は2430×910mmである。

試験体として、孔の直径と孔の間隔を変えた合板、及び標準のものとしての孔のない合板を張ったものを用意した。孔の径とピッチ（水平、垂直方向とも同一ピッチとした）は表1に示すようなもので合計7種類である。試験体は各種類3体ずつと、標準試験体は3体、総計24体を用意した。

合板を釘着する釘はN50（JIS A5508）で、釘打ち間隔は150mmとした。水平及び垂直方向の合板における端あきは25mmである。

せん断試験の方法を図2に示す。試験体を2本のアンカーボルトで加力フレームに固定し、加力側にタイロッドを設けた。タイロッドの位置は加力側柱中心より115mmの所である。加力はオイルジャッキにより行い、加力スケジュールは試験体の真のせん断ひずみが1/300、1/200、1/120、1/60の点で折り返す片側繰り返した。せん断ひずみ1/60で折り返した後は、復原力の急速な低下がみられるところまで荷重を加えた。荷重はロードセル、変位は歪ゲージ式変位計により計測した。せん断試験の模様を写真1に示す。

### 3 試験結果と検討

試験体の変形を計測して、変位データを用いて次の用に定義する。

・見かけのせん断ひずみ

$$\gamma_1 = (H_1 - H_2) / DA$$

・回転ひずみ

$$\gamma_2 = (V_2 + V_1) / DB$$

・真のせん断ひずみ

$$\gamma_3 = \gamma_1 - \gamma_2$$

記号は図2参照のこと。

見かけのせん断ひずみとせん断荷重との関係を図3～図10に、真のせん断ひずみとせん断荷重の関係を図11～図18に示す。なお、図中曲線上の×印は、復原力が急激に低下する限界点（終局限界）を示したものである。またこれらデータを基に求めた特定せん断ひずみに対するせん断力、最大耐力、壁倍率などを表2に示した。壁倍率は、表2第5欄のひずみ1/300のときの耐力と、第13欄の\*1及び第16欄の\*4の値のうちで最も低い値を用い、これに3/4及び1/130を乗じて求めたものである。今回の実験ではひ

ずみ1/300時の耐力がいずれも最も低い値を示していた。

#### (1) 孔面積と耐力との関係

合板に明けた孔の総面積と耐力との関係を図19に示した。この図から孔あき合板耐力壁の耐力は、孔のない標準耐力壁に比べて、許容耐力、最大耐力ともに低下していることが分かる。しかし孔あき合板だけで比較してみると、孔の大きさ、面積と耐力との関係はそれ程明らかではない。最大耐力にあっては孔面積の増大に伴って耐力が低下する傾向を示しているようであるが、これも有意なものとはいえないようである。

孔あけによる耐力の低下は最大耐力、許容耐力とも16%であった。試験体の破壊は、いずれも合板を釘着した釘の軸材からのひき抜けであり（写真2、3）、このことより最大耐力においては孔の影響はないと考えられるが、実際には上述したような耐力の低下がみられた。許容耐力の低下は、孔あけにより合板自身のせん断剛性が低下したことによるものと思われる。この影響の定量的評価については、更に今後の研究が必要である。

#### (2) 壁倍率について

表に壁倍率を載せているが、孔あき合板試験体を全て平均すると2.08、標準試験体は2.48であった。孔あけによる壁倍率の低下は16%である。今回の実験の範囲に入る孔あき合板による耐力壁の倍率は2.0程度と評価できよう。

#### (3) 安全率について

壁倍率算定に用いた許容耐力で最大耐力を除いた値を安全率と定義すると、これは、孔あき合板試験体で1.83、標準試験体で1.82であった。両者には差はなく、孔あき合板による耐力壁は標準耐力壁と安全率については同等であると評価できよう。

#### (4) 終局限界の比較

図20は、特定せん断ひずみに対応するせん断耐力及び最大耐力とそれに対応するせん断ひずみ、さらに終局限界の耐力とせん断ひずみの平均値を

標準試験体と孔あき合板試験体についてプロットしたものである。この図から、孔あき合板試験体は変形の初期段階から最終段階に至るまで耐力が低いこと、最大耐力から終局限界に至るまでの変形量は標準のものより大きいことが読み取れる。孔あき合板試験体の方が靱性が大きいというこの現象の説明はいまのところ不明である。

#### 4 結論

孔あき合板耐力壁と、孔のない合板耐力壁のせん断試験結果を比較して次のような結論を得た。

- 1 孔あけによって、最大耐力は16%低下した。
- 2 孔あけによって、壁倍率は16%低下した。
- 3 本実験の範囲においては、孔あき合板耐力壁の相互の耐力に差の傾向はみられなかった。
- 4 安全率は、両者に差はみとめられなかった。
- 5 終局限界のせん断ひずみは、孔あき合板耐力壁で $4.9 \times 10^{-3}$  (1/20)、合板耐力壁で $3.8 \times 10^{-3}$  (1/26) で、孔あき合板耐力壁の方が変形能力が高いことを示した。

#### 5 おわりに

本実験により、孔あき合板を用いた耐力壁のせん断力に対する挙動が明らかになり、壁倍率等を算定することができた。孔あき合板耐力壁の構造要素としての使用可能性が拓けたといえよう。

しかし、孔あけの影響については必ずしも全て明らかになった訳ではなく、今後さらに検討する必要があると思われる。

表1 孔の径 (D) とピッチ (a) と試験体記号

a	D = 9 mm	D = 15 mm	D = 21 mm
100 mm	A9シリーズ (98)	A15シリーズ (272)	
150 mm	B9シリーズ (48)	B15シリーズ (133)	B21シリーズ (260)
200 mm		C15シリーズ (78)	C21シリーズ (152)

孔なし : Dシリーズ

表中の ( ) 内の数値は孔の総面積 (cm<sup>2</sup>)

表2 特定せん断ひずみに対するせん断力、最大耐力、壁倍率など

試験体 ピッチ	孔直径	真のせん断ひずみに対するせん断耐力(kgf/m)				最大耐力 (kgf/m)	最大ひずみ (10 <sup>-3</sup> rad)	#1	#2	#3	#4	壁倍率	安全率	許容耐力 (kgf/m)				
		1/600rad	1/300rad	1/200rad	1/150rad													
100	9	1	272	396	467	521	560	593	640	668	32.1	445	4.35	16.05	648	2.28	1.69	297
		2	230	354	436	491	535	571	637	668	21.5	445	6.47	10.75	588	2.04	1.89	266
		3	241	362	436	483	521	554	609	618	21.1	412	4.45	10.55	566	2.09	1.71	272
	平均	248	371	446	498	539	573	629	651	24.9	434	5.09	12.45	601	2.14	1.76	278	
	15	1	173	319	426	478	497	519	532	555	24.1	370	3.93	12.05	538	1.83	1.74	239
150	9	1	275	393	473	536	574	610	654	766	35.2	511	6.00	17.60	695	2.27	1.95	295
		2	255	363	434	481	511	558	613	637	55.9	425	4.73	27.95	637	2.09	1.75	272
		3	266	357	459	511	519	588	648	665	25.3	443	4.65	12.65	621	2.06	1.86	268
	平均	265	371	455	509	535	585	638	689	38.8	459	5.13	19.40	651	2.14	1.86	278	
	15	1	245	363	451	505	555	593	670	712	28.1	475	5.79	14.05	648	2.09	1.96	272
200	21	1	261	352	451	511	558	596	659	709	49.5	473	5.68	24.75	706	2.03	2.01	264
		2	253	365	434	486	514	555	613	637	28.1	425	4.75	14.05	602	2.11	1.75	274
		3	291	407	484	541	571	604	662	723	46.0	482	4.86	23.00	690	2.35	1.78	305
	平均	268	375	456	513	548	585	645	690	41.2	460	5.10	20.60	666	2.16	1.84	281	
	15	1	250	365	451	511	530	588	670	742	42.2	495	6.14	21.10	706	2.17	2.03	274
孔なし	21	1	238	321	385	445	495	525	599	635	26.7	423	6.29	13.35	582	1.85	1.98	241
		2	236	354	418	481	519	555	615	670	38.0	447	5.63	19.00	637	2.04	1.89	266
		3	250	374	451	514	558	585	657	673	22.4	449	4.92	11.20	610	2.15	1.80	281
	平均	238	350	418	480	524	555	624	659	29.0	440	5.61	14.52	610	2.01	1.89	262	
	15	1	299	426	508	569	607	637	712	821	42.4	547	3.66	21.20	739	2.45	1.93	320
2	275	404	486	544	588	618	684	701	701	25.1	467	4.62	12.55	651	2.32	1.74	303	
3	319	464	566	615	659	703	755	835	835	32.9	557	4.89	16.45	791	2.67	1.80	348	
平均	298	431	520	576	618	653	717	786	786	33.5	524	4.39	16.73	727	2.48	1.82	324	

#1 最大耐力の2/3値(kgf/m)  
 #2 #1の時の真のせん断変形(10<sup>-3</sup>rad)  
 #3 最大ひずみの1/2値(rad)  
 #4 #3の時のせん断耐力(kgf/m)  
 ※ 安全率 = (最大耐力) / (1/300rad時の耐力)  
 許容耐力 = (3/4) × (1/300rad時の耐力)

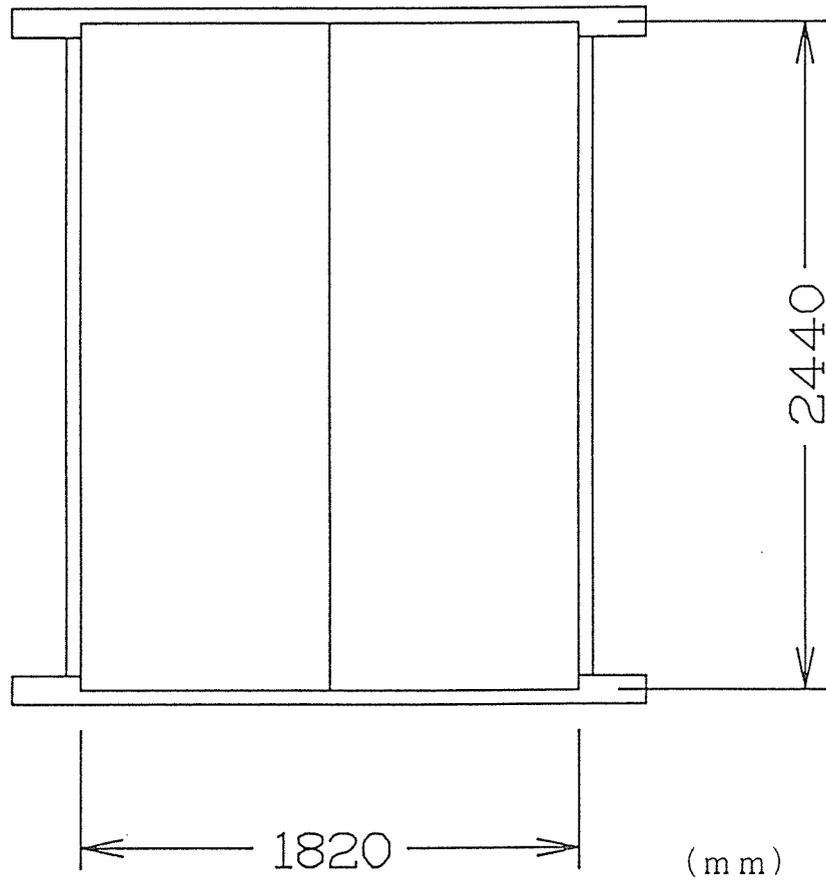


図 1 試験体寸法

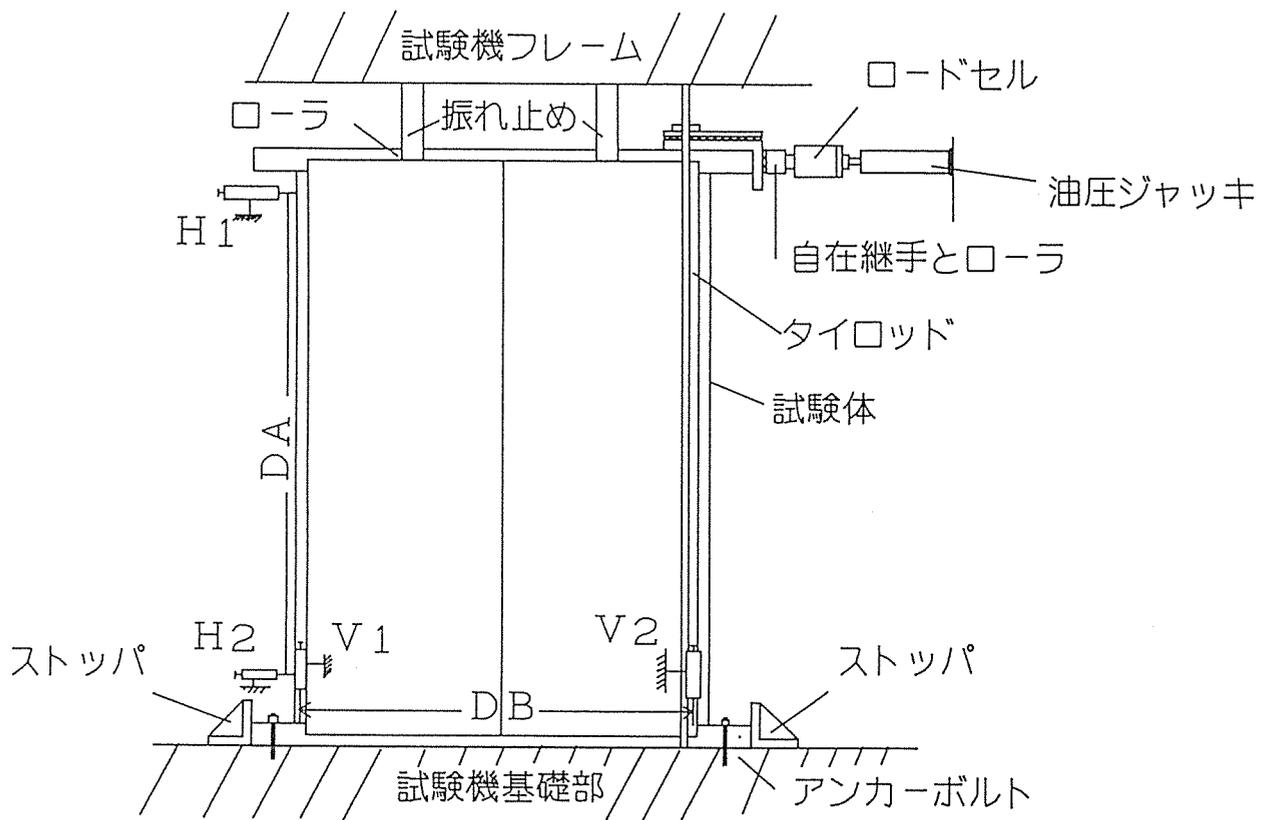


図2 せん断試験方法

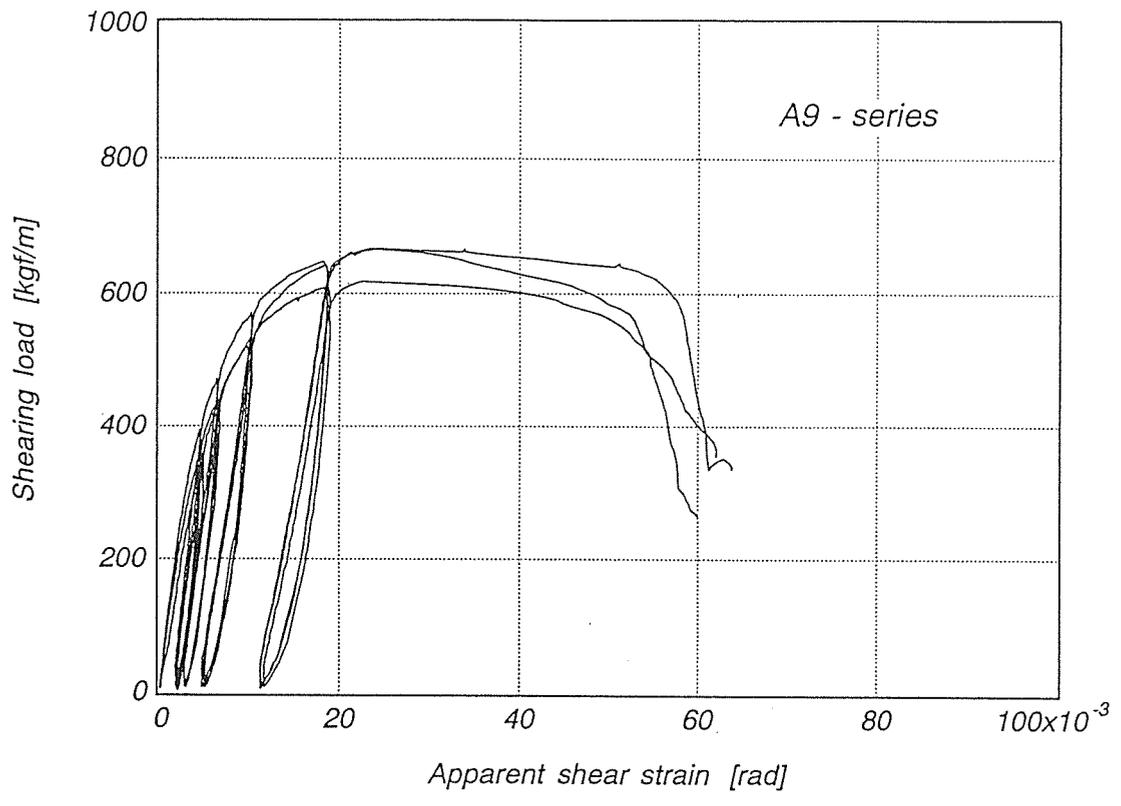


図3 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

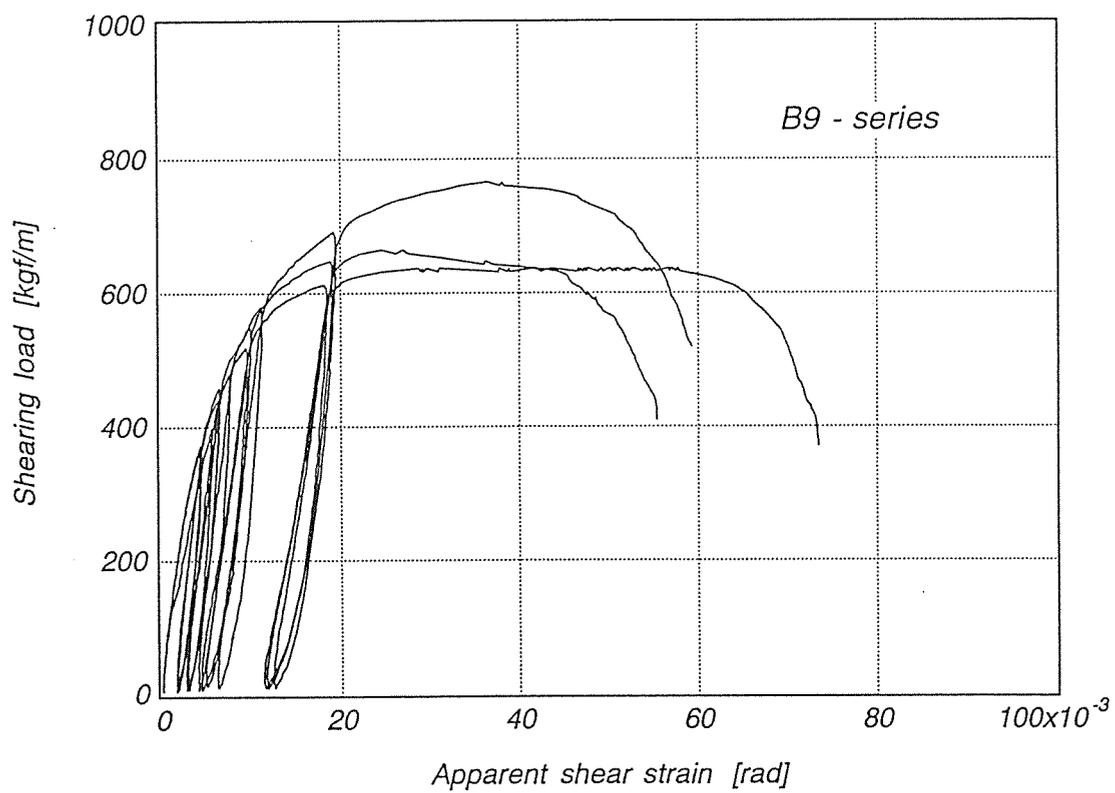


図4 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

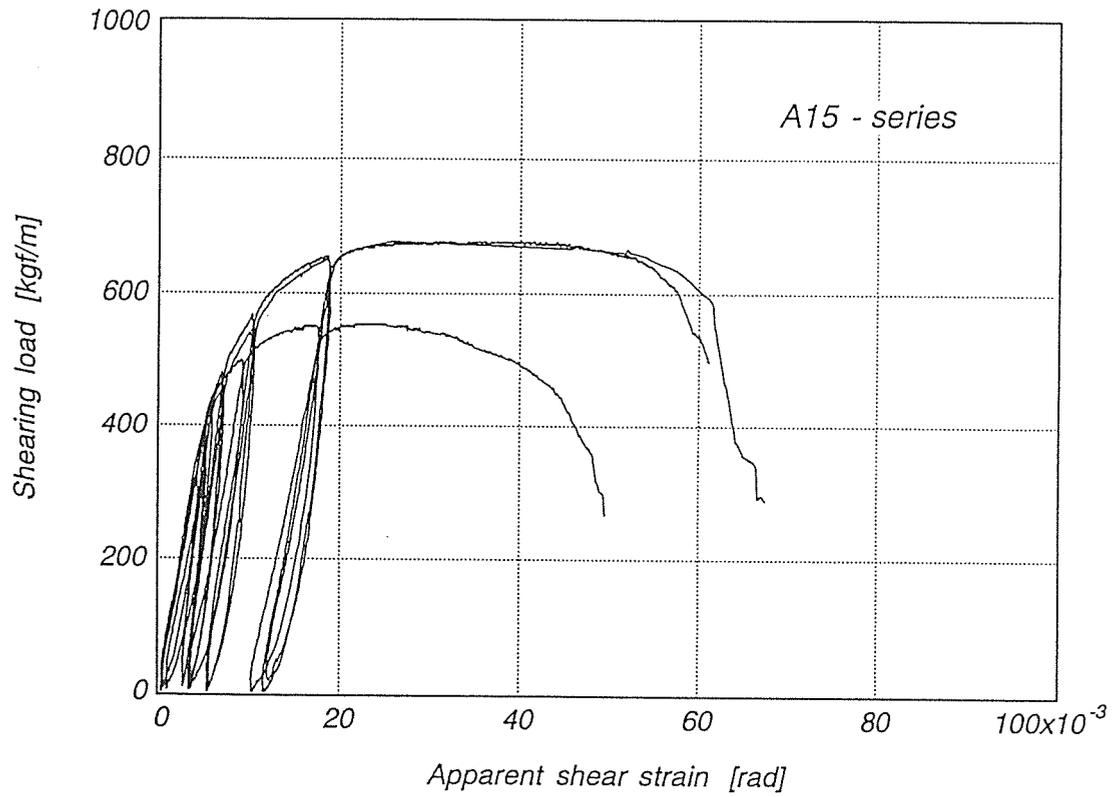


図5 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

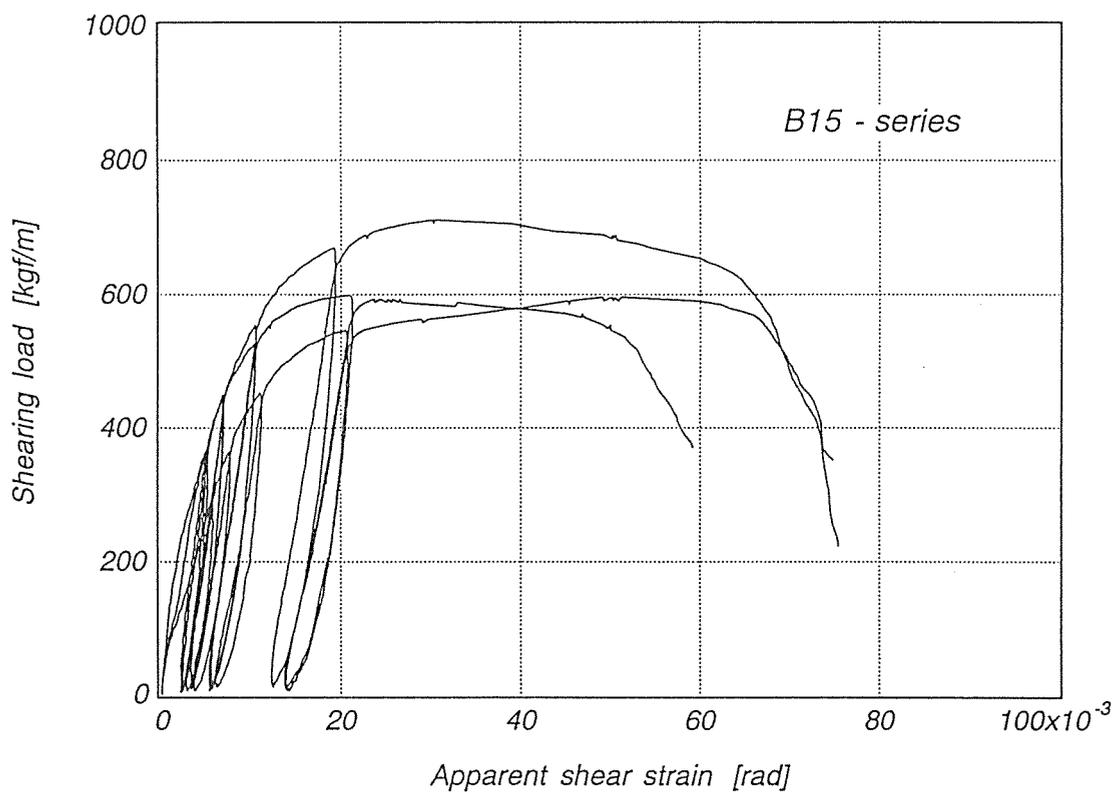


図6 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

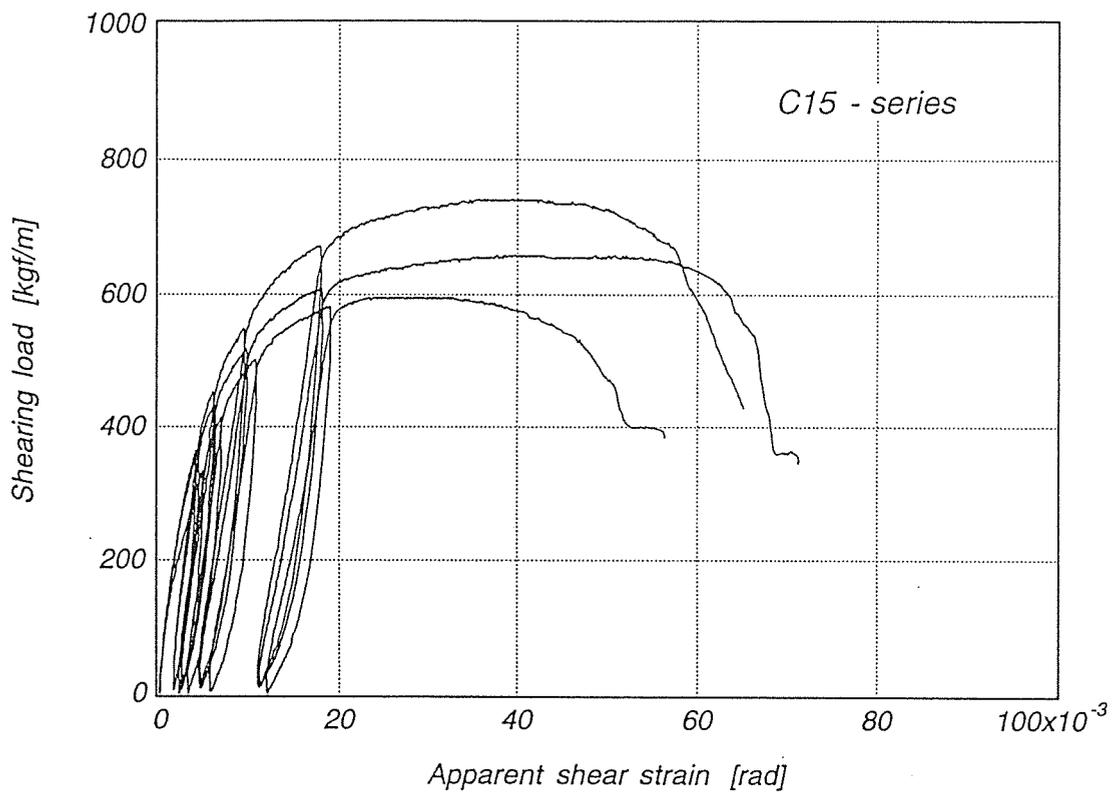


図7 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

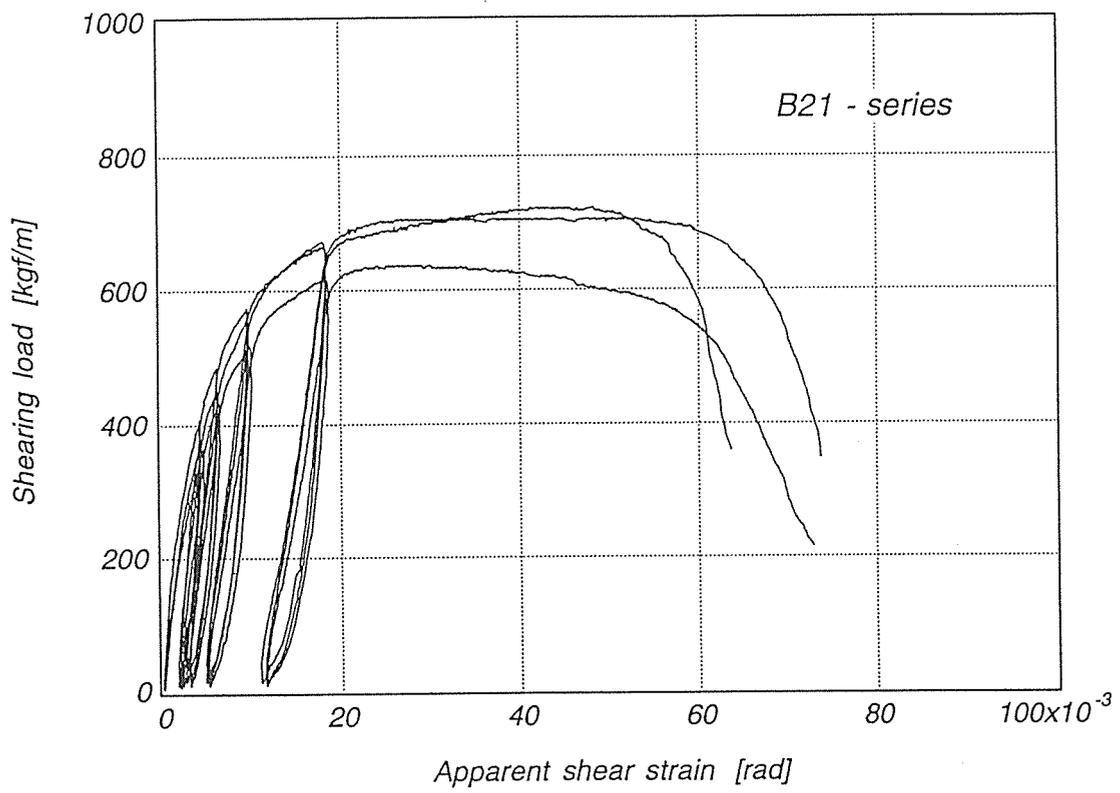


図8 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

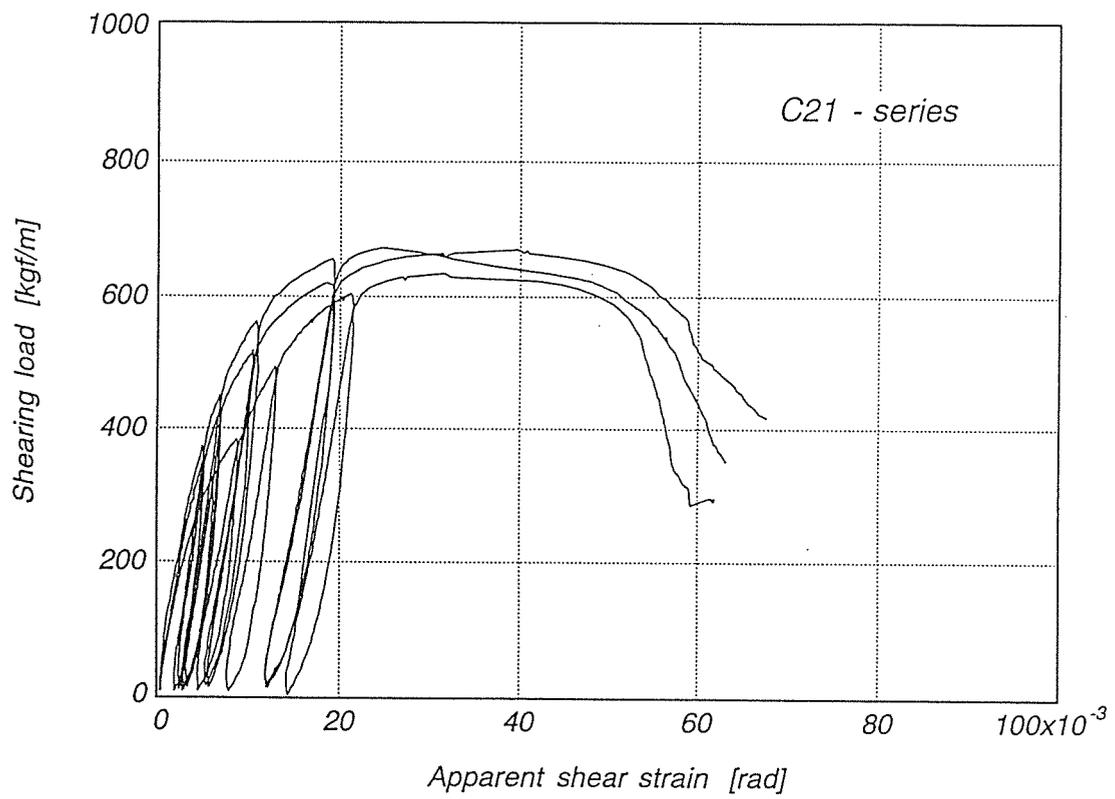


図9 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

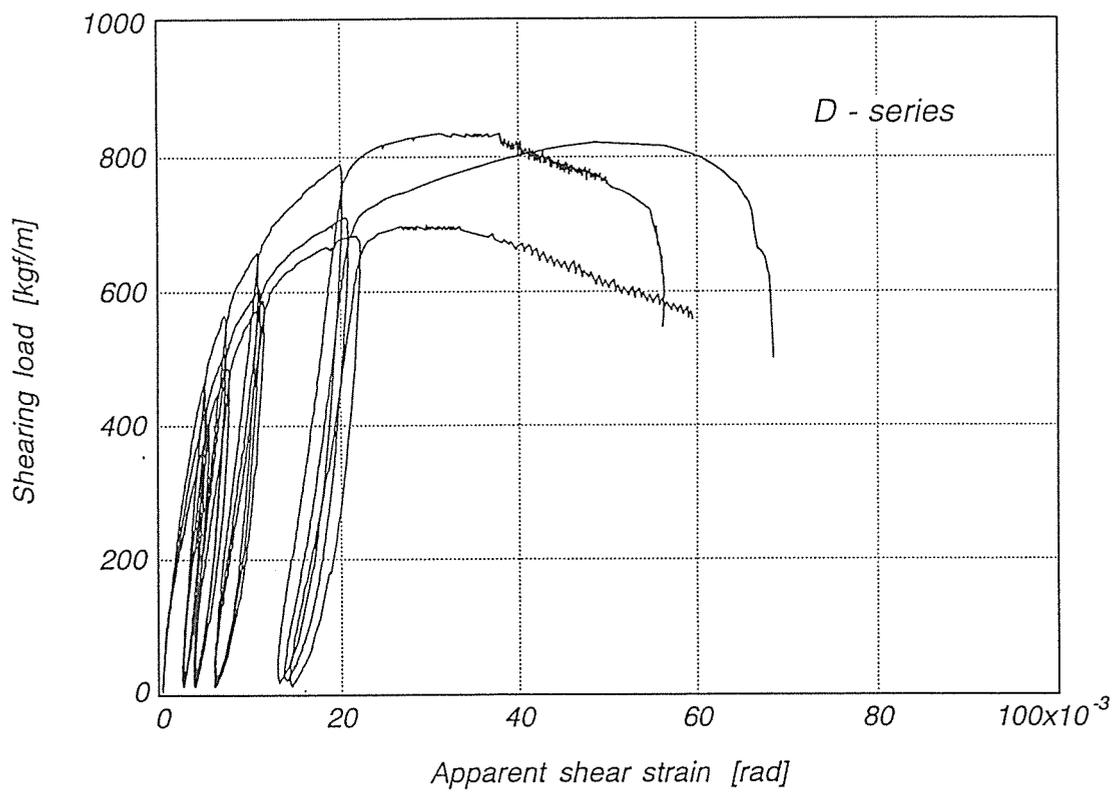


図 1 0 見かけのせん断ひずみとせん断荷重の関係

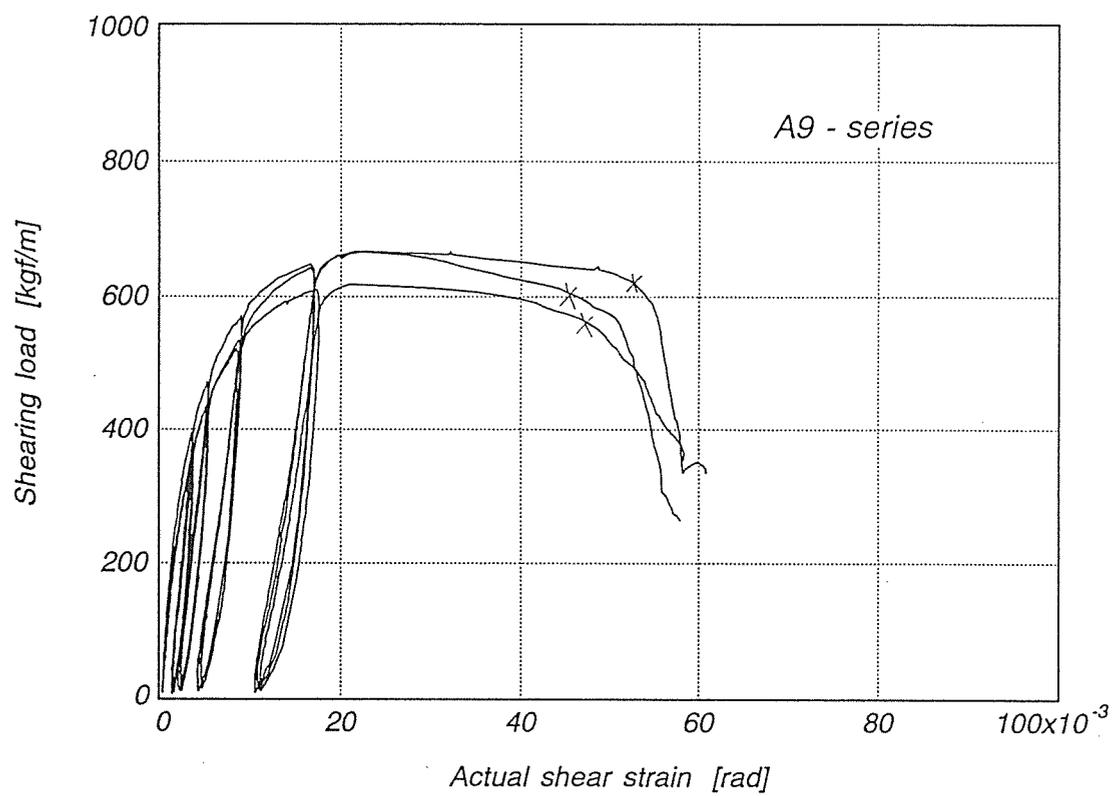


図 1 1 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

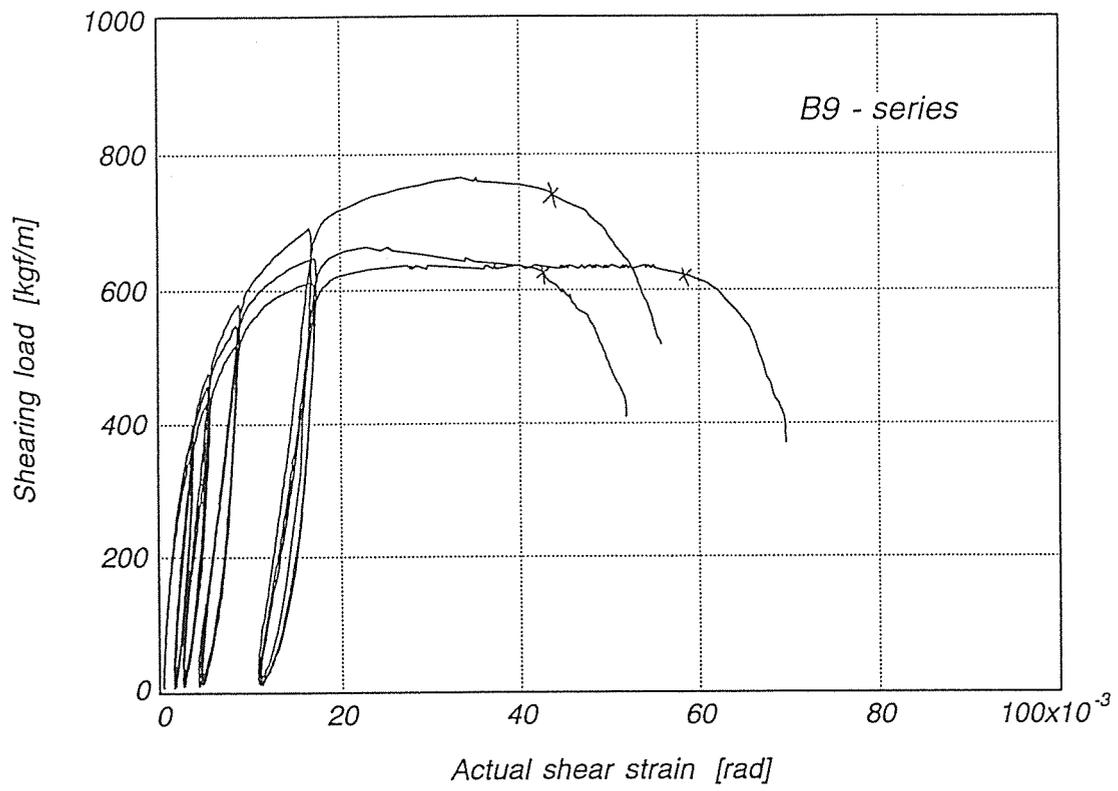


図 1 2 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

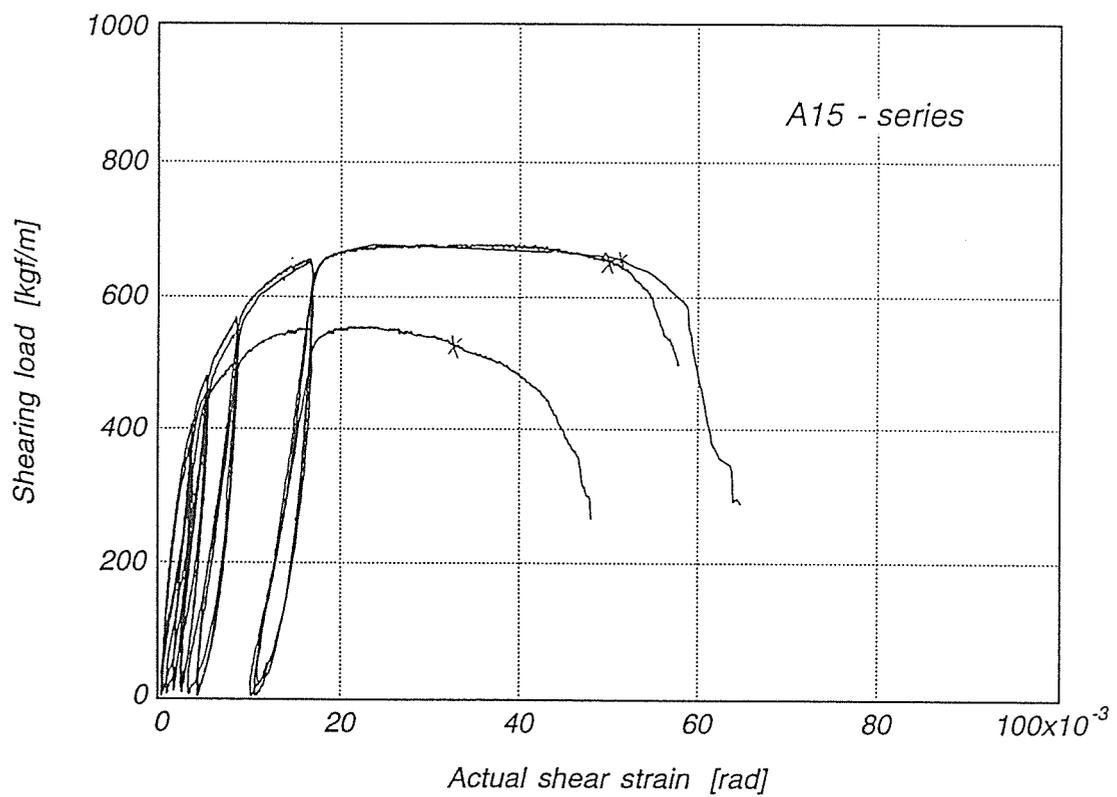


図 1 3 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

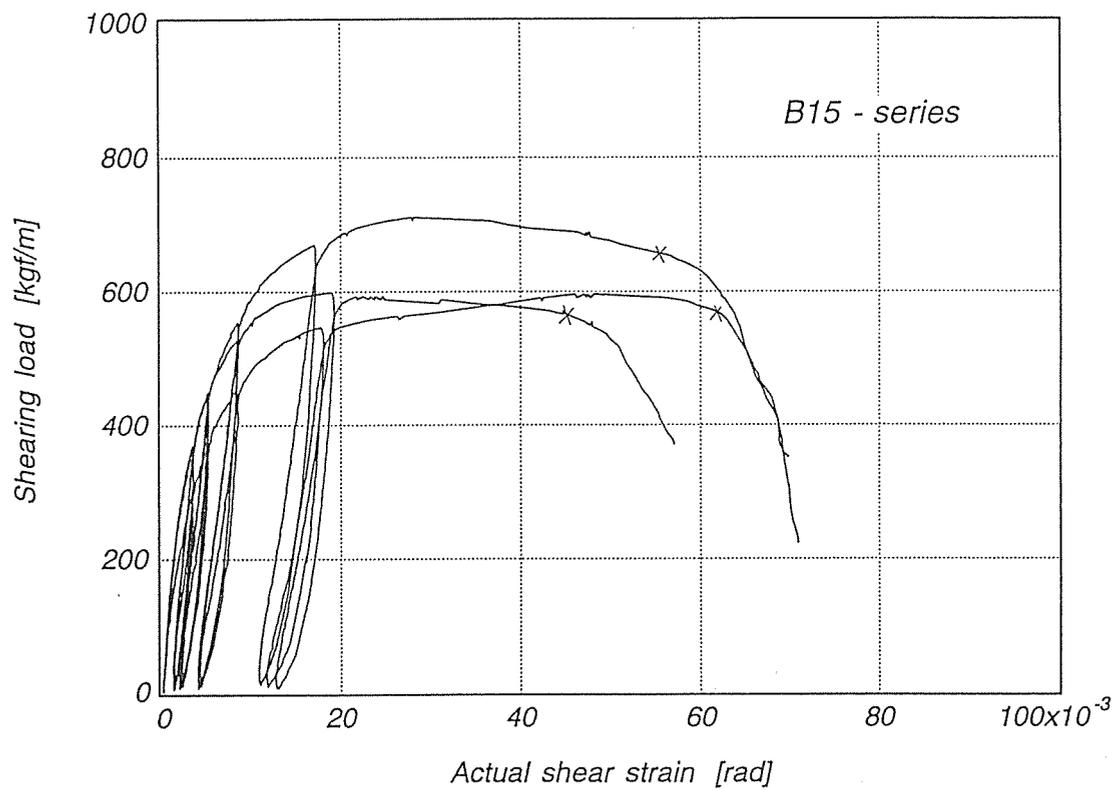


図 1 4 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

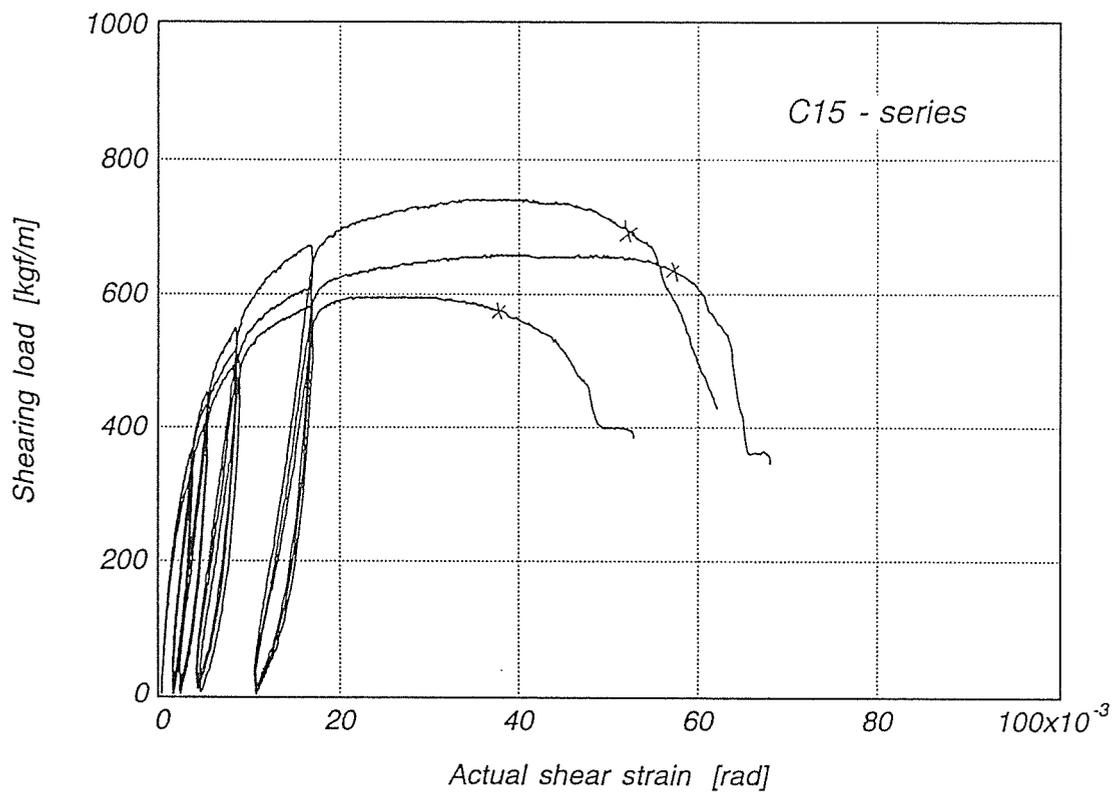


図 1 5 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

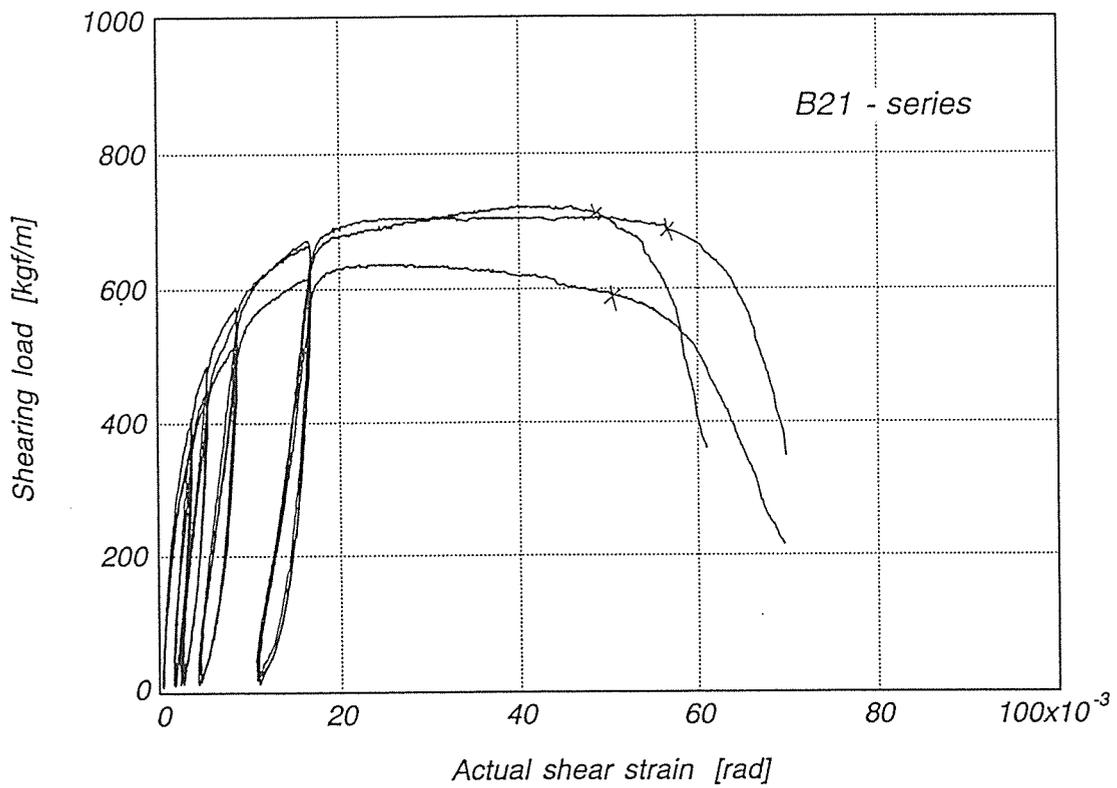


図 1 6 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

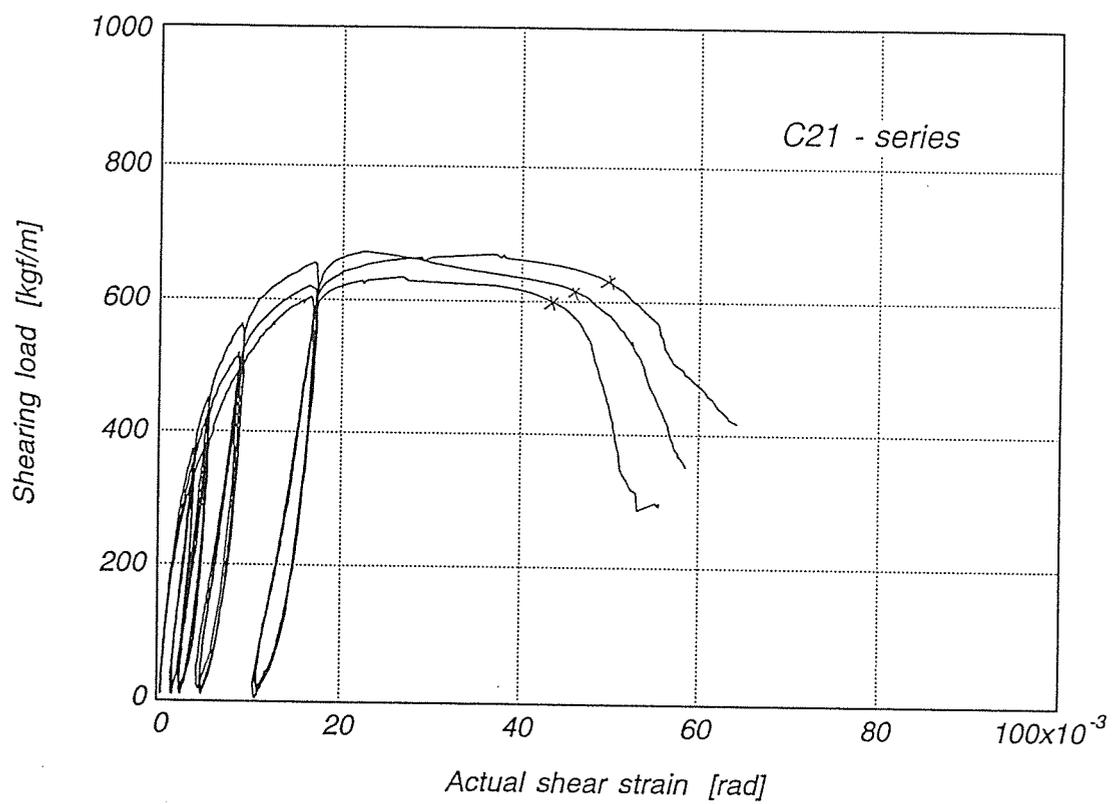


図 1 7 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

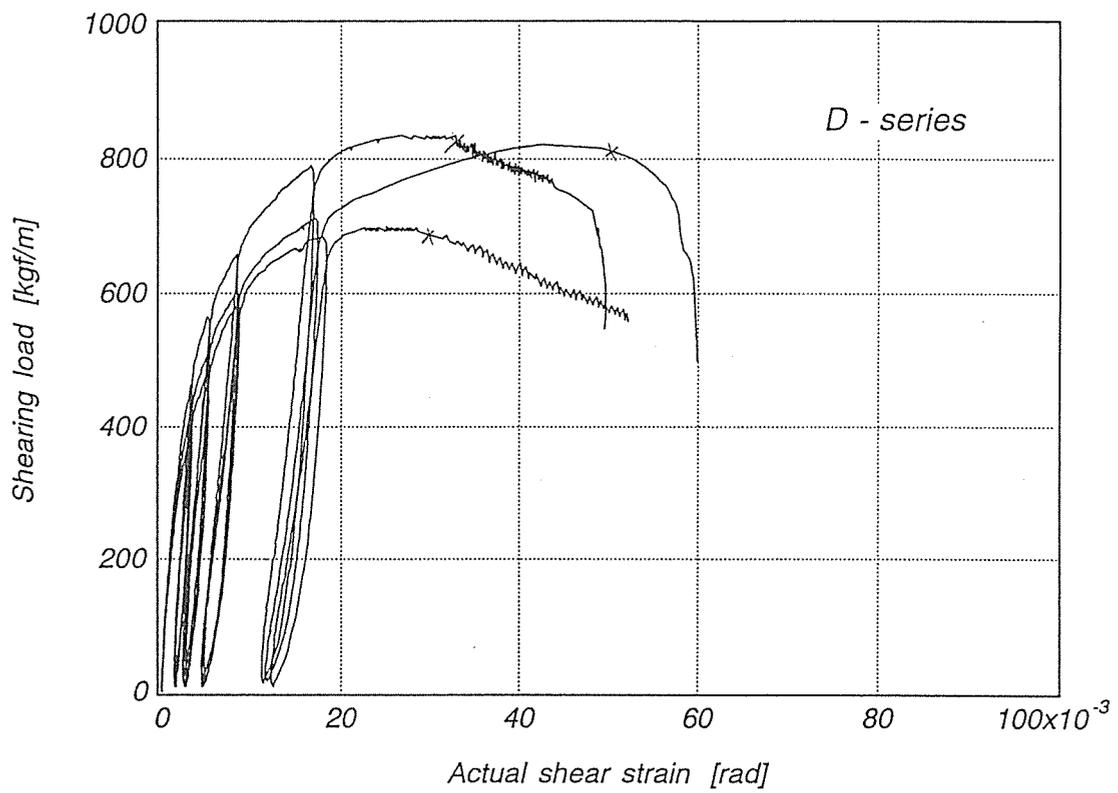


図 1 8 真のせん断ひずみとせん断荷重の関係

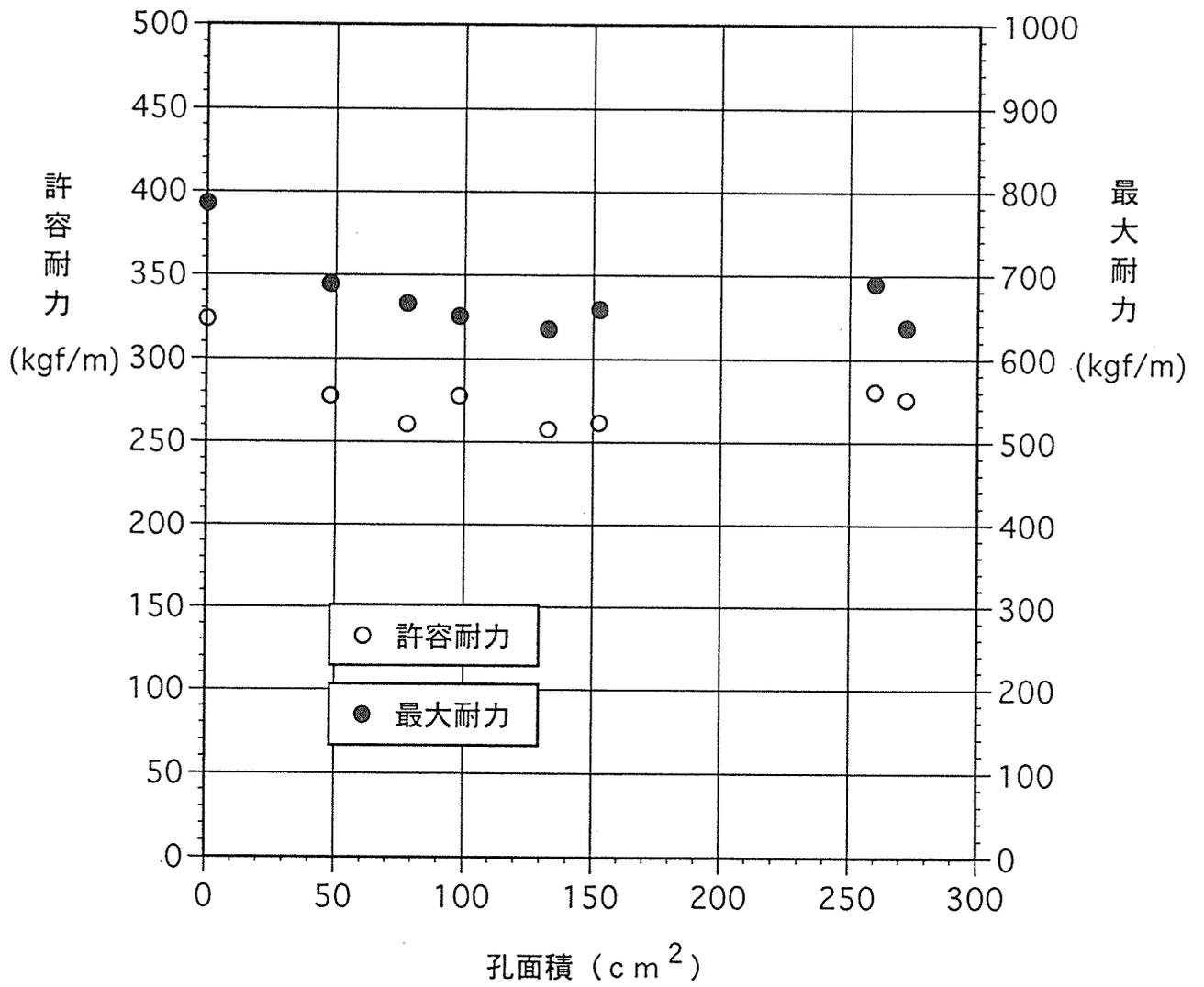


図 1 9 孔面積と許容耐力及び最大耐力の関係

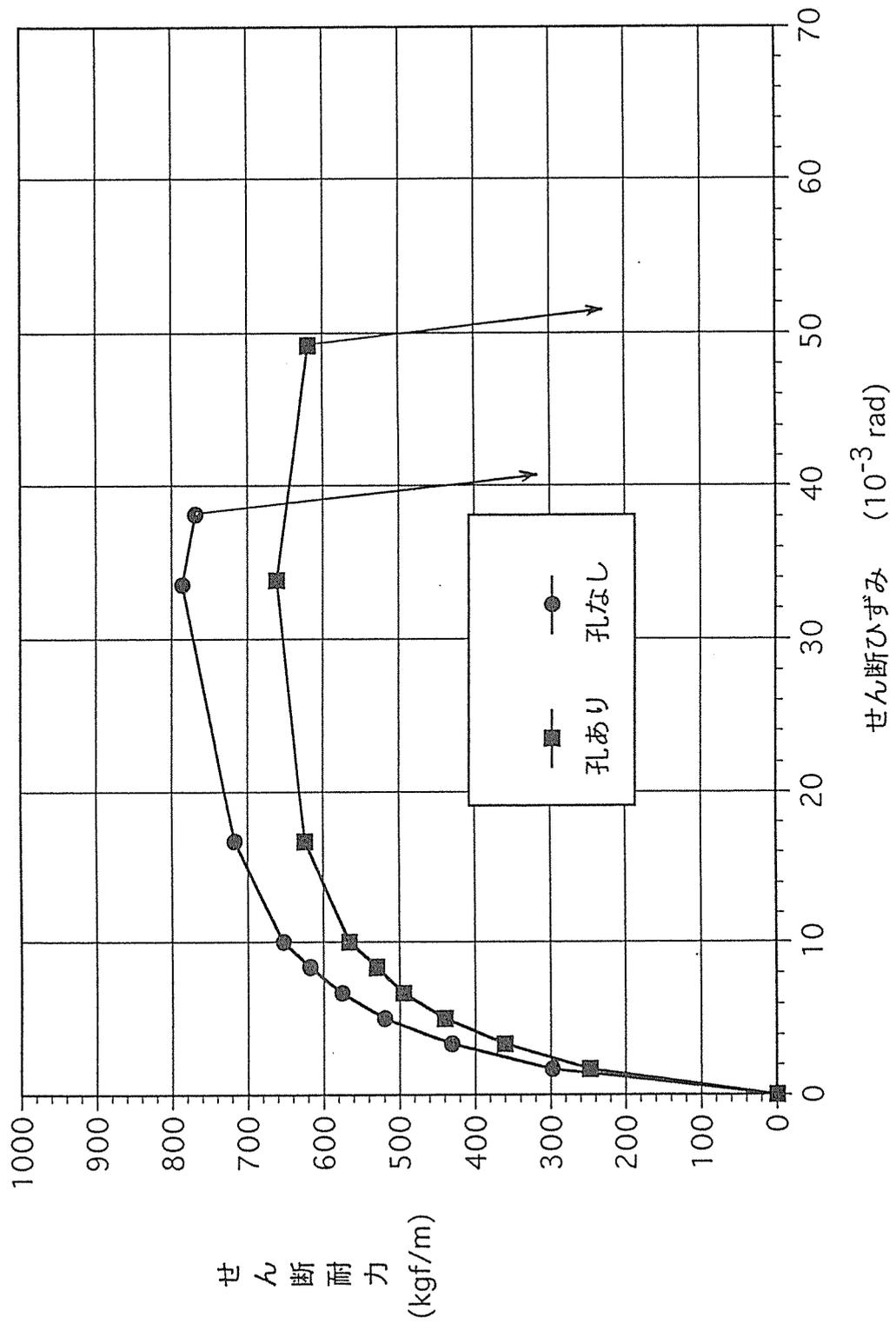


図20 耐力壁別せん断力—せん断ひずみ曲線

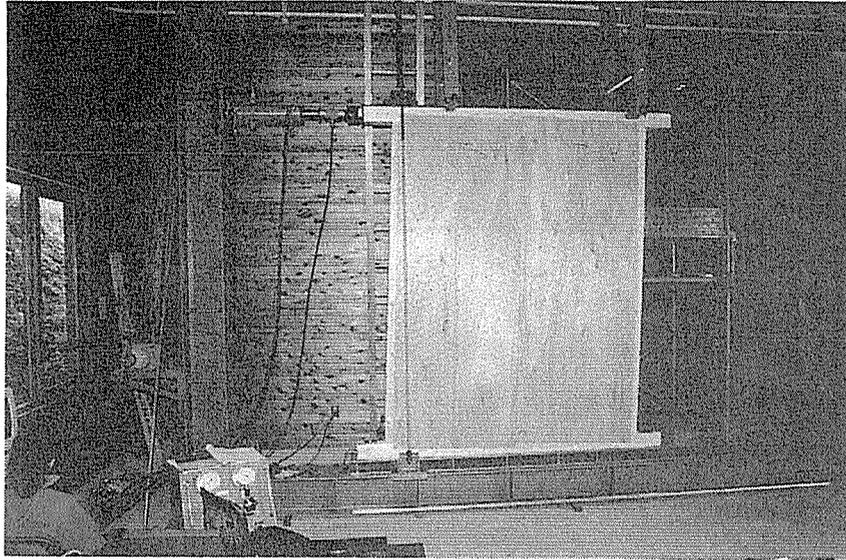


写真1 せん断試験装置

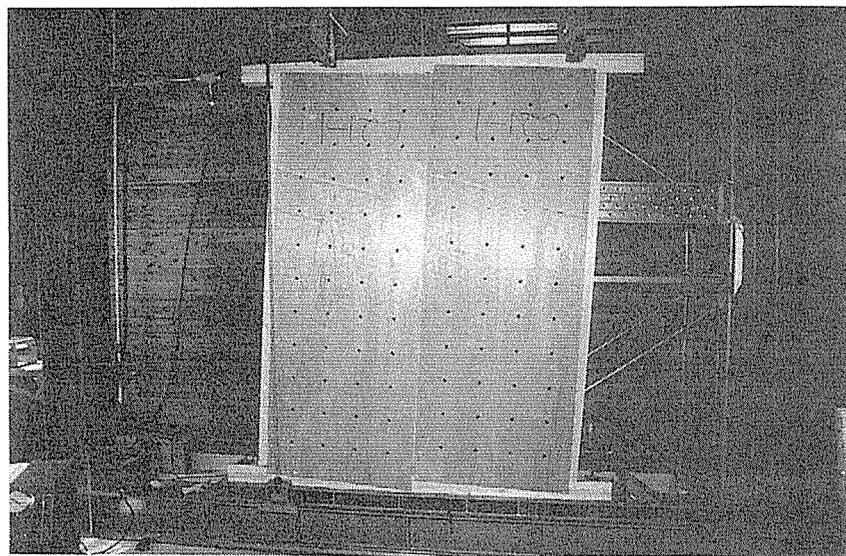


写真2 試験体の変形状況

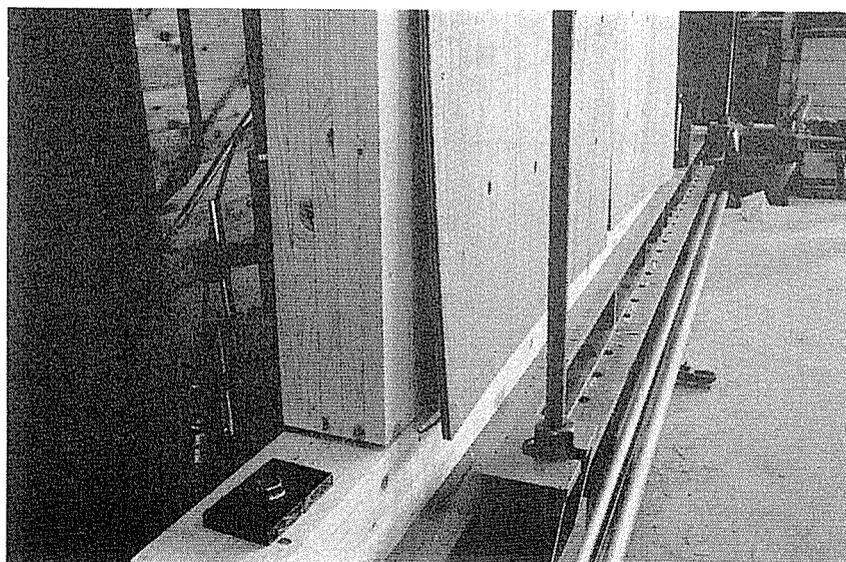


写真3 破壊状況（釘のひき抜け）

### 第3編 先進木質資材強度性能の評価方法

#### 1 はじめに

今なぜ信頼性解析を基にした限界状態設計法か

益々国際化していく日本で、住宅の内外価格差、規制緩和、相互認証、外国データの受け入れなどに対して日本政府はいろいろな政策を打ち出している。木質構造用材料について言えば貿易不均衡という理由はあるが、単に外国で使用されているからと言う理由で日本で使用すべきだと言う論理は無理があるように思われる。その場しのぎで安易に受け入れることは、技術論を先送りするばかりでなく後になって問題を残すことになる。木構造を論ずる場合、各国ではその国の持つ特殊性なども含め、いろいろな条件で異なった設計法や考え方を採用して今日に至っている。

木構造の安全性を国際間で議論するには現在日本で使用されている経験上の安全率を含む許容応力度設計法を用いては十分な議論をする事は難しい。構造の理論的な解析方法が同じでも、荷重条件や許容応力度など構造設計に必要な数値がこれまでの理論や経験から設定された日本独自の数値で、国際的に同じ土俵で正当に比較できないからである。

信頼性解析とは荷重や強度性能を確率変数と見なし確率論を援用して構造物の安全性を調べるものである。この方法によると、例えば構造材料を使用する場合には日本での確率値としての荷重、またその材料が持つ特有の確率値として与えられた性能で解析し破壊確率を求め、日本における構造物の安全性レベルから議論が出来るようになる。換言すれば、この解析方法を用いる事により異なった設計法、荷重条件、強度性能、構造方法等を確率論的に正当に比較でき、技術論で互いに議論できるようになる。

信頼性解析を基にした限界状態設計法とは信頼性解析により求めたある安全性レベルを持つ構造物を誰もが使えるようにした設計法である。現在世界的に、構造物の設計法は従来の許容応力度設計法から信頼性解析を基にした限界状態設計法に移行している。日本でもこの設計法を導入することにより国際間で調和のとれた木構造の設計が可能になる。

この報告書は北米の経験を基にして日本で限界状態設計法を導入するための考え方の骨子を纏めたものである。

## 2 許容応力度設計法と限界状態設計法

構造物を設計する場合、構造部材が荷重や外力に対して安全であると共に出来るだけ経済的であることが望ましい。部材が安全であるためには、荷重や外力によって発生する部材の内部応力が、部材の強度より小さければよい。これを確認するため従来の設計法では荷重や外力を起こり得る高い方の数値で、また強度を起こり得る低い方の数値で設定し、更に荷重や外力の不確定性を一つの安全率の中に盛り込み許容応力度を設定し計算してきた。これが許容応力度設計法である。

これに対し、荷重や外力また強度は本来バラツキを持ったものであるため、それらの不確定要素を確率論を援用し解析する方法が信頼性解析である。信頼性解析を基にした限界状態設計法とは委員会等で決定した、構造物の安全性レベルを表す目標信頼性指標（ $\beta$ ）にたいし、それを満足する構造設計をするために設計者が使いやすいよう作られた設計法である。

### 設計基本式

一般に許容応力度設計法の基本式は

$$R_a K_{LS} K_{cum} \geq \Sigma Q_i$$

ここで

$R_a$	:	許容応力度
$K_{LS}$	:	荷重期間係数（日本では長期、短期）
$K_{cum}$	:	強度調整係数
$\Sigma Q_i$	:	荷重効果

これに対し限界状態設計法では

$$\phi R_c K_{DOL} K_{cum} \geq \Sigma \alpha_i Q_i$$

ここで

$\phi$	:	性能係数
$R_c$	:	強度特性値
$K_{DOL}$	:	荷重期間係数
$K_{cum}$	:	強度調整係数
$\alpha_i$	:	荷重 $i$ の部分荷重係数
$\Sigma \alpha_i Q_i$	:	荷重効果

となる。

設計規準だけを考えると限界状態設計法及び許容応力度設計法は共に確定的な手法であり使用者は確率論を考慮しなくても設計はできる。上式に示すように根本的な違いは限界状態設計法においては設計荷重及び設計強度を部分安全係数を用いて表すことである。これらの部分安全係数は構造に対する安全性を異構造間で同等に評価できるメリットを持つ。許容応力度設計法に比べ限界状態設計法はその背景に構造物の信頼性レベル等を含んでおり技術面ではかなり改善されている。これはここ二十数年にわたる木構造の技術進歩やコンピュータによる解析などが大きく貢献している。

## 日本における限界状態設計法の現状

日本建築学会は1990年、鋼構造の限界状態設計法に関する「鋼構造限界状態設計法（案）・同解説」を出版している。現在各構造方法に対して限界状態設計法を検討している。木構造に関しては1992年から限界状態設計法にたいする研究が始まり、1994年から木構造限界状態設計法小委員会が設けられ限界状態設計法を導入するための調査研究が行われている。

また、日本建築学会は1993年6月「建築物荷重指針・同解説」を改訂している。この改訂は荷重の考え方を原則として統計データを基礎に確率統計手法に統一した12年ぶりの改訂である。それによると荷重の組み合わせは許容応力度設計法と、限界状態設計法では以下のように明確に区別されており将来の限界状態設計法についても考慮している。

### 許容応力度設計用荷重の組み合わせ

長期許容応力度設計における荷重の組み合わせ

$$(1) \text{ 常時} \quad : \quad D+L+H$$

短期許容応力度設計における荷重の組み合わせ

$$(2) \text{ 積雪時} \quad : \quad D+L+H+S$$

$$(3) \text{ 強風時} \quad : \quad D+L+H+\gamma S+W$$

$$(4) \text{ 地震時} \quad : \quad D+L+H+\gamma S+E$$

$$(5) \text{ 温度変化時} \quad : \quad D+L+H+\gamma S+T$$

ここで

$D, L, H, S, W, E, T, \gamma$ はそれぞれ固定荷重、積載荷重、土圧水圧、積雪荷重、風荷重、地震荷重、温度荷重及び積雪期間係数とする。

これに対し限界状態設計用荷重の組み合わせとして

a 終局限界状態

$$(1) \text{ 積載時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H$$

$$(2) \text{ 積雪時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S$$

$$(3) \text{ 強風時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_W W$$

$$(4) \text{ 地震時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_E E$$

$$(5) \text{ 温度変化時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_T T$$

b 使用限界状態

$$(1) \text{ 積載時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H$$

$$(2) \text{ 積雪時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S$$

$$(3) \text{ 強風時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_W W$$

$$(4) \text{ 地震時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_E E$$

$$(5) \text{ 温度変化時} \quad : \quad \gamma_D D + \gamma_L L + \gamma_H H + \gamma_S S + \gamma_T T$$

ここで  $\gamma_D, \gamma_L$  等はそれぞれの荷重に対する部分荷重係数として表されている。

また、限界状態については「限界状態とは構造物の全体又は一部が、安全性または使用性に関して、あらかじめ設定した限界に達した状態と定義されている。各構

造物に対して限界状態の定義終局限界状態や使用限界状態の一般的な考え方委員会で決定する。」とされている。

#### 木構造における限界状態の定義

日本における木構造の限界状態は未だ定義づけられていないが、一般的な限界状態は次のようなものを想定している。

##### 終局限界状態

- 構造部材の破壊

- 構造物の釣り合いが保てなくなった状態

##### 使用限界状態

- 外観からの変形

- 人体に不快感を与える振動

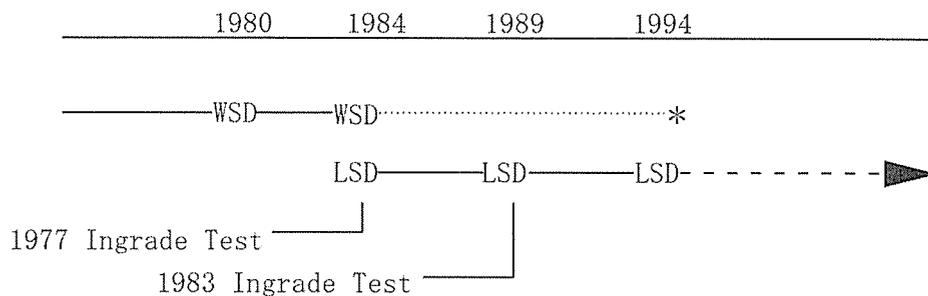
### 3 信頼性解析を基にした限界状態設計法の基本概念

#### カナダの経験

カナダで現在使用している木構造設計規準(CSA 086.1-94)は信頼性解析を基にして作られた限界状態設計法である。信頼性解析を基にした設計法を作成するには膨大な研究と時間が必要である。また許容応力度設計法で慣れた設計者にとっても急に限界状態設計法に変更されると混乱が生じる。このためカナダではソフトコンバージョンによる中間的な限界状態設計法(CAN3-086.1-M84)を作成し許容応力度設計法(CAN3-086-M84)と平行して使用できる事とした。結果的に許容応力度設計法(CAN3-086-M84)は(CAN3-086.1-M84)が作成された1984年から1994年まで使用されていた。この間にソフトコンバージョンによる限界状態設計法を信頼性解析によるものに改正したが、その殆どはCAN/CSA-086.1-M89に行われている。

これらを図示すると以下のようになる。図でWSDは許容応力度設計法を、LSDは限界状態設計法を表している。

## カナダの木構造設計規準



#### 構造信頼性の基本

確率値は確定値と異なり一つの値ではなくある確率モデルによって起こる数値とする。破壊確率を求める実際の解析はかなり複雑であるが、簡単なモデルについて述べると以下のようなものである。

荷重や外力によって生じた内部応力(荷重効果)を $U$ 、強度を $R$ とし、性能関数 $G = R - U$ で表す。性能関数 $G$ は $R > U$ の時はプラスになり構造物は破壊しない。反対に $R < U$ ではマイナスとなり構造物は破壊する。 $R = U$ の時は破壊するとしないうの境界、つまり限界状態(Limit States)になる。 $U$ 及び $R$ の関係で破壊を起こすのは下図ではハッチの箇所になる。

一般的に破壊確率 $P_f$ は信頼性指標( $\beta$ )で表され、性能関数 $G$ を正規分布として $G$ の平均値から破壊点までの距離として $P_f = \Phi(-\beta)$ で表される。

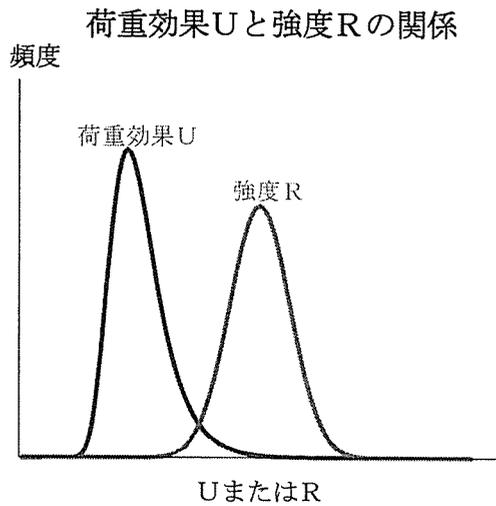
また $\beta$ は $U$ 及び $R$ を対数正規分布とした場合

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\bar{R}}{\bar{U}}\right)}{\sqrt{V_R^2 + V_U^2}}$$

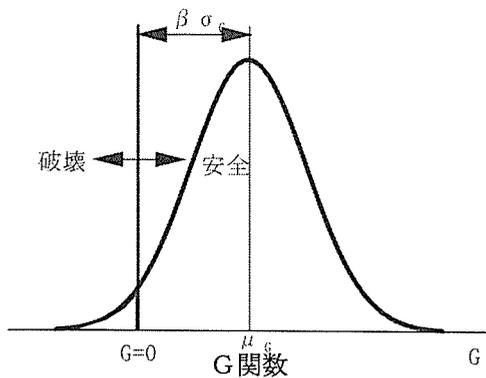
ここで

- $\bar{R}$  : 強度平均
- $\bar{U}$  : 荷重効果の平均値
- $V$  : 変動係数

で表される。



### 信頼性指標 ( $\beta$ ) の定義



信頼性指標  $\beta$  は標準正規分布の表から求められるが主な  $\beta$  と破壊確率の関係を示すと以下ようになる。

$\beta$	Pf	Pf	$\beta$
1	$1.59 \times 10^{-1}$	$10^{-1}$	1.29
2	$2.27 \times 10^{-2}$	$10^{-2}$	2.32
3	$1.35 \times 10^{-3}$	$10^{-3}$	3.09
4	$3.17 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$	3.72
5	$2.90 \times 10^{-7}$	$10^{-5}$	4.27

通常、構造物の破壊確率は低く設定されており（信頼性レベルを高く採っている）簡単に破壊しないように設計されている。

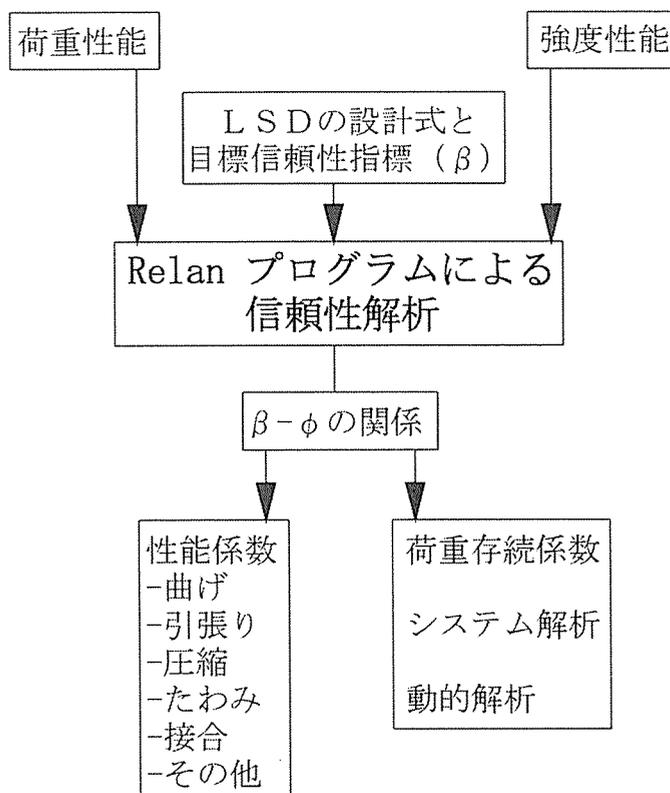
一般に部材断面を大きく採れば安全性は増すことになるが、部材の断面を一定として、たまたま巨大な荷重が作用したときに強度の小さい材が使われていたとすると構造物は破壊するであろう。破壊確率を低く（安全性を高く）採ってあれば、少しくらい大きな荷重で強度の小さな材でも、または巨大な荷重で強度が中位のものでも、荷重が中位で、強度のかなり小さな材でも破壊を起こさないであろう。

換言すれば、部材の断面は強度性能、荷重性能、破壊確率（信頼性指標  $\beta$ ）によって決定される。部材断面を決定する場合、与えられた破壊確率の基で破壊と非破壊の境を限界状態 (Limit States) と言いこの状態での設計法が限界状態設計法 (Limit States Design) である。

この信頼性指標  $\beta$  の目標をいくらに採るかは終局限界状態と使用限界状態とは異なり、また国によっても異なるが、信頼性解析を基にした限界状態設計法を採用しているカナダでは概ね終局限界状態において  $\beta = 2.5 \sim 3.0$ 、アメリカでは  $\beta = 2.4$  を採用している。

以下にカナダで行われた信頼性解析による木構造の限界状態設計法を作成するに当たって必要なものを示した。

### 信頼性解析を基にした 限界状態設計法（カナダ）

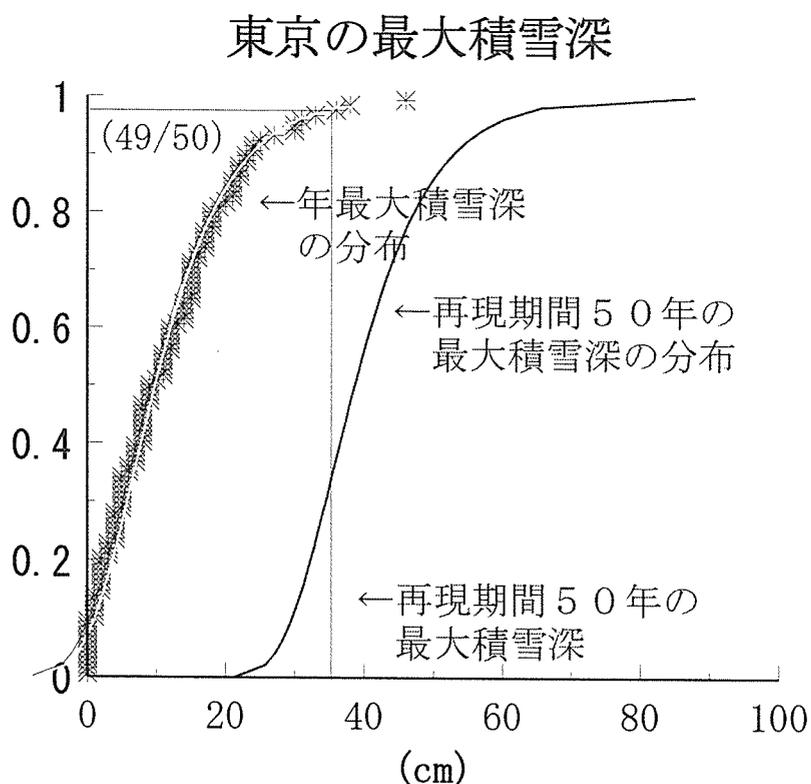


### 荷重についての詳細なデータ

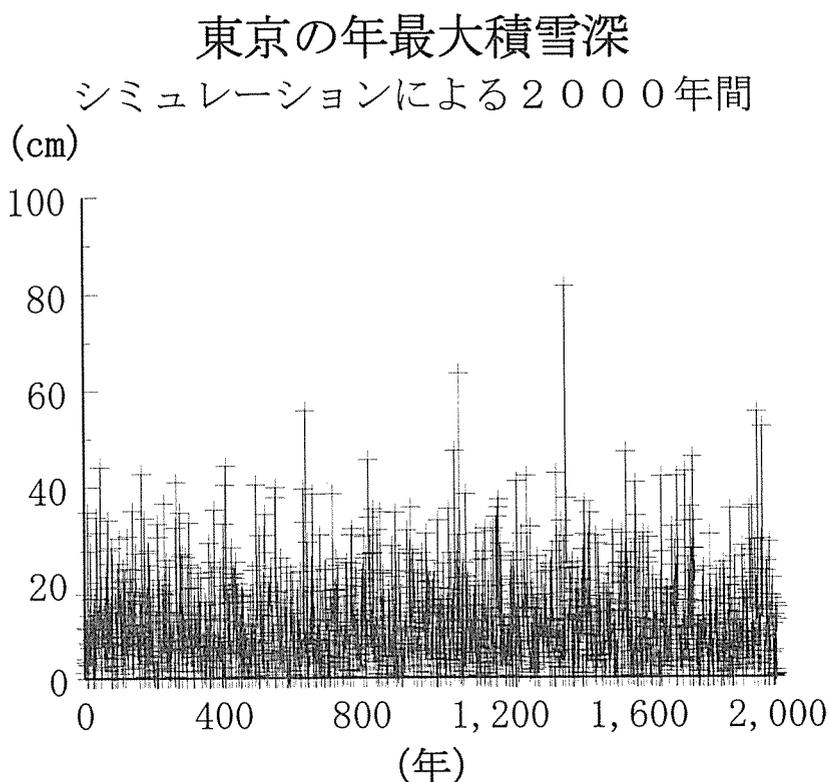
信頼性解析を用いる場合、確率値としての荷重をどのように判断するのであろうか。大雪、大地震、台風など大きな被害のあった後、10年に一度とか100年に一度の大雪でとか言われるものである。ここでの10年や100年を再現期間と言う。10年より100年、100年より1000年に一度のほうが厳しいのは理解できるがどれくらいの差があり、100年に一度くるような荷重はどのように判断するのか。

過去から現在までずっと荷重のデータが存在すればそれを例えば50年ごとに区切りその最大値を取り出し確率分布モデルに当てはめ再現期間50年の確率分布を求めることは可能である。しかしそのようなデータは存在しない。現実には多くあっても明治以後の100年くらいのデータしかない。上の方法では100のデータが在ったとしても二個の最大値しか抜き出せないの確率モデルに当てはめられない。そこで入手可能なデータを確率モデルに当てはめた後、必要な再現期間に変換するのである。

荷重の分布モデルによく使用されるものとしてガンベル分布があるのでそれを用いて一例として東京の1877～1989年の年最大積雪深の分布を示すと下図のようになる。図は更にその年毎のデータによるガンベル分布のパラメータから50年の再現期間における分布に変換している。50年の再現期間における最大積雪深は $F(49/50)$ の値を用い100年であれば $F(99/100)$ の値を用いる。



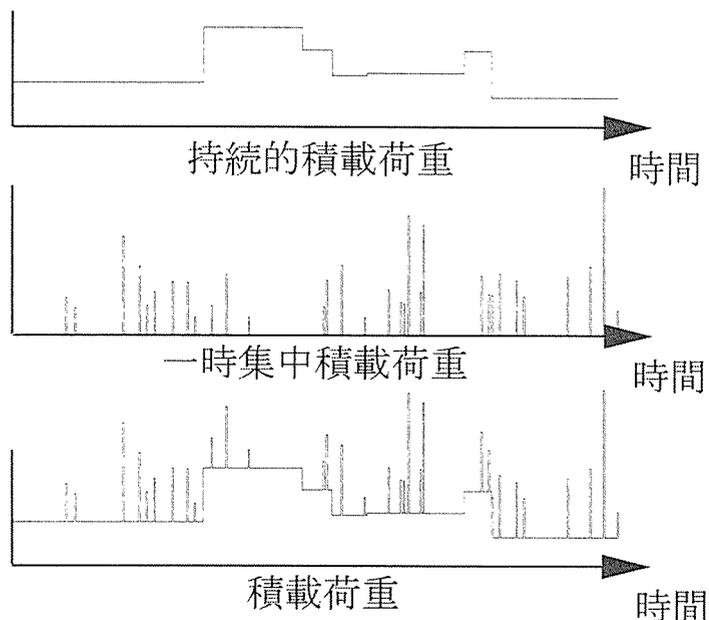
一例としてシミュレーションによって西暦0年から2000年の東京の最大積雪深を表すと下図のようになる。これによると80cmを超えるものも現れている。



積雪荷重についてはデータが入手できるので上記の手法で確率モデルが得られるが積載荷重のような場合は図のような持続的積載荷重と一時集中荷重の組み合わせになることが考えられる。このような場合は各部分のモデル条件が与えられるとシミュレーションによってコンピューター内で仮想の組み合わせられた積載荷重をたくさん作りその結果を確率モデルにあてはめ求めることができる。

地震や風荷重に対しても解析に詳細なデータが必要である。

## 積載荷重の荷重モデル



### 強度性能についての詳細なデータ

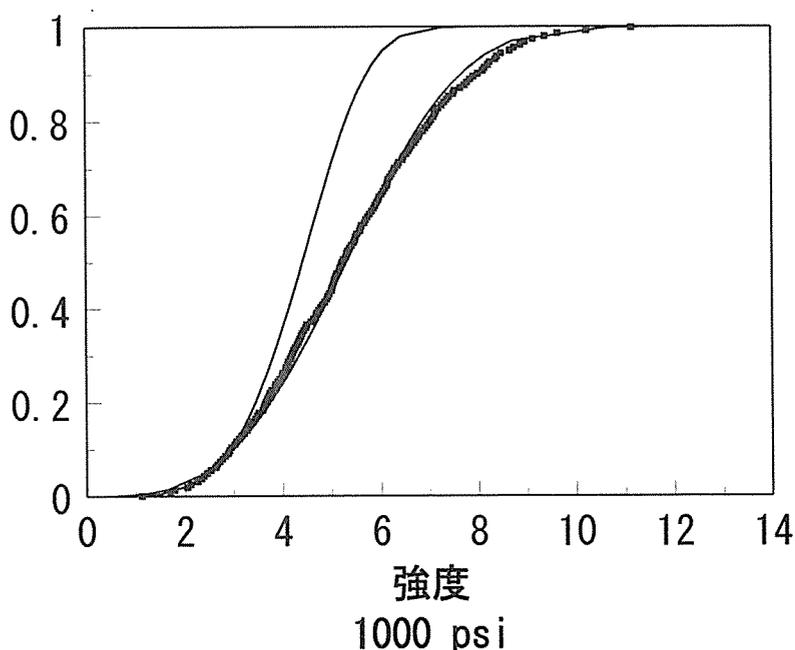
従来カナダの製材の強度性能は無欠点強度試験体で強度を調べ、その値に製材の等級における強度比を乗じ誘導してきた。しかし、1970年頃からその値と実際に現場で使用している製材の強度を比較すると材料強度に重要な意味を持つ5%下限値辺りでは双方に相当な開きがあるのではと疑問視され始めた。そこで限界状態設計法を導入する前1977年から製材を等級格付けされ実際に使用する実物で強度試験を始めた。これがイングレードテストである。カナダのイングレードテストは二期に亙り行われ延べ10万本を超える格付けされた製材が試験され製材のきめ細かな強度特性が調べられた。

しかしこの試験のもう一つの重要な目的はその時点で近い将来木構造において信頼性解析を基にした限界状態設計法へ移行するにあたり、強度サイドの詳細なデータを集積することであった。

試験データが少ないとそのまま確率モデルに当てはめるには問題があるが、十分に大きいとそれをある確率モデルに当てはめることができる。一般に製材の強度を表す分布として正規分布、対数正規分布、2Pワイブル分布及び3Pワイブル分布の四つの確率分布を使用するが多い。以前は確率紙などによりパラメータを求めていたため正規分布以外では困難であったが、最近では試験結果を調整した値からコンピュータプログラムを使用すれば簡単に各分布のパラメータが求められるようになってきている。

カナダで信頼性解析に使用した強度分布のパラメータは、低い方の強度が重要なので低い方の試験結果で求めたパラメータを使用している。打ち切りデータ(Truncation)を使用する場合は使用した範囲の適合度は良いが、全体としての適合度は良くない。それに対し全データを使用する場合には全体としての適合度はよいが必要な区間の適合度は劣る。打ち切りデータのパラメータを使用した理由は殆どの破壊点は低い方の強度に集中しているからである。

## 実験結果と 2 P ワイブル分布の関係 Truncation と全データ



カナダのイングレードテストで特筆したいことは同じ樹種、等級でも小さなサイズの方が大きなサイズの製材より強度が大きいという予想されていた以上の著しいサイズ効果があった。信頼性解析を基にした限界状態設計法にはその結果が大きく反映している。

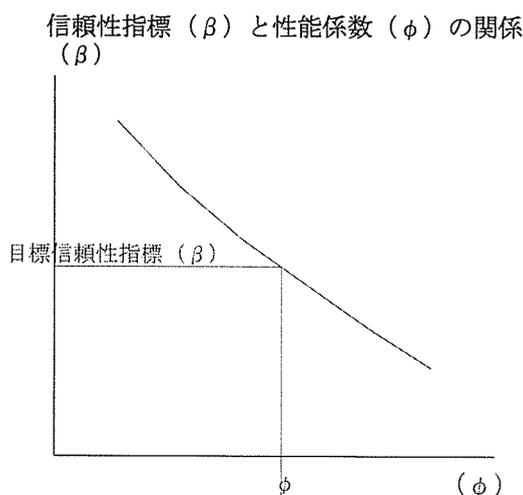
尚ここでは製材の強度について述べたが製材だけではなく集成材やその他の木質構造材料をはじめ接合強度などを含むものである。また強度試験が困難なものにあっては理論モデルによりコンピュータのシミュレーションにより強度性能を求める場合もある。

### 設計条件式と目標信頼性指標

ここでの設計条件式とは構造解析の理論式ではなく部分係数を含む荷重サイド及び強度サイドを設計法の中でどのように表すかである。この設計条件式が及び目標

信頼性指標（ $\beta$ ）が与えられると信頼性解析によるカリブレーションの手法を用いて性能係数（ $\phi$ ）を求めることが出来る。

カナダの木構造の限界状態設計法は基になる鋼構造の限界状態設計法の設計条件式と目標信頼性指標（ $\beta$ ）を参考にして木構造における性能係数（ $\phi$ ）を求めた後、限界状態設計法に採り入れたのである。



幸い日本建築学会による鋼構造限界状態設計規準（案）でも荷重の組み合わせと目標信頼性指標値（ $\beta$ ）が示されている。改正された建築物荷重指針が基本的に再現期間を100年としているなど多少の違いはあるものの、終局限界状態で荷重係数の再現期間を50年として、また使用限界状態を8年として、以下のように設定している。

荷重の組み合わせと目標信頼性指標値	目標信頼性指標値（ $\beta$ ）
限界状態	
終局限界状態設計	
荷重の組み合わせ及び荷重係数	
$1.3W_D$	2.5
$1.1W_D + 1.6W_L$	2.5
$1.1W_D + 1.6W_S + 0.6W_L$	2.0
$1.1W_D + 2.0W_E + 0.4W_L$	1.5
$1.1W_D + 1.6W_W + 0.6W_L$	2.0
$0.9W_D - 1.6W_W$	2.0
多雪区域における荷重の組み合わせ	
$1.1W_D + 1.5W_W + 0.5W_S + 0.4W_L$	2.0
$1.1W_D + 1.7W_W + 0.4W_S + 0.4W_L$	1.75
使用限界状態設計	
$1.0W_D + 1.0W_L$	1.0
$1.0W_D + 0.9W_S + 0.6W_L$	1.0
$1.0W_D + 0.4W_E + 0.4W_L$	(-0.35)
$1.0W_D + 0.9W_W + 0.6W_L$	1.0

$1.0W_D - 0.9W_W$	1.0
多雪区域における荷重の組み合わせ	
$1.0W_D + 0.9W_W + 0.5W_S + 0.4W_L$	1.0
$1.0W_D + 0.4W_W + 0.4W_S + 0.4W_L$	(0.4)

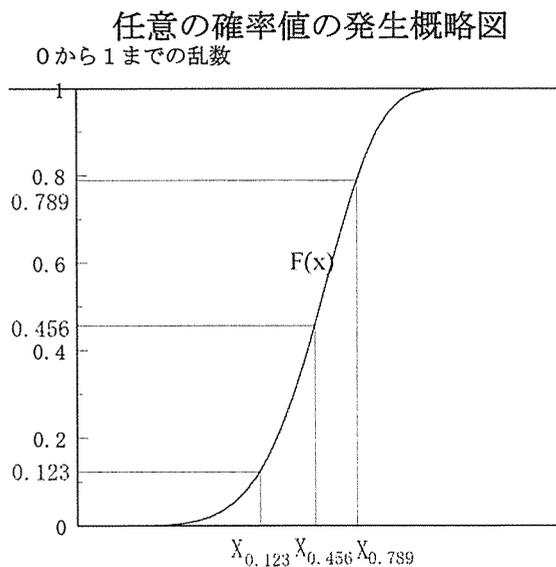
### 構造解析のプログラム

信頼性解析をするに当たって構造解析のプログラムが必要になる。このプログラムは理論解析のプログラムで、信頼性解析のためだけの特別なものではない。データ入力時に確定値を入力すれば確定値として解析できるものである。信頼性解析の場合には荷重及び強度のデータを確率値として解析する。以下に述べる破壊確率を求めるプログラムにリンクすることにより求めようとする破壊確率が求まる。例えばトラスを解析するにはトラス解析のプログラムが必要である。カナダでシステムファクターを求めたフローア解析のプログラムなどはこの種のプログラムである。

### 破壊確率を求めるプログラム

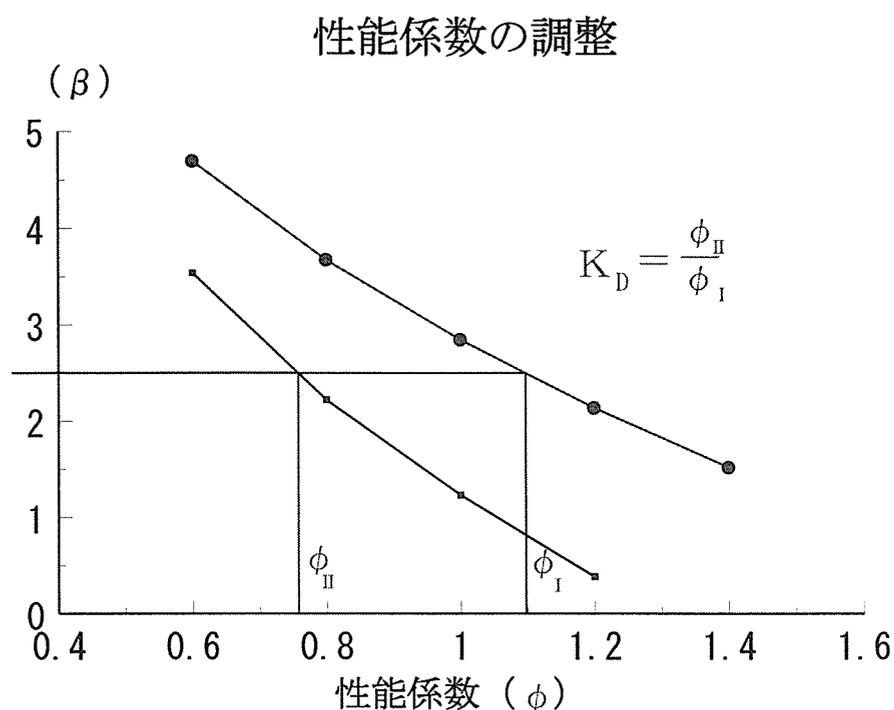
一般に荷重や強度を確率変数として構造物の破壊確率を求めることは容易ではない。確率変数が正規分布で求める性能関数Gが線形で、各確率変数どうしが互いに相関を持たないものであれば手計算でも可能だが、殆どの場合そのような条件にはならない。

数値解析で一般に使用される方法としてモンテカルロシミュレーションがある。モンテカルロシミュレーションは一様分布で0から1までの乱数をコンピュータ内で発生させ、あらかじめ与えられた確率分布により発生させた乱数を確率値に変換しその確率値で実際に計算し、その結果で確率を求める方法である。



モンテカルロシミュレーションはその考え方は単純であり有効な方法である。しかし精度を求めようとする試行回数を多くとらなければならない。コンピュータの性能が良くなったとはいえ時間もかかる。

カナダ・ブリティッシュ・コロンビア大学でDr. R. O. Foschiが開発したRelanと名付けられたプログラムは正規分布だけでなくそれ以外の確率分布や、非線形の場合、各確率変数が互いに相関を持つものまで数値解析により破壊確率が求められるという優れたものである。Relanを理論解析のプログラムにリンクさせると $\beta - \phi$ の関係が求められる。カナダの信頼性解析を基にした限界状態設計法は将来研究開発が進む事による新しい考え方を $K_D = \phi_{II}/\phi_I$ の関係を基にして目標信頼性指標（ $\beta$ ）を変えことなく設計の中に採り入れられる設計法になっている。



#### 4 木構造の信頼性レベルについて

##### 現状の信頼性指標

現状の日本の木構造の信頼性指標が全体としてどれくらいなのかを評価するのはいろいろな条件の組み合わせで解析した結果で判断することになため困難である。しかしある特定の信頼性解析を行うのに必要な荷重、強度の詳細なデータや設計条件が与えられるとその評価は可能である。

参考例として2 x 4工法の信頼性レベルを求めた。ここで使用した荷重のデータは積雪荷重の場合札幌、新潟、東京、大阪の測候所から入手した年最大積雪深のデータを解析したもの、また積載荷重は鋼構造限界状態設計規準（案）示された荷重条件からモンテカルロシミュレーションによって得たパラメータを使用した。再現期間は何れも50年としている。設計条件に使用した荷重は2 x 4工法であった為、住宅金融公庫スパン表の荷重条件に従った。また構造用製材の強度性能の詳細は日本で得られないためカナダで行われたイングレードテスト結果を採用した。

その結果を示すと次表のようになる。

2 x 4工法の信頼性指標 ( $\beta$ )

床根太				
断面寸法	等級	間隔(mm)	$\gamma$	$\beta$
208	特級	455	0.30	2.778
		303	0.34	2.782
	2級	455	0.30	2.938
		303	0.34	2.942
210	特級	455	0.33	2.680
		303	0.37	2.686
	2級	455	0.33	3.021
		303	0.37	3.028

たる木 彩色石綿板										
断面寸法	等級	間隔(mm)	札幌		新潟		東京		大阪	
			$\gamma$	$\beta$	$\gamma$	$\beta$	$\gamma$	$\beta$	$\gamma$	$\beta$
204	特級	455	0.10	3.608	0.17	3.542	0.48	2.382	1.74	2.921
		303	0.12	<u>3.610</u>	0.19	3.547	0.54	2.396	1.96	3.003
	2級	455	0.10	3.387	0.17	3.332	0.48	2.258	1.74	2.476
		303	0.12	3.389	0.19	3.337	0.54	2.269	1.96	2.821
208	特級	455	0.12	2.817	0.19	2.765	0.54	1.566	1.96	2.189
		303	0.14	2.820	0.22	2.771	0.64	1.580	2.29	2.286
	2級	455	0.12	2.976	0.19	2.925	0.54	1.780	1.96	2.373
		303	0.14	2.978	0.22	2.930	0.64	1.795	2.29	2.466
210	特級	455	0.13	2.720	0.21	2.666	0.61	<u>1.384</u>	2.18	2.121
		303	0.16	2.723	0.25	2.674	0.73	1.402	2.62	2.232
	2級	455	0.13	3.051	0.21	2.973	0.61	1.456	2.18	2.360
		303	0.16	3.056	0.25	2.985	0.73	1.482	2.62	2.493

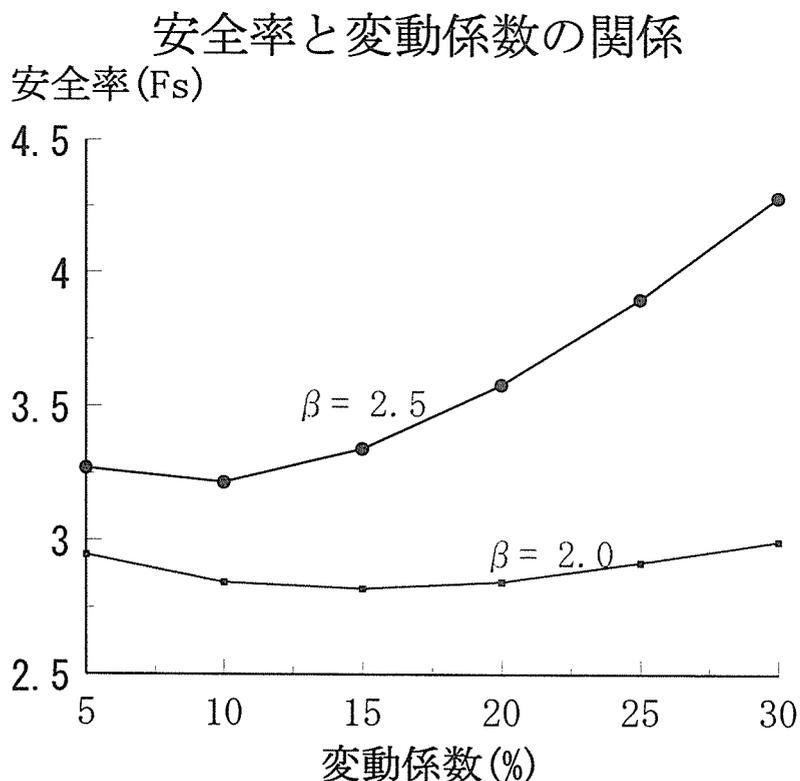
たる木 日本瓦										
断面寸法	等級	間隔(mm)	札幌		新潟		東京		大阪	
			$\gamma$	$\beta$	$\gamma$	$\beta$	$\gamma$	$\beta$	$\gamma$	$\beta$
204	特級	455	0.22	3.626	0.36	3.581	1.07	2.532	3.84	3.335
		303	0.23	<u>3.628</u>	0.38	3.585	1.13	2.588	4.06	3.354
	2級	455	0.22	3.402	0.36	3.365	1.07	2.387	3.84	3.127
		303	0.23	3.404	0.38	3.368	1.13	2.438	4.06	3.145
208	特級	455	0.23	2.832	0.38	2.796	1.13	1.753	4.06	2.547
		303	0.25	2.834	0.41	2.800	1.22	1.831	4.39	2.573
	2級	455	0.23	2.990	0.38	2.955	1.13	1.959	4.06	2.715
		303	0.25	2.992	0.41	2.959	1.22	2.033	4.39	2.740
210	特級	455	0.24	2.735	0.40	2.698	1.19	<u>1.634</u>	4.28	2.450
		303	0.27	2.737	0.44	2.704	1.31	1.735	4.72	2.483
	2級	455	0.24	3.073	0.40	3.020	1.19	1.775	4.28	2.751
		303	0.27	3.077	0.44	3.028	1.31	1.899	4.72	2.790

これはあくまで曲げの短期強度による結果である。実際の構造計算はたわみの検討などで救われており全体としてバランスが取れているが  $\beta = 1.384$  (破壊確率約 0.083) などかなり低いものも含まれている。

### 変動係数と安全率の関係

MSR 製材規格の導入により日本における許容応力度と安全率の問題が国際間で議論された。2 x 4 工法用に使用されている北米の目視による等級と MSR による等級の強度関係が日本で成り立たなくなったからである。強度性能のばらつきの小さな MSR 製材に対し、目視による製材に日本で使用する安全率 (例えばまげの場合 3.0) を適用するのは厳しすぎ、低い安全率を適用すべきではないかと言う議論であった。建設省ではその議論を受け現在製材の強度性能を評価する委員会を設けて対応している。

これを信頼性解析で表すことを考えてみる。一般論として判断するのは相当数の解析結果を総合的に判断しなければならないが、ここでは一つの例として前表で一番信頼性指標の低い東京で積雪荷重によって部材が決定されるものし、材料強度を 2P ワイブル分布として解析した。その結果安全率とばらつきの程度を表す変動係数の関係は以下ようになった。



この表から信頼性指標  $\beta$  が2.5では一般にばらつきが増すに従って安全率を増すことが必要になってくる。解析結果の安全率が3を超えている理由は一般値で積雪荷重で決まるものは短期許容応力度となり長期許容応力度の2倍の値が使用されているためである。

以上二つの場合について例を示したが信頼性解析を用いることによって今まで説明が困難なものでも信頼性指標 ( $\beta$ ) という数値で表す事が可能になる。国際間で議論する上で大いに参考になるのではないだろうか。

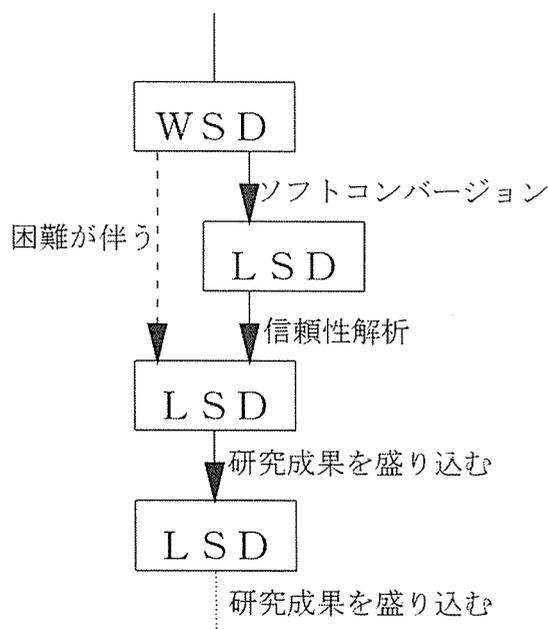
## 5 ソフトコンバージョンによる限界状態設計法

限界状態設計法を作成していくには信頼性解析を基にして進めるのが理想的である。しかし許容応力度設計法から直接信頼性解析を基にした限界状態設計法を作成することは作成するものにとっても、またそれが出来上がったとして、許容応力度設計法に慣れた使用者は戸惑うであろう。荷重係数や設計式で慣れない係数がいくつも出てくるからである。作成するものにとっても全て完全なデータが揃っていないことやいろいろな係数を決定して進める必要がある。また外国では委員会においてすら信頼性解析を基にした限界状態設計法の導入にたいし批判的な意見も出たという事である。

このような理由でカナダではソフトコンバージョンに依る限界状態設計法をまず作成し、約10年の間許容応力度設計法と限界状態設計法を平行して使用させた。この限界状態設計法はそれまでの許容応力度設計法を荷重係数やその他の係数を盛り込んだ限界状態設計法の設計式の型式に置き換えたものである。許容応力度設計法はそれまで使用しており、大きな問題がないものとして参照したため基本的にこの方法による計算結果は許容応力度設計法でも限界状態設計法でも同じである。この平行して使用が可能であった間にソフトコンバージョンによる中間的な限界状態設計法を信頼性解析を基にした限界状態設計法にアップグレードしていったのである。

日本で限界状態設計法を導入するための諸条件を考慮すると第一段階としてこのソフトコンバージョンによる中間的な限界状態設計法作成するのが最適ではないかと考えられる。

### 限界状態設計法の開発



ソフトコンバージョンによる限界状態設計法の考え方

ソフトコンバージョンによる限界状態設計法は性能係数  $\phi$  を決定し強度特性値を設定する。

限界状態設計法の基本設計式

$$R_u \geq \sum \alpha_i Q_i$$

ここで

$R_u$  : 必要強度  
 $\alpha_i$  : 荷重  $i$  の荷重係数  
 $Q_i$  : 荷重  $i$  の荷重効果

また

$$R_u = \phi K_{DOL} K_{cum} R_c$$

ここで

$\phi$  : 性能係数  
 $K_{DOL}$  : 荷重存続係数  
 $K_{cum}$  : 強度調整係数群  
 $R_c$  : 強度特性値

とすると基本設計式は次のように表される。

$$\phi K_{DOL} K_{cum} R_c \geq \sum \alpha_i Q_i$$

これに対し許容応力度設計法では

$$K_{LS} K_{cum} R_a \geq \sum Q_i$$

ここで

$K_{LS}$  : 長期・短期係数  
 $K_{cum}$  : 強度調整係数群  
 $R_a$  : 許容応力度 (長期)

今変換係数を  $\psi = \frac{R_c}{R_a}$  で表し  $K_{cum}$  を許容応力度と限界状態設計法で同じと仮定すると、

$$\psi = \frac{R_c}{R_a} = \left( \frac{\sum \alpha_i Q_i}{\sum Q_i} \right) \times \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \times \left( \frac{1}{\phi} \right) \text{ となる。}$$

ソフトコンバージョンによる方法では、 $\phi$  は委員会があらかじめ決定したものとす。カナダ及びアメリカで使用されている性能係数は次のようである。

北米の性能係数 ( $\phi$ )

		Canada		USA
		CSA 086-M84	086-M94	
部材	曲げ	0.7	0.9	0.85
	圧縮	0.75	0.8	0.90
	引張り	0.7	0.9	0.80
	せん断	0.6	0.9	0.75
接合	釘	0.7	0.7	0.65

ボルト	0.7	0.6	0.65
グルムリベット	0.7	0.6	0.65

ここでカナダのCSA 086-M84はソフトコンバージョンによる限界状態設計法であり、086-M94は信頼性解析を基にした限界状態設計法である。

性能係数 $\phi$ は1.0より小さな数値で表され、目標信頼性指標 $\beta$ 、荷重係数、荷重や強度性能によって決まる係数である。オーストラリアでは略算式 $\phi = K_{com}(R_{mean}/R_{0.05})\exp(-0.6\beta V_R)$ で $K_{com}$ （委員会による係数）を0.9として $\phi$ を求めている。

日本において木質構造材料の許容応力度は長期と短期が存在し荷重の組み合わせにより何れを使用するかが決まる。また短期許容応力度は一般に長期の2倍としている。このため $K_{SL}$ は荷重の組み合わせにより長期許容応力度を使用する場合1、短期許容応力度として計算する場合は2をとる。

これに対し限界状態設計法では荷重持続係数 $K_{DOL}$ は基本的に試験期間3～5分に対し荷重の組み合わせに対応した値をとる。カナダでは地震や風荷重などの短期では1.15であり、標準期間（屋根、床など）では固定荷重が活荷重より大きな場合は固定荷重の依存度が高いほど低い1.0～0.65までの係数で

$$K_D = 1.0 - 0.50 \log\left(\frac{D}{L}\right) \geq 0.65 \text{ で求める。}$$

またアメリカの場合は荷重の組み合わせに対して以下のような係数が設定されている。

荷重の組み合わせ	荷重期間係数
1.4D	0.6
1.2D + 1.6L + 0.5(L <sub>r</sub> or S or R)	常時積載 0.7
	積載 0.8
	衝撃 1.25 (接合 1.0)
1.2D + 1.6(L <sub>r</sub> or S or R) + 0.5L	0.8
1.2D + 1.6(L <sub>r</sub> or S or R) + 0.8W	1.0
1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(L <sub>r</sub> or S or R)	1.0
1.2D + 1.5E + (0.5L or 0.2S)	1.0
0.9D - (1.3W or 1.5E)	1.0

ここでD, L, L<sub>r</sub>, S, R, W及びEはそれぞれ固定荷重、積載荷重、屋根の積載荷重、積雪荷重、屋根の雨及び凍結荷重、風荷重及び地震荷重とする。

このソフトコンバージョンによる方法を荷重係数などを鋼構造限界状態設計法（案）で示された設計条件式にいろいろな仮定を設け製材に関して適用すると以下のようなものが考えられる。

## 6 設計応力と材料の強度性能

ここでは日本でソフトコンバージョンにより限界状態設計法を作成するための考えかたの一例を示している。

### 構造計画

構造計画は許容応力度設計法と限界状態設計法の間で異なるわけではない。そのため鉛直力に対する構造計画及び水平力に対する構造計画共現行の設計規準に従うこととする。但し、限界状態の定義を明確にする必要がある。

### 設計荷重

荷重係数を含む荷重の組み合わせは鋼構造限界状態設計規準（案）によるものとする。性能係数（ $\phi$ ）は北米の値を参考にし、暫定的に曲げ、引張りでは0.8とし圧縮及びせん断では0.7としている。

### 強度性能

強度性能は暫定的に限界状態設計法で一般に使用されている係数を含めたものとする。強度の各調整係数は日本で考慮しなくて良いものであれば係数を1.0とする事によりその係数は無視できる。また将来以下の式に含まれていない新しい係数を含める場合には係数が1.0であるため式で表れなかったとする。

強度特性値はソフトコンバージョンから求めた変換係数 $\psi = \frac{R_c}{R_a}$  より  $R_c = \psi R_a$  を暫定的に使用する。計算例を別添に示した。

強度性能が明らかになったものについては接合を除き基本的にコンフィデンスレベル75%における5%下限値を使用し試験体数を考慮したものとする。接合の強度性能は平均値を用いることとする。ヤング係数においては平均値を用いても良いこととする。ASTM D 5457 - 93 の計算方法を別添に示した。

### 荷重存続期間

地震及び風荷重に対し1.15を、それ以外の荷重の組み合わせに対して活荷重に対する固定荷重の比で決まるものとし固定荷重が活荷重を超える場合は $K_D = 1.0 - 0.5 \log\left(\frac{D}{L}\right) \geq 0.65$  で求め1.0から0.65の値をとることとする。ここでD及びLはそれぞれ固定荷重、活荷重とする。

## 7 部材の設計

それぞれの構造部材は以下の式により算定する。

### 引張り材

引張り材の断面は次式により算定する。

$$T_r \geq T_f$$

ここで

$$\begin{aligned} T_f &: \text{設計引張力} \\ T_r &: \text{引張り強度抵抗} \end{aligned}$$

また

$$T_r = \phi F_t A_n K_{Zt}$$

ここで

$$\phi = 0.8$$

$$F_t = f_t (K_D K_H K_{St} K_T)$$

$$\begin{aligned} A_n &: \text{有効断面積} \\ K_{Zt} &: \text{サイズファクター} \\ f_t &: \text{引張り強度特定値} \\ K_D &: \text{荷重期間係数} \\ K_H &: \text{システム係数} \\ K_{St} &: \text{使用状態係数} \\ K_T &: \text{薬剤処理係数} \end{aligned}$$

とする。

### 圧縮材

単一圧縮材は次式により算定する。

$$P_r \geq P_f$$

ここで

$$\begin{aligned} P_f &: \text{設計圧縮力} \\ P_r &: \text{圧縮強度抵抗} \end{aligned}$$

また

$$P_r = \phi F_c A K_{Zc} K_C$$

ここで

$$\phi = 0.7$$

$$F_c = f_c (K_D K_H K_{Sc} K_T)$$

$$\begin{aligned} f_c &: \text{圧縮強度値} \\ A &: \text{断面積} \\ K_{Zc} &: \text{サイズファクター} \\ K_C &: \text{細長比係数} \end{aligned}$$

### 曲げ材

曲げ材の断面は次式により算定する。

$$M_r \geq M_f$$

ここで

$M_r$  : 設計曲げモーメント  
 $M_f$  : 曲げ強度抵抗

また

$$M_r = \phi F_b S K_{Zb} K_L$$

ここで

$\phi = 0.8$   
 $F_b = f_b (K_D K_H K_{Sb} K_T)$   
 $f_b$  : 曲げ強度特性値  
 $S$  : 断面係数  
 $K_{Zb}$  : サイズファクター  
 $K_L$  : 横座屈係数

曲げ材のせん断は次式により算定する。

$$V_r \geq V_f$$

ここで

$V_f$  : 設計せん断強度  
 $V_r$  : せん断強度抵抗

また

$$V_r = \phi F_v \left( \frac{2A}{3} \right) K_{Zv} K_N$$

ここで

$\phi = 0.7$   
 $F_v = f_v (K_D K_H K_{Sv} K_T)$   
 $f_v$  : せん断強度特性値  
 $A$  : 断面積  
 $K_{Zv}$  : サイズファクター  
 $K_N$  : 切り欠き調整係数

複合応力を受ける材

曲げを伴う引張り材は次式により確認する。

$$\frac{T_f}{T_r} + \frac{M_f}{M_r} \leq 1.0$$

曲げを伴う圧縮材は次式により確認する。

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} \leq 1.0$$

ここで

$T_f$  : 設計引張り力  
 $T_r$  : 引張り抵抗強度  
 $P_f$  : 設計圧縮力  
 $P_r$  : 圧縮抵抗強度  
 $M_f$  : 設計曲げモーメント  
 $M_r$  : 曲げ抵抗強度

## 8 木質材料の強度性能評価のあり方

木質材料を構造部材として使用するためには設計強度や弾性常数が必要になる。天然の材料である木材には節や繊維走行などの強度に及ぼす欠点があり、強度性能は材毎に異なる。従来はこのような特性を持つ木質構造材料の強度性能は基本的に無欠点小試験体による強度を基に誘導してきた。

しかし、研究が進むにつれ実際に使用されている製品の強度性能と無欠点小試験体から誘導した強度の格差が大きいのではないかと議論され、実際に等級付けされた製品を小さくするのではなく実大に近いサイズで試験が行われるようになった。また製造規格上からも仕様規定により製造された製品だけでなく与えられた試験に合格すればよい性能規格の製品も多く出回ってきた。さらに製材、集成材、合板といった基本的な木質構造材料以外に様々なエンジニアードウッドが開発され無欠点小試験体の強度からでは製品の強度性能の誘導が困難なものも多く現れており製品を直接試験して強度性能を求める方法に変わっている。

北米で一般に使われる2 x 4工法用の構造用製材においてはカナダでは1977年から二度に渡って、またアメリカでは1978年から大がかりな製材のイングレードテストが行われ、めり込みなどの例外を除き基本的にイングレードテスト結果を設計に盛り込んでいる。また従来無欠点小試験体による方法を用いてきた合板の強度性能も実大試験に変わってきた。

これらの試験を行う場合、同じ強度性能の試験でも試験方法が異なると本来ばらつきのある大きな材料であるが故に試験結果も大きく異なる場合がある。このため試験方法はあらかじめ厳密に設定しておく必要がある。日本では基本的に無欠点小試験体の試験方法はあるが、実大の試験方法についての統一された規格はない。益々国際化していく中で国際的な調和がとれた試験方法が望まれる。

試験結果が得られた後、データの統計処理が必要になる。平均値と標準偏差で表し正規分布で処理する方法は簡単であり無欠点小試験体には問題は少ないと言われているが実大試験の処理としては充分ではない。特にサンプルサイズの大小が強度性能を求める上で大きく影響することが判っているためサンプルサイズや各種の分布を考慮した解析が必要になる。

強度特性値や許容応力度の誘導方法も明確にする必要がある。今後益々いろいろな木質構造材料が世界各国から輸入されると考えられる。日本における明確な強度性能の誘導方法を設定することが混乱を防止するのに大きな役割を果たすと思われる。

## 9 今後の課題

日本で信頼性解析による限界状態設計法を導入するには多くの解決しなければならない問題がある。限界状態設計法に移行すると直ちに今まで解決されなかった問題が全て解決できるような設計法になる訳ではない。例えば、これまで慣れ親しんできた許容応力度設計法でまだよく解明されていない、接合の問題、地震や風に対する設計の問題等が限界状態設計法にすると解明出来るようになるなどの誤解もある。換言すれば、そのような点に関して許容応力度設計法でも未だに完璧なものではないということである。設計法は新しい理論が解明されればそれを盛り込めるようにし、いつも最新の情報を持つものであることが理想である。この点においては限界状態設計法は理想的な設計法である。

安全率というこれまでの経験から採用して作られた許容応力度設計法が誤った設計法ではない。

カナダでは限界状態設計法導入前、限界状態設計法を導入することにより有利な条件で設計できるのではないかと期待されていた。しかし通常の設計では限界状態設計法と従来の許容応力度設計法で設計されたものの間に大きな差は生じていない。このことは従来の許容応力度設計法が経験をふまえたもので数学的にも従来の設計法が妥当なものであったことや、建築物の目標信頼性指標 ( $\beta$ ) を設定する際に従来の安全性を参考にしたことによるものであろう。これに対し、それでは何も限界状態設計法にする必要はないのではないかという意見も出そうだが、将来のことを考えると経験によって得られた数値を他のものに適用するには限界があることが判っている。コンピュータ化が進み確率論的に議論の出来る信頼性解析を基にした限界状態設計法は有効な設計法である。このことが理解され国際的に許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しているのである。

カナダの経験では1970年代後半から始まったイングレードテストから許容応力度設計法の使用が廃止された1994年によりやく許容応力度設計法から限界状態設計法に完全に移行した。しかし最新の限界状態設計法ですらすべて信頼性解析を基にした限界状態設計法になっていない。これから研究開発が進み信頼性解析が出来るものにあっては徐々に研究成果が設計法に盛り込まれていくであろう。

木構造において、世界的に信頼性を基にした設計法が導入されている中で我が国ではよりやくその必要性が議論し始められるようになった。信頼性解析を基にした設計法の進んでいる国では技術面だけでなく技術者の意識を変えることなどいろいろな困難が伴った。我が国のように後追いをしている国にとって先輩たちの経験を生かしてこの導入に向かうことは恥ずかしいことではない。しかし、公表されている資料だけを参考にして進めていくにはかなりの困難が予想される。公表されなかった裏話や、委員会での意見などの専門的な意見を聞くことが出来るようになれば大いに参考になるのではないだろうか。この分野では世界的にかなり遅れている我が国で国際的な協力の下に新しい考え方を持つ設計法の導入が進むことを期待したい。

日本ではようやく木構造に対して限界状態設計法の研究が始まったところであるが導入までには長い道のりであろう。

## 参考文献

- 日本建築学会「鋼構造限界状態設計規準（案）・同解説」、1990
- 日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」、1993
- 日本建築学会「木質構造設計規準・同解説」、1995
- 友井政利「木構造の信頼性解析」、木材工業 Vol.47, No.11, 1992
- 友井政利「カナダのイングレードテストと木構造の信頼性解析」、木材工業、Vol.47, No.5, 1992
- 友井政利「木構造の信頼性設計について」、ウッドミック、Vol.11,'93-7、Vol.11,'93-8、Vol.11,'93-9、Vol.11,'93-11、Vol.11,'93-12、Vol.11,'94-2、Vol.11,'94-3、Vol.11,'94-6
- American Society of Testing and Materials, "Computing the Reference Resistance of Wood-Based Materials and Structural Connections for Load and Resistance Factor Design", ASTM D 5457 - 93, December 1993
- Barrett, J.D. and Lau, W. "Canadian Lumber Properties", Canadian Wood Council, Ottawa, Ontario, Canada, 1994
- Canadian Standard Association O86.1-94 "Engineering Design in Wood (Limit States Design)", Etobicoke, Ontario, Canada, December 1994
- Foschi, R.O., Folz, B. and Yao, F. "Reliability-Based Design of Wood Structures", Structural Research Series Report No. 34, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada, 1989
- Foschi, R.O., "Material Characteristics and Reliability-Based Design", J. Bodig(ed.) Reliability-Based Design of Wood Engineered Wood Structures, pp.75-89, 1992
- Goodman, J.R. et al, "Load & Resistance Factor Design - Specification for Engineered Wood Construction", July 1991
- Gromala, D., et al, "LRFD in the United States: Development of a New Design System", Proc. Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia, July 1994
- Leicester, R.H. "The Development of LSD Codes for Structural Timber", J. Bodig(ed.) Reliability-Based Design of Wood Engineered Wood Structures, pp.91-124, 1992
- Madsen, B. "Structural Behaviour of Timber", Timber Engineering LTD., Vancouver, B.C., Canada, 1992
- Tomoi, M., "Reliability-Based Design for Japanese Timber Structures Using Canadian S-P-F Dimension Lumber", M.A.Sc. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada, 1991

## 別添 1

### 強度特性値の計算例

#### 1 ソフトコンバージョンによる方法（日本の場合）

##### 仮定条件

鋼構造限界状態設計法における設計式で1-3のケースで曲げについて計算した荷重期間係数はカナダ方式を参考にした

$\phi$  は曲げについて0.8を用いた

長期・短期許容応力度を考慮した

$\gamma = D/L$ または $D/S$ は2 x 4工法を参考にして求めた。

$$\psi = \frac{R_c}{R_a} = \left( \frac{\sum \alpha_i Q_i}{\sum Q_i} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \text{ より}$$
$$R_c = \left( \frac{\sum \alpha_i Q_i}{\sum Q_i} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$

##### 1) 1.3Dの場合

$$R_c = \left( \frac{1.3D}{D} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$

ここで $K_{DOL} = 0.65$ として

$$R_c = \left( \frac{1.3D}{D} \right) \cdot \left( \frac{1}{0.65} \right) \cdot \left( \frac{1}{0.8} \right) \cdot R_a = 2.50R_a$$

##### 2) 1.1D+1.6Lの場合

$$R_c = \left( \frac{1.1D+1.6L}{D+L} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$
$$= \left( \frac{1.1(D/L)+1.6}{(D/L)+1} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$

ここで $(D/L) = 0.3$ 及び $K_{DOL} = 1.0$ として

$$R_c = \left( \frac{1.1 \cdot 0.3 + 1.6}{0.3 + 1} \right) \cdot \left( \frac{1}{1} \right) \cdot \left( \frac{1}{0.8} \right) \cdot R_a = 1.856R_a$$

##### 3) 1.1D+1.6S+0.5L (0.5L=0とする) の場合

一般地域

$$R_c = \left( \frac{1.1D+1.6S}{D+S} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$
$$= \left( \frac{1.1(D/S)+1.6}{(D/S)+1} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$

ここで $(D/S) = 1.22$ ,  $K_{LS} = 2.0$  (短期) 及び $K_{DOL} = 0.957$ として

$$R_c = \left( \frac{1.1 \cdot 1.22 + 1.6}{1.22 + 1} \right) \cdot \left( \frac{2}{0.957} \right) \cdot \left( \frac{1}{0.8} \right) \cdot R_a = 3.462R_a$$

多雪地域

$$R_c = \left( \frac{1.1D+1.6S}{D+S} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$
$$= \left( \frac{1.1(D/S)+1.6}{(D/S)+1} \right) \cdot \left( \frac{K_{LS}}{K_{DOL}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \cdot R_a$$

ここで $(D/S) = 0.41$ 及び $K_{DOL} = 1.0$ として

$$R_c = \left( \frac{1.1 \cdot 0.41 + 1.6}{0.41 + 1} \right) \cdot \left( \frac{1}{1} \right) \cdot \left( \frac{1}{0.8} \right) \cdot R_a = 1.818R_a$$

このように設計条件によって異なる値をとるので調整が必要である。日本では特に積雪荷重を考慮する場合には一般地域と多雪地域によって短期・長期許容応力度が変わってくるため矛盾が生じている。

## 2 ASTM D 5457 - 93による方法（ソフトコンバージョンの場合）

計算条件

荷重の組み合わせに対して荷重期間係数（5章参照）が与えられている  
強度性能係数  $\phi$ （5章参照）が各構造部材に対し与えられている

$L/D=3.0$ として計算

許容応力度設計法の荷重期間係数を使用

$$\begin{aligned} K_A &= \frac{R_n}{F_x} = \left( \frac{1.2D+1.6L}{D+L} \right) \cdot \left( \frac{K_D}{\lambda} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \\ &= \left( \frac{1.2+1.6(L/D)}{1+(L/D)} \right) \cdot \left( \frac{K_D}{\lambda} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \\ &= \left( \frac{1.2+1.6 \cdot 3}{1+3} \right) \cdot \left( \frac{1.15}{0.8} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) = \frac{2.16}{\phi} \end{aligned}$$

これより

$$R_n = K_A \cdot F_x = \left( \frac{2.16}{\phi} \right) \cdot F_x$$

曲げの場合

$$R_n = \left( \frac{2.16}{0.85} \right) \cdot F_b = 2.541 F_b$$

接合の場合

$$R_n = \left( \frac{2.16}{0.65} \right) \cdot F_{connection} = 3.323 F_{connection}$$

このようにして求めた値を纏めると変換係数 $K_A$ は

性能	変換係数 $K_A$
圧縮	2.40
曲げ	2.54
引張り	2.70
せん断	2.88
接合	3.32

となりこの値を用いて強度特性値を算出する。

## 3 ASTM D 5457 - 93による方法（試験結果が得られる場合）

試験結果が得られる場合には試験結果の分布を2Pワイブル分布と仮定し、変動係数、試験体数を考慮した信頼水準75%に対する5%下限値及び目標信頼性指標 $\beta=2.4$ とした信頼性規準化係数を考慮し強度特性値を求める。その手順を述べると以下のようなになる。

i) 試験結果より 2 P ワイブル分布のパラメータをもとめる  
 パラメータの求め方は ASTM D 5457 - 93 に述べられているがここでは省略する。

ii) 5% 下限値を算出  
 2 P ワイブル分布で任意の累積分布点における強度は以下の式で表される。

$$R_p = \eta[-\ln(1-p)]^{1/\alpha}$$

ここで

- $\eta$  : 尺度パラメータ
- $p$  : 必要%ile値
- $\alpha$  : 形状パラメータ

5% 下限値を求める場合

$$R_{0.05} = \eta[-\ln(1-0.05)]^{1/\alpha} \text{ で求められる。}$$

iii) 2 P ワイブル分布の変動係数を求める

二とおりの変動係数の求め方が ASTM D 5457 - 93 に述べられている。

$\Gamma$  関数を用いて計算する方法

$$CV_w = \frac{\eta[\Gamma\{1+2(1/\alpha)\} - \Gamma^2\{1+(1/\alpha)\}]^{1/2}}{\eta\Gamma\{1+(1/\alpha)\}}$$

略算法

$$CV_w \cong \alpha^{-0.92}$$

iv) 変動係数と試験対数を考慮し 75% 信頼水準にたいする 5% 下限値を求める

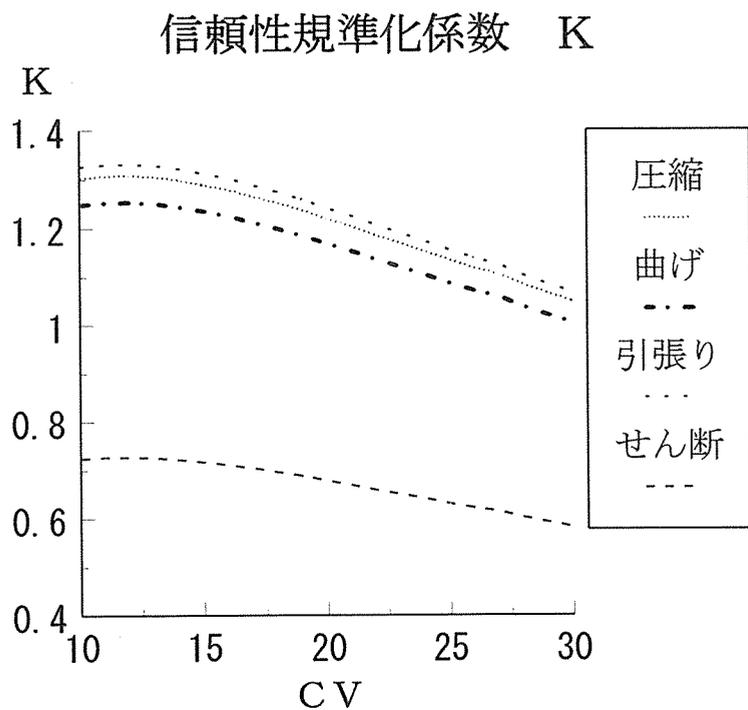
2 P ワイブル分布の信頼水準 50% に対する信頼水準 75% の 5% 下限値の表が ASTM D 5457 - 93 で与えられている。

$$\Omega = \frac{R_{0.05}(75\%CL)}{R_{0.05}(50\%CL)} \text{ の表}$$

変動係数	サンプルの大きさ									
	30	40	50	60	100	200	500	1000	2000	5000
0.10	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00
0.15	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99
0.20	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99
0.25	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99
0.30	0.84	0.86	0.88	0.89	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99
0.35	0.81	0.84	0.86	0.87	0.90	0.93	0.96	0.97	0.98	0.90
0.40	0.79	0.81	0.84	0.85	0.89	0.92	0.95	0.96	0.97	0.98
0.45	0.76	0.79	0.82	0.83	0.87	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98
0.50	0.73	0.77	0.80	0.81	0.86	0.90	0.94	0.95	0.97	0.98

v) 信頼性規準化係数を求める

信頼性規準化係数 $K_R$ は目標信頼性指標 $\beta=2.4$ で求められている。



vi) 強度特性値を求める

それぞれの値から強度特性値を下式により算出する。

$$R_n = \Omega \cdot K_R \cdot R_{0.05}$$



# Standard Specification for Computing the Reference Resistance of Wood-Based Materials and Structural Connections for Load and Resistance Factor Design<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 5457; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

## INTRODUCTION

Load and resistance factor design (LRFD) is a structural design method that uses concepts from reliability theory and incorporates them into a procedure usable by the design community. The basic design equation requires establishing a reference resistance based on several material property parameters. A standard method for calculating the required material property input data is critical so that all wood-based structural materials can be treated equitably. This specification provides the procedures that are required for the generation of reference resistance for LRFD.

### 1. Scope

1.1 This specification covers procedures for computing the reference resistance of wood-based materials and structural connections for use in load and resistance factor design (LRFD). The reference resistance derived from this specification applies to the design of structures addressed by the load combinations in ASCE 7-88.

1.2 A commentary to this specification is provided in Appendix XI.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

- D 9 Terminology Relating to Wood<sup>2</sup>
- D 143 Method of Testing Small Clear Specimens of Timber<sup>2</sup>
- D 198 Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes<sup>2</sup>
- D 1037 Test Methods of Evaluating the Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials<sup>2</sup>
- D 1761 Method of Testing Mechanical Fasteners in Wood<sup>3</sup>
- D 1990 Practice for Establishing Allowable Properties for Visually-Graded Dimension Lumber From In-Grade Tests of Full-Size Specimens<sup>2</sup>
- D 2718 Test Method for Structural Panels in Planar Shear (Rolling Shear)<sup>2</sup>
- D 2719 Test Methods for Structural Panels in Shear Through-the-Thickness<sup>2</sup>
- D 2915 Method for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber<sup>2</sup>
- D 3043 Methods of Testing Structural Panels in Flexure<sup>2</sup>

- D 3500 Test Method for Structural Panels in Tension<sup>2</sup>
- D 3501 Methods of Testing Plywood in Compression<sup>2</sup>
- D 4761 Test Method for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material<sup>2</sup>
- D 5055 Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists<sup>2</sup>
- E 105 Practice for Probability Sampling of Materials<sup>4</sup>
- 2.2 ASCE Standard:  
ASCE 7-88 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures<sup>5</sup>

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—For general definitions of terms related to wood, refer to Terminology D 9.

3.1.1 *coefficient of variation,  $CV_w$* —a relative measure of variability. For this specification, the calculation of  $CV_w$  is based on the shape parameter of the 2-parameter Weibull distribution. It is not the traditional sample standard deviation of the data divided by the sample mean.

3.1.2 *data confidence factor,  $\Omega$* —a factor that is used to adjust member reference resistance for sample variability and sample size.

3.1.3 *distribution percentile,  $R_p$* —the value of the distribution associated with proportion,  $p$ , of the cumulative distribution function.

3.1.4 *format conversion factor,  $K_F$* —a factor applied to convert resistance from the allowable stress design (ASD) format to the LRFD format.

3.1.5 *lower tail*—a portion of an ordered data set consisting of all test specimens with the lowest property values (for example, lowest strengths).

3.1.6 *reference resistance,  $R_n$* —the value used in LRFD equations to represent member resistance (that is, strength or capacity).

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee D-7 on Wood and is the direct responsibility of Subcommittee D07.02 on Lumber and Engineered Wood Products.

Current edition approved Oct. 15, 1993. Published December 1993.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.09.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vols 04.09 and 15.08.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vols 07.02 and 14.02.

<sup>5</sup> Available from American Society of Civil Engineers, 345 East 47th Street, New York, NY 10017-2398.

3.1.7 *reliability normalization factor,  $K_R$* —a factor used to establish the reference resistance to achieve a target reliability index for a reference set of conditions.

3.1.8 *resistance factor*—a factor applied to the resistance side of the LRFD equation.

#### 4. Sampling

4.1 Samples selected for analysis and implementation with this specification shall be representative of the population about which inferences are to be made. Both manufacturing and material source variability shall be considered. The principles of Practice E 105 shall be maintained. Method D 2915 provides methods for establishing a sampling plan. Special attention is directed to sampling procedures in which the variability is low and results can be influenced significantly by manufacturing variables. It is essential that the sampling plan address the relative magnitude of the sources of variability.

4.1.1 Data generated from a quality control program shall be acceptable if the criteria of 4.1 are maintained.

4.1.2 When data from multiple data sets are compiled or grouped, the criteria used to group such data shall be in keeping with the provisions of 4.1. When such procedures are available in applicable product standards, they shall be used.

##### 4.2 Sample Size:

4.2.1 For data sets in which all specimens are tested to failure, the minimum sample size shall be 30.

NOTE 1—The confidence with which population properties can be estimated decreases with decreasing sample size. For sample sizes less than 60, extreme care must be taken during sampling to ensure a representative sample.

4.2.2 For lower tail data sets, a minimum of 60 failed observations is required for sample sizes of  $n = 600$  or less. (This represents at least the lower 10 % of the distribution.) For sample sizes greater than 600, a minimum of the lowest 10 % of the distribution is required (for example, sample size,  $n = 720$ ,  $0.10 (720) = 72$  failed test specimens in the lower tail). Only parameter estimation procedures designed specifically for lower tail data sets shall be used (see Appendix X2).

#### 5. Testing

5.1 Testing shall be conducted in accordance with appropriate standard testing procedures. The intent of the testing shall be to develop data that represent the capacity of the product in service.

5.2 *Periodic Property Assessment*—Periodic testing is recommended to verify that the properties of production material remain representative of published properties.

#### 6. Reference Resistance for LRFD

6.1 The derivation of LRFD reference resistance is addressed in this section. Parameters required for the derivation of reference resistance are also presented. These parameters include the distribution percentile, coefficient of variation, data confidence factor, and reliability normalization factor. An example derivation of reference resistance is provided in X1.7.

6.2 *Reference Resistance,  $R_n$* —The following equation establishes reference resistance for LRFD:

$$R_n = R_p \times \Omega \times K_R \quad (1)$$

where:

$R_p$  = distribution percentile estimate,

$\Omega$  = data confidence factor, and

$K_R$  = reliability normalization factor.

##### 6.3 Distribution Percentile Estimate, $R_p$ :

6.3.1 Eq (2) is intended to be used to calculate any percentile of a two-parameter Weibull distribution. The percentile of interest depends on the property being estimated.

$$R_p = \eta[-\ln(1 - p)]^{1/\alpha} \quad (2)$$

where:

$\eta$  = Weibull scale parameter,

$p$  = percentile of interest expressed as a decimal (for example, 0.05), and

$\alpha$  = Weibull shape parameter.

6.3.2 The shape ( $\alpha$ ) and scale ( $\eta$ ) parameters of the two-parameter Weibull distribution shall be established to define the distribution of the material resistance.<sup>6</sup> Algorithms for common estimation procedures are provided in Appendix X2.

6.4 *Coefficient of Variation,  $CV_w$* —The coefficient of variation of the material is necessary when determining the data confidence factor,  $\Omega$ , and the reliability normalization factor,  $K_R$ . The  $CV_w$  can be estimated from the shape parameter of the Weibull distribution as follows:

$$CV_w \propto \alpha^{-0.92} \quad (3)$$

NOTE 2—The above approximation is within 1 % of the exact solution for  $CV_w$  values between 0.09 and 0.50. An exact relationship of  $CV_w$  and  $\alpha$  is shown in Appendix X3.

6.5 *Data Confidence Factor,  $\Omega$* —The data confidence factor,  $\Omega$ , accounts for uncertainty associated with data sets.<sup>7</sup> This factor, which is a function of coefficient of variation, sample size, and reference percentile, is applied as a multiplier on the distribution estimate. Table 1 provides data confidence factors appropriate for lower fifth-percentile estimates.

NOTE 3—When a distribution tolerance limit is developed on a basis consistent with  $\Omega$ , the data confidence factor is taken as unity.

6.6 *Reliability Normalization Factor,  $K_R$* —The reliability normalization factor,  $K_R$ , is used to adjust the distribution estimate (for example,  $R_{0.05}$ ) to achieve a target reliability index. The reliability normalization factor is the ratio of the computed resistance factor,  $\phi_c$  (Appendix X1), to the specified resistance factor,  $\phi_s$  (Table 2), adjusted by a scaling factor. This adjustment factor is a function of  $CV_w$  and is generated for specific target reliability indices. The  $K_R$  values presented in Table 3 represent resistance factors ( $\phi_c$ ) computed at a live-to-dead load ratio of 3. Computations for determining reliability normalization factors for target reliability indices greater than  $\beta = 2.4$  are contained in Zahn.<sup>8</sup>

##### 6.7 Format Conversion:

<sup>6</sup> Weibull, W., "A Statistical Theory of the Strength of Materials," *Proceedings of the Royal Swedish Institute of Engineering Research*, Stockholm, Sweden, Report No. 151, 1939, pp. 1-45.

<sup>7</sup> *Load and Resistance Factor Design for Engineered Wood Construction—A Pre-Standard Report*, American Society of Civil Engineers, 1988.

<sup>8</sup> Zahn, J., *FORTRAN Programs for Reliability Analysis*, USDA Forest Service, FPL GTR-72, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1992.

**TABLE 1 Data Confidence Factor,  $\Omega$  on  $R_{0.05}$ , for Two-Parameter Weibull Distribution with 75 % Confidence<sup>a</sup>**

$CV_w$	Sample Size, n									
	30	40	50	60	100	200	500	1000	2000	5000
0.10	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	1.0
0.15	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99
0.20	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.96	0.98	0.98	0.99	0.99
0.25	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99
0.30	0.84	0.86	0.88	0.89	0.92	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99
0.35	0.81	0.84	0.86	0.87	0.90	0.93	0.96	0.97	0.98	0.99
0.40	0.79	0.81	0.84	0.85	0.89	0.92	0.95	0.96	0.97	0.98
0.45	0.76	0.79	0.82	0.85	0.87	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98
0.50	0.73	0.77	0.80	0.81	0.86	0.90	0.94	0.95	0.97	0.98

<sup>a</sup> Interpolation is permitted. For  $CV_w$  values below 0.10, the values for 0.10 shall be used.

**TABLE 2 Specified LRFD Resistance Factors,  $\phi_s$**

Application	Property	$\phi_s$
Member	compression <sup>a</sup>	0.90
	bending	0.85
	tension parallel	0.80
	shear, radial tension	0.75
Connection	all	0.65

<sup>a</sup> Compression parallel-to-grain, compression perpendicular-to-grain, and bearing.

6.7.1 As an alternative to the use of  $K_R$ , in which one chooses to adjust the design values to achieve a stated reliability index under the reference load conditions, it is permissible to generate LRFD reference resistance values based on format conversion from code-recognized allowable stress design (ASD). It shall not be claimed that reference resistance values generated in this manner achieve a stated reliability index.

NOTE 4—Examples of Standards that are used to generate code-recognized ASD values include Test Methods D 143, D 198, D 1037, D 1761, D 2718, D 2719, D 3043, D 3500, D 3501, and D 4761; Practice D 1990; and Specification D 5055.

6.7.2 For standardization purposes, format conversion reference resistance values shall be based on the arithmetic conversion at a specified reference condition that results from the calibration (defined as providing an identical required section modulus, cross-sectional area, allowable load capacity, etc.) of basic ASD and LRFD equations. The specified reference condition shall be chosen such that changes in design capacity over the range of expected load cases and load ratios is minimized.

6.7.3 Based on the same load factors and load ratio as those given in 6.6, with an ASD load duration adjustment factor of 1.15 and a LRFD time effect factor of 0.80, the format conversion factor,  $K_F$ , is as follows:

$$K_F = \frac{2.16}{\phi_s} \tag{4}$$

6.7.4 Since ASD deformation-based compression perpen-

**TABLE 3 Fifth-Percentile Based Reliability Normalization Factors,  $K_R$**

$CV_w, \%$	$K_R$					
	Compression and Bearing	Bending	Tension Parallel	Shear (Lumbar)	Shear (SCL)	Shear (Jolst)
10	1.303	1.248	1.326	0.724	0.943	1.253
11	1.307	1.252	1.330	0.727	0.946	1.257
12	1.308	1.253	1.331	0.727	0.947	1.258
13	1.306	1.251	1.329	0.726	0.945	1.256
14	1.299	1.244	1.322	0.722	0.940	1.249
15	1.289	1.235	1.312	0.717	0.933	1.240
16	1.279	1.225	1.302	0.711	0.928	1.230
17	1.265	1.212	1.288	0.704	0.918	1.217
18	1.252	1.199	1.274	0.698	0.900	1.204
19	1.237	1.185	1.259	0.688	0.895	1.190
20	1.219	1.168	1.241	0.678	0.882	1.173
21	1.204	1.153	1.225	0.669	0.871	1.158
22	1.186	1.138	1.207	0.659	0.858	1.141
23	1.169	1.120	1.190	0.650	0.846	1.125
24	1.162	1.104	1.173	0.641	0.834	1.109
25	1.135	1.087	1.155	0.631	0.821	1.092
26	1.118	1.071	1.138	0.622	0.809	1.076
27	1.105	1.059	1.125	0.615	0.800	1.063
28	1.084	1.038	1.103	0.603	0.784	1.042
29	1.068	1.021	1.085	0.593	0.771	1.025
30	1.049	1.005	1.068	0.583	0.759	1.009

dicular to grain values are not subject to the duration of load adjustment, the constant in the numerator of Eq (4) is 1.875 for this property.

6.7.5 The format conversion reference resistance is computed by multiplying the ASD resistance (based on normal 10-year duration) by  $K_F$ .

6.7.6 *Format Conversion Example*—An ASD bolt design value for a single shear connection is 800 lbf. From Table 2, the specified LRFD resistance factor is 0.65. Using Eq (4), the corresponding LRFD bolt design value is as follows:

$$R_n = \left( \frac{2.16}{0.65} \right) \times 800$$

$$R_n = 2658 \text{ lbf}$$

## 7. Presentation of Results

7.1 Report the sampling plan and testing in accordance with applicable standards. When lower tail data sets are used, report the sample size and data used in the calculations. Report the estimated shape and scale parameters along with the calculated coefficient of variation. When appropriate, also report the mean and standard deviation (derived from the calculated coefficient of variation). Include a plot showing the data points and fitted Weibull distribution. In addition to these basic parameters, also report the data confidence factor, calculated percentile estimate, reliability normalization factor, and reference resistance.

## 8. Keywords

8.1 load and resistance factor design (LRFD); reference resistance; wood-based

## APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

## XI. COMMENTARY TO THE TEXT

*X1.1 Commentary to the Introduction:*

X1.1.1 Load and resistance factor design (LRFD) is a subset of a broader design methodology known as reliability-based design (RBD). The distinction between the two design procedures is significant. RBD implies, and often calculates, quantities related to the reliability of a member under a given set of conditions for a given reference period. A higher reliability corresponds to a lower probability of failure. One practical concern that arises when one attempts to apply RBD to real structural applications is that the calculations must idealize both the loads and the structural system response to reduce it to a mathematically tractable problem. This idealization process reduces the final calculation to a theoretically interesting, but often inapplicable, number. LRFD was developed by selecting a few of the basic concepts of RBD and using them to develop a format that is similar in many ways to current (allowable stress) design. LRFD provides incremental improvements in the design process in this way. The improvements provided by LRFD include the following:

X1.1.1.1 Consideration of the variability of various types of loads when assessing safety factors.

X1.1.1.2 Consideration of the consequences of various potential failure modes in a structure.

X1.1.1.3 Material resistance values that relate more closely to test data (member capacities).

X1.1.1.4 Consideration of resistance variability.

X1.1.2 Previous standards for developing allowable properties for many types of wood-based products directed the user to various ways of computing a population lower fifth-percentile estimate. This single number was the basis for an allowable strength property assignment. At the other extreme, a realistic RBD would require an accurate definition of a large portion of the lower tail of the material distribution and a large portion of the upper tail of the load distribution. LRFD requires somewhat more information than current procedures (for example, reference values and variability) but substantially less than RBD. In the most advanced LRFD procedures in use today, one needs only a distribution type and the parameters that describe that distribution. Refinements of these procedures suggest that estimates of the distribution and its parameters give the most accurate reliability estimates when they represent a tail portion of the distribution rather than the full distribution. This reflects the fact that, for common building applications, only the lower tail of the resistance and upper tail of the load distribution contribute to failure probabilities.

X1.1.3 Simulations have shown that the assumed distribution type can have a strong effect on computed LRFD resistance factors. However, much of this difference is due to the inability of standard distribution forms to fit the tail data precisely. By standardizing the distribution type, this procedure provides a consistent means for deriving these factors.

In addition, by permitting tail fitting of the data, it provides a way of fitting data in this important region that is superior to full-distribution types.

X1.1.4 While the two-parameter Weibull distribution is the underlying basis for these calculations, the user of this specification is not burdened with applying statistical decisions. For LRFD purposes, the user must calculate the shape and scale parameters for the fitted Weibull distribution using the equations in the specification. All remaining steps in the calculations of a reference resistance are spelled out in the equations of the specification.

X1.2 *Commentary to Section 1, Scope*—The calculation procedures identified in this specification are common statistical procedures. This specification gives the user a document for all calculations necessary to develop LRFD reference resistances. Due to the sensitivity of reliability to changes in some of the parameters, these procedures offer a limited set of options to ensure that LRFD reference resistances are generated in a consistent manner.

X1.3 *Commentary to 4.1*—Some wood-based products exhibit extremely low variability when tested on a batch basis. On this basis, one would compute, for example, a fifth percentile that may be as high as 90 % of the mean value, as compared with a computed fifth percentile that may be less than 50 % of the mean value for a product with a substantially higher variability. The warning provided in this section is intended to caution the user of this specification to be certain that either the sampling plan or the daily quality control procedures are sufficiently sensitive to reflect population shifts caused by factors such as subtle manufacturing changes or shifts in material sources.

X1.4 *Commentary to Section 5, Testing*—While the most desirable and reliable method of defining reference resistance for a given property is by the direct testing of representative materials, estimation methods may be used when such data are not available. The preferred method of defining the characteristics for missing data is through the use of a known physical relationship. For example, Weibull's theory<sup>6</sup> can be used to estimate reference resistance values for untested sizes of a certain product. Statistical relationships may be used in the case in which data are missing and no sufficiently reliable physical relationship exists. Linear or nonlinear curve fitting methods can be applied to define the statistical relationship between a given property and the influencing variables.

X1.5 *Commentary to Section 6, Reference Resistance for LRFD:*

X1.5.1 The basis for establishing many of the allowable stresses for wood-based products has traditionally focused on the population lower fifth percentile. The primary emphasis of this section is on these types of values. Some classes of products (that is, connections) have established stresses based on an average (or mean) value in the past. Regardless of past

procedures, a resistance distribution is necessary for a reliability-based procedure.

X1.5.2 Equation (4) is the equivalent result of two alternative derivations. Equation (4) is based on a graph of  $R_n/F_x$  that was generated across a range of load ratios for three distinct live-load cases (occupancy floor, snow roof, and non-snow roof), where  $R_n$  and  $F_x$  come directly from the LRFD and ASD design equations:

$$\text{LRFD: } \lambda \phi R_n \geq 1.2 D + 1.6 L$$

$$\text{ASD: } K_d F_x \geq D + L$$

where:

$\lambda$  = time effect factor,

$\phi$  = resistance factor,

$R_n$  = reference resistance,

$D, L$  = dead and live load effects, respectively,

$K_d$  = load duration factor (ASD), and

$F_x$  = allowable stress (ASD).

X1.5.3 The factor in the numerator of Eq (4) is in the range from 2.1 to 2.2 and resulted from the application of engineering judgment as a balance of increases for floors at low  $L/D$  ratios versus decreases for non-snow roofs at higher  $L/D$  ratios.

X1.5.4 In what may be called the second derivation, the precise factor of 2.16 happens to be the algebraic solution for the ratio of  $R_n/F_x$  for  $L/D = 3$ ,  $\lambda = 0.80$ , and  $K_d = 1.15$ . However, this algebraic equivalent is not to be confused as the basis for Eq (4).

X1.6 *Commentary to 6.5, Data Confidence Factor,  $\Omega$* —This factor is based on the ratio of binomial confidence bounds for the reference resistance. More specifically, it is the ratio of the specified percentile with 75 % confidence to the estimate with 50 % confidence. Note that  $\Omega$  is chosen based on the sample size of the complete data set, even if tail fitting is used.

X1.7 *Commentary to 6.6, Reliability Normalization Factor,  $K_R$* :

X1.7.1 The objective of the conversion to an LRFD format is to provide the designer with a simple, easy-to-use procedure. For the convenience of the designer, specified resistance factors,  $\phi_s$ , are given in the LRFD specification. In order to keep the number of different  $\phi_s$  values to a minimum, an adjustment to the resistance is necessary because the computed resistance factors,  $\phi_c$ , corresponding to specific target reliabilities, generally differ from the specified resistance factors. To attain the target reliability, the application of a reliability normalization factor,  $K_R$ , is required in the development of tabulated resistances.

X1.7.2 The use of the reliability normalization factor represents a reliability-based conversion. The fundamental relationship involving  $K_R$  is provided for the example case of a bending member.

X1.7.3 Consider the LRFD equation as applied to format-converted resistance:

$$\lambda \phi_s R_n \geq \Sigma \gamma_i Q_i$$

where:

$\phi_s$  = specified resistance factor,

$\gamma_i$  = load factor for load type,  $i$ , and

$Q_i$  = load effect for load type,  $i$ .

X1.7.4 Next, consider the same relationship when the resistance side meets a computed level of reliability using the

computed resistance factor,  $\phi_c$ :

$$\lambda \phi_c R_n \geq \Sigma \gamma_i Q_i$$

X1.7.5 Since it is desired to obtain the same target reliability by both equations, the first must be adjusted by the reliability normalization factor, that is:

$$\lambda \phi_s K_R R_n = \lambda \phi_c R_n$$

from which the definition of the reliability normalization factor is obtained by the following ratio:

$$K_R = \phi_c / \phi_s$$

X1.7.6 The designer need not be concerned with the relationship between  $\phi_c$  and  $\phi_s$  since  $K_R$  is incorporated in the tabulated values. Reliability normalization is thus transparent to the designer.

X1.7.7  $K_R$  equations are generated by applying first-order, second-moment, Level 2 reliability methods using the Rackwitz-Fiessler algorithms.<sup>9</sup> The procedure is the following: Choose a target reliability index,  $\beta$ , and conduct the reliability analysis across a range of  $CV_w$  values. Plot the calculated  $\phi$  versus  $CV_w$  from these results to check for consistency and tabulate the  $\phi_c$  as a function of  $CV_w$ . Table 2 is an example of some specified resistance factors for an LRFD specification. Selected target reliability indices are based on many technical parameters and judgments. For example, the general level of the index is influenced by the underlying reliability calculation methods and on assumed distribution type. Other parameters that influence the relationship between calculated  $\phi$  and  $CV_w$  such as target load cases (for example, live or snow), appropriate load ratios (for example, ratios of live to dead or snow to dead loads), and tributary areas are also important. The target indices were chosen based on a 50-year life for a structure. Also examined were a range of commonly used primary structural members. A target reliability index of 2.4 was used for the bending strength properties of fifth-percentile-based products. For the purposes of determining  $K_R$ , the reliability analysis used the dead plus live load case with the load distributions given in *Load and Resistance Factor Design for Engineered Wood Construction—A Pre-Standard Report*.<sup>7</sup> This load case and the live to dead ratio of 3 are considered an appropriate basis for evaluating the reliability of wood-based materials used in structures addressed within the scope of ASCE 7-88.

X1.7.8 The target reliability index was computed for the reference case in which the ASTM-specified divisor is 2.1. For other cases, in which the ASTM-divisor differs significantly from 2.1, it is believed that the differences attempt to quantify factors to account for discrepancies between stress calculations in the ASTM test versus those in the structural-size member. An example of this is the larger divisor for shear, in which the results from the standard test specimen, a 4-in.<sup>2</sup> shear block, do not correlate directly with those on structural-size members. Thus, for the purposes of this specification, it is assumed that differing ASTM-divisors do not produce differing target reliability indices, but merely adjust for other factors not addressed elsewhere in the procedures. On this basis, it is necessary to include the same scaling in LRFD as is used in ASD.

<sup>9</sup> Thoft-Christensen, P., and Baker, M. J., *Structural Reliability Theory and Its Applications*, Springer-Verlag, New York, NY, 1982.

X1.7.9 Tabulated  $K_R$  values for bending were determined by this procedure. Reliability normalization factors for other properties were developed by scaling bending  $K_R$  values on the basis of ASTM ASD adjustment factors.

X1.7.10 The scaling provides an equivalent  $\phi_c$  for the other properties as follows:

$$\phi_c = [2.1/A][(K_R)(\phi_b)]_{\text{bending}}$$

where  $A$  is provided in the following table:

Material Property	Allowable Stress Design Adjustment Factor, $A$
Compression, bearing	1.9
Bending, tension	2.1
Shear—Lumber	4.1
Shear—SCL	3.15
Shear—I-Joist	2.37

For example, Table 3 provides a  $K_R$  value of 1.212 for bending at  $CV = 17\%$ .

X1.7.11 The  $K_R$  value for compression at the same  $CV$  is determined as:

$$\phi_c = [(2.1)/(1.9)][(1.212)(0.85)] = 1.139$$

$$K_R = \phi_c / \phi_t = 1.139 / 0.9 = 1.265$$

X1.7.12 Compared to allowable stress design, several changes in LRFD (choice of  $\beta$ , load factoring, time effect factor, and resistance  $CV_w$ ) dictate that most designs will change to a degree. The factors of Table 3 were computed after many iterations of these variables. These final factors generally minimize the changes (compared to ASD) introduced by the reliability-based LRFD system. A nearly

identical member design (compared to ASD) will occur when the application is a snow-loaded roof,  $S/D = 3$  and  $CV_w \approx 17\%$ . The reasoning behind the decisions underlying the Table 3 values is discussed in Gromala, et al.<sup>10</sup>

NOTE X1.1—*Example Derivation of LRFD Reference Resistance*—The following example provides the LRFD reference resistance for a bending member with a target reliability of  $\beta = 2.4$ . As shown in Eq (1), computing a reference resistance ( $R_n$ ) requires the calculation of three other quantities ( $R_p$ ,  $\Omega$ , and  $K_R$ ).

*Calculating  $R_p$* —As shown in Eq (2),  $R_p$  is a function of the two parameters of the Weibull distribution ( $\alpha$ , and  $\eta$ ). Appendix X2 provides two accepted methods for computing these parameters. For an example data set containing the failure stresses of 100 bending specimens, the shape parameter ( $\alpha$ ) is 5.75, and the scale parameter ( $\eta$ ) is 3425 psi. The Weibull parameters are substituted into Eq (2) to compute  $R_p$ . The computed fifth percentile is 2043 psi for this data set.

*Calculating  $\Omega$* —Table 1 provides numerical values of  $\Omega$  for various sample sizes and coefficients of variation. For the example data set,  $n = 100$  and the coefficient of variation is computed directly from the shape parameter as shown in Eq (3). For  $\alpha = 5.75$ , this yields a  $CV_w$  of 0.20, and  $\Omega = 0.94$ .

*Calculating  $K_R$* —Table 3 provides numerical values of  $K_R$  for various  $CV_w$  values. For this example with  $CV_w$  of 0.20, the  $K_R$  is 1.168. From Eq 1, the LRFD reference resistance is determined as follows:

$$R_n = [(0.94)(1.168)(2043)]$$

$$R_n = 2243 \text{ psi}$$

<sup>10</sup> Gromala, D. S., Sharp, D. J., Pollock, D. G., and Goodman, J. R., "Load and Resistance Factor Design for Wood: The New U.S. Wood Design Specification," *Proceedings 1990 International Timber Engineering Conference*, Tokyo, Japan, 1990.

## X2. PARAMETER ESTIMATION PROCEDURES

### X2.1 Method of Maximum Likelihood:

X2.1.1 This method may be used for parameter estimation with either complete or lower tail data sets. The method also defines convergence criteria for this iterative procedure. Use first  $n_c$  of  $n$  data (after ranking), as follows:

$$n_i = n - n_c$$

where:

$n_c$  = number of data values used in the analysis ( $n_c = n$  for complete data sets).

$n_i$  = number of data values not used.

Each such data point is assigned the value  $r_i$ , the maximum data value used.

X2.1.2 Calculate the  $CV$  ( $s/\bar{x}$ ) from the available data. This  $CV$  is to be used only as an initial value for the estimation procedure. Let  $(1/\alpha)$  approximate  $CV$ :

$$(1/\alpha) = \frac{\sum r_i^\alpha \ln(r_i) + n_i r_i^\alpha \ln(r_i)}{\sum r_i^\alpha + n_i r_i^\alpha} - \frac{\sum \ln(r_i)}{n_c}$$

Then iterate the above equation, updating  $\alpha$ , for 100 iterations or until the change in the absolute value of  $(1/\alpha)$

$< 0.00002$  ( $\ln$  is natural logarithm). Then,

$$\eta = [(\sum r_i^\alpha + n_i r_i^\alpha) / n_c]^{(1/\alpha)}$$

where all summations are from  $i = 1$  to  $n_c$ .

### X2.2 Method of Least Squares:

X2.2.1 This method may be used for parameter estimation with either complete or lower tail data sets. Use first  $n_c$  of  $n$  data (after ranking).

$n_c$  = number of data values used for analysis

( $n_c = n$  for complete data sets)

set  $x_i = \ln[-\ln\{1 - ((i - 0.3)/(n + 0.4))\}]$

independent variable

$y_i = \ln(r_i)$  dependent variable

where  $\ln$  = natural logarithm.

$$(1/\alpha) = \frac{n_c \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n_c \sum x_i^2 - \sum x_i \cdot \sum x_i}$$

and

$$\eta = \exp\{(\sum y_i) / n_c - (1/\alpha)(\sum x_i) / n_c\}$$

where all summations are from  $i = 1$  to  $n_c$ .

### X3. EXACT COEFFICIENT OF VARIATION CALCULATION METHOD.

X3.1 Coefficient of variation can be calculated using the Weibull shape and scale parameters along with the use of Table X3.1 or an equivalent computerized function.

$$CV_w = \frac{\eta[\Gamma(1 + 2(1/\alpha)) - \Gamma^2(1 + (1/\alpha))]^{1/2}}{\eta\Gamma[1 + (1/\alpha)]}$$

TABLE X3.1 Gamma Function; Values of  
 $\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx; \Gamma(n+1) = n\Gamma(n)$

<i>n</i>	$\Gamma(n)$	<i>n</i>	$\Gamma(n)$	<i>n</i>	$\Gamma(n)$	<i>n</i>	$\Gamma(n)$
1.00	1.00000	1.25	0.80640	1.50	0.88623	1.75	0.91908
1.01	0.99433	1.26	0.80440	1.51	0.88659	1.76	0.92137
1.02	0.98804	1.27	0.80250	1.52	0.88704	1.77	0.92376
1.03	0.98355	1.28	0.80072	1.53	0.88757	1.78	0.92623
1.04	0.97844	1.29	0.89904	1.54	0.88818	1.79	0.92877
1.05	0.97350	1.30	0.89747	1.55	0.88887	1.80	0.93138
1.06	0.96874	1.31	0.89600	1.56	0.88964	1.81	0.93408
1.07	0.96415	1.32	0.89464	1.57	0.89049	1.82	0.93685
1.08	0.95973	1.33	0.89338	1.58	0.89142	1.83	0.93969
1.09	0.95546	1.34	0.89222	1.59	0.89243	1.84	0.94261
1.10	0.95135	1.35	0.89115	1.60	0.89352	1.85	0.94561
1.11	0.94739	1.36	0.89018	1.61	0.89468	1.86	0.94869
1.12	0.94359	1.37	0.88931	1.62	0.89592	1.87	0.95184
1.13	0.93993	1.38	0.88854	1.63	0.89724	1.88	0.95507
1.14	0.93642	1.39	0.88785	1.64	0.89864	1.89	0.95838
1.15	0.93304	1.40	0.88726	1.65	0.90012	1.90	0.96177
1.16	0.92980	1.41	0.88676	1.66	0.90167	1.91	0.96523
1.17	0.92670	1.42	0.88636	1.67	0.90330	1.92	0.96878
1.18	0.92373	1.43	0.88604	1.68	0.90500	1.93	0.97240
1.19	0.92088	1.44	0.88580	1.69	0.90678	1.94	0.97610
1.20	0.91817	1.45	0.88565	1.70	0.90864	1.95	0.97988
1.21	0.91558	1.46	0.88560	1.71	0.91057	1.96	0.98374
1.22	0.91311	1.47	0.88563	1.72	0.91258	1.97	0.98768
1.23	0.91075	1.48	0.88575	1.73	0.91466	1.98	0.99171
1.24	0.90852	1.49	0.88595	1.74	0.91683	1.99	0.99581
						2.00	1.00000

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.*