

炭素繊維強化集成材の強度特性（1）

—炭素繊維による強化方法と曲げ強度性能との関係—

柴田直明・橋爪丈夫

集成材の強度性能等を向上させるため、産学官の共同で、炭素繊維による補強・強化技術の開発を進めてきた。1997年度には木材との接着性能に優れた「炭素繊維シート」を開発し、2 m長の集成材の最外層表面（上下面）に接着して曲げ強度試験を実施し、次の結果を得た。（1）曲げヤング係数は、炭素繊維の使用量に応じて向上した。CF強化によるヤング係数の増分はバラツキが極めて小さく、等価断面法で高精度の予測が可能であった。（2）曲げ強さは、曲げヤング係数以上に向上した。強化後の曲げ強さはバラツキも小さく、より信頼性の高い部材となった。（3）本試験に用いた「炭素繊維シート」は、炭素繊維自体のヤング係数の78%以上を発現させることができた。（4）使用する炭素繊維のみの厚さが梁背の0.5%程度までの場合は下面のみの強化が、それ以上の場合は原則として上下面の強化が有効であると思われる。

キーワード：集成材、炭素繊維強化、曲げヤング係数、曲げ強さ、変動係数

1 緒言

集成材は、エンジニアードウッドを代表する優れた材料である。しかし、曲げ荷重下では引張側の節やフィンガージョイント部等が弱点となる。また、木材のみで造る以上、その強度性能には自ずから限界がある。

そこで、集成材の弱点を補強し、さらに高性能化を図るため、各種の繊維や鋼材を用いた複合強化の研究が、日本を含めた世界各地で進められている。最近では、北米を中心に、実用化例も多く見られるようになった¹⁾。

筆者らは[†]は、1996年から炭素繊維（以下、CF）を用いた強化集成材の開発を進めてきた¹⁻¹¹⁾。

本研究に用いたCFはアクリル系合成繊維（PAN）から作られており、軽量で、かつ強度性能が著しく高いものである（表-1）。

このようなCFは、釣竿やゴルフクラブ等のスポーツ用品をはじめとして、一般産業用途・航空宇宙用途にまで、幅広く利用されている。また、近年はコンクリート橋脚等の補強材としても使われている。

ただし、構造用集成材を強化するに当っては、いくつかの新たな技術開発が必要であった。

本研究では、まず新規の「CFシート」の開発から着手した。このシートの特徴は、主として次の2点であった。

- ① 耐火・耐熱性能の観点から、フェノール系およびレゾルシノール系樹脂を選択し、CFとの接着性に優れた新たなマトリックス樹脂を開発した（通常は、エポキシ樹脂が使われている）。
- ② 上記の樹脂に含浸させたCF（長さ方向に配向）を樹脂含浸紙等で挟み、あらかじめ加熱・硬化させて、任意の寸法のCFシートにした。このようなCFシートの開発により、常温での保管・輸送等が可能になるとともに、種々の製造・加工工程が容易になった。また、CFシートを集成材へ接着する際にも木材用のレゾルシノール樹脂が使えるようになり、集成材工場において薄い

表-1 各種材料の強度性能（一例）

材料の種類	引張強さ (N/mm ²)	引張ヤング 係数(kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)
炭素繊維 ^{*1}	4,050	236	1.77
ガラス繊維	3,430	73.6	2.57
アラミド繊維	2,840	109	1.45
軟鋼 ^{*2}	400	206	7.86
カラマツ ^{*3}	83.4	9.8	0.50
スギ ^{*3}	88.3	7.4	0.38

*1 本研究に用いた東邦テナックス(株)製 HTA-12K の値

*2 引用文献 12) による

*3 引用文献 13) による。強度性能は無欠点試片での値

† 本報の試験に携わった主たるメンバーの（試験当時の所属）氏名

（京都大学木質科学研究所）石原茂久，（東邦テナックス）小川博靖，遠藤善博，

（リグナイト）井出勇，樋口尚登，（アイカ工業）月東秀夫，上野加恵，（齋藤木材工業）齋藤健，田中宏明，

（長野県林業総合センター）橋爪丈夫，柴田直明

ラミナと同様に取り扱うことが可能になった。

次いで、このCFシートを2m長の集成材等に接着し、種々の性能評価と、それに基づく改良を繰り返した。その結果、集成材との接着性能等も徐々に改善され、工業材料として評価し得るものとなった^{2-3,5)}。

そこで、1997年度には2m長のスギ・カラマツ集成材を計72体作製し、CFシートによる強化方法と曲げ強度性能の向上との関係等を検討した^{4,6)}。本報では、この試験の結果を報告する。

なお、本報で用いる「CF」以外の略号を以下に記す。

- FJ : フィンガージョイント
- (試験体の) 上面 : 曲げ試験時の圧縮側表面
- (試験体の) 下面 : 曲げ試験時の引張側表面
- MOE : 曲げヤング係数
- MOR : 曲げ強さ

2 試験の方法

2.1 集成材の作製

基材となるスギ・カラマツ構造用集成材の仕様を、表-2に示す。使用したラミナは、含水率が10%以下になるように人工乾燥され、その後室内

にて数ヶ月以上養生されたものであった。従って、含水率はほぼ11~12%程度に仕上がっていた。これらのラミナは等級区分機を通して選別した後、表-3のレゾルシノール樹脂を用いて集成化した。

表-4の試験-1ではスギおよびカラマツ集成材を12体ずつ、試験-2では24体ずつ、計72体を作製した。

これらの集成材は、「構造用集成材の日本農林規格」の曲げA試験に従い、あらかじめMOEを測定した。測定条件は、図-3と同様にした。

表-2 スギ・カラマツ構造用集成材の仕様

スギラミナ	L60 および L70 のラミナから無作為に抽出
カラマツラミナ	L90 および L100 のラミナから無作為に抽出
集成材寸法	両樹種とも、すべて 45 (b) × 105 (h) × 2,000 (L) mm
ラミナの積層枚数	すべて 5 枚
FJ	引張側最外層ラミナには、必ず中央部に設定
試験体数	1 条件当たり、すべて 6 体

表-3 本試験に用いたCF、樹脂等の品番・性能・混合比等 (混合比は、すべて重量比で示す)

CF	東邦テナックス(株) HTA-12K (配向 : 1 方向)	密度 1.77 g/cm ³ 引張ヤング係数 236 kN/mm ² , 引張強さ 4050 N/mm ²
レゾール型フェノール樹脂	リグナイト(株) AH-343 : D-5 = 100 : 20	(本試験に用いたCFプリプレグの樹脂含有率 : 57wt%)
レゾール型フェノール樹脂含浸紙	リグナイト(株) PFP-2	
レゾルシノール樹脂	大鹿振興(株) D-300 : D30M : 水 = 100 : 18 : 22	

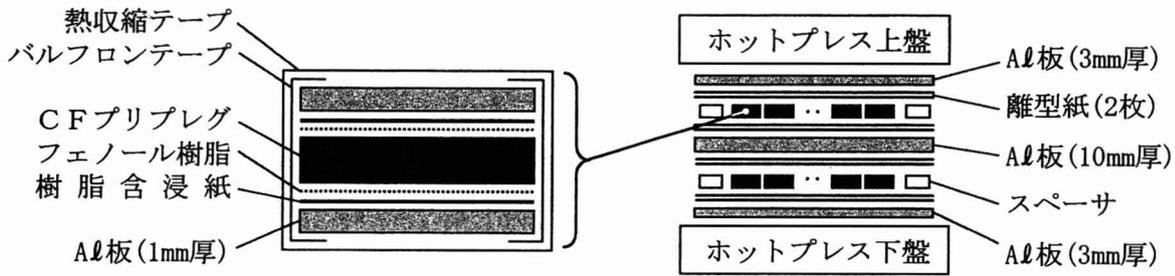
表-4 試験-1, 2に用いたCFシート1枚当りの諸データと、集成材の強化面および記号

試験 No.	CF使用量 (g/m ²)	CF厚さ *1 (mm)	CF厚さ率 *2 (%)	曲げ試験における集成材の強化面	CF強化集成材の記号 *3
1	1,200	0.678	0.646	上面および下面 (無強化)	S ₁ 646/646, K ₁ 646/646
	0 (コントロール)				S ₁ 0/0, K ₁ 0/0
2	600	0.339	0.323	上面および下面	S ₂ 323/323, K ₂ 323/323
	300	0.169	0.161	下面のみ	S ₂ 0/161, K ₂ 0/161
	150	0.085	0.081	下面のみ	S ₂ 0/081, K ₂ 0/081
	0 (コントロール)			(無強化)	S ₂ 0/0, K ₂ 0/0

*1 表-3に示したCFの密度 (1.77 g/cm³) から算出した「CFのみの厚さ」

*2 集成材の梁背 (本試験では105mm) に対するCF厚さの百分率

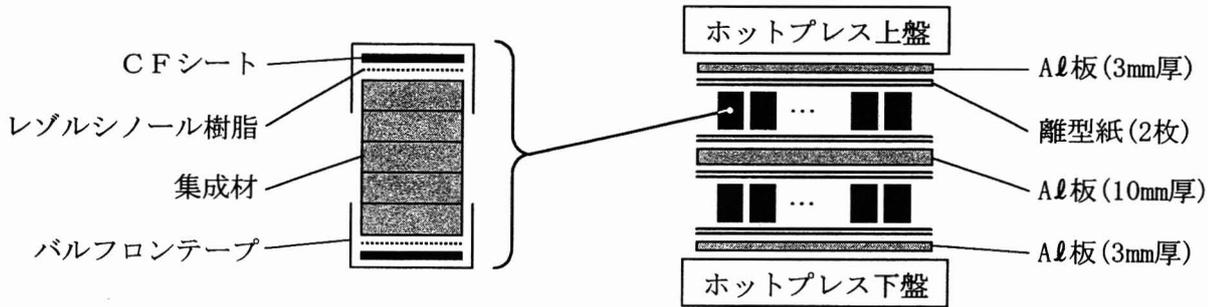
*3 S : スギ, K : カラマツ, 下付き数字 : 試験 No., 数字/数字 : 上面/下面のCF厚さ率の小数点以下3桁



(1) CFシート1枚当りのセット方法

(2) ホットプレスによる熱圧方法 (試験-1の例)

図-1 CFシートの作製方法 (横断面図)



(1) CFシートと集成材のセット方法

(2) プレスによる接着方法 (試験-1の例)

図-2 CF強化集成材の作製方法 (横断面図)

次いで、それぞれの試験体グループごとのMOE平均値がほぼ等しくなるように、これらの集成材を仕分けた。即ち、試験 No. および樹種別にそれぞれの集成材をMOEの降順に並べ、MOEの高いものから順に試験-1では2グループ、試験-2では4グループに振り分けた。

2.2 CFシートの作製

本試験に用いたCF、樹脂等を表-3に示す。

CFの配向はすべて長さ方向とし、CF使用量の基本単位は $150\text{g}/\text{m}^2$ に統一した。そして、新たに開発したレゾール型フェノール樹脂を含浸させ、1方向プリプレグとした。本プリプレグの寸法は幅45mm、長さ2,000mm強とし、冷蔵後、保冷箱に入れて搬送した。

CFシートの作製に当っては、まずCFプリプレグを常温に戻し、表-4のCF使用量になるよう、必要な枚数だけ積層した。

次いで、最外層表面にのみレゾール型フェノール樹脂を $100\text{g}/\text{m}^2$ の割合で塗布した後、レゾール型フェノール樹脂含浸紙で挟んだ (図-1の(1))。これらは、さらに離型剤を塗布したアルミニウム

板 (図中、Al板) で挟み、バルフロンテープで側面からはみ出しを防いだ上、熱収縮テープで全長をらせん状にシールした。

ホットプレスによる熱圧方法を、図-1の(2)に例示する。ホットプレスは、高木金属工業(株)製OUB-ESを用いた。このプレスは電熱ヒーター加熱方式で、熱盤寸法は $640 \times 2,160\text{mm}$ であった。

図-1の(2)のようにセットした後、 $0.49\text{N}/\text{mm}^2$ まで加圧した。この状態で熱盤温度を 95°C まで上昇させ、同温度にて3時間保持した後、そのまま一晩かけて放冷させた。

2.3 CF強化集成材の作製

上記2.2で作製したCFシートは、集成材との接着面をサンダーがけした後、集成材の上面および下面、あるいは下面にのみ接着した。

なお、試験-1では集成材の作製からCFシートの接着までの期間が1ヶ月以上あった。そこで、集成材の上下面をプレーナで約 0.5mm ずつ切削し、高さを 104.0mm にしてからCFシートを接着した。

CFシートの接着方法を、図-2に例示する。レゾールシノール樹脂は、表-3に記載した集成材用の

ものを用い、塗布量は 300g/m^2 とした。

プレスは、2.2のホットプレスを用いた。

接着条件は、常温、圧縮圧 0.78N/mm^2 、24時間とした。ただし、試験-1では夜間に低温となったため、熱盤温度を 30°C に保持した。

本報では、以下、各試験体グループを表-4の「CF強化集成材の記号」で表記する。また、CF強化の程度は、これらの記号の数字部分を用い、646/646等と記すことにする。

2.4 強度特性の評価

強度特性は、「構造用集成材の日本農林規格」の曲げA試験で評価した。試験機は、ミネベア(株)製万能試験機 TCM-5000 を用いた。試験条件を、図-3に示す。上部荷重点におけるめり込み等为了避免するため、試験-1の途中から、CFシート数枚を挟んだ(図-3のc)。このCFシートは1枚当りのCF使用量が $1,200\text{g/m}^2$ のもので、幅は 45mm 、長さは約 200mm とした。

クロスヘッドスピードは 5mm/min としたが、 50mm 以上たわんだ場合には、特に問題のない限り 10mm/min に切り替えた。

変位計 a (測定範囲: 50mm) は、MOEを算出するため、試験体中央上面にセットした。CF強化前後のMOEは、図-3に示したように、荷重範囲 $0.588\sim 2.94\text{kN}$ で測定した。

比例限の判定に当たっては、変位計 a による 0.294kN ごとの変位差を見て、その値が連続して数%以上増加した時点で、比例限を逸脱したと見なした。

本試験では、試験体上面のCFシートが剥離して上方に跳ね上がる危険性があったため、変位計 a は比例限を越えたところで取り外した。

変位計 b (測定範囲: 100mm) は試験終了時まで取り付けておき、クロスヘッドの下降量を測定した。本報では、CF強化後の最大荷重時たわみとして、この測定値を代用した。なお、この値には上部荷重点が試験体に接するまでのわずかな距離を含むため、実際の荷重開始後の下降量よりは $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 程度大きい値となった。

また、本報では「荷重-変位曲線」を記録する際にも、変位計 a で測定した中央たわみではなく、変位計 b で測定したクロスヘッドの下降量を用いた。本曲線の記録には、試験機に付随した X-Y プ

クロスヘッドスピード: $5 (10)\text{mm/min}$
 荷重・変位データ 印字間隔: 0.294kN
 MOE測定範囲: $0.588\sim 2.94\text{kN}$

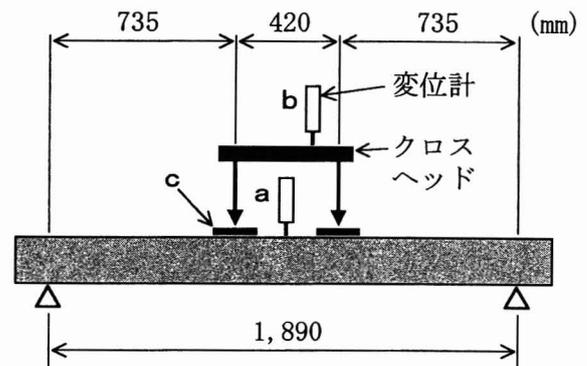


図-3 曲げ試験の条件

c : CF使用量 $1,200\text{g/m}^2$ のCFシート数枚
 (表-4の試験-1の途中から挿入)

ロッタを用いた。

表-4の試験-2では破壊過程がやや複雑であったので、その経過も記録に残した。

MOEやMORの5%下限値を算出するに当たっては、ASTM D2915¹⁴⁾のTable 3において、75% Confidenceの $n=6$ に示された係数Kを用いた。即ち、5%下限値は次式で求めた。

$$5\% \text{下限値} = \text{平均値} - 2.336 \times \text{標準偏差}$$

等価断面法でMOEを試算する際には、基材となる集成材部のMOEを均等と見なし、1層のラミナとして計算した。

3 結果と考察

3.1 荷重-変位曲線と曲げ破壊過程の特徴

3.1.1 CF強化集成材の荷重-変位曲線

ここでは上述のように、「荷重」と「クロスヘッドの下降量」との関係性を求めて、検討を加えた。

表-4の試験-1, 2において、樹種・強化条件別に平均的な曲線を1例ずつ選び、図-4, 5に示す。すべての曲線は、本報の末尾に付図-1~6として添付した。

なお、これらのグラフはX-Yプロットの関係上、横軸に荷重、縦軸にクロスヘッドの下降量を採用している。X, Y軸の目盛は図-4の左上にのみ示したが、図-4, 5ともすべて共通である。

これらのグラフを見ると、CF強化の程度が大

きくなるほど、比例域における（荷重の増分/クロスヘッド下降量の増分）の値や最大荷重が大きくなっていった。従って、曲げヤング係数・曲げ強さも向上していることは明らかである。

また、強化方法によっては、最大荷重に達した後も、ある程度の強度を保持する例が多く認められた。このことは、CF強化の方法によっては、集成材がねばりのある部材になり得ることを示唆している。

3.1.2 CF強化集成材の曲げ破壊過程の特徴

試験-2については、その破壊過程を図中に示した（図-5）。

コントロール材は、通常の集成材の場合と同様、ほとんどが引張側最外層ラミナのF J部から破壊した。その他は、同ラミナの節から破壊した。そして、これらの破壊1回のみで荷重値を大幅に減少させ、試験終了となった（図-4、5）。

CF強化した集成材でも、ほとんどは引張側最

外層ラミナのF J部から破壊が始まった。ただし、木部で破壊が始まってもCFシートは破壊されず、直ちには大破に至らない場合が多かった（図-4、5）。

下面のみをCF強化した試験体（0/161, 0/081）では、計24体中8体において、集成材上面での圧縮破壊が観察された。上下面をCF強化した試験体（646/646, 323/323）では、最終的な破壊に至る前に、上面のCFシートが中央部付近で剥離して座屈する例も見られた。

図-4、5におけるすべての最終的な破壊と一部の途中の破壊では、集成材下面側におけるCFシートの破断あるいは剥離を伴った。CF厚さ率0.081%のシートを用いて集成材下面のみを強化した試験体12体では、10体において同シートの破断が認められた。これに対し、CF厚さ率0.161%以上のシートの場合は、主として集成材とCFシートとの接着層における剥離が認められた。

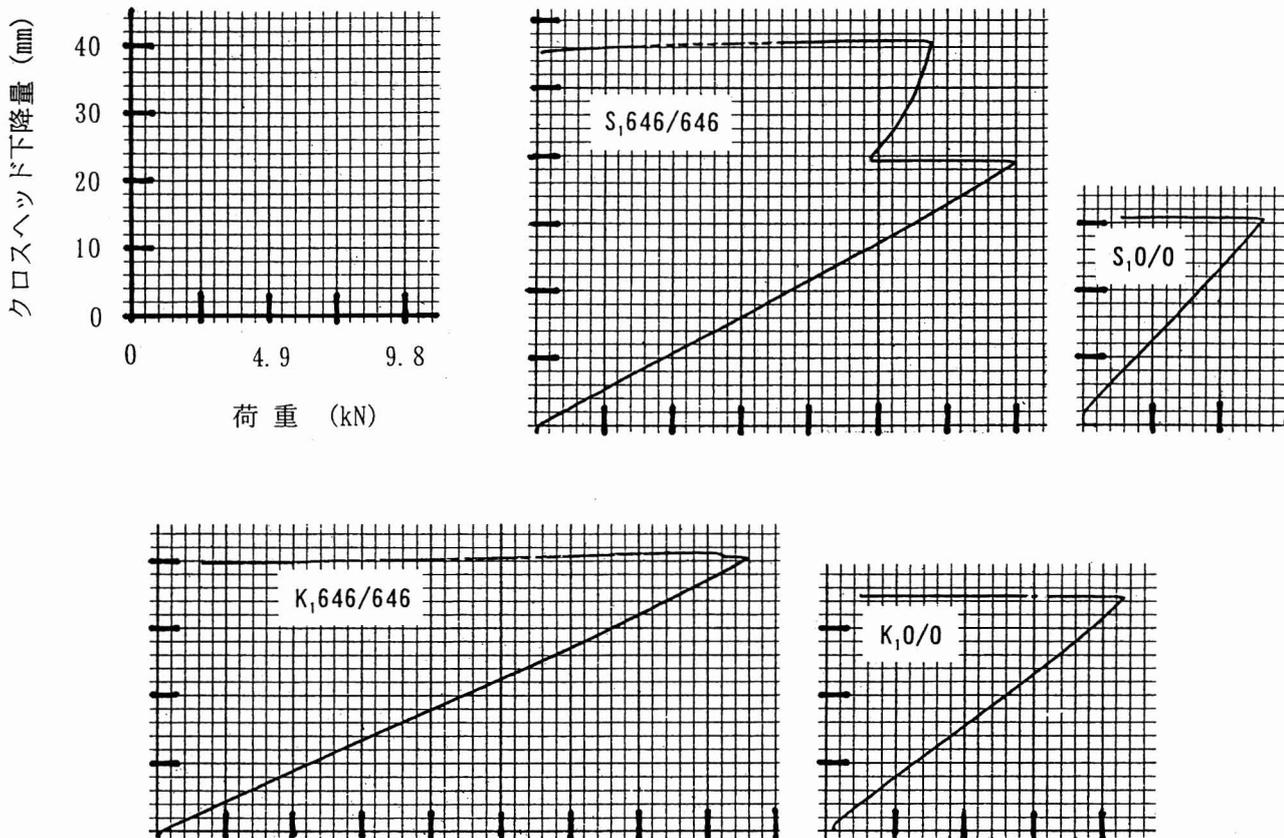


図-4 試験-1のCF強化スギ・カラマツ集成材における、荷重とクロスヘッド下降量との関係

X, Y軸の目盛は、すべて左上のグラフと同じ

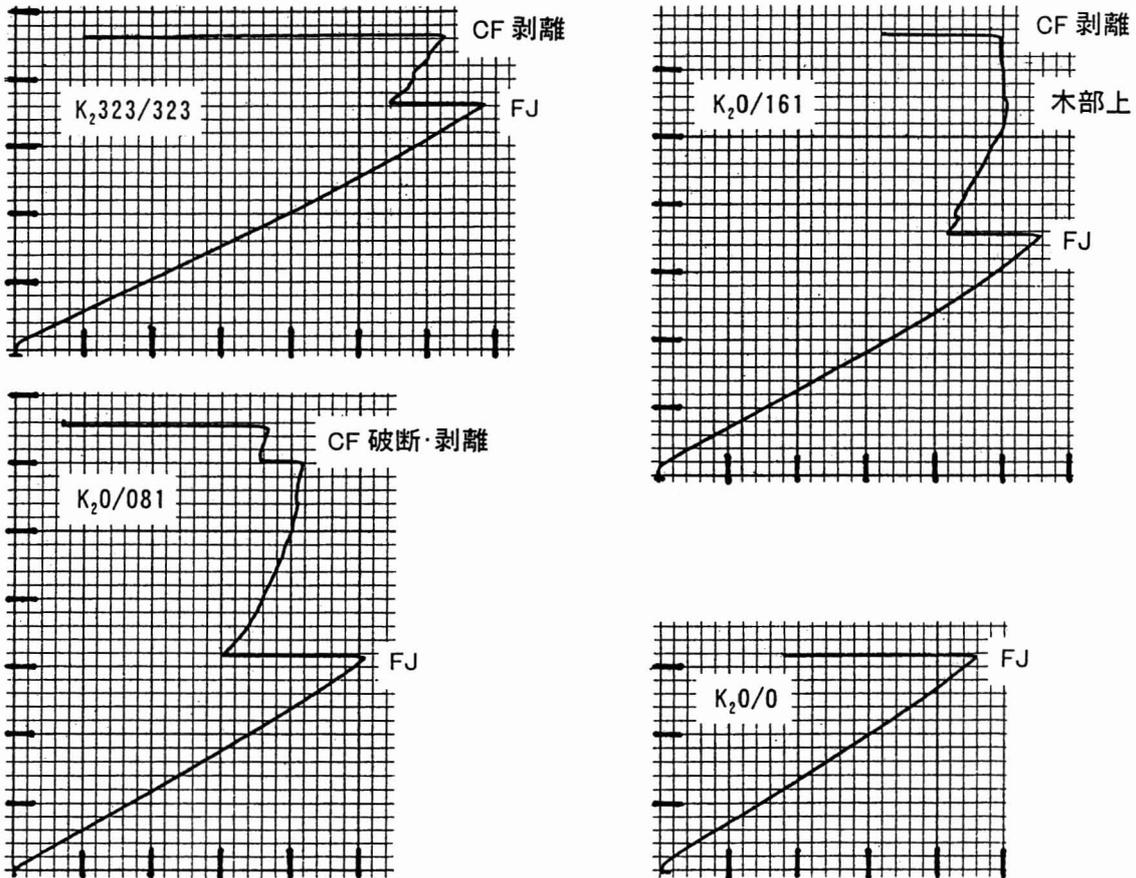
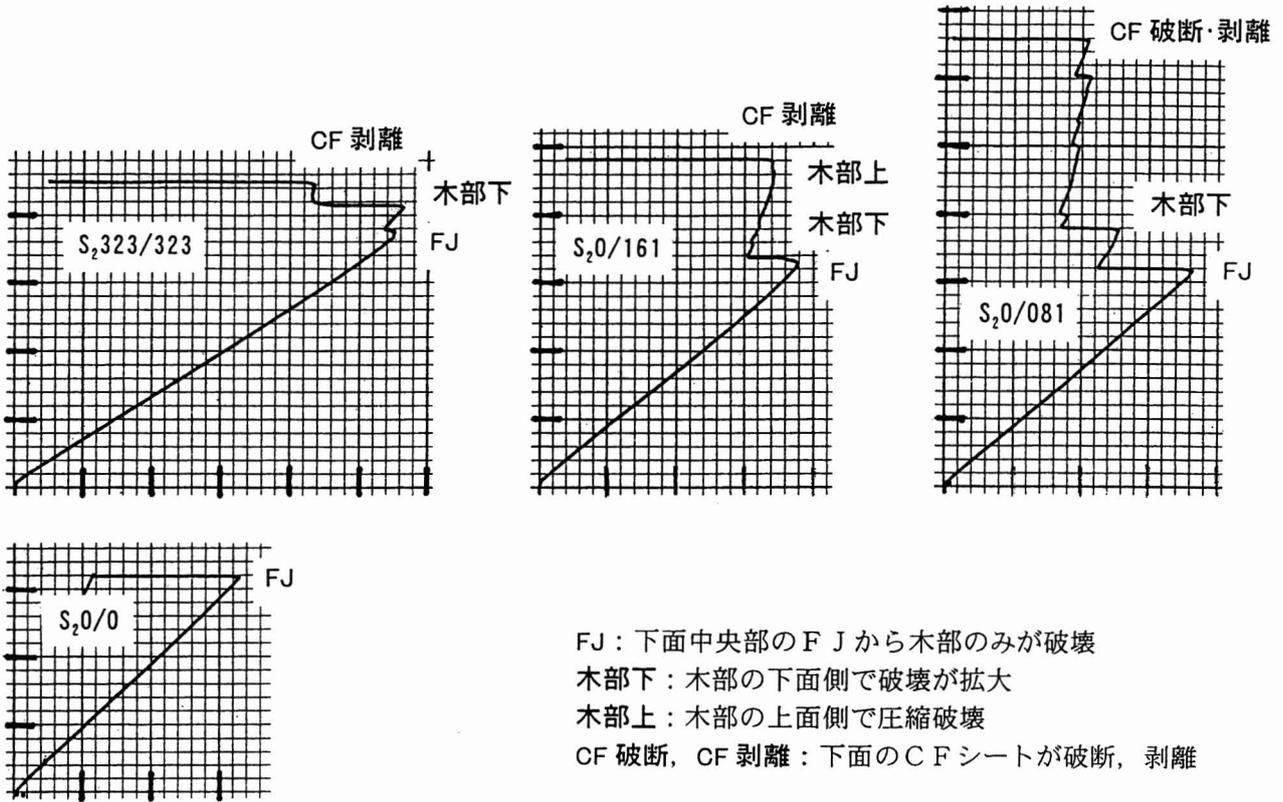


図-5 試験-2のCF強化スギ・カラマツ集成材における、荷重とクロスヘッド下降量との関係
 X, Y軸の目盛は、すべて図-4の左上のグラフと同じ

表-5 試験-1, 2におけるCF強化集成材およびCFシートの各種強度性能

試験No. (樹種) 記号 (表-4 参照)	1 (スギ)		1 (カラマツ)		2 (スギ)				2 (カラマツ)					
	S ₁ 646/646	S ₁ 0/0	K ₁ 646/646	K ₁ 0/0	S ₂ 323/323	S ₂ 0/161	S ₂ 0/081	S ₂ 0/0	K ₂ 323/323	K ₂ 0/161	K ₂ 0/081	K ₂ 0/0		
CF強化前	高(mm)	平均	106.47	106.51	106.19	106.30	105.81	105.83	105.89	105.88	105.80	105.73	105.72	105.91
	密度(g/cm ³)	平均	0.376	0.383	0.526	0.506	0.383	0.391	0.390	0.384	0.552	0.551	0.557	0.552
		変動係数(%)	3.51	2.95	3.16	4.07	3.04	3.01	2.93	3.02	3.77	3.92	5.68	4.78
	MOE(kN/mm ²)	平均	6.55	6.32	10.16	9.67	7.07	7.11	7.31	7.18	10.81	10.98	11.10	10.67
		標準偏差	0.43	0.61	0.96	1.37	0.64	0.65	0.68	0.64	1.27	1.20	1.19	1.35
		変動係数(%)	6.5	9.7	9.5	14.1	9.0	9.1	9.3	8.9	11.8	10.9	10.7	12.7
		5%下限値	5.56	4.89	7.91	6.48	5.59	5.59	5.72	5.69	7.84	8.18	8.32	7.51
CF強化後	高(mm)	平均	109.04	—	109.08	—	108.65	106.70	106.39	—	108.59	106.48	106.33	—
	比例限荷重(kN)	平均	9.91	4.07	12.06	4.76	6.82	5.49	5.30	4.07	8.43	6.13	6.42	4.66
		変動係数(%)	2.4	19.1	11.8	23.9	14.3	21.1	12.7	26.8	30.4	28.1	14.6	11.6
	同 たわみ(mm)	平均	22.00	18.74	21.62	14.42	18.47	19.68	19.67	16.65	16.98	14.83	16.23	12.76
		変動係数(%)	4.9	15.0	14.7	14.4	10.7	15.3	10.3	23.3	24.9	20.6	12.0	9.2
	最大荷重(kN)	平均	17.99	6.41	20.91	9.59	12.99	9.68	8.75	7.27	17.52	12.76	12.88	10.63
		変動係数(%)	8.0	8.7	6.4	25.2	7.5	6.4	11.5	18.9	7.3	7.8	7.2	10.2
	同 たわみ(mm)	平均	43.36	30.31	40.01	31.36	43.07	37.17	33.87	31.04	41.90	42.42	42.86	31.46
		(=クロスヘッド [*] 下降量) 変動係数(%)	8.4	5.8	8.0	23.0	7.2	9.9	8.7	17.9	19.2	41.6	33.1	9.3
	MOE(kN/mm ²)	平均	12.31	6.34	15.35	9.65	10.03	7.98	7.85	7.30	13.54	11.91	11.59	10.85
		標準偏差	0.37	0.64	0.81	1.38	0.47	0.68	0.63	0.62	1.06	1.18	1.22	1.38
		変動係数(%)	3.0	10.0	5.3	14.3	4.7	8.5	8.1	8.5	7.8	10.0	10.5	12.8
		5%下限値	11.44	4.85	13.46	6.44	8.94	6.40	6.37	5.85	11.06	9.14	8.75	7.62
	比例限MOE(kN/mm ²)	平均	12.26	6.31	15.24	9.64	10.03	7.94	7.81	7.28	13.39	11.78	11.50	10.82
		変動係数(%)	3.0	9.7	5.1	14.3	4.7	8.2	7.9	8.4	7.4	9.5	10.2	12.8
	MOR(N/mm ²)	平均	74.8	27.9	87.0	41.9	53.8	41.4	37.8	32.2	72.6	55.0	55.7	46.3
		標準偏差	5.9	2.3	5.6	10.3	4.1	2.8	4.3	5.5	5.4	4.3	4.1	4.9
		変動係数(%)	7.9	8.4	6.4	24.6	7.7	6.7	11.5	17.1	7.4	7.9	7.4	10.5
		5%下限値	61.0	22.4	74.0	17.8	44.2	35.0	27.6	19.4	60.0	44.9	46.1	34.9
MOE実測値の増分(kN/mm ²)	平均	5.76	0.02	5.19	-0.02	2.95	0.86	0.54	0.12	2.72	0.93	0.49	0.18	
	標準偏差	0.24	0.05	0.27	0.07	0.20	0.05	0.06	0.07	0.23	0.09	0.16	0.07	
	変動係数(%)	4.1	319.6	5.1	-289.6	6.9	5.2	11.3	60.5	8.3	10.2	33.2	39.5	
MOE補正值(kN/mm ²)	平均	12.29	6.32	15.37	9.67	9.91	7.86	7.73	7.18	13.36	11.73	11.41	10.67	
	同 増分(kN/mm ²)	平均	5.74	0.00	5.21	0.00	2.84	0.75	0.42	0.00	2.54	0.75	0.31	0.00
	変動係数(%)	4.1	—	5.1	—	7.1	6.0	15.5	—	8.9	12.5	51.7	—	
CF効率100%時の 強化後MOE試算値(kN/mm ²)	平均	14.07	—	17.20	—	10.84	8.01	7.75	—	14.30	11.81	11.48	—	
	増分	7.52	—	7.04	—	3.77	0.90	0.44	—	3.49	0.83	0.38	—	
MOE補正值を与える CFシートのMOE(kN/mm ²)	平均	49.55	—	49.20	—	44.66	40.73	35.18	—	44.49	44.37	31.73	—	
	変動係数(%)	3.3	—	3.1	—	4.8	6.0	11.1	—	4.0	9.5	34.3	—	
上記のCF効率(%)	平均	78.6	—	78.1	—	78.2	84.6	96.2	—	77.9	92.2	86.7	—	
	変動係数(%)	3.3	—	3.1	—	4.8	6.0	11.1	—	4.0	9.5	34.3	—	

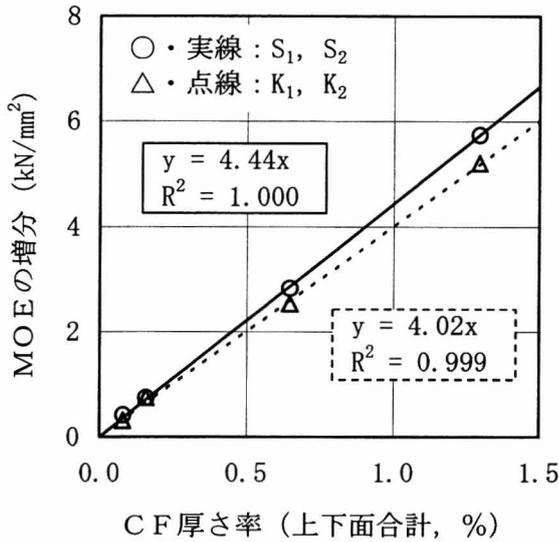


図-6 CF厚さ率(上下面)とMOEの増分
MOEの増分は、MOE補正值から求めた。

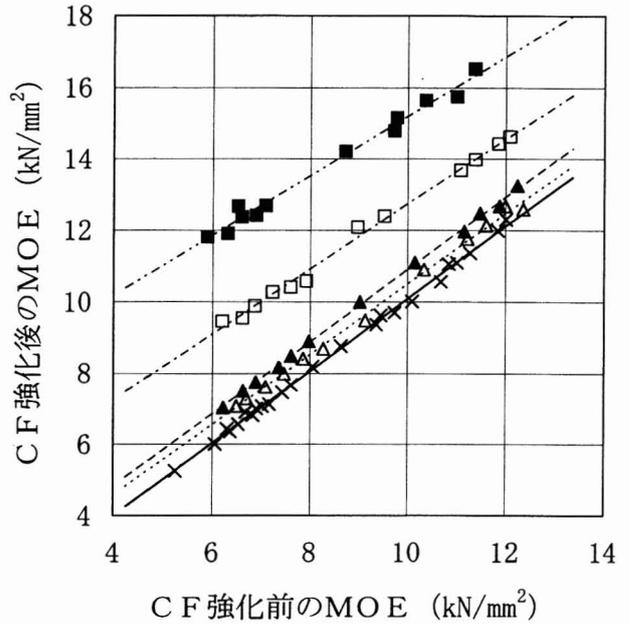


図-7 CF強化前後におけるMOEの向上

凡例	CF強化	近似式	決定係数
■・2点鎖線	646/646	$y=0.837x+6.83$	$R^2=0.987$
□・1点鎖線	323/323	$y=0.913x+3.62$	$R^2=0.995$
▲・破線	0/161	$y=1.014x+0.77$	$R^2=0.999$
△・点線	0/081	$y=0.988x+0.62$	$R^2=0.997$
×・実線	0/0	$y=1.014x-0.04$	$R^2=0.998$

表-6 CF強化後のMOEの標準誤差等

CF強化	646/646	323/323	0/161	0/081	0/0
試験体数 *1 (個)	12	12	12	12	24
平均値 (kN/mm ²)	13.83	11.78	9.94	9.72	9.08
標準誤差 (kN/mm ²)	0.205	0.151	0.076	0.123	0.102
標準誤差/平均値 *2 (%)	1.48	1.28	0.76	1.27	1.12
K×標準誤差 *3 (kN/mm ²)	0.420	0.309	0.156	0.252	0.194

*1 CF強化の程度が等しい2樹種の試験体は、一連のものとして評価した。

*2 (標準誤差/平均値×100)として求めた。

*3 Kは2.4で述べたASTMの係数。n=12の時K=2.048, n=24の時K=1.901

3.2 CF強化によるMOEの向上

3.2.1 CF厚さ率とMOEの増分

表-5に、試験結果の全体をまとめて示す。個々の測定データは、本報の末尾に付表-1～3として添付した。

表-5のCF強化前後の欄において、単にMOEとして記した値は、荷重範囲0.588～2.94kNにおいて求めたものである。本報ではCF強化前後のMOEの比較が重要となるので、主としてこのM

OEの値を用いて検討を進める。

なお、このMOEの方が、比例限MOEより若干大きい値になった。

次に、表-5ではCF強化前後のMOEの増分も算出した。その結果、無強化の集成材でも、MOEの平均値は若干増減していた。これは、保管中のわずかな含水率変化等が影響しているものと思われる。

そこで、試験No.および樹種別に無強化集成材

のMOE増分の平均値を一律に差し引き、個々の試験体のMOE補正値を求めた。即ち、表-5に記した試験-1のスギ試験体12体を例にとると、各試験体のCF強化後のMOE値から一律に0.02 kN/mm²を差し引いた値を、それぞれのMOE補正値とした。以下、MOEの値としてこの補正値を用いた場合は、その旨を明記する。特に断らない場合は、MOEの実測値を用いた。

CF厚さ率の上下面の合計値とMOE補正値の増分との関係を、図-6に示す。原点を通る直線で近似すると、決定係数(相関係数Rの2乗)が0.999以上となった。従って、CF強化によるMOEの増分は、CF厚さ率に比例すると判断される。ただし、基材のMOEの大小によって、近似直線の傾きは若干異なった。

そこで、さらにCF強化前後のMOEの関係を検討した(図-7)。図中のプロットの並び方から、ここでは試験No.や樹種による区分はせず、CF強化の程度だけでグループ分けすることを試みた。その結果、直線近似によって非常に高い相関関係が得られた。

なお、これらの近似直線を比較すると、グラフ上で上位の直線ほど、その傾きが小さくなる傾向が見て取れる。このことは、図-6において、基材のMOEが大きいカラマツ集成材の方が、MOEの増分が小さかったことと一致する。

等価断面法に基づいて考えると、図-7における無強化集成材の近似直線を $y = x$ 、CFシートのヤング係数を E_{CF} とした場合、無強化集成材の近似直線とCF強化集成材の近似直線は、座標(E_{CF} , E_{CF})において交わるはずである。従って、上記の傾向は理論的にも一応は説明できる。この点については、3.5.1において再度検討する。

3.2.2 CF強化後のMOEのバラツキ等

表-5において、CF強化前のMOEの標準偏差、変動係数、5%下限値を比較すると、それらの値は試験条件(試験体グループ)によって若干異なっていた。従って、それぞれの値を単純にコントロールと比較することは困難であった。

そこで、ここでは各試験条件別に、CF強化前後におけるそれぞれの値を比較することにした。

図-8では、CF強化前後におけるMOE平均値の倍率をX軸に、標準偏差、変動係数および5%

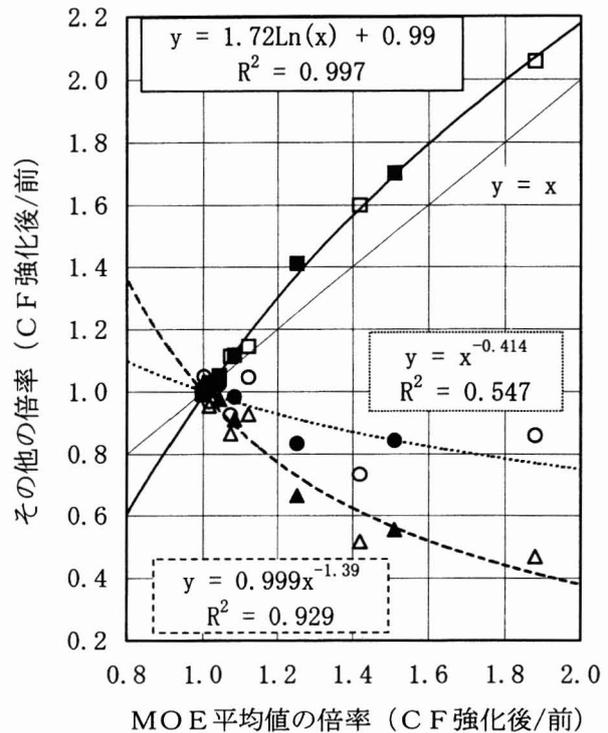


図-8 CF強化前後のMOE関連値の増減

- : 標準偏差(スギ), ● : 標準偏差(カラマツ)
 - △ : 変動係数(スギ), ▲ : 変動係数(カラマツ)
 - : 5%下限値(スギ), ■ : 5%下限値(カラマツ)
- 各近似曲線は、両樹種の点全体から求めた。

下限値の倍率をY軸にとった。

標準偏差は、CF強化の程度が大きいほど、若干小さくなる傾向があった。そのため、変動係数の倍率は $y = 1/x$ の曲線(図-8では表示せず)よりも下方にプロットされた。また、5%下限値は $y = x$ の直線よりも上方に位置した。

よって、CF強化により、MOEの変動係数が小さくなること、MOEの5%下限値が平均値の倍率以上に改善されることが確認された。

なお、図-7では各プロットがほぼ近似直線上に存在する。表-5においてCF強化後のMOEとその増分の標準偏差を見ると、後者の方が小さい。よって、CF強化後のMOEの標準偏差には、基材のバラツキの影響が含まれていると考えられる。また、CF強化の前後における標準偏差の大小には、近似直線の傾きも関係する。

そこで、さらに図-7の各近似直線において、それぞれの標準誤差を求めてみた(表-6)。その結果、CF強化の程度が大きいものほど、標準誤差も若干大きくはなった。しかし、いずれも小さな

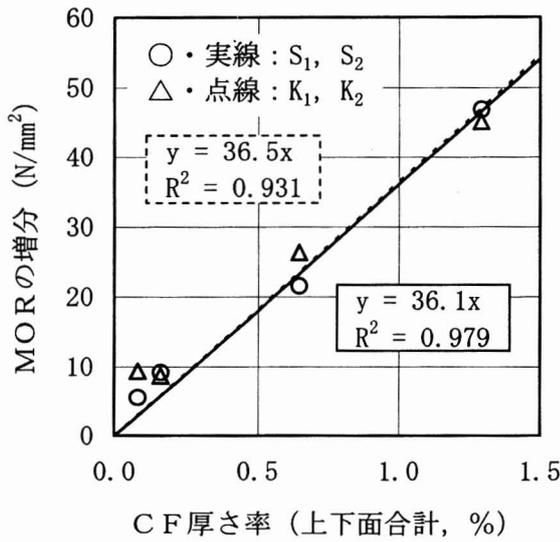


図-9 CF厚さ率（上下面）とMORの増分

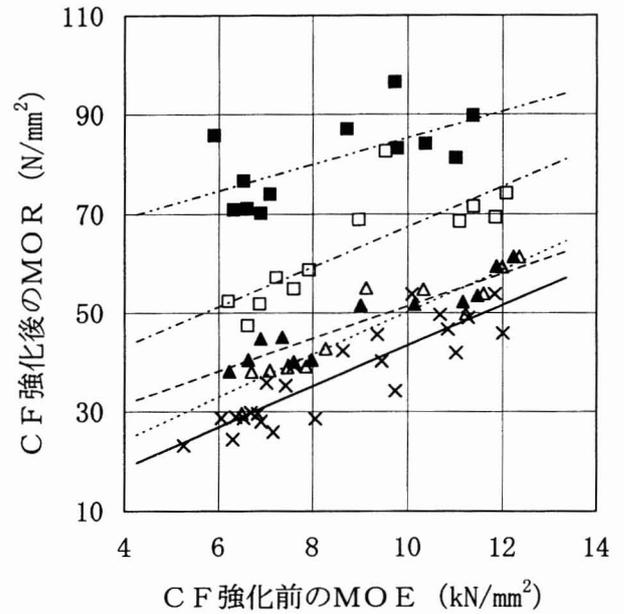


図-10 CF強化によるMORの向上

凡例	CF強化	近似式	決定係数
■・2点鎖線	646/646	$y=2.66x+58.6$	$R^2=0.407$
□・1点鎖線	323/323	$y=4.06x+26.9$	$R^2=0.668$
▲・破線	0/161	$y=3.32x+18.2$	$R^2=0.872$
△・点線	0/081	$y=4.32x+7.0$	$R^2=0.856$
×・実線	0/0	$y=4.12x+2.2$	$R^2=0.782$

表-7 CF強化後のMORの標準誤差等

CF強化	646/646	323/323	0/161	0/081	0/0
試験体数 ^{*1} (個)	12	12	12	12	24
平均値 (N/mm ²)	80.9	63.2	48.2	46.8	39.3
標準誤差 (N/mm ²)	6.79	6.53	2.96	4.07	4.59
標準誤差/平均値 ^{*2} (%)	8.39	10.33	6.14	8.70	11.68
K×標準誤差 ^{*3} (N/mm ²)	13.91	13.37	6.06	8.34	8.73

*1~*3 表-6の脚注に示した。

値であり、それぞれの平均値と比較すると、1.5%以下であった。

また、図-7の各近似直線を $y = a x + b$ で表すと、それぞれの5%下限直線は次式で示される。

$$y = a x + b - K \times \text{標準誤差}$$

ここで、Kは2.4で述べたASTMの係数

即ち、表-6に示した(K×標準誤差)の値は、近似直線と5%下限直線とのy軸方向における距離に相当する。この値を見ても、CF強化の程度に応じて若干大きくなる傾向は認められるものの、それぞれの平均値と比べれば極めて小さい。

従って、表-6の各種の値や図-7の決定係数 R^2

から判断すると、CF強化によるMOEの向上は非常にバラツキが小さいものであった。換言すれば、CF強化集成材のMOEについては、計算によって高精度の予測をし得ることが明らかとなった。

3.3 CF強化によるMORの向上

3.3.1 CF厚さ率とMORの増分

MOEの場合と同様、CF厚さ率とMORの増分との関係を検討した。ただし、MORについては集成材ごとに節の状態等が異なる上、強化前の値がないので、あくまでも推定値での評価である。本報では表-5のMOR平均値を用い、試験No.・

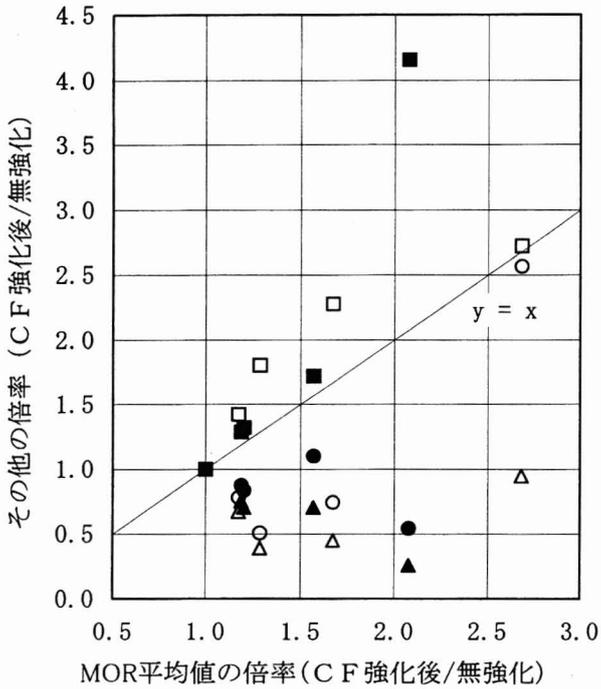


図-11 CF強化後のMOR関連値の増減

- : 標準偏差(スギ), ● : 標準偏差(カラマツ)
- △ : 変動係数(スギ), ▲ : 変動係数(カラマツ)
- : 5%下限値(スギ), ■ : 5%下限値(カラマツ)

樹種別に無強化集成材の値との差を求めて、その値をそれぞれの増分と見なすことにした。

図-9では、X軸をCF厚さ率の上下面の合計値とした。原点を通る直線で近似すると、大きな決定係数が得られた。ただし、CF厚さ率の低い、下面のみを強化した試験体では、それぞれの増分のプロットが近似直線のやや上方にあった。この点については、3.6.2でさらに検討を加える。

次に、CF強化前のMOEと強化後のMORとの関係を、図-10に示す。

MORの場合は、図-7のMOEの場合と異なり、近似直線の上下方向にある程度のバラツキが認められた。

また、図-10では図-7と異なり、CF強化の程度と近似直線の傾きとの間に、特定の傾向は認められなかった。このことは、図-9におけるスギとカラマツの近似直線がほぼ重なることと対応する。

3.3.2 CF強化後のMORのバラツキ等

MORの場合は、図-10に示したように、近似直線の上下方向にある程度のバラツキが認められた。

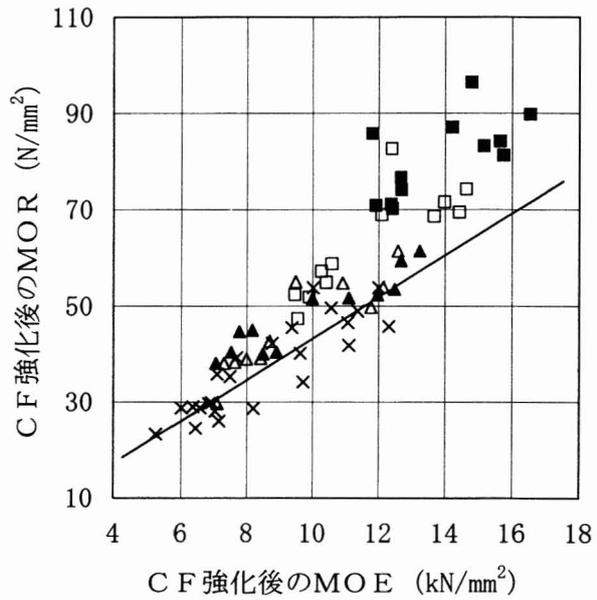


図-12 CF強化後のMOEとMOR

- | | | | |
|----|---------|----|-------|
| 凡例 | CF強化 | 凡例 | CF強化 |
| ■ | 646/646 | ▲ | 0/161 |
| □ | 323/323 | △ | 0/081 |
| | | × | 0/0 |
- 近似直線 : 0/0, $y=4.33x$, $R^2=0.764$

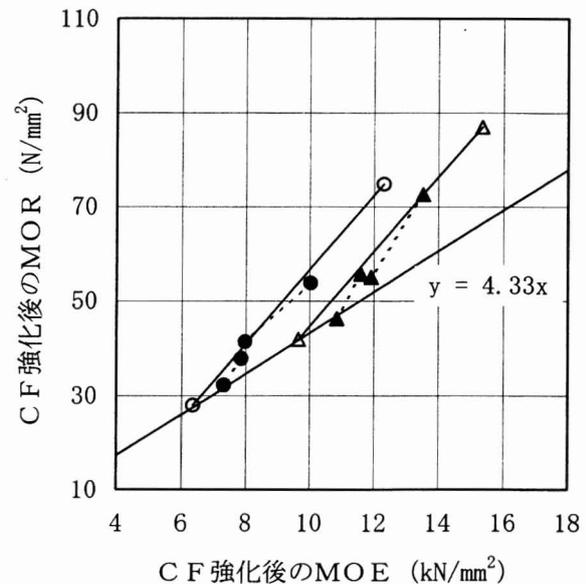


図-13 CF強化後のMOEとMORの平均値

- : 試験-1のスギ, ● : 試験-2のスギ
 - △ : 同上のカラマツ, ▲ : 同上のカラマツ
- 試験 No.・樹種別に、関係するプロットを線で結んだ。いずれも左端が0/0で、右方ほどCF強化が大

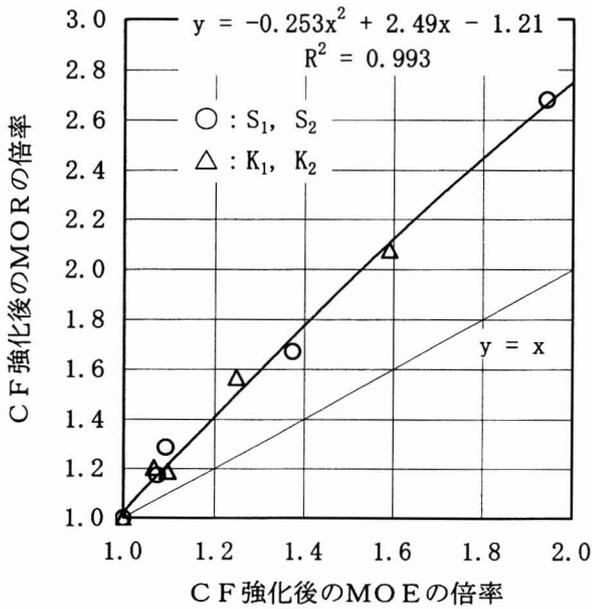


図-14 CF強化後のMOEとMORの倍率

倍率は、無強化の平均値に対する各平均値の値。近似曲線は、全プロットを対象にして求めた。

従って、MORの標準偏差、変動係数および5%下限値についても、MOEの場合(図-8)よりバラツキは大きかったが、それぞれにほぼ同様の傾向は認められた(図-11)。

表-7には、表-6と同様の値を示した。MOEの場合と比較して、MORの(標準誤差/平均値)の値は全体的に大きかった。ただし、CF強化によって、若干減少する傾向が見受けられる。

従って、MORについても、CF強化によって変動係数等が減少し、より信頼性の高い部材となり得ることが明らかとなった。

3.4 CF強化によるMOEとMORの向上

CF強化後のMOEとMORの関係を、図-12~14に示す。

図-12では、全試験体の値をプロットした。図-13では、試験条件(試験体グループ)ごとに、それぞれの平均値を示した。また、図-14ではそれぞれの平均値を用い、MOEとMORの倍率の関係を示した。

これらの図より、CF強化集材材においては、MORの方がMOEよりも顕著な向上を示すことが分かる。

また、CF強化の程度に応じて、比例限荷重や同たわみ、最大荷重時たわみ等も大きくなる傾向

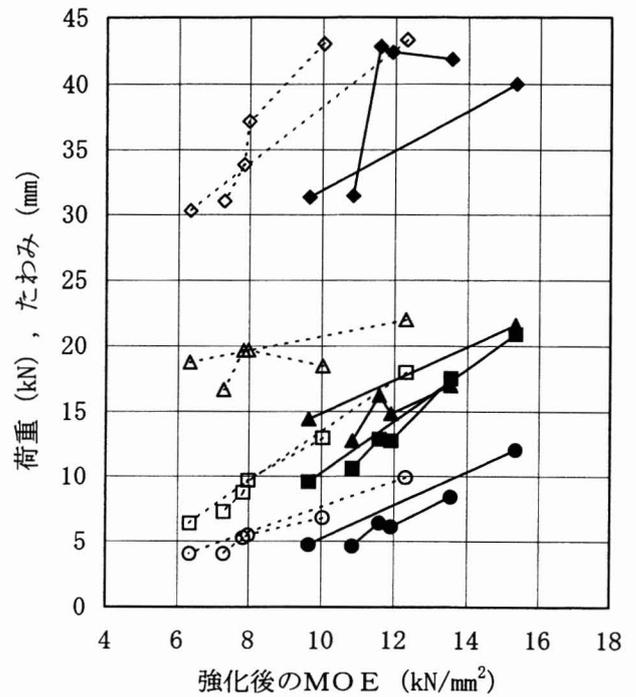


図-15 CF強化後のMOEと各種荷重・たわみ

◇：最大荷重時たわみ(スギ), ◆：同左(カラマツ)
 △：比例限たわみ(スギ), ▲：同左(カラマツ)
 □：最大荷重(スギ), ■：同左(カラマツ)
 ○：比例限荷重(スギ), ●：同左(カラマツ)
 試験No.・樹種別に、関係するプロットを線で結んだ。

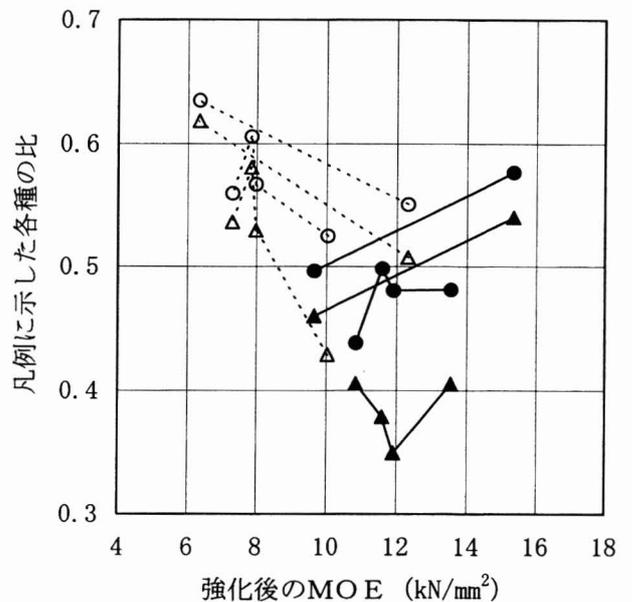


図-16 CF強化後の各種荷重・たわみの比率

○：比例限荷重/最大荷重(スギ)
 ●：比例限荷重/最大荷重(カラマツ)
 △：比例限たわみ/最大荷重時たわみ(スギ)
 ▲：比例限たわみ/最大荷重時たわみ(カラマツ)
 試験No.・樹種別に、関係するプロットを線で結んだ。

が認められた (図-15)。荷重とたわみについての比例限と最大荷重時における比を、図-16 に示す。なお、これらの図においては、最大荷重時のたわみとして、クロスヘッドの下降量を用いた。

図-16 では、たわみに関する比がCF強化に伴って減少するようであれば、ねばりのある部材になったと言える。ただし、カラマツ集成材を強化したものは、必ずしも減少しなかった。この点については、今後さらに検討を要するものと思われる。

3.5 CFシートのMOEとCF効率

3.5.1 CFシートのMOEの推定

CFシートは、CFにマトリックス樹脂を57wt%添加した上、樹脂含浸紙で挟んで作製した (表-3、図-1)。従って、CFシートの強度性能はCF自体の値 (表-3) より当然小さい。

そこで、CFシートの実際のMOEを求めるため、まずCFシートの厚さから検討した。CFシート1枚当りの厚さは、CF強化前後の試験体高 (表-5) から、樹種・CF使用量別に計算した。なお、試験-1では2.3に記したように再度のプレーナがけをしているので、CFシート接着前の試験体高は104.00 mmと仮定した。

次いで、CF使用量とCFシート1枚当りの平均厚さとの関係をグラフ化した (図-17)。この図において、すべてのプロットを対象に近似直線を求めると、図中の式が得られた。

表-8には、CF使用量別に計算したCFシートの厚さ、CFの体積含有率 (Vf)、CFの強度性能が100%生かされた場合のCFシートのMOEを示す。

表-8で求めた各CFシートのMOEを用い、等価断面法で試算した強化条件ごとの平均MOEを、表-5に「CF効率100%時の強化後MOE試算値」として示す。

実際のCFシート内では、CFに多少のたわみがあったり、CF・マトリックス樹脂・樹脂含浸紙間で若干のずれが生じたりする。従って、CF強化後のMOEの実測値や補正值 (表-5) が、この「CF効率100%時の強化後MOE試算値」より小さくなるのはやむを得ない。

そこで、CF強化後の個々の試験体について、そのMOEの補正值から、等価断面法を用い、C

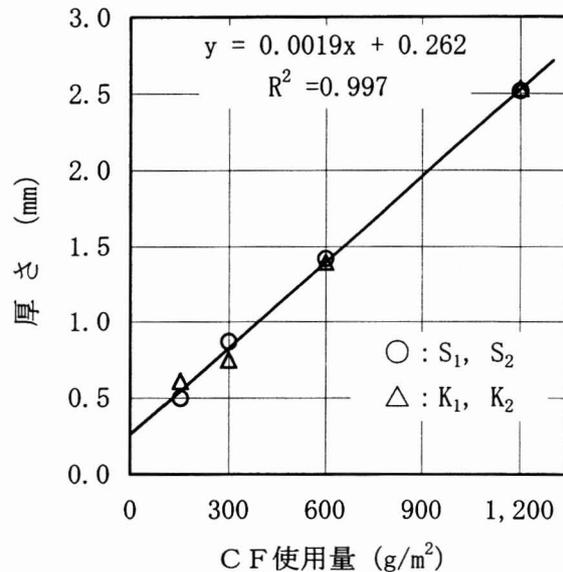


図-17 CFシート1枚当りのCF使用量と厚さ

表-8 CFシートのCF使用量と各種試算値

CF使用量 (g/m ²)	シート厚 *1 (mm)	Vf *2 (%)	MOE *3 (kN/mm ²)
150	0.547	15.5	36.56
300	0.832	20.4	48.08
600	1.402	24.2	57.06
1,200	2.542	26.7	62.94

*1 図-17の近似式による

*2 Vf=(表-4のCF厚さ)/(本表のシート厚)×100

*3 MOE=(表-3のCFの引張ヤング係数)×Vf/100

Fシートの実際のMOEを逆算してみた。ここでは、CFシートの厚さとして、表-8のシート厚を用いた。その結果を「MOE補正值を与えるCFシートのMOE」として、表-5に示す。

CF使用量 (厚さ率) の大きいものほどMOEの平均値も大きくなっているが、これは表-8に示した「CFの体積含有率 (Vf)」の差によると考えられる。

次に、ここでCFシートのMOE推定値が得られたので、3.2.1において触れた図-7の近似直線の交点について、再度検討を加える。

例えば、図-7の646/646と基材の近似直線の交点を求めると、 $x = 38.81$ (kN/mm²)となった。この値は、表-5の試験-1で試算した「MOE補正值を与えるCFシートのMOE」の平均値49.55や49.20kN/mm²よりも小さい。323/323や0/081と基材の近似直線の交点についても、同様の傾向

が見られる。CF強化後のMOEの近似直線は全体的に傾きが小さくなる傾向が認められるが、その理由については今後の検討課題である。

3.5.2 CFシートのCF効率の推定

上述の通り、CFシートのMOE推定値は、表-8のMOEよりも小さかった。そこで、次式によってCF効率(%)を算出した。

$$\text{CF効率} = (\text{MOE補正值を与えるCFシートのMOE}) / (\text{表-8のMOE}) \times 100$$

得られたCF効率を、表-5に示す。

CF強化の程度が大きい646/646や323/323では、CF効率がほぼ78%となった。この値は、一般のCF強化プラスチック製品等の場合と比較し、十分に高いものであった。また、646/646や323/323では「MOE補正值を与えるCFシートのMOE」の変動係数も3~5%程度であり、工業材料として十分な信頼性を付与できていた。

CF強化量が比較的小さく、かつ試験体の下面のみを強化した場合には、CF効率の平均値がより大きくなっていったが、変動係数も大きかった。CF効率の平均値が大きかったのは、木材のMOEの場合、下面の節等の弱点が大きく影響するためであると考えられる。また、変動係数が大きかったのは、下面の節の状態等により、その補強効果にバラツキがあったためであると思われる。

3.6 CF強化面とMOE, MORの向上

3.6.1 CF強化面とMOEの向上

CF強化面が下面のみの場合と上下面の場合とを想定し、CF強化面とMOEの向上との関係について、若干の検討を加える。

図-18は、種々のCF厚さ率(上下面の合計)に対するMOEの増分を等価断面法で試算した上で、それらの近似曲線を求めたものである。ここでは、基材のMOEは7および11kN/mm²、CF効率は78%で一定とした。また、CFシートの厚さは図-17の近似直線から算出した。

CF強化量が少ない場合には、下面のみの強化でも上下面の強化でも、MOEの増分には大差がない(図-18)。計算上は、下面のみを強化した場合の方が、増分が若干大きくなった部分もある。これに対し、CF強化量が多い場合は、明らかに上下面強化の方が有効であった。

従って、MOEの向上に重点をおく場合は、C

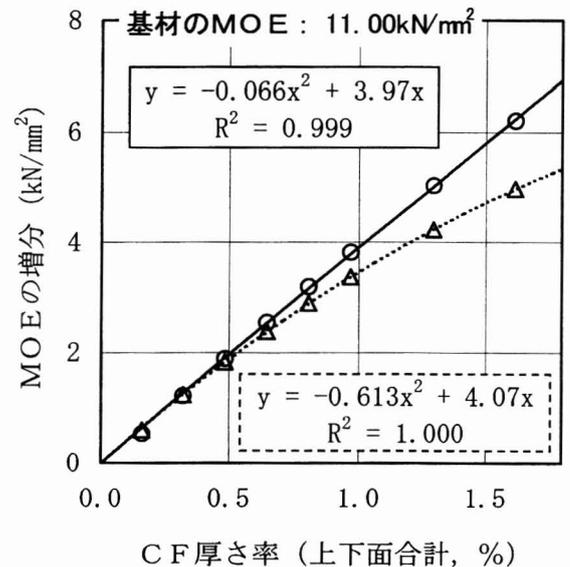
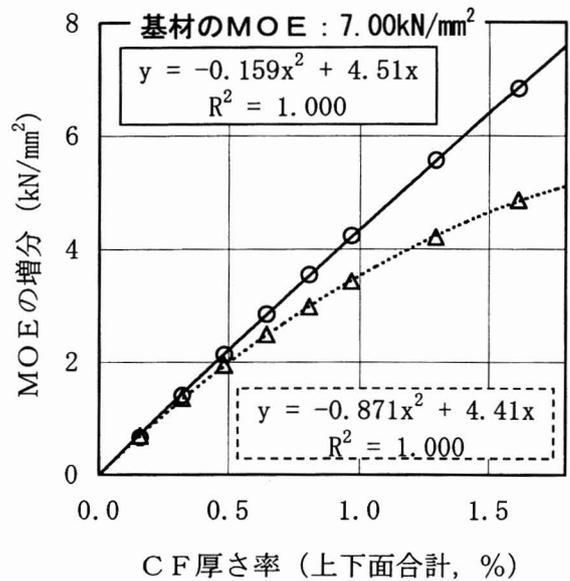


図-18 CF強化面とMOE増分の試算値

○ : 上下面の均等強化, △ : 下面のみの強化

F厚さ率が合計で0.5%程度までは下面のみの強化でもよいが、それ以上では上下2面の強化をすべきものと思われる。

3.6.2 CF強化面とMORの向上

図-9では、CF厚さ率の低い、下面のみを強化した試験体において、それぞれの増分のプロットが近似直線のやや上方にあった。

そこで、図-19では小川⁹⁾に倣い、X軸を下面のみのCF厚さ率とした。各プロットの並びはこちらの方がより直線的になり、決定係数も若干大

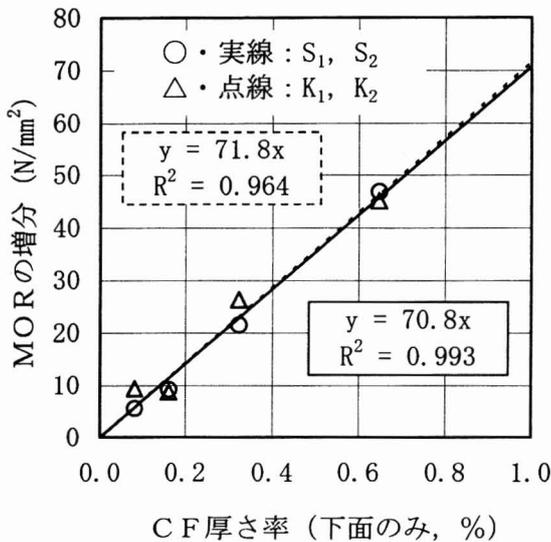


図-19 CF厚さ率 (下面のみ) とMORの増分

きくなった。

MORの大小には、試験体下面の節やF Jの影響が大きい。従って、いずれか1面のみを強化するのであれば、下面の方が有効であると考えられる。

ただし、CF強化の程度が大きくなった場合には、他の要因の検討も必要になるとと思われる。

集成材の下面のみを大幅に強化した場合は、試験体上面で木材の圧縮破壊が進むと考えられる。本試験においても、集成材の下面のみをCF強化した試験体を中心に、既に同様の破壊が認められた(0/161と0/081の試験体では、24体中8体)。下面のみをCF強化する場合は、上面の木材の圧縮強度により、CF強化集成材のMORの上限が制約されるものと思われる。なお、この下面のみの強化方法は、ねばりのある部材の開発に重点をおく場合には、有効になるとも思われる。

集成材の上下面をともに大幅に強化した場合は、試験体の中央付近で木材のせん断破壊が生じると考えられる。本試験のCF強化の範囲では、このようなせん断破壊は認められなかった。しかし、上下面をより多くのCFで強化する場合は、木材のせん断強度により、CF強化集成材のMORの上限が制約されるものと思われる。

図-9および19の近似曲線については、1次関数でよいのか、2次関数や $1/n$ 乗等の関数になるのか、さらには図-18のように強化面によって異

なる近似曲線になるのか等が、現時点では明らかでない。CF強化面とMORの上限との関係を含め、これらの近似曲線については今後さらに検討を進める必要があると思われる。

4 結言

木材をCFで強化する場合には、まず両者の接着が課題となる。本プロジェクトでは接着性能を高めるために新たな「CFシート」を開発したが、それでも当初の接着性能は必ずしも十分ではなかった。その後、種々の改良によって接着性能を向上させることができたため、ようやく本報の結果が得られた。

今回の試験結果を見ると、CFによって大幅に強化した場合、MOE、MORともに木材のみでは造り得ない高性能を付与できている。

CFによる強化方法とMOEとの関係については、本報においてかなり明確にできたと思われる。

MORについては、大幅に向上させ得ることは実証できたが、CFによる強化方法とMORとの関係についてはまだ課題が残った。現在ではCFシートの接着性能がさらに改善されているので、機会があれば、MORについては再度検討を加えてみたいと考えている。

なお、今回の試験では、上面のCFシートが剥離して浮き上がる例が見られた。耐火性能等も考慮に入れると、CFシートは上下面とも最外層表面に接着するのではなく、それぞれの最外接着層に挿入する方がよいのではないかと、とも思われる。

検討すべき課題はまだ残っているが、本技術は集成材以外の木質材料にも応用が可能であることから、今後の展開が期待される。

謝辞

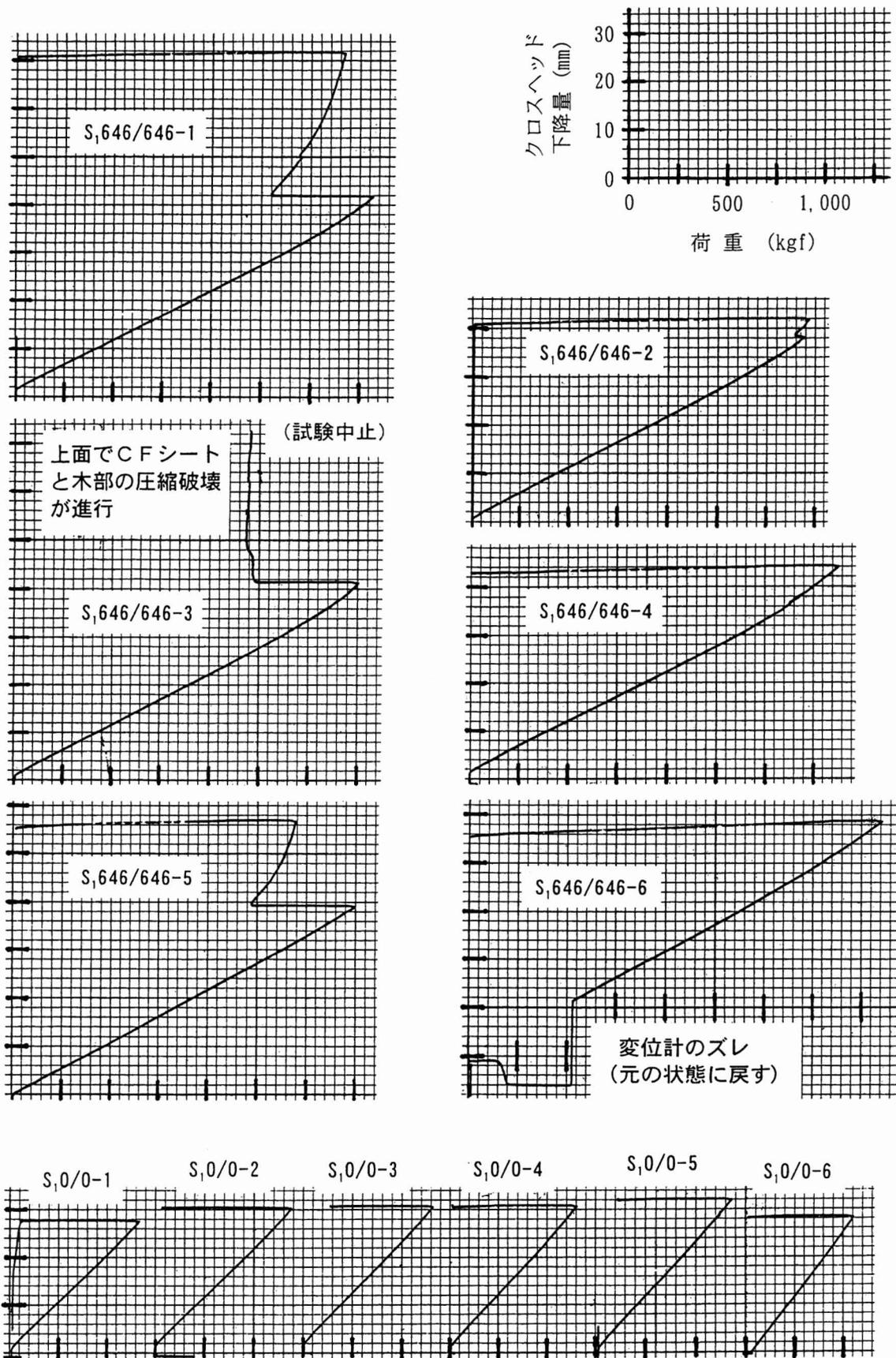
本試験に携わった主たるメンバーは最初のページの脚注に記したが、試験の実施に当っては、各所属先において多くの方々にご協力をいただいた。

また、本報をとりまとめるに当っては、信州大学農学部の武田孝志助教授からも貴重なご指導・ご助言をいただいた。

これらの方々に対し、ここに厚く感謝の意を表します。

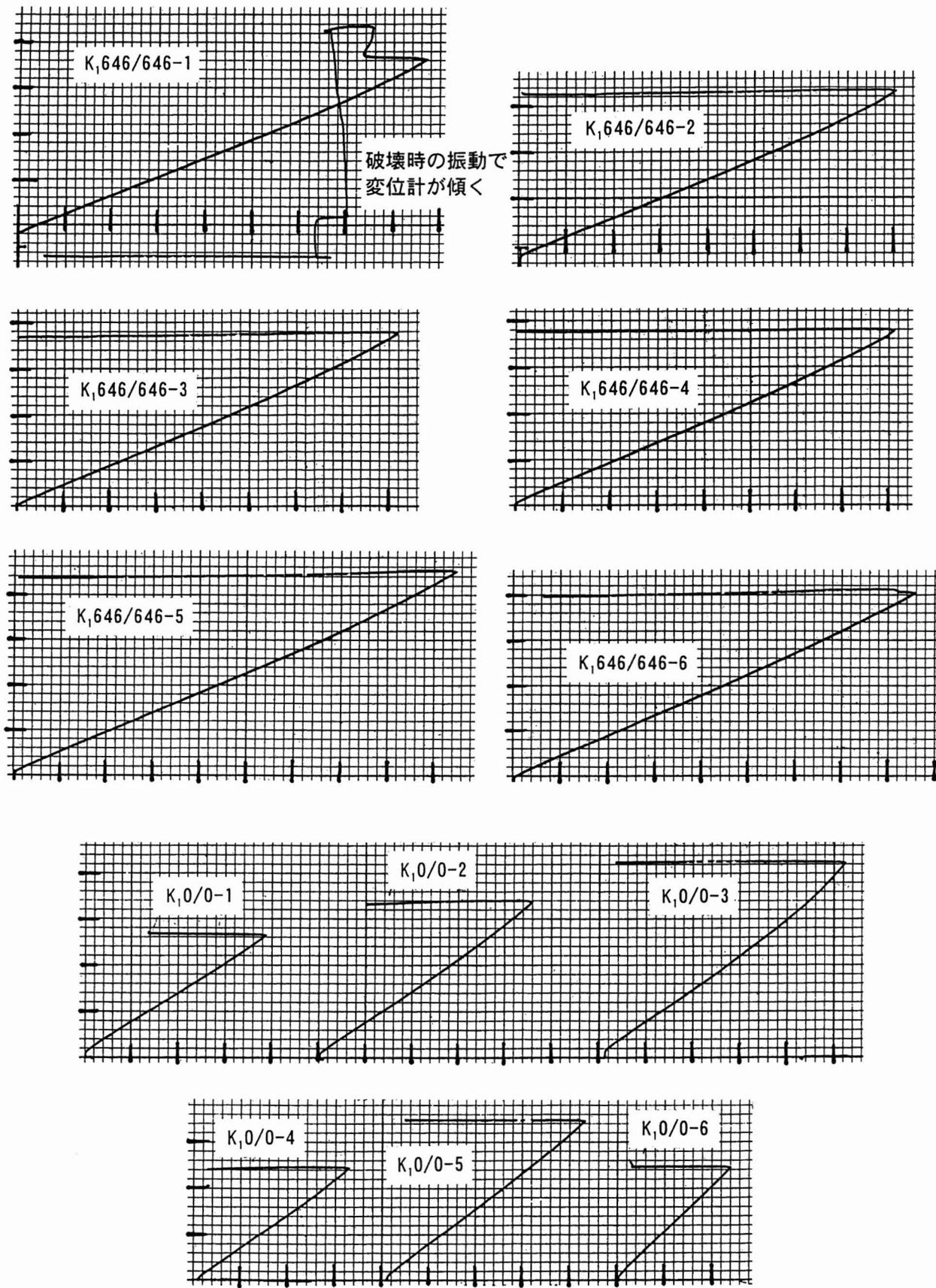
引用文献

- 1) 柴田直明 (1999) 繊維強化集成材. (最新木材工業事典, (社)日本木材加工技術協会). 5 (口絵), 168-169
- 2) 本研究メンバー (1996) 炭素繊維複合強化集成材の開発 (I-1)~(V). 炭素材料学会年会 要旨集: 94-95, 218-229
- 3) 本研究メンバー (1997) 炭素繊維複合強化集成材の開発 (I)~(V). 日本木材学会大会 研究発表要旨集: 480, 609-614
- 4) 本研究メンバー (1997) 炭素繊維複合強化集成材の開発 (VII), (VIII). 炭素材料学会年会 要旨集: 68-69, 286-287
- 5) 本研究メンバー (1998) 炭素繊維複合強化集成材の開発 (VI)~(VII). 日本木材学会大会 研究発表要旨集: 568-569
- 6) 本研究メンバー (1998) 炭素繊維複合強化集成材の開発 (VIII). 日本木材学会大会 研究発表要旨集: 570
- 7) 小川博靖 (1998) 木材と炭素繊維の複合化の現状と夢. Cellulose Communications 5 (1): 24-28
- 8) 柴田直明 (2000) 炭素繊維強化集成材 (ハイブリッドティンバー) の開発. 木工機械 No. 188: 2-5
- 9) Ogawa, H. (2000) Architectural application of carbon fibers - Development of new carbon fiber reinforced glulam -. Carbon 38: 211-226
- 10) 本研究メンバー (2002) 炭素繊維複合強化集成材の開発 -CFシートの開発から実大試験, 木橋への実用化-. 炭素材料学会 第3回エコカーボン研究会 ポスター発表要旨集: 25
- 11) 柴田直明 (2002) 炭素繊維強化集成材 (ハイブリッドティンバー) の開発 -これまでの概要と, 木橋主桁への実用化-. 木材工業 57 (8): 347-350
- 12) 和田博ら (1996) Z-S 処理鋼とスギ材で構成される複合集成材の曲げ性能. 木材学会誌 42(4): 369-375
- 13) (1982) 日本産主要樹種の強度的性質. (木材工業ハンドブック改訂3版. 農林水産省林業試験場監修, 丸善). 188-189
- 14) (1996) Standard practice for Evaluating Allowable Properties for Grades of structural Lumber. Annual book of ASTM Standards, Section 4 - Construction, Vol. 04.10 Wood: 397-408



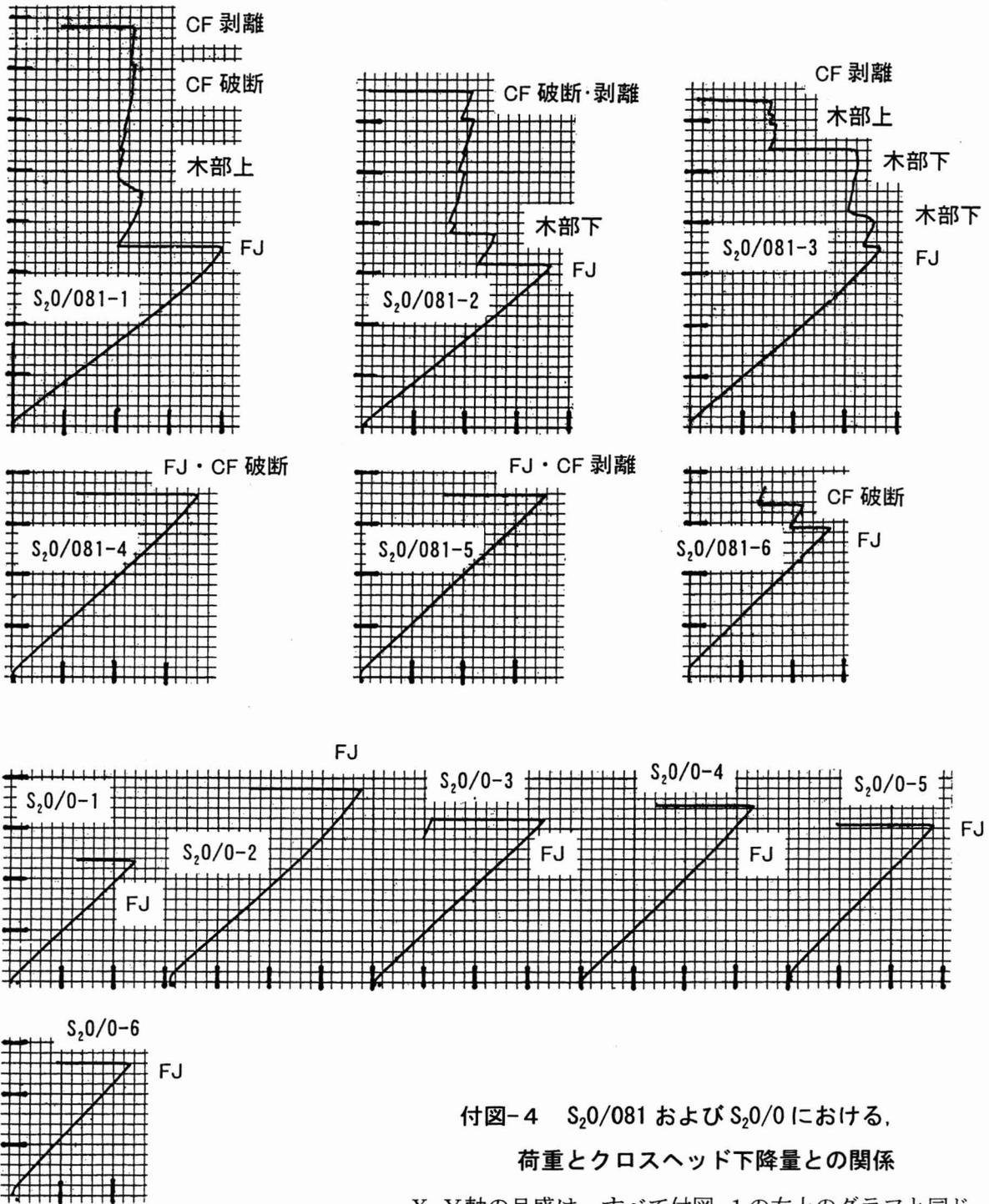
付図-1 S_{1,646/646} および S_{1,0/0} における, 荷重とクロスヘッド下降量との関係

X, Y軸の目盛は, すべて右上のグラフと同じ



付図-2 K,646/646 および K,0/0 における, 荷重とクロスヘッド下降量との関係

X, Y軸の目盛は, すべて付図-1の右上のグラフと同じ

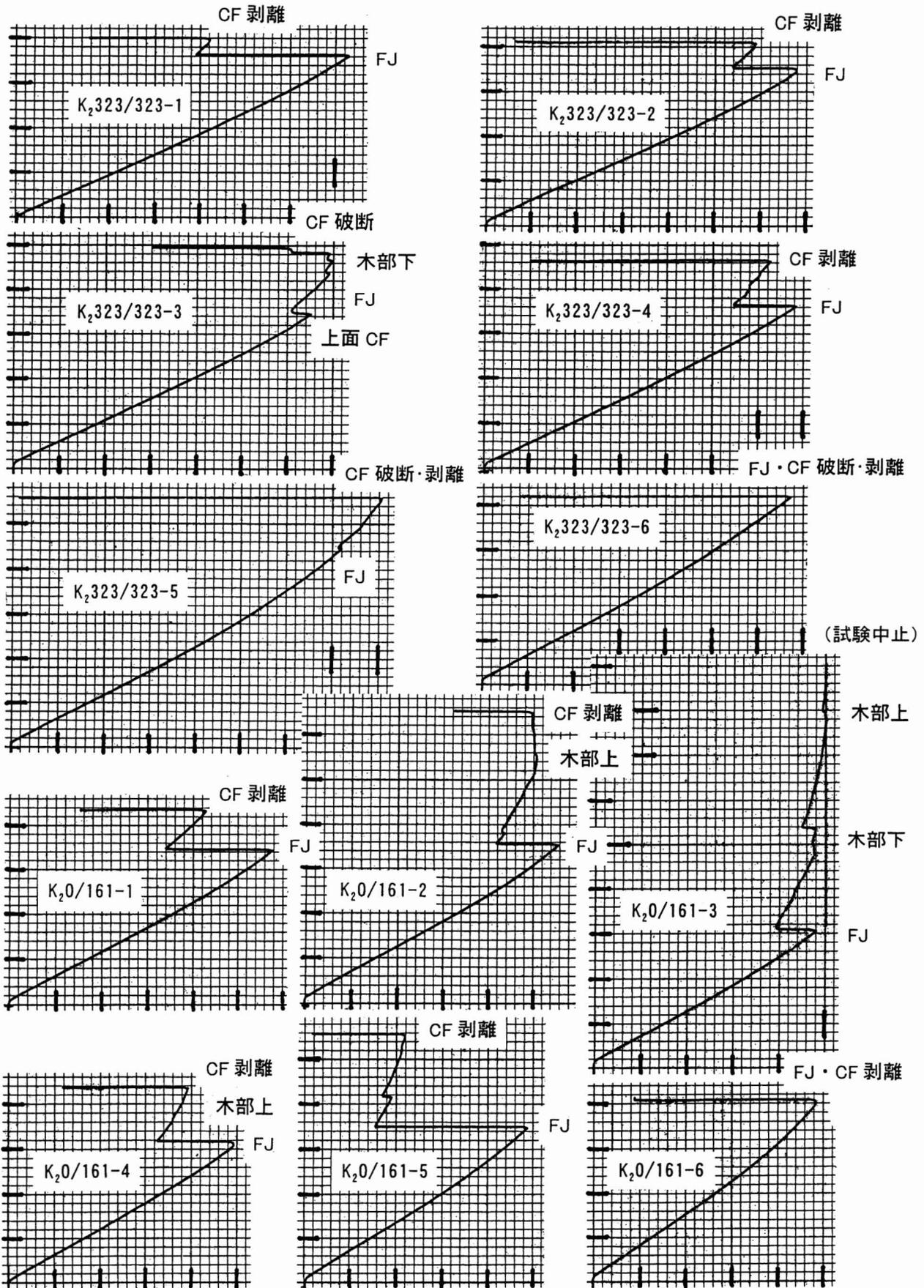


付図-4 S₂0/081 および S₂0/0 における、
荷重とクロスヘッド下降量との関係

X, Y軸の目盛は、すべて付図-1の右上のグラフと同じ

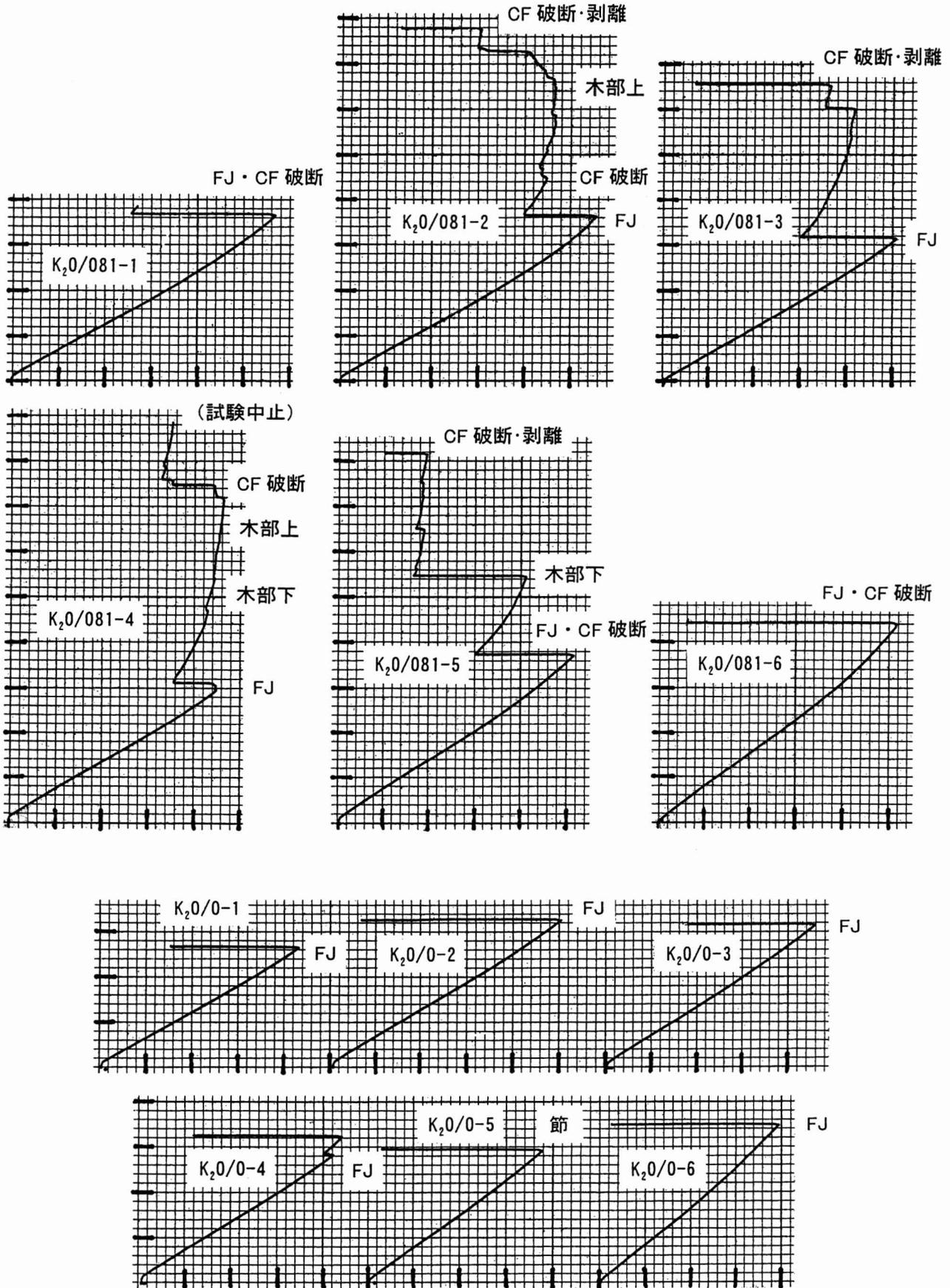
付図-3～6における図中の略号

上面 CF	上面のCFシートが剥離, 座屈
木部上	木部の上面側で圧縮破壊が進行
FJ	下面中央部のFJから木部のみが破壊
(FJ)	下面中央部のFJ付近から木部のみが破壊
節	下面中央付近の節から木部のみが破壊
木部下	木部の下面側で破壊が拡大
CF 破断, 剥離	下面のCFシートが(部分的に)破断, 剥離



付図-5 K₂323/323 および K₂0/161 における、荷重とクロスヘッド下降量との関係

X, Y軸の目盛は、すべて付図-1の右上のグラフと同じ。 図中の略号は、付図-4に記載



付図-6 K₂0/081 および K₂0/0 における、荷重とクロスヘッド下降量との関係

X, Y軸の目盛は、すべて付図-1の右上のグラフと同じ。 図中の略号は、付図-4に記載

付表-1 試験-1におけるCF強化スギ・カラマツ集成材の曲げ強度データ

記号-No.	構造用集成材 初期値				集成材のみの曲げヤング係数測定 (集成材)					CF強化後の曲げ破壊試験				
	幅(cm)	高(cm)	長(cm)	重量(kg)	曲げヤング係数データ (kgf, mm)				密度 g/cm ³	CF強化後 高(cm)	曲げヤング係数データ (kgf, mm)			
					荷重1	たわみ1	荷重2	たわみ2			荷重1'	たわみ1'	荷重2'	たわみ2'
S ₁ 646/646-1	4.475	10.585	197.80	3.611	60	2.48	300	12.31	0.385	10.901	60	1.28	300	6.31
S ₁ 646/646-2	4.456	10.653	197.80	3.384	60	2.53	300	12.49	0.360	10.897	60	1.30	300	6.47
S ₁ 646/646-3	4.460	10.681	197.80	3.431	60	2.51	300	12.82	0.364	10.905	60	1.31	300	6.48
S ₁ 646/646-4	4.458	10.619	197.80	3.605	60	2.66	300	13.28	0.385	10.914	60	1.27	300	6.31
S ₁ 646/646-5	4.466	10.686	197.80	3.711	60	2.66	300	13.42	0.393	10.887	60	1.45	300	6.84
S ₁ 646/646-6	4.455	10.660	197.85	3.485	60	2.94	300	14.57	0.371	10.920	60	1.36	300	6.76
S ₁ 0/0-1	4.491	10.657	197.80	3.494	60	2.51	300	12.37	0.369	—	60	2.51	300	12.21
S ₁ 0/0-2	4.473	10.696	197.80	3.609	60	2.49	300	12.38	0.381	—	60	2.48	300	12.38
S ₁ 0/0-3	4.476	10.641	197.85	3.530	60	2.64	300	13.14	0.375	—	60	2.66	300	13.10
S ₁ 0/0-4	4.447	10.631	197.80	3.673	60	2.77	300	13.65	0.393	—	60	2.75	300	13.64
S ₁ 0/0-5	4.446	10.649	197.85	3.556	60	2.85	300	14.23	0.380	—	60	2.93	300	14.40
S ₁ 0/0-6	4.446	10.631	197.80	3.732	60	3.33	300	16.53	0.399	—	60	3.27	300	16.44
K ₁ 646/646-1	4.444	10.629	197.80	4.816	60	1.50	300	7.60	0.515	10.910	60	0.98	300	4.86
K ₁ 646/646-2	4.468	10.605	197.80	4.959	60	1.62	300	7.93	0.529	10.918	60	1.00	300	5.04
K ₁ 646/646-3	4.446	10.706	197.80	5.063	60	1.67	300	8.21	0.538	10.889	60	1.04	300	5.16
K ₁ 646/646-4	4.456	10.591	197.75	5.051	60	1.81	300	8.96	0.541	10.891	60	1.06	300	5.30
K ₁ 646/646-5	4.447	10.582	197.80	4.962	60	1.90	300	9.12	0.533	10.919	60	1.06	300	5.38
K ₁ 646/646-6	4.464	10.602	197.85	4.654	60	2.05	300	10.03	0.497	10.918	60	1.13	300	5.61
K ₁ 0/0-1	4.457	10.601	197.80	4.874	60	1.53	300	7.86	0.522	—	60	1.61	300	7.89
K ₁ 0/0-2	4.448	10.616	197.80	4.982	60	1.69	300	8.20	0.533	—	60	1.72	300	8.30
K ₁ 0/0-3	4.532	10.654	197.85	4.850	60	1.76	300	8.45	0.508	—	60	1.69	300	8.43
K ₁ 0/0-4	4.457	10.664	197.80	4.807	60	1.78	300	8.81	0.511	—	60	1.85	300	8.90
K ₁ 0/0-5	4.432	10.657	197.80	4.497	60	1.85	300	9.22	0.481	—	60	1.88	300	9.24
K ₁ 0/0-6	4.454	10.587	197.80	4.511	60	2.52	300	12.29	0.484	—	60	2.46	300	12.27

(付表-1 続き)

記号-No.	比例限データ(同)		最大荷重データ(同)		強化前	強化後 (以下, 同様)					比例限MOE kN/mm ²	MOR N/mm ²	
	荷重3	たわみ3	荷重4	たわみ4 ^{*1}	MOE kN/mm ²	MOE kN/mm ²	実測値 増分	MOE 補正值	補正後 増分	CFシートの ヤング係数 ^{*2}			CF効率 %
S ₁ 646/646-1	960	20.19	1821	41.97	7.09	12.69	5.60	12.67	5.58	48.90	77.6	12.66	74.1
S ₁ 646/646-2	1020	22.13	1718	42.59	6.90	12.41	5.52	12.39	5.50	48.08	76.3	12.32	70.2
S ₁ 646/646-3	1020	22.08	1744	41.28	6.60	12.37	5.77	12.35	5.75	49.72	78.9	12.32	71.1
S ₁ 646/646-4	1020	21.50	1882	43.46	6.53	12.67	6.14	12.65	6.12	52.43	83.2	12.62	76.6
S ₁ 646/646-5	1020	23.05	1735	40.36	6.31	11.91	5.60	11.89	5.58	48.14	76.4	11.89	70.9
S ₁ 646/646-6	1020	23.05	2108	50.48	5.90	11.81	5.92	11.79	5.90	50.03	79.4	11.76	85.8
S ₁ 0/0-1	480	19.67	662	27.46	6.90	7.02	0.11	7.00	0.09			6.94	28.1
S ₁ 0/0-2	420	17.40	701	31.02	6.84	6.83	-0.01	6.81	-0.03			6.80	29.6
S ₁ 0/0-3	450	19.73	674	30.91	6.53	6.57	0.04	6.55	0.02			6.53	28.8
S ₁ 0/0-4	390	17.80	673	31.00	6.36	6.36	-0.01	6.34	-0.03			6.33	29.0
S ₁ 0/0-5	480	23.09	670	32.38	6.06	6.01	-0.05	5.99	-0.07			5.98	28.7
S ₁ 0/0-6	270	14.75	540	29.06	5.25	5.26	0.01	5.24	-0.01			5.28	23.2
K ₁ 646/646-1	1200	19.58	2196	39.06	11.37	16.52	5.16	16.54	5.18	50.09	79.5	16.37	89.8
K ₁ 646/646-2	1140	19.34	2001	36.82	11.00	15.75	4.75	15.77	4.77	46.75	74.2	15.61	81.2
K ₁ 646/646-3	1080	18.67	2050	38.30	10.37	15.65	5.28	15.67	5.30	50.09	79.5	15.54	84.1
K ₁ 646/646-4	1260	22.39	2034	38.51	9.78	15.16	5.38	15.18	5.40	50.28	79.8	15.07	83.2
K ₁ 646/646-5	1500	27.21	2367	45.60	9.73	14.80	5.07	14.82	5.09	47.89	76.0	14.66	96.5
K ₁ 646/646-6	1200	22.50	2143	41.75	8.72	14.22	5.50	14.24	5.52	50.09	79.5	14.16	87.1
K ₁ 0/0-1	630	16.44	970	26.90	11.01	11.10	0.09	11.12	0.11			11.16	41.9
K ₁ 0/0-2	600	16.59	1151	34.59	10.68	10.57	-0.11	10.59	-0.09			10.52	49.7
K ₁ 0/0-3	390	10.99	1281	42.64	10.09	10.02	-0.07	10.04	-0.05			9.98	53.8
K ₁ 0/0-4	480	14.19	802	24.50	9.74	9.71	-0.03	9.73	-0.01			9.71	34.2
K ₁ 0/0-5	480	14.82	1061	34.77	9.36	9.37	0.01	9.39	0.03			9.33	45.6
K ₁ 0/0-6	330	13.48	600	24.78	7.17	7.14	-0.03	7.16	-0.01			7.15	26.0

*1 「たわみ4」のみクロスハット下降量

*2 「CFシートのヤング係数」はMOE補正值から逆算

付表-2 試験-2におけるCF強化スギ集成材の曲げ強度データ

記号-No.	構造用集成材 初期値				集成材のみの曲げヤング係数測定 (集成材)				密度 g/cm ³	CF強化後 高 (mm)	CF強化後の曲げ破壊試験			
	幅 (cm)	高 (cm)	長 (cm)	重量 (kg)	曲げヤング係数データ (kgf, mm)		曲げヤング係数データ (kgf, mm)				荷重1'	たわみ1'	荷重2'	たわみ2'
S ₂ 323/323-1	4.512	10.581	200.1	3.746	60	2.31	300	11.05	0.392	10.865	60	1.52	300	7.56
S ₂ 323/323-2	4.510	10.575	200.0	3.542	60	2.33	300	11.46	0.371	10.860	60	1.55	300	7.70
S ₂ 323/323-3	4.506	10.586	200.0	3.782	60	2.41	300	11.98	0.396	10.868	60	1.59	300	7.82
S ₂ 323/323-4	4.513	10.584	199.9	3.637	60	2.58	300	12.64	0.381	10.860	60	1.76	300	8.23
S ₂ 323/323-5	4.515	10.579	200.0	3.516	60	2.69	300	13.15	0.368	10.882	60	1.75	300	8.41
S ₂ 323/323-6	4.525	10.578	199.9	3.733	60	2.87	300	14.01	0.390	10.854	60	1.71	300	8.47
S ₂ 0/161-1	4.505	10.592	200.1	3.601	60	2.23	300	10.90	0.377	10.655	60	2.00	300	9.63
S ₂ 0/161-2	4.513	10.586	200.1	3.718	60	2.35	300	11.44	0.389	10.693	60	2.01	300	9.91
S ₂ 0/161-3	4.513	10.580	200.1	3.621	60	2.42	300	11.83	0.379	10.655	60	2.10	300	10.40
S ₂ 0/161-4	4.513	10.574	200.1	3.841	60	2.59	300	12.65	0.402	10.670	60	2.23	300	10.93
S ₂ 0/161-5	4.575	10.591	199.9	3.793	60	2.61	300	12.88	0.392	10.674	60	2.24	300	11.09
S ₂ 0/161-6	4.527	10.577	199.9	3.886	60	2.82	300	13.92	0.406	10.673	60	2.43	300	11.98
S ₂ 0/081-1	4.515	10.581	199.8	3.772	60	2.17	300	10.54	0.395	10.647	60	1.97	300	9.78
S ₂ 0/081-2	4.506	10.583	200.0	3.603	60	2.30	300	11.12	0.378	10.626	60	2.11	300	10.24
S ₂ 0/081-3	4.515	10.598	200.0	3.618	60	2.36	300	11.58	0.378	10.659	60	2.14	300	10.61
S ₂ 0/081-4	4.505	10.601	200.1	3.691	60	2.51	300	12.23	0.386	10.622	60	2.27	300	11.26
S ₂ 0/081-5	4.513	10.591	200.0	3.840	60	2.63	300	12.93	0.402	10.645	60	2.37	300	11.69
S ₂ 0/081-6	4.517	10.581	199.9	3.857	60	2.70	300	13.35	0.404	10.637	60	2.45	300	12.06
S ₂ 0/0-1	4.039	10.621	199.9	3.220	60	2.39	300	11.89	0.375	—	60	2.31	300	11.64
S ₂ 0/0-2	4.507	10.602	200.1	3.478	60	2.37	300	11.43	0.364	—	60	2.23	300	11.20
S ₂ 0/0-3	4.517	10.577	200.0	3.743	60	2.40	300	11.72	0.392	—	60	2.33	300	11.59
S ₂ 0/0-4	4.507	10.573	200.0	3.723	60	2.48	300	12.37	0.391	—	60	2.51	300	12.32
S ₂ 0/0-5	4.504	10.575	200.0	3.695	60	2.70	300	13.09	0.388	—	60	2.55	300	12.59
S ₂ 0/0-6	4.504	10.579	200.1	3.741	60	2.73	300	13.74	0.392	—	60	2.67	300	13.45

(付表-2 続き)

記号-No.	比例限界 ^テ (同)		最大荷重 ^テ (同)		強化前	強化後 (以下, 同様)					比例限MOE kN/mm ²	MOR N/mm ²	
	荷重3	たわみ3	荷重4	たわみ4 ^{*1}	MOE kN/mm ²	MOE kN/mm ²	実測値 増分	MOE 補正值	補正後 増分	CFシートの ヤング係数 ^{*2}			CF効率 %
S ₂ 323/323-1	870	21.92	1448	47.28	7.92	10.59	2.67	10.47	2.55	41.69	73.0	10.58	58.8
S ₂ 323/323-2	690	17.71	1352	43.01	7.60	10.42	2.82	10.30	2.70	43.41	76.0	10.40	55.0
S ₂ 323/323-3	720	18.68	1409	41.09	7.23	10.27	3.04	10.15	2.92	45.92	80.4	10.29	57.2
S ₂ 323/323-4	660	17.97	1277	39.83	6.87	9.89	3.02	9.77	2.90	45.35	79.4	9.87	51.9
S ₂ 323/323-5	570	15.89	1172	46.37	6.62	9.55	2.93	9.43	2.81	43.86	76.8	9.56	47.4
S ₂ 323/323-6	660	18.63	1292	40.86	6.20	9.46	3.26	9.34	3.14	47.75	83.6	9.45	52.4
S ₂ 0/161-1	660	21.23	956	32.70	7.97	8.90	0.93	8.78	0.81	44.39	92.2	8.83	40.4
S ₂ 0/161-2	630	20.90	955	32.81	7.60	8.49	0.89	8.37	0.77	42.22	87.7	8.43	40.0
S ₂ 0/161-3	690	24.07	1066	39.35	7.36	8.17	0.81	8.05	0.69	38.32	79.6	8.10	45.0
S ₂ 0/161-4	510	18.60	1062	41.80	6.89	7.76	0.86	7.64	0.74	40.63	84.4	7.73	44.7
S ₂ 0/161-5	480	17.74	975	37.80	6.63	7.51	0.89	7.39	0.77	41.02	85.2	7.51	40.4
S ₂ 0/161-6	390	15.56	908	38.58	6.22	7.04	0.82	6.92	0.70	37.79	78.5	7.04	38.1
S ₂ 0/081-1	660	21.72	1011	35.74	8.27	8.69	0.43	8.57	0.31	28.17	77.0	8.60	42.7
S ₂ 0/081-2	480	16.40	920	32.15	7.85	8.42	0.56	8.30	0.44	37.90	103.6	8.38	39.1
S ₂ 0/081-3	570	20.20	924	34.52	7.47	7.99	0.52	7.87	0.40	34.17	93.4	7.96	39.0
S ₂ 0/081-4	480	18.07	900	36.52	7.09	7.62	0.53	7.50	0.41	34.53	94.4	7.59	38.3
S ₂ 0/081-5	540	21.13	900	35.59	6.70	7.29	0.59	7.17	0.47	38.26	104.6	7.25	38.1
S ₂ 0/081-6	510	20.50	700	28.69	6.49	7.08	0.59	6.96	0.47	38.04	104.0	7.07	29.6
S ₂ 0/0-1	420	16.35	603	23.81	8.05	8.20	0.15	8.08	0.03			8.17	28.6
S ₂ 0/0-2	420	15.72	921	38.56	7.60	7.68	0.08	7.56	-0.04			7.66	39.3
S ₂ 0/0-3	600	23.27	825	32.33	7.43	7.48	0.05	7.36	-0.07			7.44	35.3
S ₂ 0/0-4	450	18.51	835	35.17	7.02	7.08	0.06	6.96	-0.06			7.05	35.8
S ₂ 0/0-5	300	12.59	695	30.45	6.69	6.92	0.23	6.80	0.11			6.92	29.8
S ₂ 0/0-6	300	13.45	571	25.94	6.30	6.44	0.13	6.32	0.01			6.44	24.5

*1 「たわみ4」のみクロスヘッド^テ下降量

*2 「CFシートのヤング係数」はMOE補正值から逆算

付表-3 試験-2におけるCF強化カラマツ集成材の曲げ強度データ

記号-No.	構造用集成材 初期値				集成材のみの曲げヤング係数測定 (集成材)				密度 g/cm ³	CF強化後 高 (mm)	CF強化後の曲げ破壊試験			
	幅 (cm)	高 (cm)	長 (cm)	重量 (kg)	荷重1	たわみ1	荷重2	たわみ2			曲げヤング係数データ (kgf, mm)	荷重1'	たわみ1'	荷重2'
K ₂ 323/323-1	4.511	10.589	197.8	5.353	60	1.53	300	7.25	0.567	10.873	60	1.10	300	5.46
K ₂ 323/323-2	4.512	10.577	200.0	5.492	60	1.53	300	7.38	0.575	10.849	60	1.12	300	5.57
K ₂ 323/323-3	4.501	10.568	197.8	5.233	60	1.62	300	7.74	0.556	10.844	60	1.19	300	5.80
K ₂ 323/323-4	4.546	10.615	200.0	5.392	60	1.56	300	7.70	0.559	10.880	60	1.20	300	5.82
K ₂ 323/323-5	4.506	10.568	197.8	5.069	60	1.88	300	9.18	0.538	10.862	60	1.31	300	6.48
K ₂ 323/323-6	4.515	10.565	199.9	4.939	60	2.01	300	9.76	0.518	10.848	60	1.38	300	6.69
K ₂ 0/161-1	4.507	10.554	200.0	5.427	60	1.51	300	7.22	0.570	10.630	60	1.29	300	6.45
K ₂ 0/161-2	4.515	10.580	199.9	5.393	60	1.57	300	7.40	0.565	10.658	60	1.35	300	6.69
K ₂ 0/161-3	4.508	10.576	200.0	5.456	60	1.56	300	7.61	0.572	10.660	60	1.36	300	6.79
K ₂ 0/161-4	4.512	10.556	197.8	5.162	60	1.63	300	7.88	0.548	10.626	60	1.47	300	7.18
K ₂ 0/161-5	4.513	10.571	200.0	5.100	60	1.80	300	8.64	0.535	10.660	60	1.56	300	7.66
K ₂ 0/161-6	4.515	10.601	200.0	4.966	60	2.02	300	9.65	0.519	10.653	60	1.68	300	8.46
K ₂ 0/081-1	4.501	10.555	197.7	5.453	60	1.49	300	7.15	0.581	10.609	60	1.38	300	6.85
K ₂ 0/081-2	4.507	10.562	197.8	5.410	60	1.50	300	7.31	0.575	10.632	60	1.35	300	6.74
K ₂ 0/081-3	4.510	10.594	199.9	5.583	60	1.51	300	7.46	0.585	10.666	60	1.35	300	6.92
K ₂ 0/081-4	4.510	10.589	200.0	5.341	60	1.69	300	7.85	0.559	10.633	60	1.46	300	7.26
K ₂ 0/081-5	4.508	10.568	199.9	5.134	60	1.73	300	8.46	0.539	10.621	60	1.56	300	7.84
K ₂ 0/081-6	4.522	10.565	197.7	4.740	60	2.03	300	9.63	0.502	10.635	60	1.84	300	9.01
K ₂ 0/0-1	4.514	10.614	200.0	5.415	60	1.43	300	7.14	0.565	—	60	1.44	300	7.01
K ₂ 0/0-2	4.511	10.570	199.9	5.444	60	1.51	300	7.38	0.571	—	60	1.48	300	7.27
K ₂ 0/0-3	4.515	10.585	197.8	5.388	60	1.62	300	7.75	0.570	—	60	1.68	300	7.76
K ₂ 0/0-4	4.508	10.566	197.8	5.322	60	1.65	300	8.07	0.565	—	60	1.67	300	7.96
K ₂ 0/0-5	4.508	10.629	197.8	5.050	60	1.89	300	9.12	0.533	—	60	1.83	300	8.93
K ₂ 0/0-6	4.514	10.581	197.8	4.784	60	2.06	300	10.08	0.506	—	60	2.00	300	9.89

(付表-3 続き)

記号-No.	比例限データ(同)		最大荷重データ(同)		強化前	強化後 (以下, 同様)					比例限MOE kN/mm ²	MOR N/mm ²	
	荷重3	たわみ3	荷重4	たわみ4 ^{*1}	MOE kN/mm ²	MOE kN/mm ²	実測値 増分	MOE 補正值	補正後 増分	CFシートの ヤング係数 ^{*2}			CF効率 %
K ₂ 323/323-1	1200	22.33	1830	36.33	12.08	14.64	2.56	14.46	2.38	43.63	76.4	14.28	74.2
K ₂ 323/323-2	1050	19.69	1705	34.61	11.85	14.43	2.58	14.25	2.40	43.63	76.4	14.27	69.4
K ₂ 323/323-3	1020	19.83	1751	46.55	11.38	13.98	2.60	13.80	2.42	43.46	76.1	13.83	71.5
K ₂ 323/323-4	600	11.65	1707	36.40	11.08	13.68	2.60	13.50	2.42	43.29	75.8	13.61	68.6
K ₂ 323/323-5	690	14.96	2031	55.59	9.53	12.39	2.86	12.21	2.68	45.00	78.8	12.32	82.6
K ₂ 323/323-6	600	13.41	1694	41.91	8.97	12.09	3.12	11.91	2.94	47.92	83.9	12.01	68.9
K ₂ 0/161-1	780	17.01	1447	34.77	12.23	13.25	1.02	13.07	0.84	49.49	102.8	13.04	61.4
K ₂ 0/161-2	810	18.35	1411	35.47	11.87	12.68	0.81	12.50	0.63	39.72	82.5	12.44	59.5
K ₂ 0/161-3	750	17.29	1268	78.01	11.47	12.48	1.01	12.30	0.83	48.38	100.5	12.23	53.5
K ₂ 0/161-4	540	12.86	1232	31.62	11.15	11.97	0.82	11.79	0.64	39.38	81.8	12.00	52.3
K ₂ 0/161-5	450	11.55	1226	34.83	10.15	11.10	0.95	10.92	0.77	44.39	92.2	11.01	51.7
K ₂ 0/161-6	420	11.90	1222	39.80	9.02	10.00	0.98	9.82	0.80	44.87	93.2	9.95	51.6
K ₂ 0/081-1	840	19.36	1439	36.59	12.35	12.59	0.23	12.41	0.05	16.24	44.4	12.44	61.4
K ₂ 0/081-2	600	13.63	1399	36.51	11.99	12.67	0.68	12.49	0.50	45.14	123.4	12.52	59.4
K ₂ 0/081-3	660	15.44	1280	31.93	11.60	12.14	0.54	11.96	0.36	35.48	97.0	12.00	53.9
K ₂ 0/081-4	630	15.26	1174	70.67	11.22	11.77	0.55	11.59	0.37	35.74	97.7	11.75	49.8
K ₂ 0/081-5	630	16.55	1289	37.07	10.33	10.91	0.58	10.73	0.40	36.84	100.7	10.85	54.8
K ₂ 0/081-6	570	17.13	1302	44.38	9.13	9.49	0.36	9.31	0.18	20.92	57.2	9.45	55.0
K ₂ 0/0-1	510	11.96	1078	26.75	12.01	12.31	0.30	12.13	0.12			12.22	45.8
K ₂ 0/0-2	450	10.91	1256	32.65	11.83	12.00	0.16	11.82	-0.02			11.97	53.9
K ₂ 0/0-3	510	13.10	1147	31.84	11.27	11.37	0.09	11.19	-0.09			11.35	49.0
K ₂ 0/0-4	540	14.24	1085	32.85	10.84	11.06	0.22	10.88	0.04			11.07	46.6
K ₂ 0/0-5	450	13.44	947	29.54	9.45	9.63	0.17	9.45	-0.01			9.57	40.2
K ₂ 0/0-6	390	12.91	988	35.13	8.63	8.77	0.14	8.59	-0.04			8.72	42.3

*1 「たわみ4」のみクロスヘッド下降量

*2 「CFシートのヤング係数」はMOE補正值から逆算