

平成5年度 農林水産省補助事業

(財)日本住宅・木材技術センター事業

技術開発推進事業報告書

集成材構造開発

平成6年3月

財団法人 日本住宅・木材技術センター

目 次

序 章	平成5年度集成材構造委員会の目的と委員構成	1
第1章	湿度変動下での接合部のクリープ特性	2
第2章	ベイマツ集成梁のクリープ実験	14
第3章	スギ梁材のクリープ特性 (第3報)	65
第4章	集成材構造におけるラグスクリュー接合部と ボルト接合部のクリープ性能の比較	79
第5章	低質ベイマツラミナの曲げ及び引張強度試験	90

序章 平成5年度集成材構造委員会の目的と委員構成

1. 目的

本委員会は、集成材に関する基本的な技術資料および集成材建築物の構造性能に関する技術データを整備し、今後の集成材工業の需要拡大に資することが目的である。

本年度は、昨年度に引続き集成材梁および集成材構造の接合部に関するクリープ現象を定性的に把握し、今後の集成材建築物の設計に有益な資料を提供する。

また、第5章では、品質低下が議論されているベイマツラミナの強度試験を行い、その実態を把握する。

2. 委員の構成

委員長	有馬 孝礼	東京大学農学部林産学科助教授
委員	徳田 廸夫	三重大学生物資源学科森林資源コース教授
〃	五十田 博	信州大学工学部建築学科
〃	林 知行	森林総合研究所木材利用部集成材研究室 主任研究員
〃	木村 衛	(株)竹中工務店技術研究所主任研究員
〃	丸山 則義	鹿島建設(株)技術研究所第2研究部研究員
〃	伊東 洋路	セブン工業(株)
〃	高木 和芳	トリスミ集成材(株)
協力委員	塚田 市朗	林野庁林産課課長補佐
事務局	牧 勉	(財)日本住宅・木材技術センター 試験研究部長
〃	鴛海 四郎	(財)日本住宅・木材技術センター主任研究員

謝辞：第3章のスギ梁材のクリープ特性第3報は宮崎県工業試験場の荒武志朗氏の執筆によるもので、ここに厚く御礼申し上げます。

第1章 湿度変動下での接合部のクリープ特性

1. はじめに

集成材、LVL（単板積層材）とその釘接合部を対象にして曲げモーメント時における湿度変動下でクリープ変形の定性的な傾向を報告した。集成材、LVLおよびその接合部の変形は湿度変化によって大きな影響を受け、集成材は湿度低下によって変形の回復が生じることもあり、個々の差異が顕著でラミナの配置による収縮率の違いなどの効果が考えられた。一方、接合部も湿度の影響は大きいですが、個々の差異は少なく変形の進行は一定の傾向であった。瞬間変形に対するクリープ変形の比率（相対クリープ）で湿度変動による変形を比較すると、応力比が高いほど、湿度変動による変動幅は少なくなる傾向が認められた。集成材、LVLとも負荷初期においては湿度変動に対する対応は明確でなく、荷重に対する安定化への変動が主体であった。負荷後変形が安定してくると湿度との対応が比較的明確になってくる。したがって長期間にわたる湿度変動を受けるときの撓み量の推定は比較的応力比の大きいときには初期の湿度変動後のPOWER則を基本にして、湿度変動に伴う撓み増加を湿度変動量に比例する量とした式で表示すれば実用上大きな問題はないことを報告した。本報告では近年多くみられるようになってきた通直の集成材やLVLのフレームについて、そのコーナー部の接合部に曲げモーメントを受けたときの変形の湿度変動の寄与について検討した。

2. 実験

供試材料は図1のようにベイマツのLVL（13層、断面4×14cm）を直交させ、図2の釘接合金物で接合したものとした。荷重は図2に示したように片持梁形式のもので、接合部には主として曲げモーメントが作用する。この接合部における応力の状態はきわめて複雑であることが予想される。すなわち柱に相当する材に梁に相当する材が支持されており、梁に作用するせん断力は接合金物の釘からの伝達がなければ柱からの圧縮力によって生じることになるが、梁の横圧縮による変形が両端の変位①②に含まれることになる。当然横圧縮変形の程度によっては接合金物への力の分担が変化するであろう。また曲げモーメントによる釣合の支点や接合部の回転の中心は検討の余地がある。しかしながらあえてこのような試験体を用いた理由はこのような支持が現実の場で多いことが予想されるからであり、クリープの相対的な評価と、同様に湿度変動による傾向をつかむことが重要であると

考えられたからである。従来よりクリープの評価はきわめて少なく、ましてや湿度変動による傾向は無視されてきた。接合部の設計が強度評価で対処してきたからであり、さほど支障なかった。しかしながら、実際の設計の場における評価においては耐力評価であってもその許容値から予想されるように弾性限度を下回るので作用している応力は比較的小さくなっている。実際に変形のチェックにおいて算出される数値は論議も多く、概して小さくなっている。すでに明らかにしてきたように時間軸でみた時の変形における湿度変動の寄与は比較的応力比の少ない場合に相対的に大きくなる。

荷重は図1のように重りを表1のように作用させた。湿度変動は窓の開閉などを行い、この12体を同一環境下で比較した。第1ステップでは3つの荷重で比較をした。その後荷重の変化は2900時間において行った。荷重の増加および減少を行い、荷重による変形と、湿度変動による変形の寄与をみた。

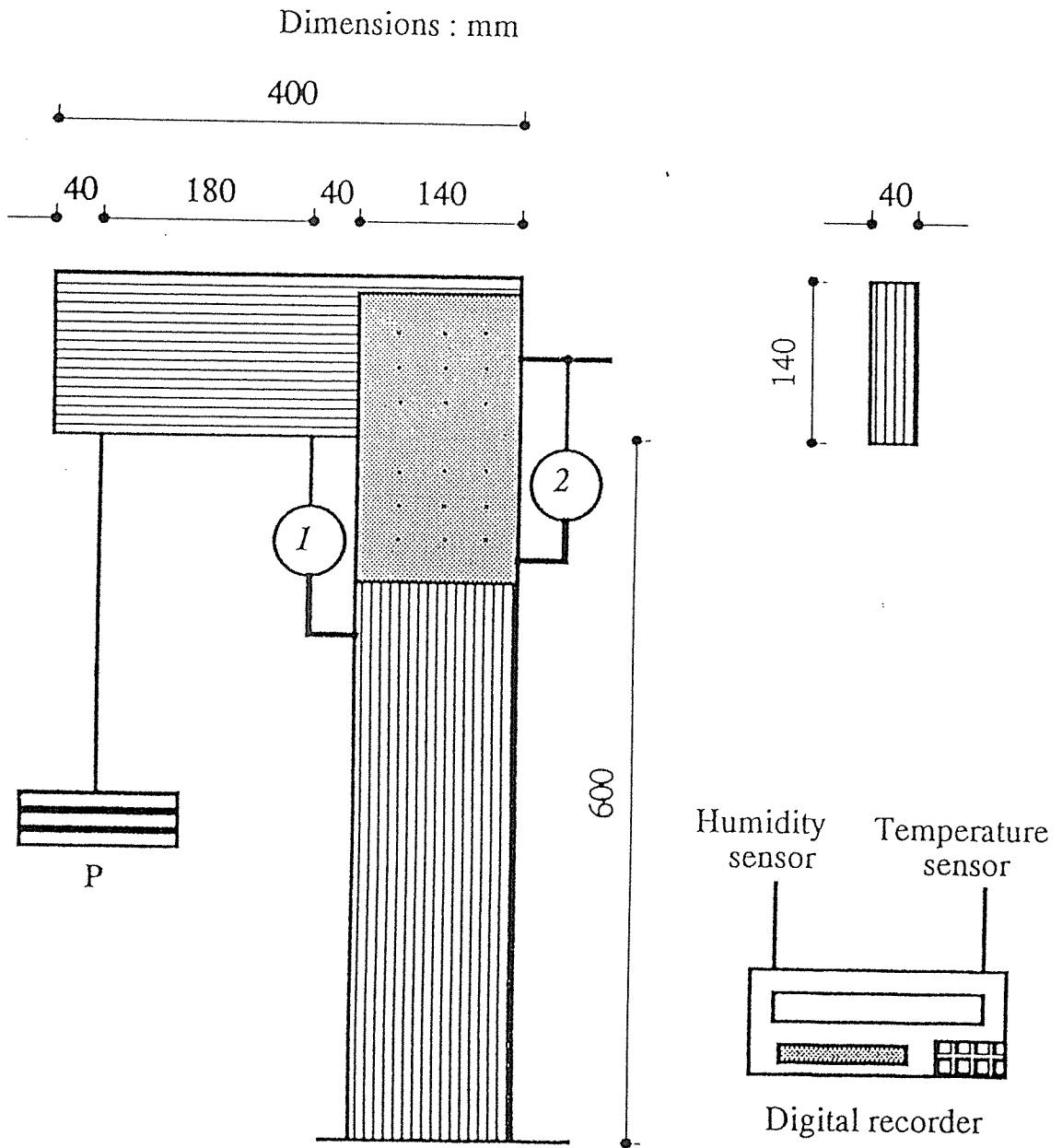
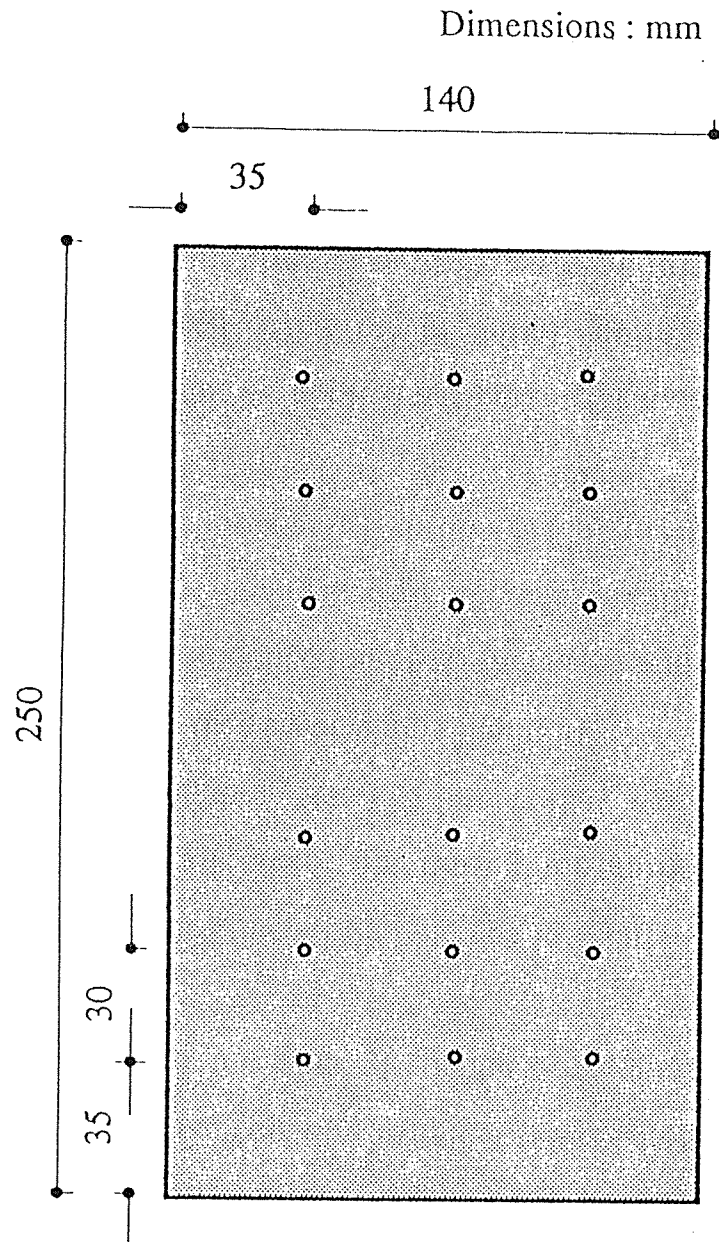


図1 試験体および試験装置



Steel gusset size : 140 x 250 x 2
 Nail size : zn 40

図2 接合金物の形状

表1 試験体の性状と荷重条件

Specimen	SG	MC(%)	MOE(10^3kgf/cm^2)	Loading condition
L1	0.6	9.6	168.2	5kg->15kg
L2	0.56	9.1	137.8	5kg->15kg
L3	0.57	9.2	145.7	5kg->0kg
L4	0.54	9.8	147.4	5kg->0kg
L5	0.61	9.9	167.5	10kg->20kg
L6	0.57	9.3	145.7	10kg->20kg
L7	0.57	9.6	151.6	10kg->20kg
L8	0.54	9.4	125.9	10kg->20kg
L9	0.55	9	138.4	20kg->30kg
L10	0.63	9.5	169.1	20kg->30kg
L11	0.6	10.6	155.6	20kg->0kg
L12	0.59	9.1	156.4	20kg->0kg

3. 実験結果

ここでは変形として①の変位で定性的な傾向を示す。

図3に変形の時間変動を示す。低荷重ほどバラツキが少なく、荷重の大きくなるにしたがって個体差が生じる。2900時間以降の荷重の変動で明確に区分がなされる。

2900時間までの湿度の変動による変形を比較すると図4のようになり、荷重の大きくなるほど湿度変動による変形の大きさが少なくなってくる。

釘接合部や応力比の小さい場合の負荷初期ではPOWER則を基本にするより指数型の方が変形機構を表示するには適切なこともあるので、本報ではそれを基本にして湿度変動による変形を重ね合わせること試みた。

図5は負荷後初期の段階に次の指数式を当てはめたものを示したものである。なお、係数を定めた時間範囲はそれぞれ40hr.までである。

$$r(t) = r_0 + r_1(1 - \exp(-Bt))$$

ここに、 r_0 は瞬間変形であり、 $r_1(1 - \exp(-Bt))$ がクリープ変形に相当する。

この式を用いた理由は釘接合のように圧密によって変形が安定化する機構を説明しうる²⁾からである。また、粘弾性Voigt模型によるクリープ曲線の表示に相当するVoigt模型であるからでもある。

これから明らかなように初期で求めた曲線からいずれもはずれていき、湿度変化はその変形に大きな影響を与える。

集成材とその釘接合部を対象にして湿度変動下でクリープ変形の推定を試みた結果では、負荷初期においては湿度変動に対する対応は明確でなく、荷重に対する安定化への変動が主体であった。負荷後変形が安定してくると湿度との対応が比較的明確になってくる。負荷後初期の段階に指数式を当てはめ、その外挿値と湿度差によって生じる撓み量を加算することによって長期にわたる湿度変動による変形を推定することを試みた。それはいずれも変化の性状をよく示し、湿度変動に伴う挙動の把握が十分可能と思われた。

初期の曲線を求めた時点での湿度を基準にして湿度の差を求め、一方変形は上記の曲線の各時間での外挿値からの差をとる。この両者の直線回帰式 $f(\Delta RH)$ を求めたのが、図6である。

全変形は次式で算出される。

$$r(t, \Delta RH) = r_0 + r_1(1 - \exp(-Bt)) + f(\Delta RH)$$

いずれも変化の性状をよく示していると思われる。したがって、今後の湿度変動に伴う

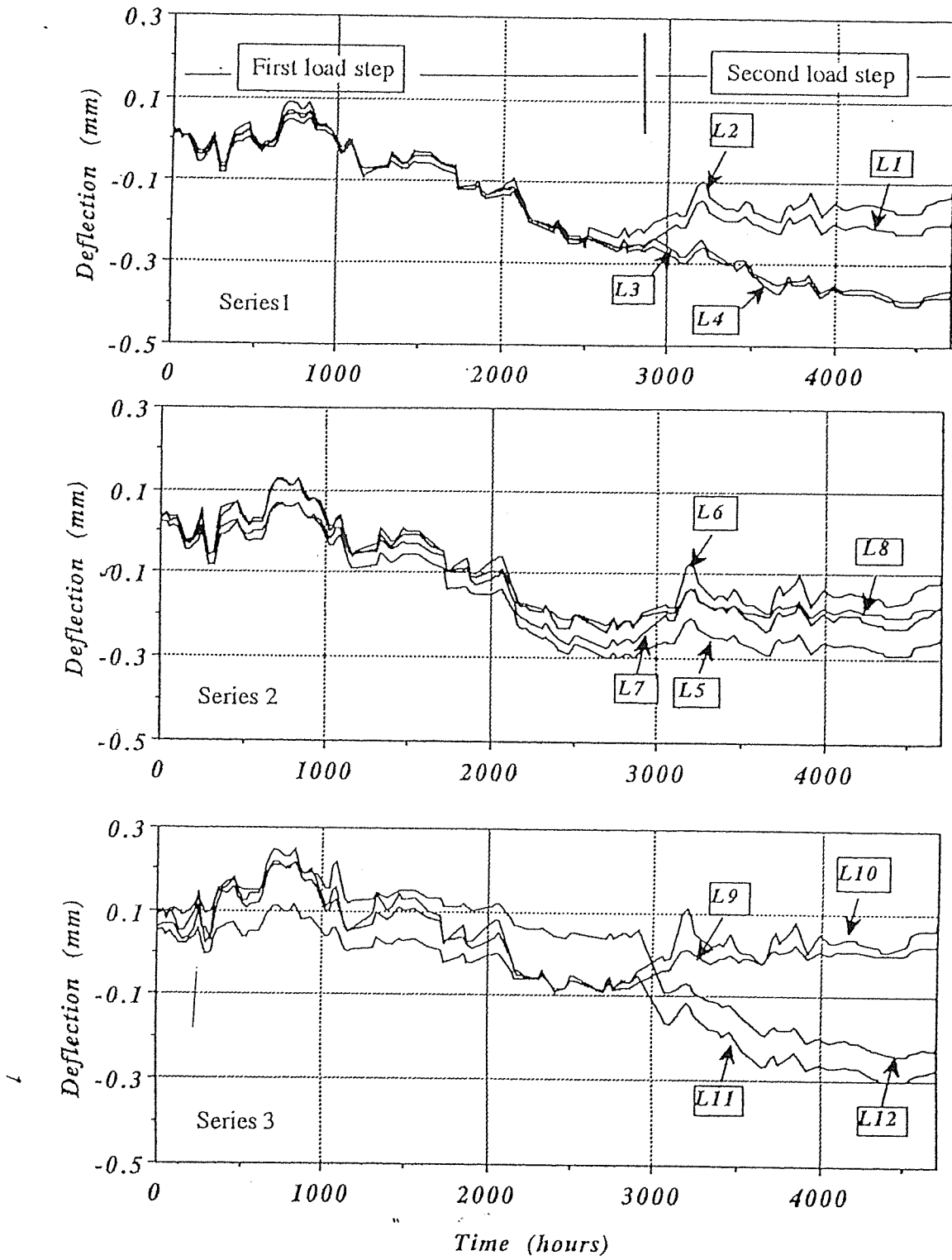


図3 変形の時間変動

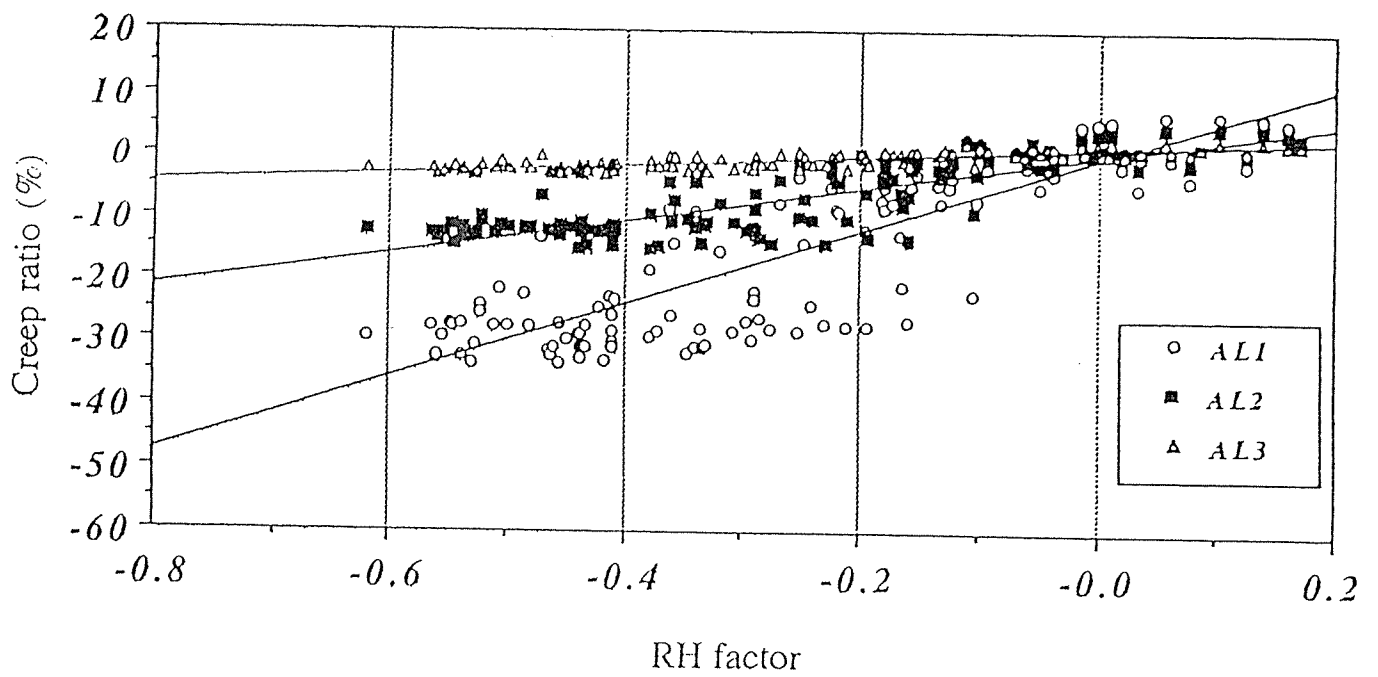


図4 2900時間までの湿度の変動による変形の荷重の影響

Note : AL1 = $-0.989 + 58.31 \cdot RH$ $R^2 = 0.76$
 AL2 = $-0.018 + 26.59 \cdot RH$ $R^2 = 0.76$
 AL3 = $0.942 + 6.81 \cdot RH$ $R^2 = 0.74$

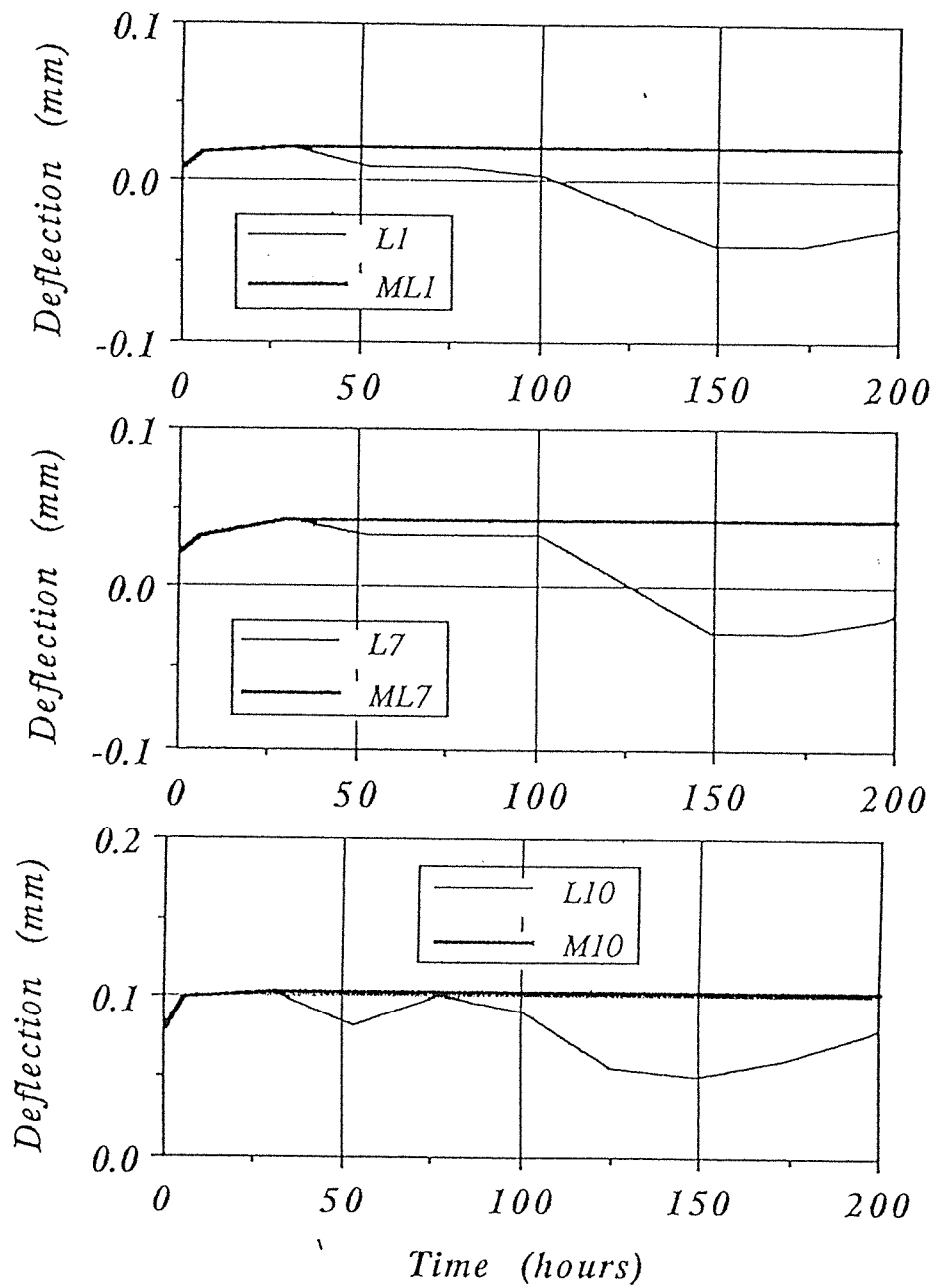


図5 負荷後初期の指数式と実測値

$$r(t) = r_0 + r_1(1 - \exp(-Bt))$$

ここに、 r_0 は瞬間変形であり、 $r_1(1 - \exp(-Bt))$ がクリープ変形に相当する。

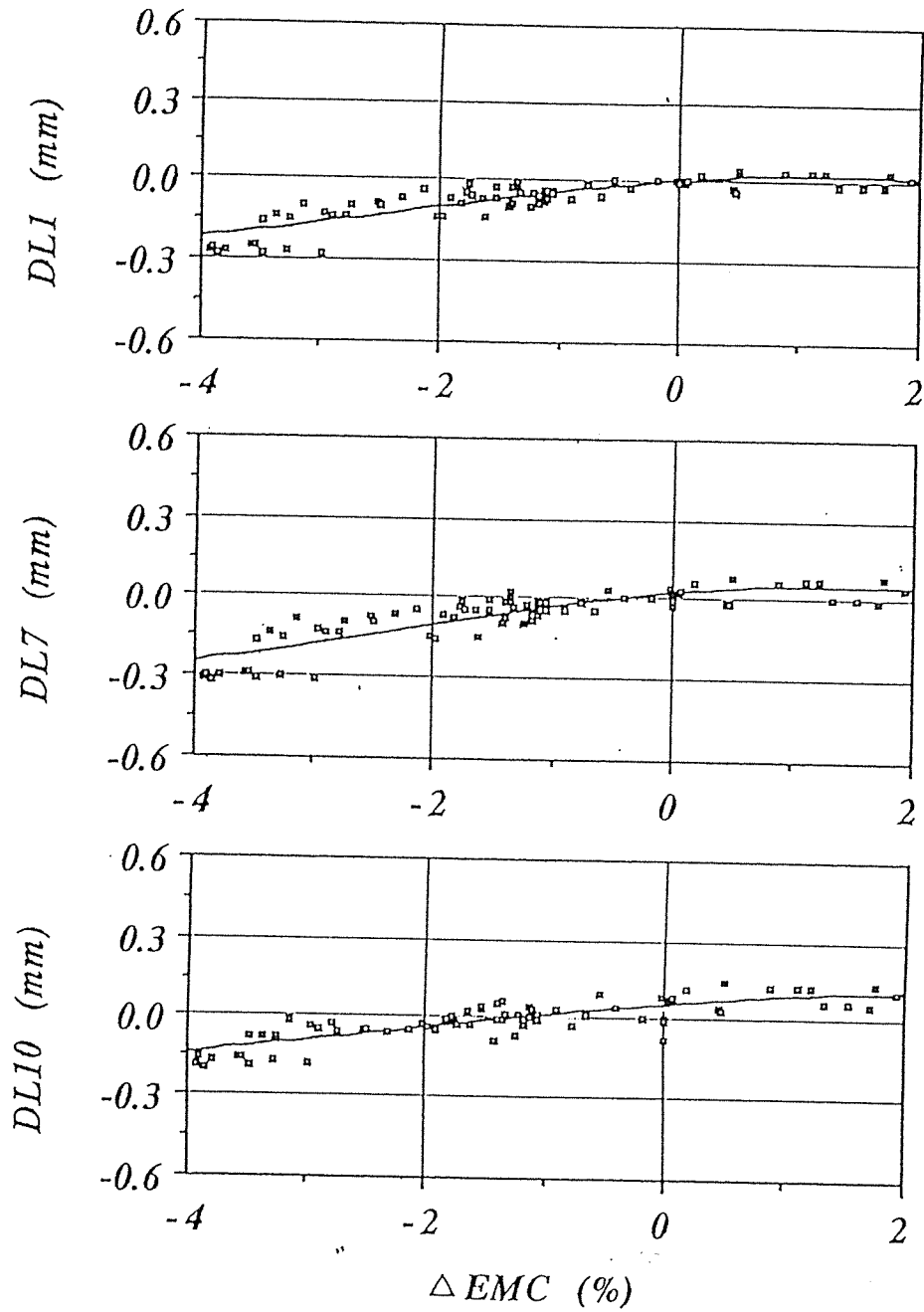


図6 変形差 $f(\Delta RH)$ と湿度の差

$$r(t, \Delta RH) = r_0 + r_1(1 - \exp(-Bt)) + f(\Delta RH)$$

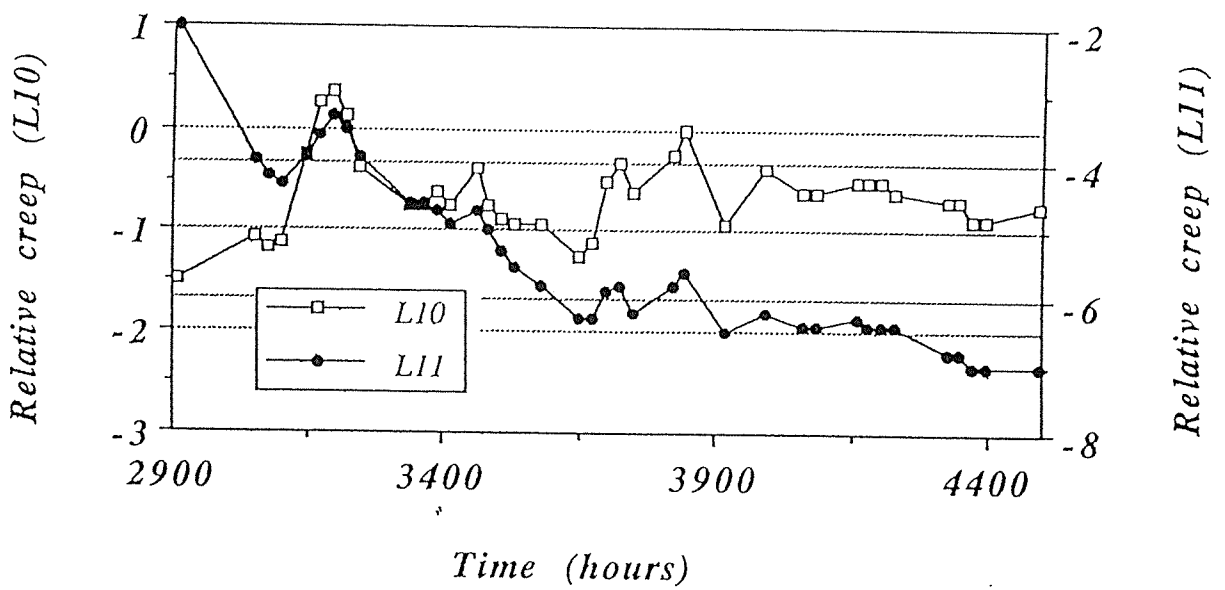
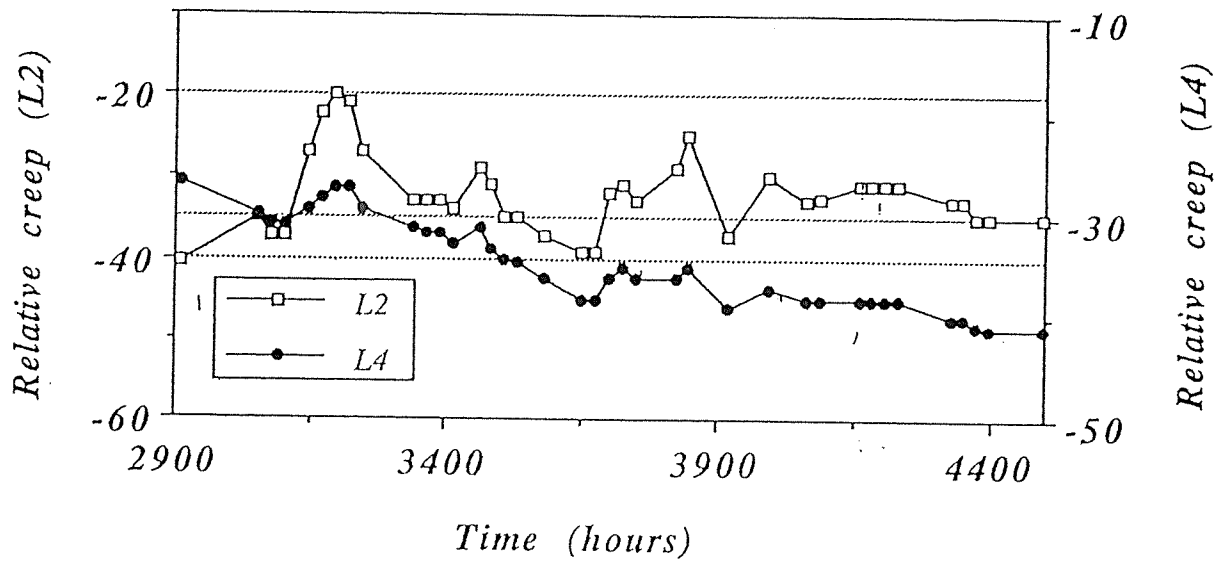


図7 2900時間後の荷重の差異の影響

挙動の把握にはある程度の推定は十分可能と思われる。

図7は2900時間後の荷重の差異の影響を示したものである。両者の傾向は類似している。負荷を増した場合の方が減少させた方より短期間の凹凸の変動は大きい。しかしながら2900時間から4500時間までの変化の大きさは低荷重（回復）の方が大きくなっている。

4. まとめ

LVLの釘接合部を対象にして湿度変動下でクリープ変形の推定を試みた。負荷初期においては湿度変動に対する対応は明確でなく、荷重に対する安定化への変動が主体であった。負荷後変形が安定してくると湿度との対応が比較的明確になってくる。負荷後初期の段階に指数式を当てはめ、その外挿値と湿度差によって生じる撓み量を加算することによって長期にわたる湿度変動による変形を推定することを試みた。それはいずれも変化の性状をよく示し、湿度変動に伴う挙動の把握が十分可能と思われた。

文献

- 1) 有馬、篤海：湿度変動下での集成材、LVLおよび接合部のクリープ特性、日本建築学会大会学術講演梗概集,23-24 (1992)
- 2) 有馬、佐藤、益田：木質材料及び部材の長期耐力評価に関する研究、建築研究報告、NO.95(1981)
- 3) 有馬、洪：湿度変動下での集成材、LVLおよび接合部のクリープ特性、日本建築学会大会学術講演梗概集,951-952 (1993)

第2章 ベイマツ集成梁のクリープ実験

1. はじめに

木材を対象とした従来の曲げクリープ実験は、小断面の無欠点材を試験体としたものが多く、集成材に対して実施したものは世界的にも極めて少ない状況にある。今日、集成材はその優れた特性から大規模建築の主要構造材として用いられることが多くなっており、そのクリープ特性データを求めておくことは、力学的な安全性評価の上で重要と考えられる。この観点から本研究では集成材の曲げクリープ特性を明らかにすることを目的として、実大集成材を用いた長期（3年間）曲げ載荷実験を実施した。試験体は2体用い、パラメーターとしては応力比を選んだ。

杉材などを用いた既往の研究¹⁾によれば、木材の曲げクリープ限度は曲げ強度の40～50%程度であるとされている。本研究では、長期許容応力度レベル（応力比0.3）と、集成材の曲げクリープ破壊の可能性を調べるため、上記50%のレベル（応力比0.5）の2ケースを対象とした。

本実験の実施場所は（財）日本住宅・木材技術センター試験研究所（東京都江東区）の銘木標本館内である。

1) 例えば、久田「木材の長期荷重に対する強度並に断面欠損の影響」

日本建築学会 研究報告9号 1950年11月

2. 試験体概要

本実験で使用する試験体は、断面 396×120mm、全長6mの集成材である。（2体使用）

図 - 1に試験体外形図を示す。

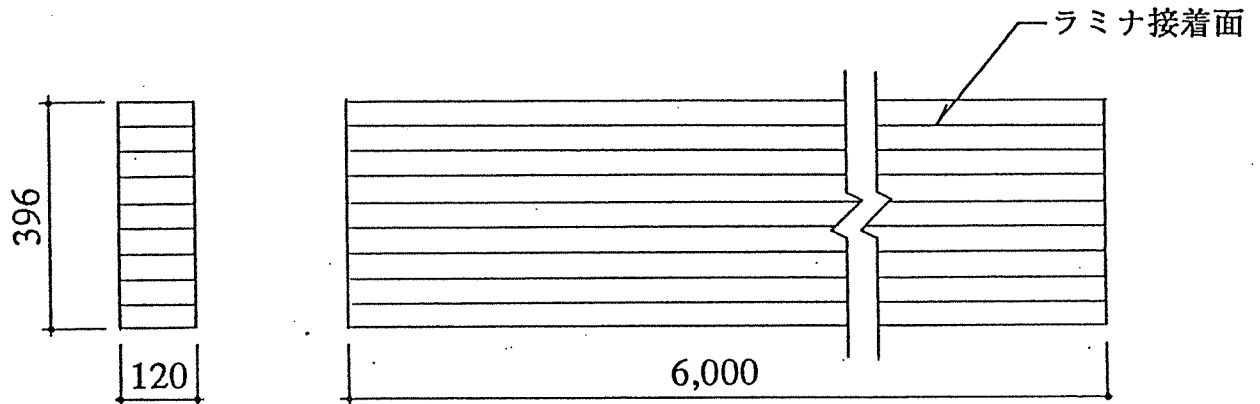


図 - 1 試験体外形

素材はベイマツで、ラミナ厚33mm、積層数12である。

集成材の強度等級は1級とする。

日本建築学会「木構造計算規準・同解説」によるヤング係数及び長期許容応力度は次の通り。

ヤング係数 $E = 110 \times 10^3 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$

長期圧縮許容応力度 $f_c = 105 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} : \text{繊維方向}$

長期曲げ許容応力度 $f_b = 145^* \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$

長期せん断許容応力度 $f_s = 12^* \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$

(注) *印の値は、荷重方向又はたわみ方向と積層面が直交する場合のものである。

なお、載荷直前の試験体の平均表面含水率は、応力比0.3のものが11.3%、0.5のものが12.0%であった。

3. 実験装置概要

3-1. 支持架台

支持架台は鉄筋コンクリート製とし、試験体両端に1台ずつ2台で1組とする。

図-2に架台外形図を示す。

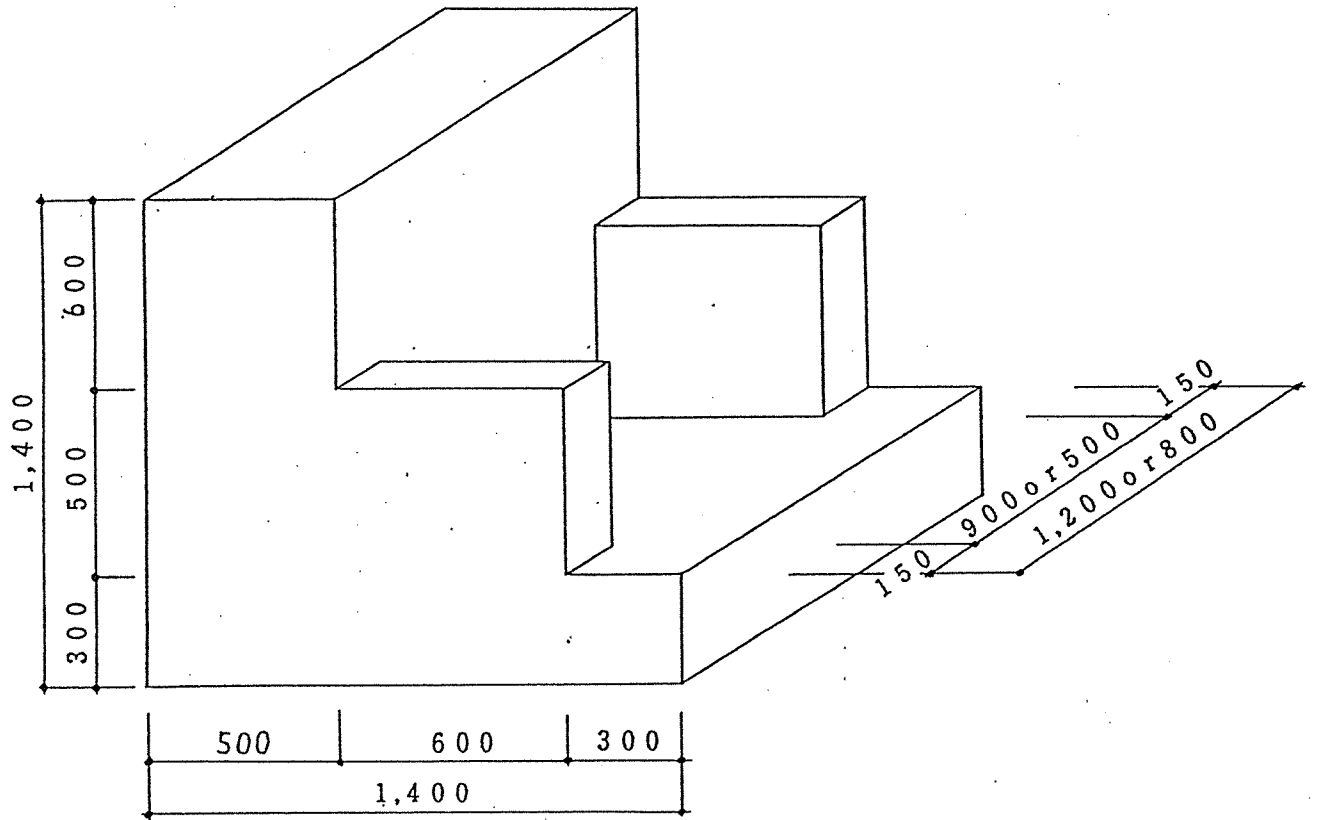


図-2 RC架台外形

試験体は2体であり、4. 実験方法で述べるように、応力比を変えた実験即ち荷重を変えた実験を行うため、荷重（錘）として使用する鋼矢板の枚数が2体の試験体で異なる。この枚数差により架台幅が相違する。

袖壁部分は鋼矢板の振れ止めである。

3-2. 錘及び油圧ジャッキ

荷重としての錘には鋼矢板（FSP-3型，5m長）を使用する。

本鋼矢板は幅40cm、重さ300kg/枚であり、重ね厚は1枚当たり5cmである。

鋼矢板の載荷及び除荷の際には写真5-1に示す油圧ジャッキ（揚重10ton,揚程10cm）を使用する。本油圧ジャッキを鋼矢板の下に4ヶ所配し、手動にて操作する。

油圧ジャッキそのものの高さは27cmである。

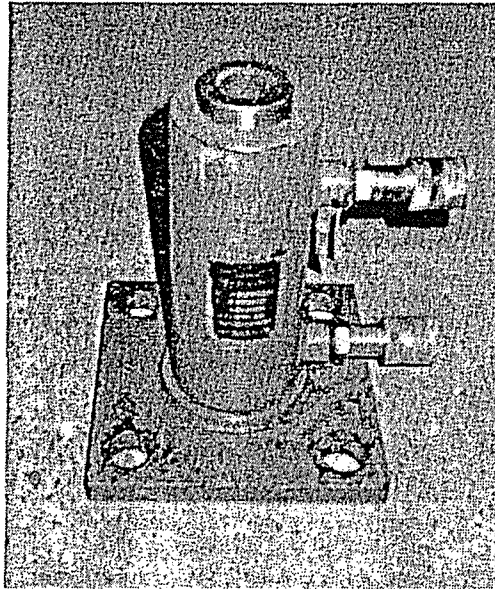


写真 - 1 油圧ジャッキ

3-3. 計測機器

試験体の変形は、変位計（ストローク10cm）により、次の各点の鉛直変位を計測する。

- a) 試験体中央 1個
- b) 試験体支持点 2個
- c) 荷重点 2個

(計) 5個

これらの変位計は、次頁図に示すような鉄骨製支持架構に取り付けるものとする。

ひずみ測定器には、東京測器研究所製 TDS-301を使用する。

また、試験体設置室内の温度及び湿度を計測するため、連続記録方式の温湿度計を使用する。(写真 - 2 参照)

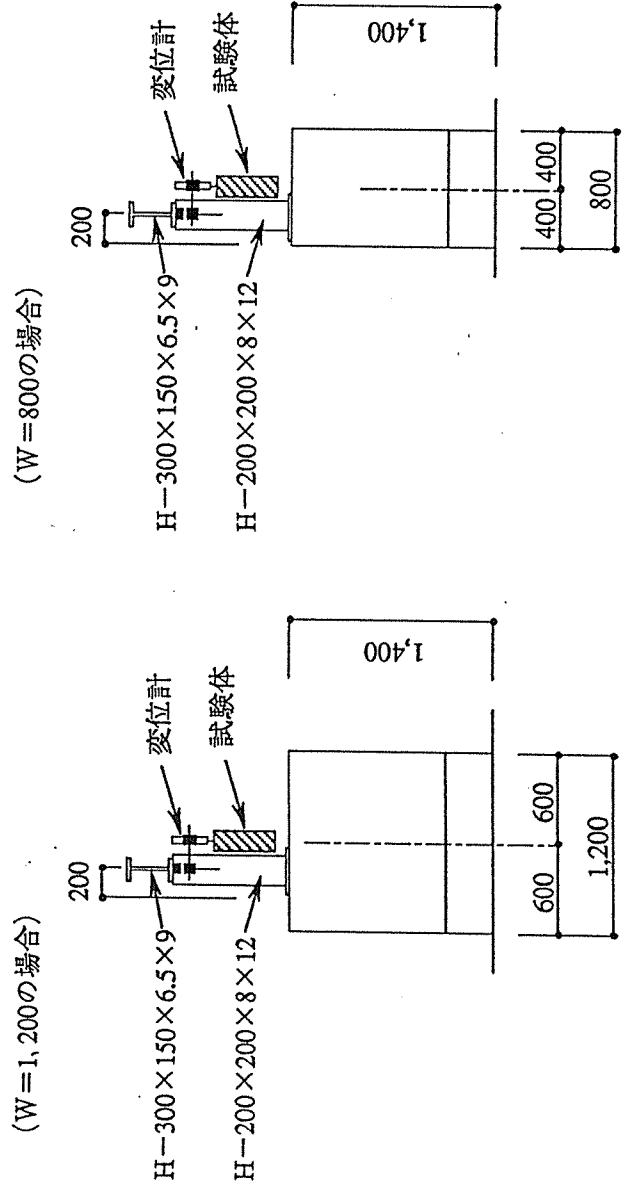
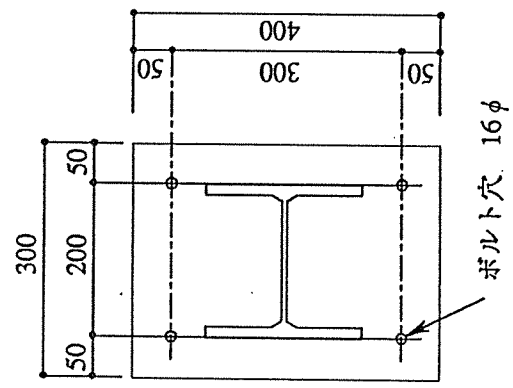
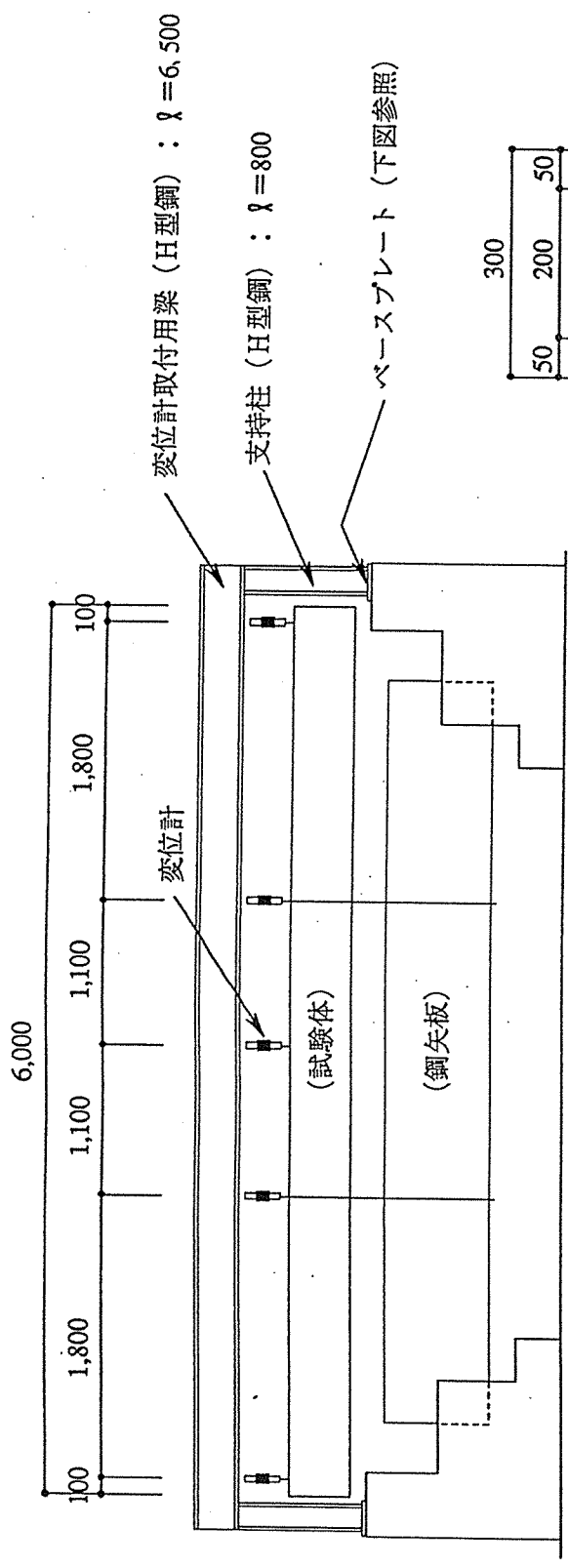


図-3 変位計取付鉄骨

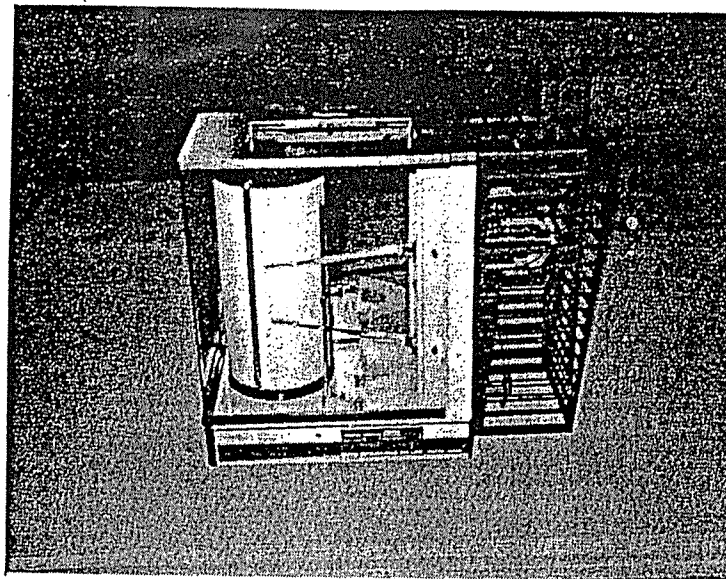


写真 - 2 連続温湿度記録計

4. 実験方法

4-1. 載荷方法

2体の試験体は、それぞれ異なる応力比で載荷し、載荷期間は3年とする。1体は長期許容応力度に対応させ、応力比を0.3とし、もう1体は0.5とする。

いま、試験体の強度を長期許容応力度の3倍とすると、

$$\text{曲げ強度} \quad f_{bu} = 145 \times 3 = 435 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{せん断強度} \quad f_{su} = 12 \times 3 = 36 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{曲げ耐力} \quad M_u &= f_{bu} \times Z \\ &= 435.0 \times 3136.3 \\ &= 13.64 \times 10^5 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{せん断耐力} \quad Q_u &= f_{su} \times A \div 1.5 \\ &= 36.0 \times 12.0 \times 39.6 \div 1.5 \\ &= 11.40 \times 10^3 \text{ kgf} \end{aligned}$$

せん断スパンをLQとすると(荷重は2点載荷とする)、

$$M_u / LQ < Q_u \quad \text{より} \quad LQ > 119.6 \text{ cm}$$

曲げ破壊実験との対応を考慮し、LQ = 180 cmとする。

荷重の大きさWは、応力比 α が0.3のとき、

$$\frac{M}{Z} = \frac{180.0 \times 0.5 \times W}{3136.3} = 0.3 \times f_{bu}$$

より、W = 4548 kg (鋼矢板15枚: 4500kg)

応力比 α が0.5のときは、同様にして

$$W = 7579 \text{ kg (鋼矢板24枚: 7200kg)} : \text{不足分は他の錘により補う}$$

$\alpha=0.3$ のとき、鋼矢板は1段積みで済むが、 $\alpha=0.5$ のときは12枚積みを2段並べる構成となる。

図-4は、 α が0.5の場合の試験体、架台、錘（鋼矢板）の構成を示したものである。鋼矢板は図中に示すようなH型鋼と長ボルトからなる吊り金物により固定し、二段に並べた鋼矢板が崩れるのを防止する。（図-5参照）

α が0.3の場合は、図-6、図-7に示すような構成とする。

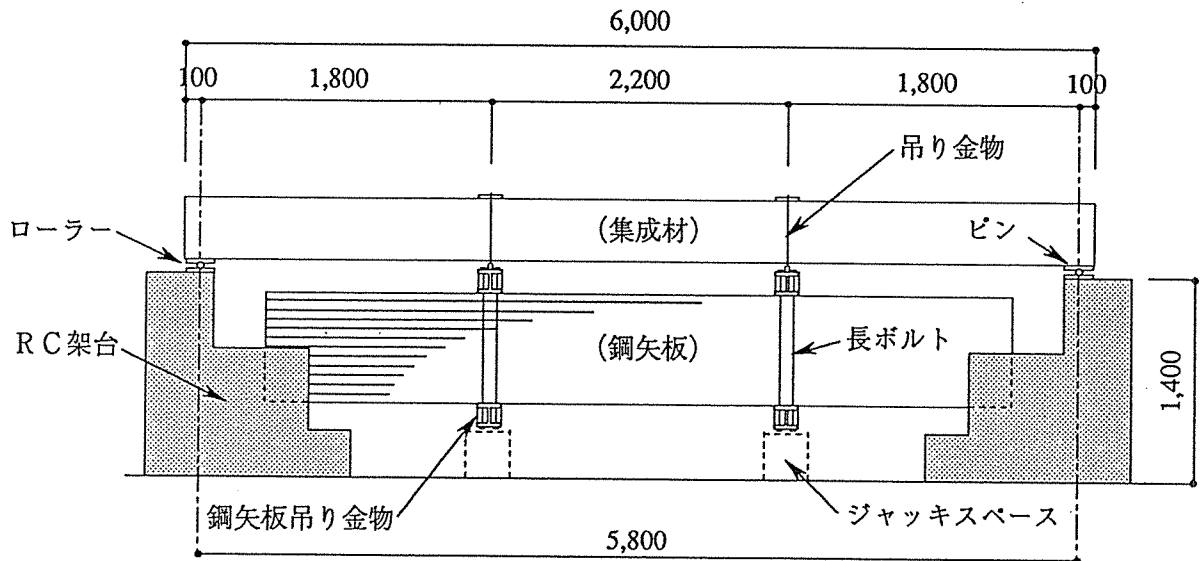


図-4 実験装置構成 ($\alpha = 0.5$ の場合)

荷重のかけ方

予め配した4個のジャッキ及び、コンクリートブロックの上に吊り金物（下側のH型鋼又は溝型鋼）を置き、その上に鋼矢板を天井クレーンにて吊り降ろす。このときジャッキの揚程（ストローク）は9cmにしておく。コンクリートブロックは鋼矢板積み上げの際の安定のために設けるものである。鋼矢板が積み上がり、ターンバックルにて吊りワイヤーのたるみをなくしたら、ジャッキのストロークを一杯の10cmに上げ、両脇のコンクリートブロックを取り除く。4個のジャッキは手動で操作し（1個につき一人がつく）、合図でジャッキを下げる。

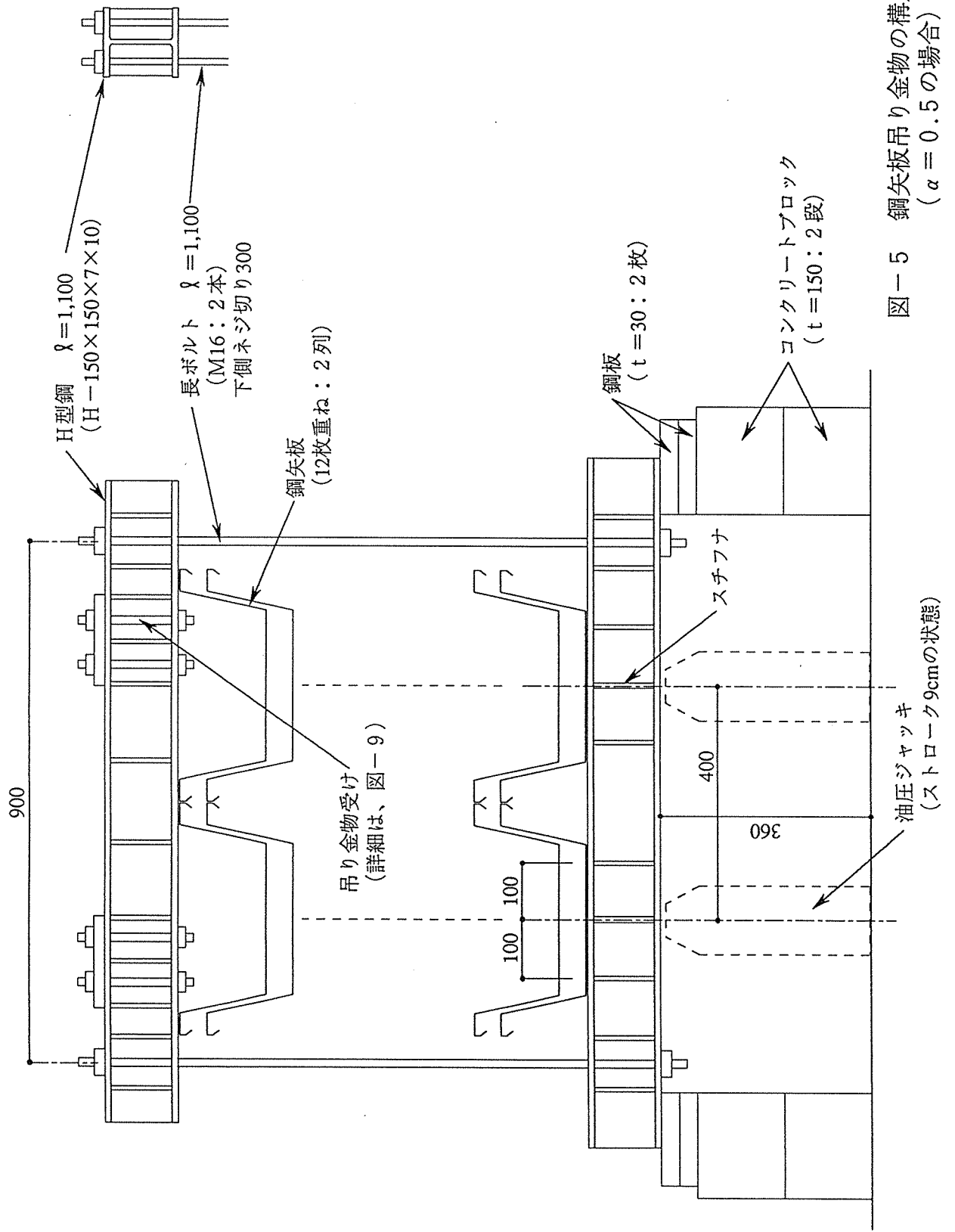


図-5 鋼矢板吊り金物の構成 (部分)
($\alpha = 0.5$ の場合)

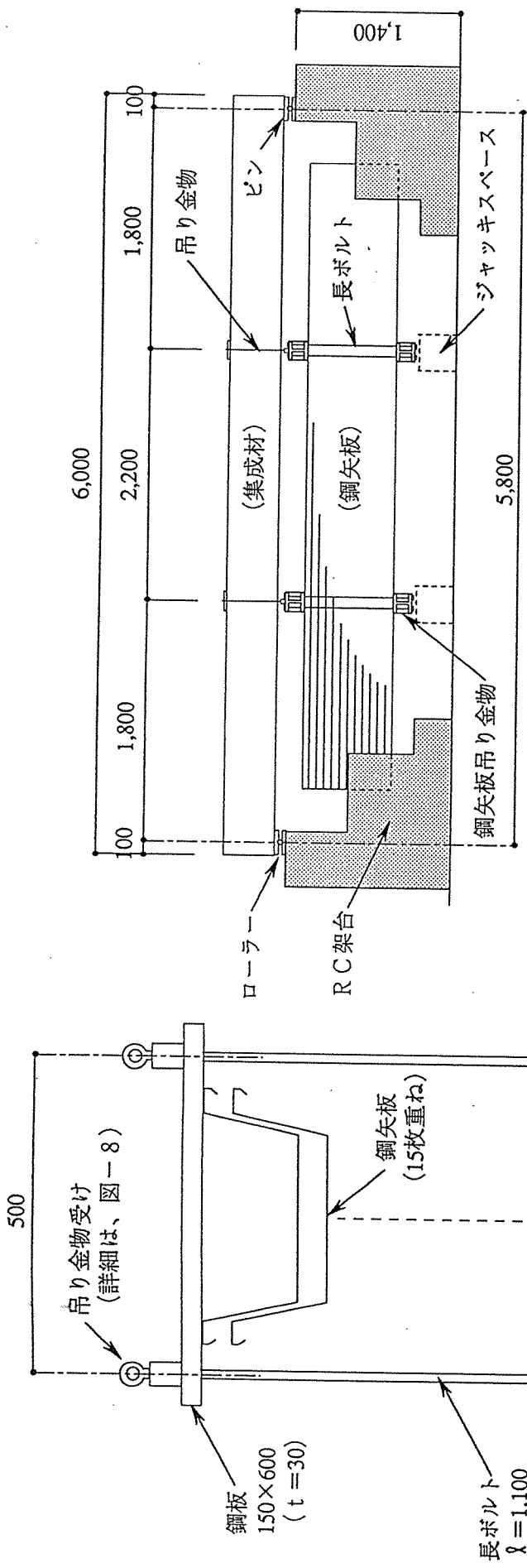


図-6 実験装置構成 ($\alpha = 0.3$ の場合)

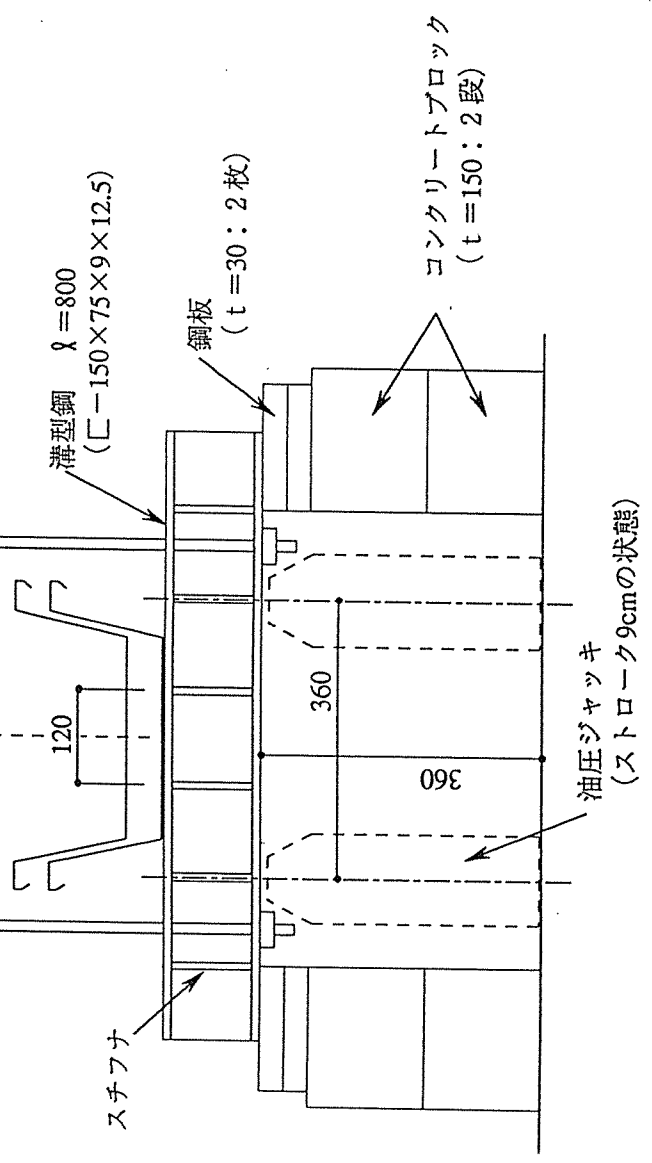


図-7 鋼矢板吊り金物の構成 (部分)
($\alpha = 0.3$ の場合)

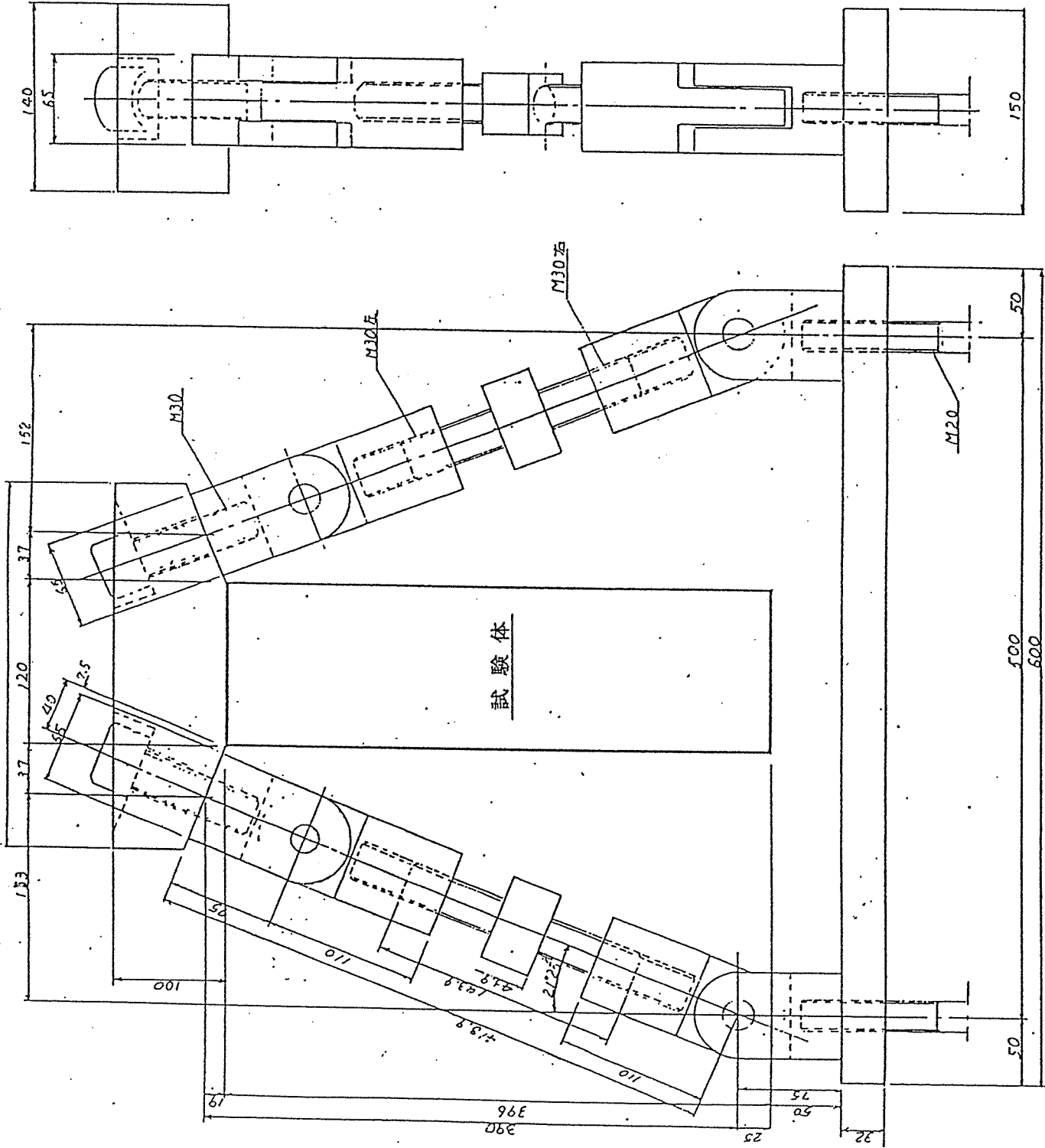
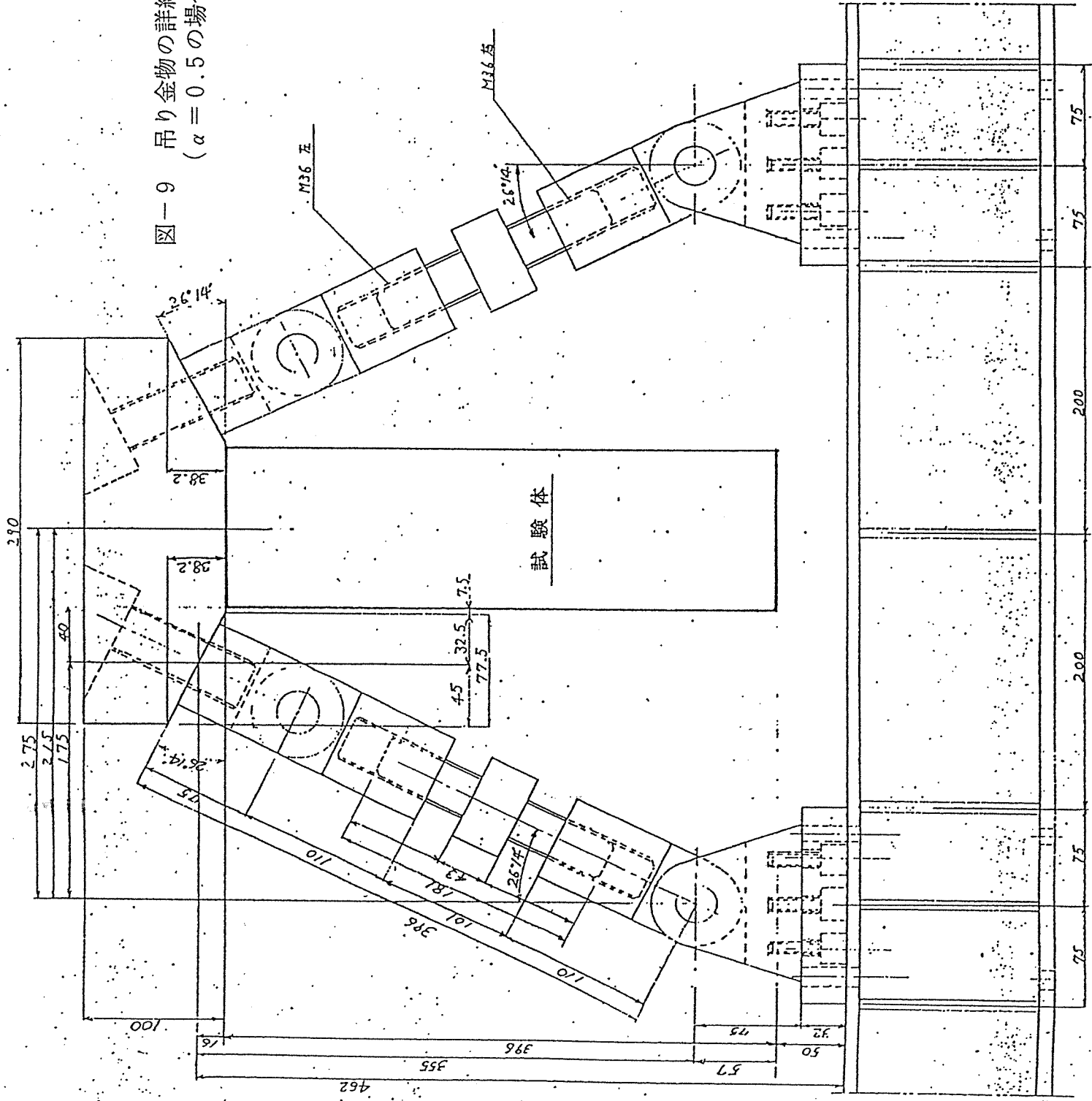
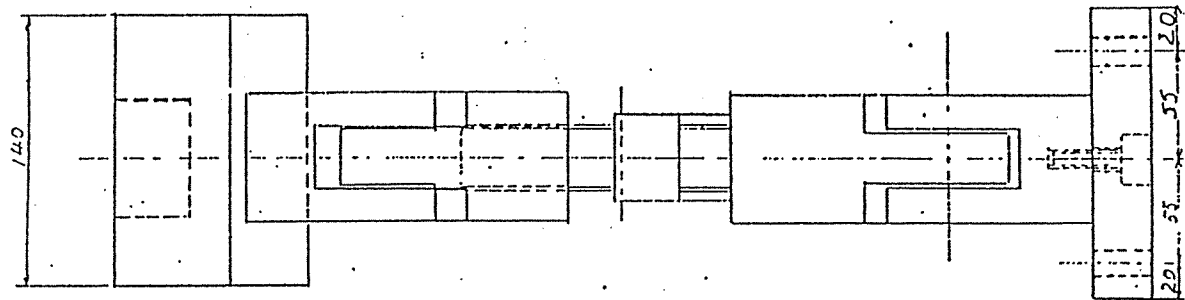


図-8 吊り金物の詳細
 $(\alpha = 0.3 \text{ の場合})$

6							
5							
4							
3							
2							
1							
種別		材料		規格		数量	
株式会社 平井工務店							
771-72 久原道号							
吊り金物							
製作番号							
図番				製図者			
製図				検査			
有限会社 富士製作所							

図-9 吊り金物の詳細
($\alpha = 0.5$ の場合)



6	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41
42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55
56	57	58	59	60	61	62
63	64	65	66	67	68	69
70	71	72	73	74	75	76
77	78	79	80	81	82	83
84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97
98	99	100	101	102	103	104
105	106	107	108	109	110	111
112	113	114	115	116	117	118
119	120	121	122	123	124	125
126	127	128	129	130	131	132
133	134	135	136	137	138	139
140	141	142	143	144	145	146
147	148	149	150	151	152	153
154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167
168	169	170	171	172	173	174
175	176	177	178	179	180	181
182	183	184	185	186	187	188
189	190	191	192	193	194	195
196	197	198	199	200	201	202
203	204	205	206	207	208	209
210	211	212	213	214	215	216
217	218	219	220	221	222	223
224	225	226	227	228	229	230
231	232	233	234	235	236	237
238	239	240	241	242	243	244
245	246	247	248	249	250	251
252	253	254	255	256	257	258
259	260	261	262	263	264	265
266	267	268	269	270	271	272
273	274	275	276	277	278	279
280	281	282	283	284	285	286
287	288	289	290	291	292	293
294	295	296	297	298	299	300
301	302	303	304	305	306	307
308	309	310	311	312	313	314
315	316	317	318	319	320	321
322	323	324	325	326	327	328
329	330	331	332	333	334	335
336	337	338	339	340	341	342
343	344	345	346	347	348	349
350	351	352	353	354	355	356
357	358	359	360	361	362	363
364	365	366	367	368	369	370
371	372	373	374	375	376	377
378	379	380	381	382	383	384
385	386	387	388	389	390	391
392	393	394	395	396	397	398
399	400	401	402	403	404	405
406	407	408	409	410	411	412
413	414	415	416	417	418	419
420	421	422	423	424	425	426
427	428	429	430	431	432	433
434	435	436	437	438	439	440
441	442	443	444	445	446	447
448	449	450	451	452	453	454
455	456	457	458	459	460	461
462	463	464	465	466	467	468
469	470	471	472	473	474	475
476	477	478	479	480	481	482
483	484	485	486	487	488	489
490	491	492	493	494	495	496
497	498	499	500	501	502	503
504	505	506	507	508	509	510
511	512	513	514	515	516	517
518	519	520	521	522	523	524
525	526	527	528	529	530	531
532	533	534	535	536	537	538
539	540	541	542	543	544	545
546	547	548	549	550	551	552
553	554	555	556	557	558	559
560	561	562	563	564	565	566
567	568	569	570	571	572	573
574	575	576	577	578	579	580
581	582	583	584	585	586	587
588	589	590	591	592	593	594
595	596	597	598	599	600	601
602	603	604	605	606	607	608
609	610	611	612	613	614	615
616	617	618	619	620	621	622
623	624	625	626	627	628	629
630	631	632	633	634	635	636
637	638	639	640	641	642	643
644	645	646	647	648	649	650
651	652	653	654	655	656	657
658	659	660	661	662	663	664
665	666	667	668	669	670	671
672	673	674	675	676	677	678
679	680	681	682	683	684	685
686	687	688	689	690	691	692
693	694	695	696	697	698	699
700	701	702	703	704	705	706
707	708	709	710	711	712	713
714	715	716	717	718	719	720
721	722	723	724	725	726	727
728	729	730	731	732	733	734
735	736	737	738	739	740	741
742	743	744	745	746	747	748
749	750	751	752	753	754	755
756	757	758	759	760	761	762
763	764	765	766	767	768	769
770	771	772	773	774	775	776
777	778	779	780	781	782	783
784	785	786	787	788	789	790
791	792	793	794	795	796	797
798	799	800	801	802	803	804
805	806	807	808	809	810	811
812	813	814	815	816	817	818
819	820	821	822	823	824	825
826	827	828	829	830	831	832
833	834	835	836	837	838	839
840	841	842	843	844	845	846
847	848	849	850	851	852	853
854	855	856	857	858	859	860
861	862	863	864	865	866	867
868	869	870	871	872	873	874
875	876	877	878	879	880	881
882	883	884	885	886	887	888
889	890	891	892	893	894	895
896	897	898	899	900	901	902
903	904	905	906	907	908	909
910	911	912	913	914	915	916
917	918	919	920	921	922	923
924	925	926	927	928	929	930
931	932	933	934	935	936	937
938	939	940	941	942	943	944
945	946	947	948	949	950	951
952	953	954	955	956	957	958
959	960	961	962	963	964	965
966	967	968	969	970	971	972
973	974	975	976	977	978	979
980	981	982	983	984	985	986
987	988	989	990	991	992	993
994	995	996	997	998	999	1000

4-2. 計測方法

計測は、試験体の鉛直変位、中央の曲げひずみ、実施場所の温湿度について行なう。

鉛直変位については、3-3. で述べたように5ヶ所に変位計をセットし、一定時間おきに計測する。計測時間間隔を次に示す。

- | | | |
|-----------|----------|-----------|
| a) 荷重直後 | ～ 荷重後1時 | : 30秒 |
| b) 荷重後1時間 | ～ 荷重後6時間 | : 15分 |
| c) 荷重後6時間 | ～ 荷重後7日 | : 1時間 |
| d) 荷重後7日 | ～ | : 1週間～3週間 |

温湿度計は試験体近傍に設置し、荷重期間計測を続ける。

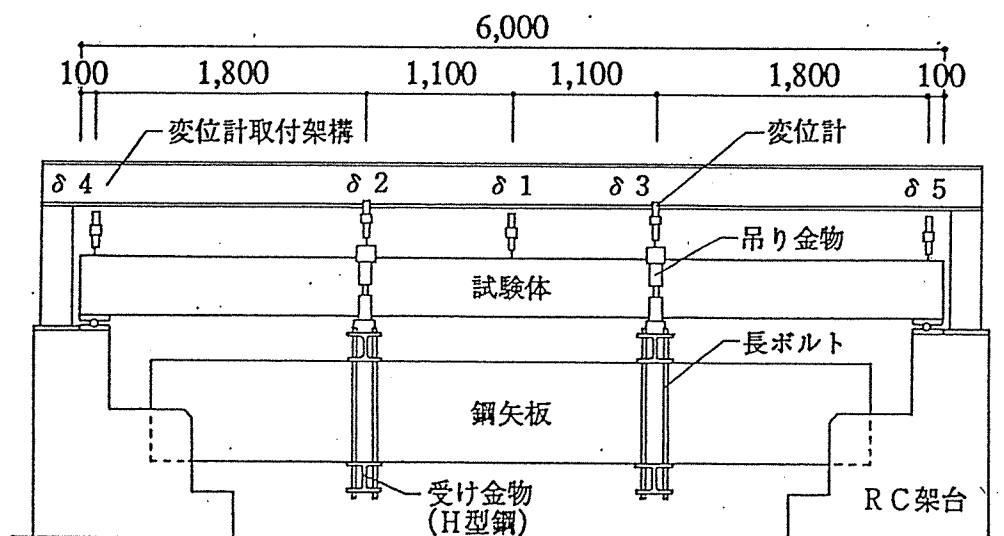
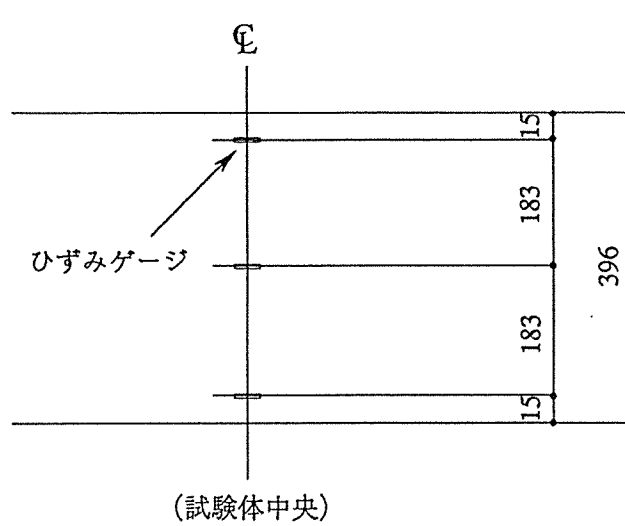


図 - 10 変位計測の概要

$\delta 1 \sim \delta 5$ は、各変位計に於ける変位量を示す。

試験体の曲げ変形状を調べるため、試験体中央に3ヶ所ひずみゲージを貼付する。(下図参照) 但し、試験体片面のみに貼付する。



計測は変位計と同時に行なう。但し、接着剤の信頼性(有効期間)を考慮して、計測期間は3週間程度とする。

実験状況を写真 - 3 (応力比0.3の場合) 及び写真 - 4 (応力比0.5の場合) に示す。

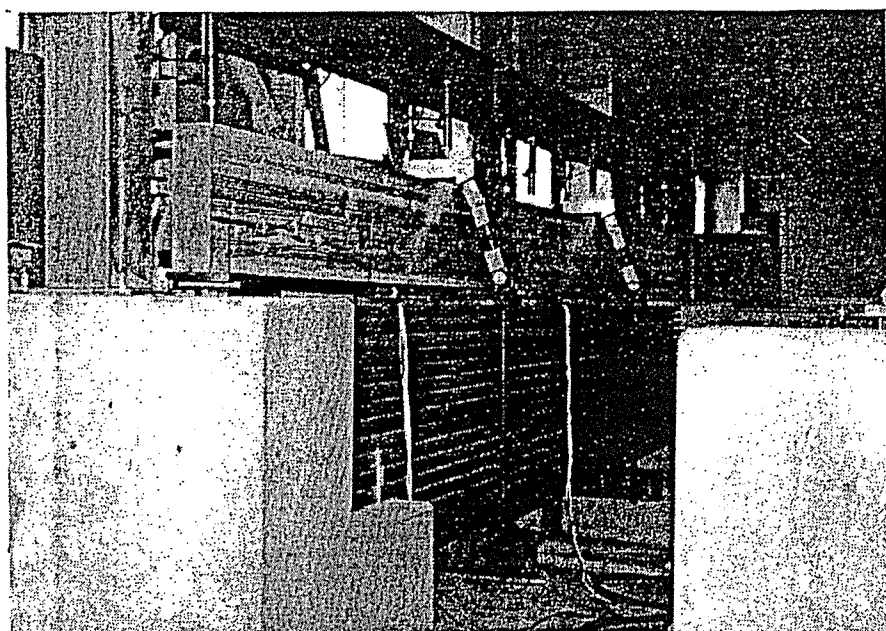


写真 - 3 実験状況 (応力比0.3)

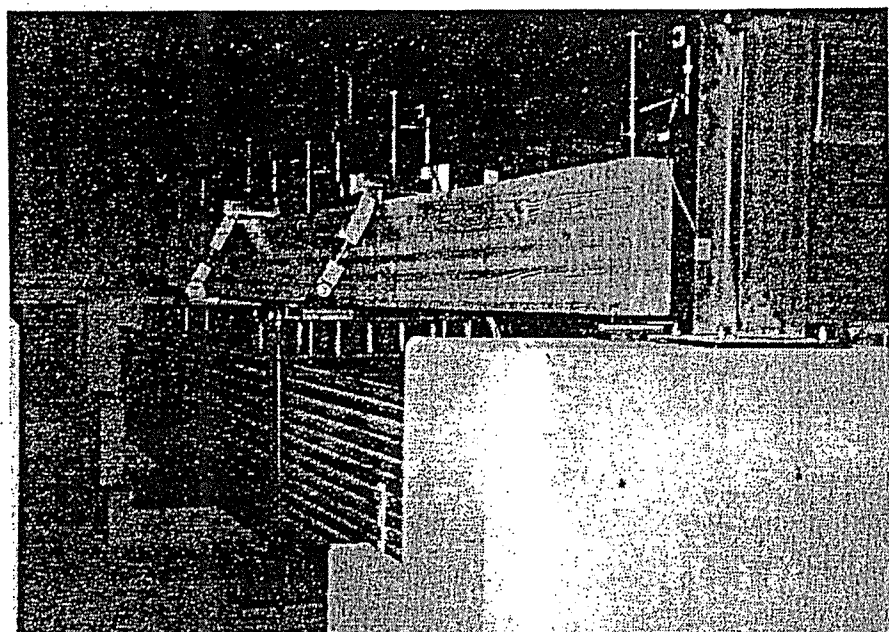


写真 - 4 実験状況 (応力比0.5)

5. スケジュール

(平成3年)

1月上旬 ～ 2月下旬

RC架台および鉄骨架構製作。

3月上旬 ～ 3月中旬

鋼矢板、試験体セット。 実験機材、計測機器セット。

3月26日

載荷（2試験体とも）

8月9日～8月23日（載荷後136日～150日）

連続計測実施。

(平成4年)

8月10日～8月24日（載荷後503日～517日）

連続計測実施。

(平成4～5年)

10月1日～1月4日（載荷後555日～650日）

連続計測実施。

10月27日～1月4日

連続歪計測実施。

(平成5年)

4月8日～8月3日（載荷後744日～861日）

連続計測実施（応力比0.5）。

6. 実験結果

6-1. 載荷後4ヶ月目までの変位計測結果

載荷を行なった3月26日から4ヶ月目（正確には119日目）の7月24日までの変位状況をグラフ化し、中間検討を行なった。

図-11は、応力比0.3の場合の試験体中央（ $\delta 1$ ）及び載荷点（ $\delta 2$ 及び $\delta 3$ ）の計測結果である。載荷直後の試験体中央の初期たわみは17.69mmであった。119日目の試験体中央の変位量は22.93mmであり、これより4ヶ月目の対初期たわみ比は1.30となる。文献1（P.2参照）によれば、4ヶ月にわたる杉材曲げクリープ実験の結果、クリープ限度付近（応力比0.3～0.4）の継続荷重を受ける木材の変位量は、4ヶ月でほぼ安定し、載荷直後の変位量の約1.6～2.0倍になるとしている。本実験の結果では同じ4ヶ月でも1.6を下回っている。

同様に図-12は、応力比0.5の場合の試験体中央（ $\delta 1$ ）及び載荷点（ $\delta 2$ 及び $\delta 3$ ）の計測結果である。載荷直後の試験体中央の初期たわみは31.92mmであった。119日目の試験体中央の変位量は42.68mmであり、これより4ヶ月目の対初期たわみ比は1.34となる。文献1によれば、応力比が0.6のものは載荷時間が3000時間以内に破壊するが、応力比が0.5のものは載荷時間が3000時間になっても変位の増加が停止しないとしている。本実験の場合も同様に3000時間に近づいても変位の増加は続いている。

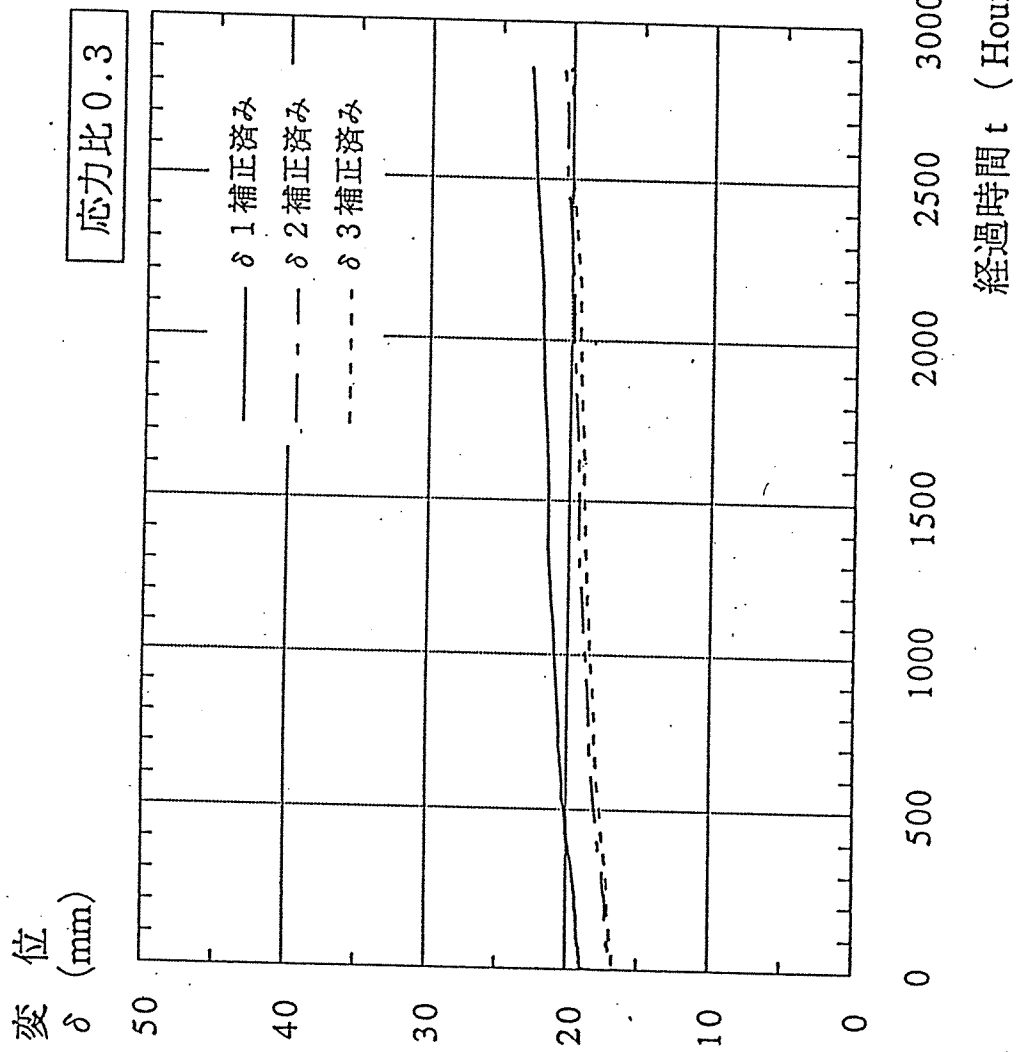


図 - 11 載荷後 4 ヶ月目までの変位状況 (応力比 0.3)

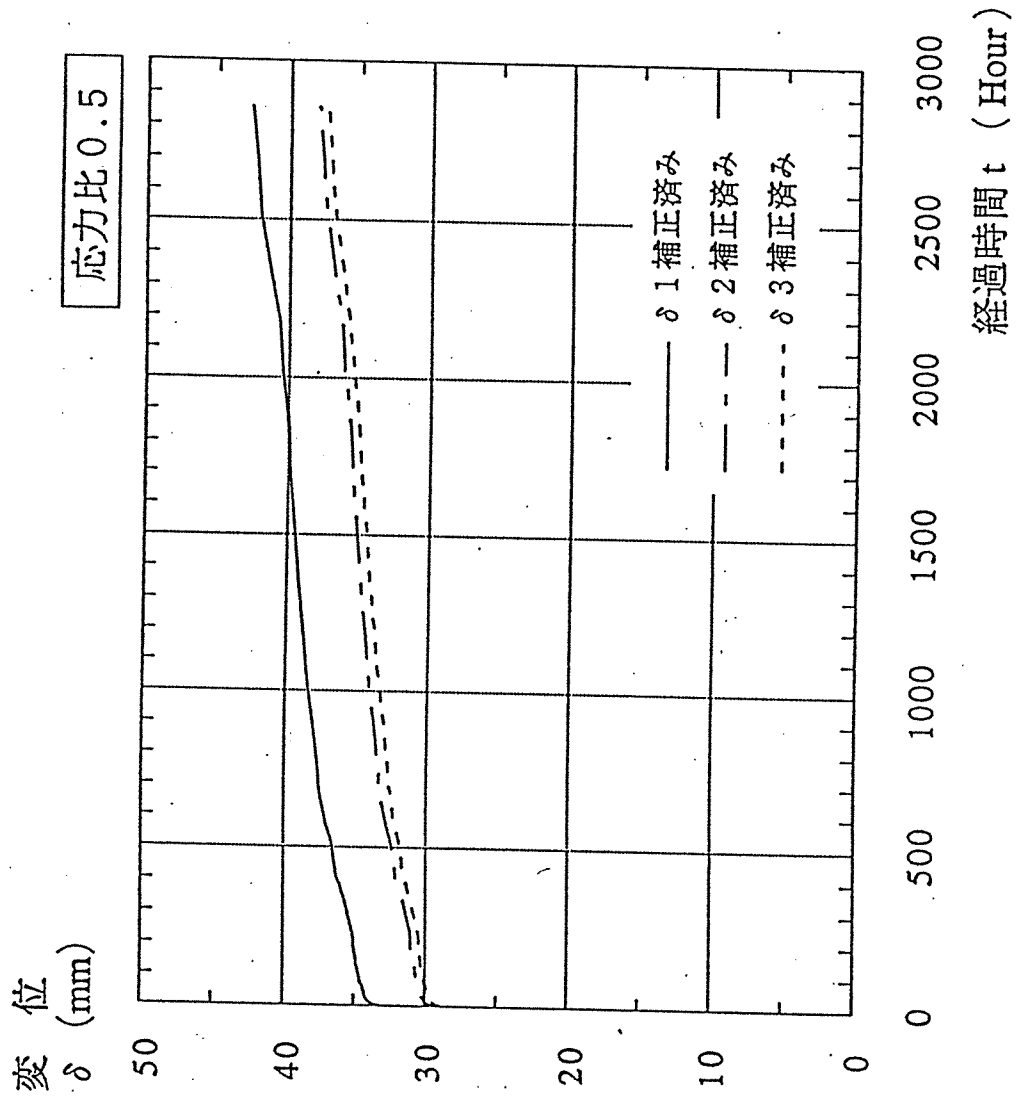


図 - 12 載荷後 4 ヶ月目までの変位状況 (応力比 0.5)

6-2. 短期間（2週間）連続変位計測結果（1）

本実験は、比較的温湿度の高い時期（夏期）の試験体の動きを調べることを目的として、8月9日16時30分より同23日11時30分まで約2週間、1時間おきに計331時間、変位を連続計測した。これは載荷後、136日目（約3260時間）から150日目（約3600時間）に相当する。

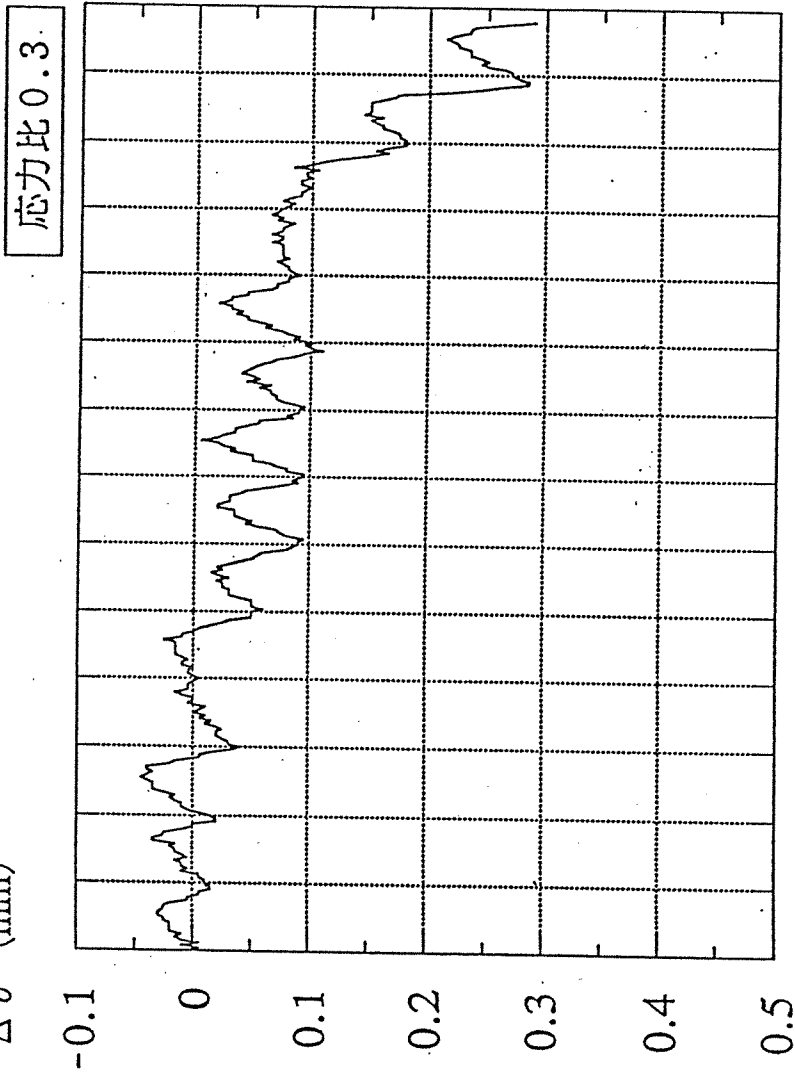
図-13は応力比が0.3の場合、図-14は応力比が0.5の場合の計測結果である。図-15は比較のため両者を1つのグラフに描いたもので、温度と湿度（いずれも試験体脇にセットした温湿度計による記録値）のデータを併せて示した。実験実施場所は広い屋内で、比較的通気性が良く、直接日光を受ける部分が少ないため温度の変化は少ないが、湿度は比較的高い領域で変動している。

本実験の結果により、試験体の変位は、ほぼ周期的に小さな増減を繰り返しながら徐々に増加することがわかる。また、応力比0.3と0.5の両試験体は、変位増分量は異なるが、変位の増減はほぼ同時に起こっていることがわかる。両試験体に共通して、夕方から早朝にかけてわずかながら変位が減少する（戻る）向が認められる。この他、240時間を過ぎて湿度がほぼ90%と高湿度になったところで両試験体の変位量が大きく伸びているのが確認できる。

3 3 1 時間經過時
 中央變位増分 $\Delta \delta = 0.29 \text{ mm}$

試験体中央変位増分

$\Delta \delta \text{ (mm)}$



0 48 96 144 192 240 288 336
 経過時間 t (Hour)

図 - 13 短期間連続変位計測結果 (応力比 0.3)

3 3 1 時間經過時

中央變位増分 $\Delta \delta = 0.46 \text{ mm}$

試験体中央變位増分

$\Delta \delta \text{ (mm)}$

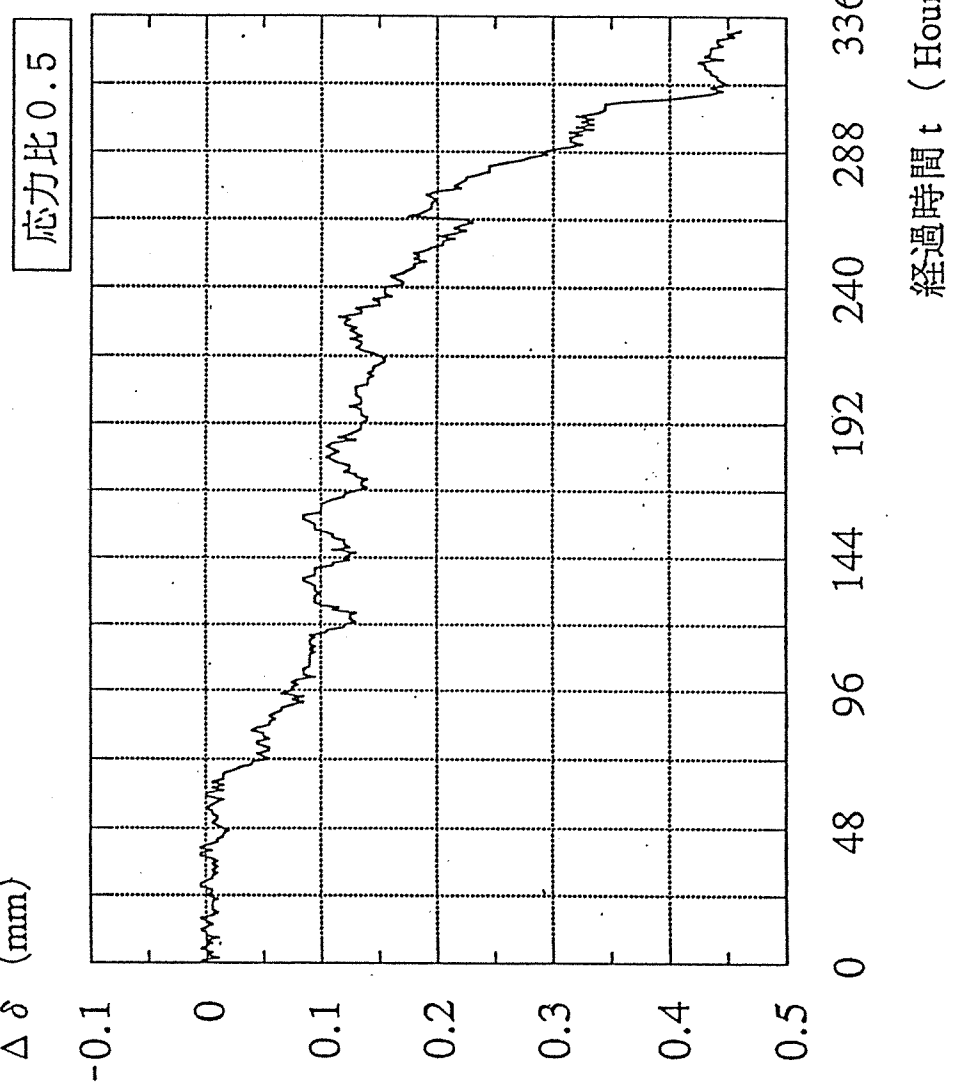


圖 - 14 短期間連続變位計測結果 (応力比 0.5)

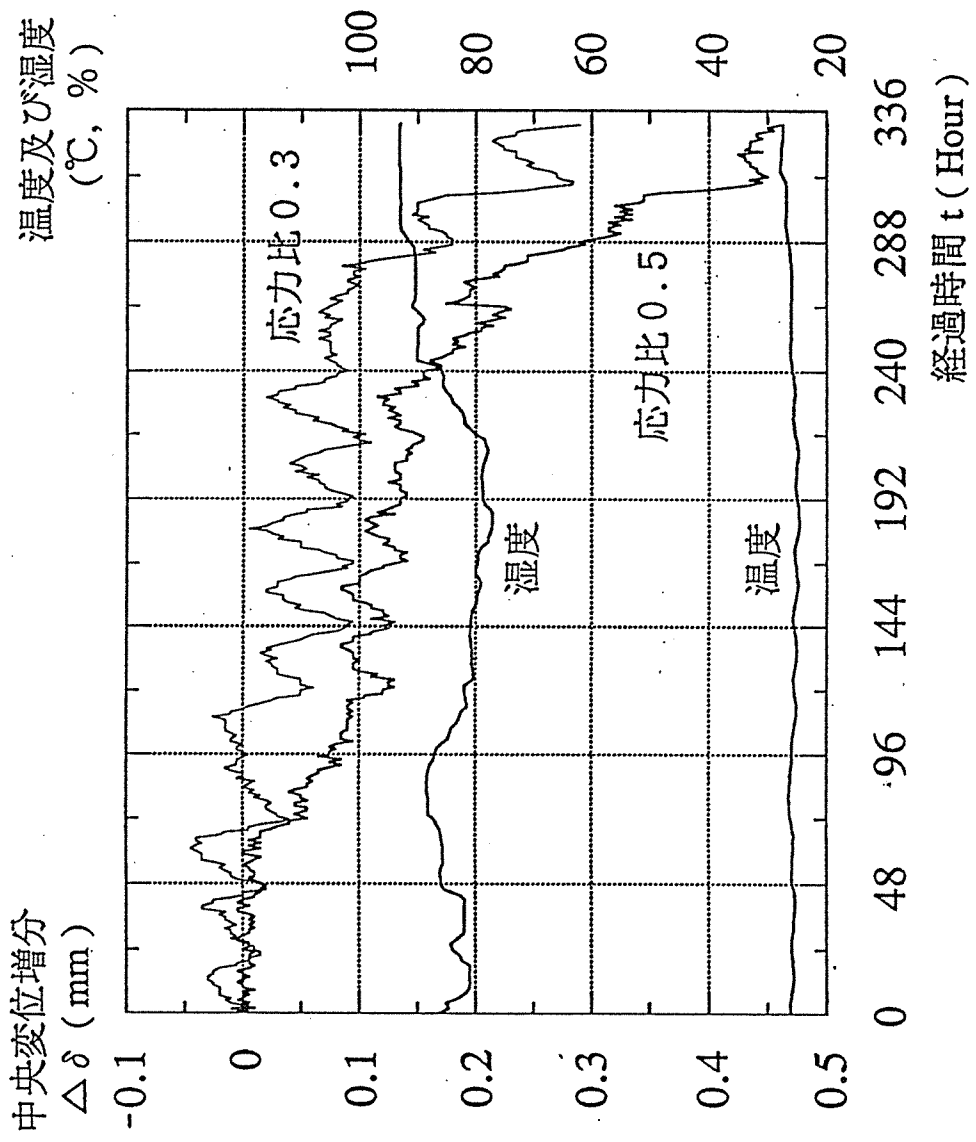


図 - 15 短期間連続変位計測結果 (応力比 0.3 及び 0.5)

6-3. 短期間（2週間）連続変位計測結果（2）

本実験は、6-2で行なった計測と同様に、比較的温湿度の高い時期（夏期）の試験体の動きを調べることを目的として、8月10日11時より同24日11時までの2週間、1時間おきに計336時間、変位の連続計測を行なったものである。（前報では8月9日16時30分より同23日11時30分までの約2週間、1時間おきに計331時間、変位を連続計測した。）これは載荷後503日目（約12070時間）から517日目（約12400時間）に相当する。

図-16は応力比が0.3の場合、図-17は応力比が0.5の場合の計測結果である。図-18は比較のため両者を1つのグラフに描いたものである。いずれの図にも温度と湿度を併せて示した。実験実施場所は広い屋内で、比較的通気性が良く、直接日光を受ける部分が少ないため温度の変化は少ないが、湿度は比較的高い領域で変動している。

昨年度の実験（6-2）では、試験体の変位はほぼ周期的に小さな増減を繰り返しながら徐々に増加していく傾向が認められた。また、応力比0.3と0.5の両試験体ともに変位増分量は異なるが（2週間の変位増分は応力比0.3の試験体で0.29mm、0.5の試験体で0.46mmであった。）、変位の増減がほぼ同時に起こっていることもわかった。

今回の実験でも昨年同様に応力比0.3と0.5の両試験体ともに小さな増減を繰り返しているが、2週間の変位増分は昨年度よりも小さくなり、応力比0.3の試験体で0.07mm、0.5の試験体で0.18mmであった。特に今回は湿度との対応が比較的明瞭に認められる。70時間目から160時間目あたりまで湿度が高い状態（90%以上）が続き、この間応力比0.3、0.5の両試験体とも若干の変動はあるが、変位はやや継続的に増加しているのがわかる。160時間目以降、湿度が90%以下の状態で動き始めたのに対応して、変位が比較的是っきりと増減を繰り返すようになった。この時、昨年度と同様に両試験体の変位の増減がほぼ同時に起こっている。

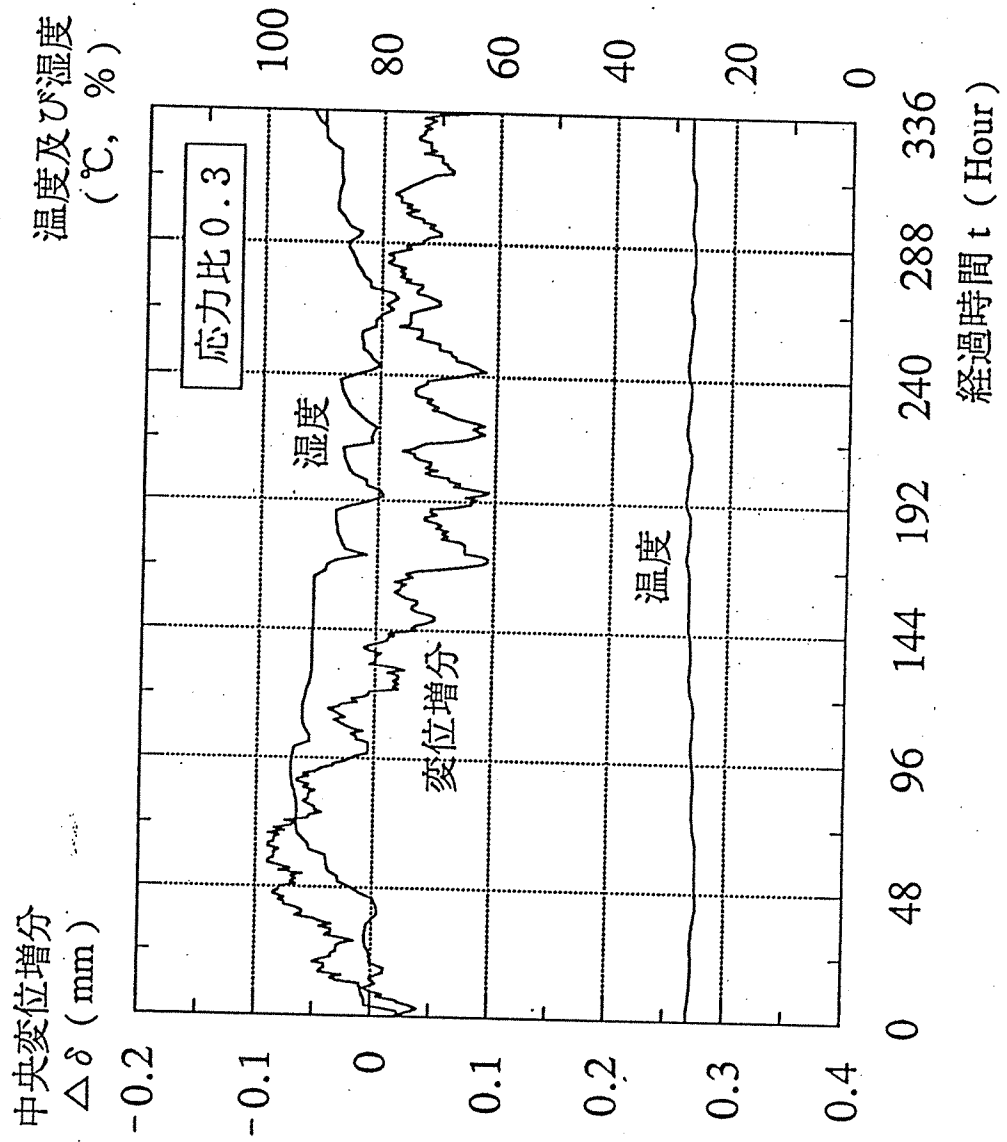


図-16 夏期短期間連続変位計測結果

(応力比 0.3)

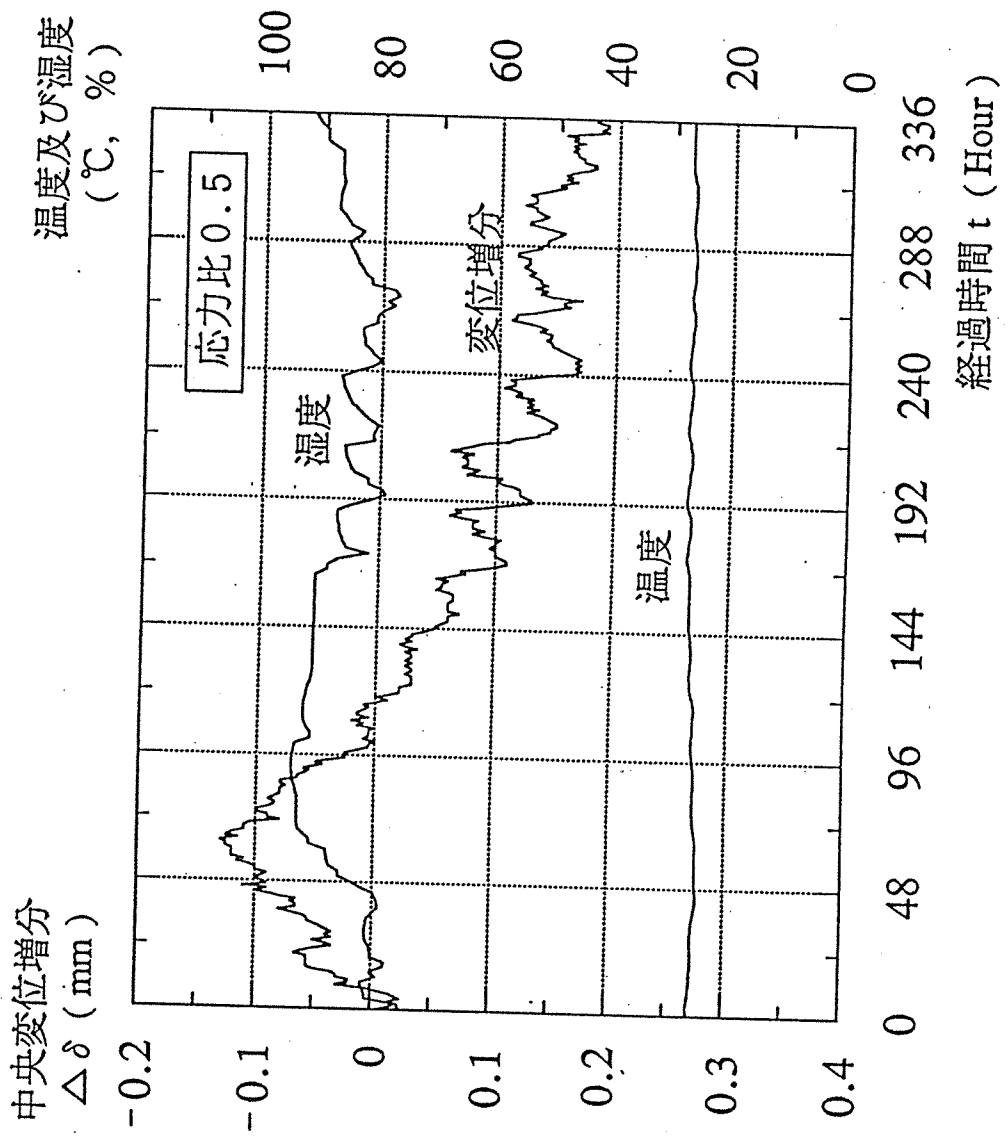


図-17 夏期短期間連続変位計測結果
(応力比 0.5)

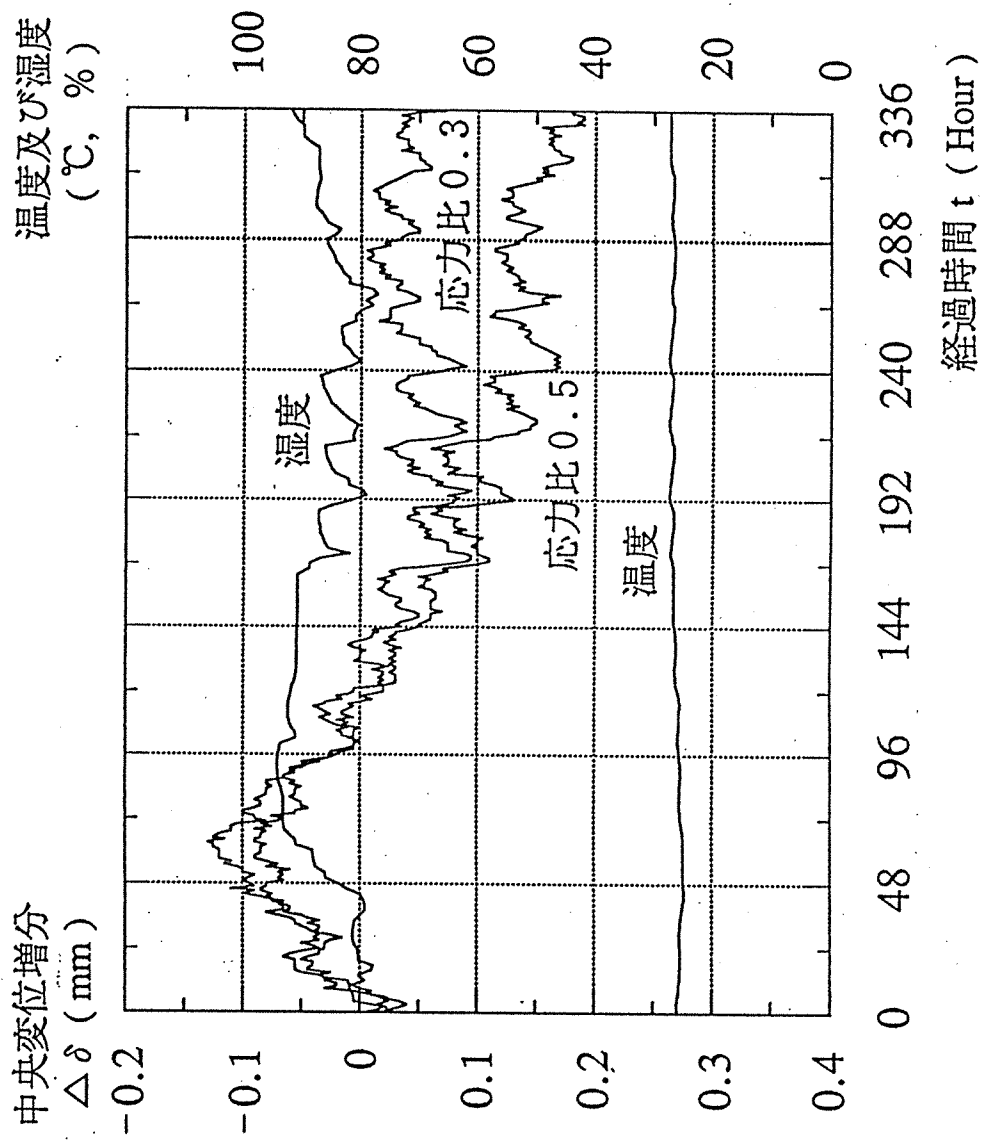


図-18 夏期短期間連続変位計測結果

(応力比 0.3 及び 0.5)

6-4. 載荷後20日目までのひずみ計測結果

ひずみ計測は、応力比が0.5の試験体のみについて実施した。ひずみゲージの貼付位置は試験体の中央、片側側面3ヶ所であり、計測は載荷後24時間おきに実施した。

計算では、試験体のヤング率を 110 tonf/cm^2 としたとき、ひずみゲージ外側2枚の計測位置に於けるひずみ値は 1815μ となる。本実験では、載荷直後(初期たわみ時)のひずみ値は、引張側で 1260μ 、圧縮側で 1536μ であった。

この20日間の結果からは、引張側、圧縮側共にひずみが僅かずつではあるが増加していることがわかる。特に載荷後1日間の増加が大きく、その後はほぼ一定の増加傾向を示している。なお、中央のひずみ値が時間の経過と共に0に近づいており、このことは中立軸位置が断面の中心へ徐々に移動していることを示している。

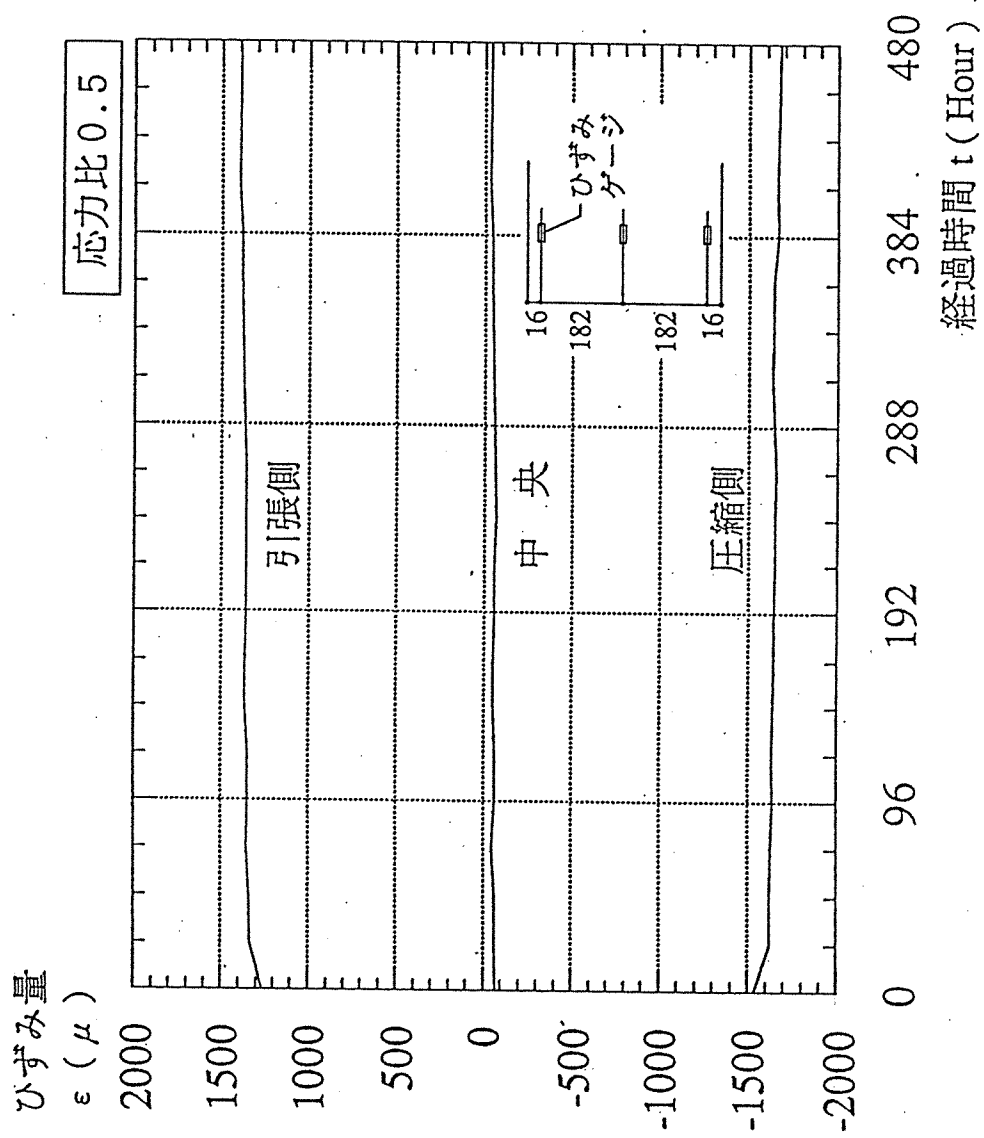


図-19 載荷後20日目までのひずみ計測結果
 (応力比0.5のみ)

6-5. 載荷後3年目までの変位計測結果

図-20は、載荷を行なった1991年3月26日から1994年4月26日までの3年間（正確には1127日目）の試験体中央の変位の計測結果であり、計測した際に記録した温度と湿度のデータを併せて示した。試験体の変位値は、中央の変位計（ $\delta 1$ ）の計測値から両支持点の変位計（ $\delta 4$ 及び $\delta 5$ ）の計測値の平均値を差し引いて補正したものである。

応力比が0.3の場合、試験体中央の1年目、2年目、3年目の変位量はそれぞれ23.95mm、24.87mm、25.48mmであり、これより対初期たわみ比は1.35、1.41、1.44となる。

また、応力比が0.5の場合、1年目、2年目、3年目の変位量は46.61mm、50.53mm、55.02mmであり、同様に対初期たわみ比は1.46、1.58、1.72となる。

載荷後約12000時間を経過した1992年の8月～9月頃、応力比0.5の試験体の変位が約50日間で急増したが（約1.8mm）、その後13000時間を過ぎてから変位の増加は急増する以前のように緩やかになった。載荷後1年の変位増分は約14.7mm、1年目から2年目までの1年間の変位増分は約3.9mm、2年目から3年目までの増分は約4.5mmであった。応力比0.3の試験体については、一時的に増減の波は認められるものの、全体的に見れば変位の増加は非常にわずかであるといえる。載荷後1年の変位増分は約6.3mm、載荷後1年目から2年目までの1年間の変位増分は約0.9mm、2年目から3年目で約0.6mmであった。また、応力比0.3と0.5の試験体ともに温度及び湿度が比較的高い時期（3000時間～4000時間：91年夏、12000時間～13000時間：92年夏、20000時間～21000時間：93年夏）に変位の増加の割合が大きくなっていることがわかる。

図-21は、図-20の時間軸を対数目盛としたものである。この図を見ると応力比0.3の試験体は、3年経過時点でも増加傾向を示していることがわかる。

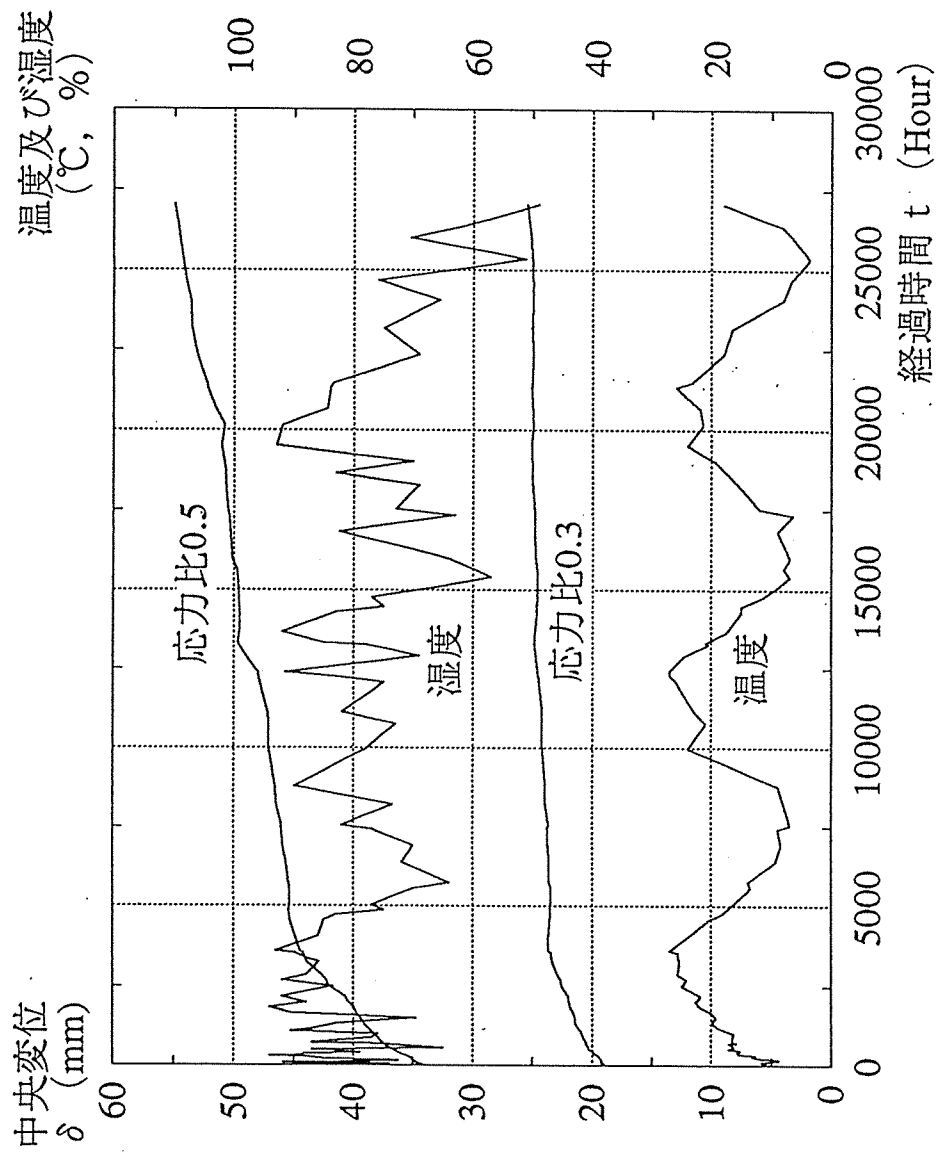


図-20 載荷後3年間の測定結果

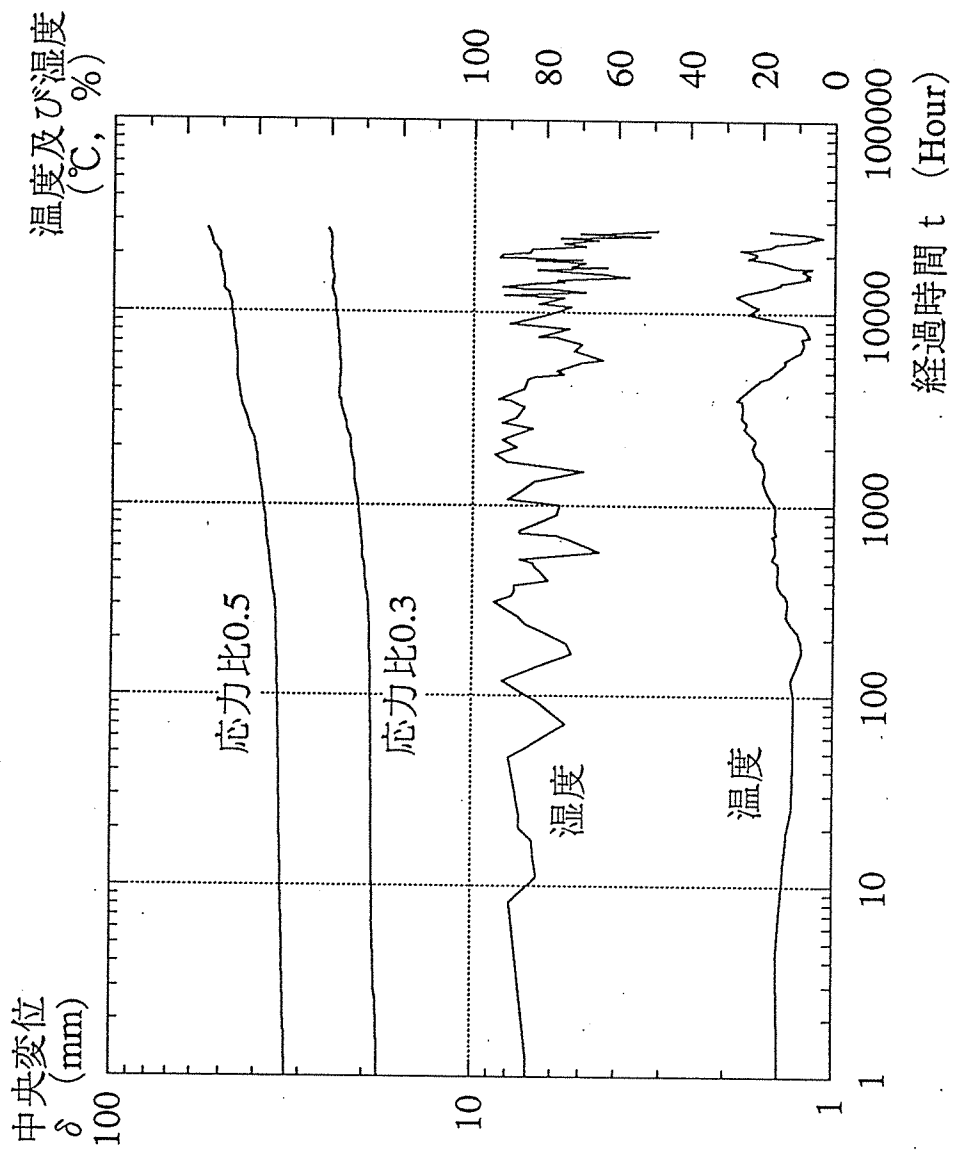


图-21 両対数日盛表示

6-6. 応力比0.5試験体の変位が急増した後の連続変位計測結果

載荷後約1年半の時点で応力比0.5の試験体にひび割れを発見した。図-22に2年経過時点でのひび割れの状況を示す。同図に示すように、最下端から2枚目のラミナに節があり（位置は試験体中央から約26cm）、ひび割れは節の上の3枚目のラミナに発生している。この節はラミナを貫通しており、集成材の反対側の側面にも同様なひび割れが現われている。このひび割れは、計測を行なった8月24日（517日目）から9月14日（538日目）の間に生じたものである。

次頁にひび割れ近傍の状況写真（載荷後2年経過時点）を示す。

ひび割れの発生により応力比0.5の試験体に破壊の可能性が出てきたため10月初旬より自動計測器による連続変位計測を行なうこととした。

期 間 : 1992年 10月 1日 13時より
1993年 1月 4日 12時まで

計 測 : 1時間毎 (合計2280時間)

本計測はクリープ実験開始後、555日目（約13320時間）から650日目（約15600時間）に相当する。また、ひび割れ近傍のラミナのひずみ状況と変位との関係を調べるため、最下端から4枚目までのラミナに図-22に示すようにひずみゲージを貼付し、変位と同時に1時間毎に計測することとした。但し、計測開始は変位の連続計測開始後624時間目の10月27日13時である。

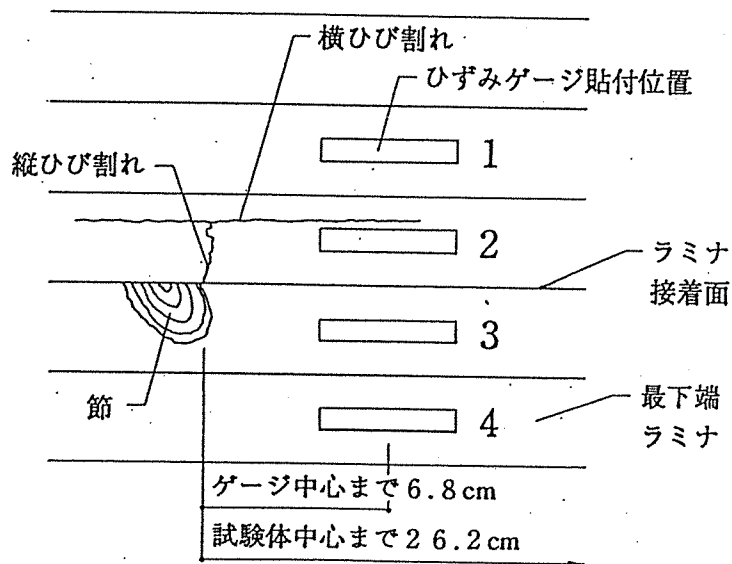


図-22 ひび割れ状況図
(応力比0.5)

応力比0.5 試験体ひび割れ状況

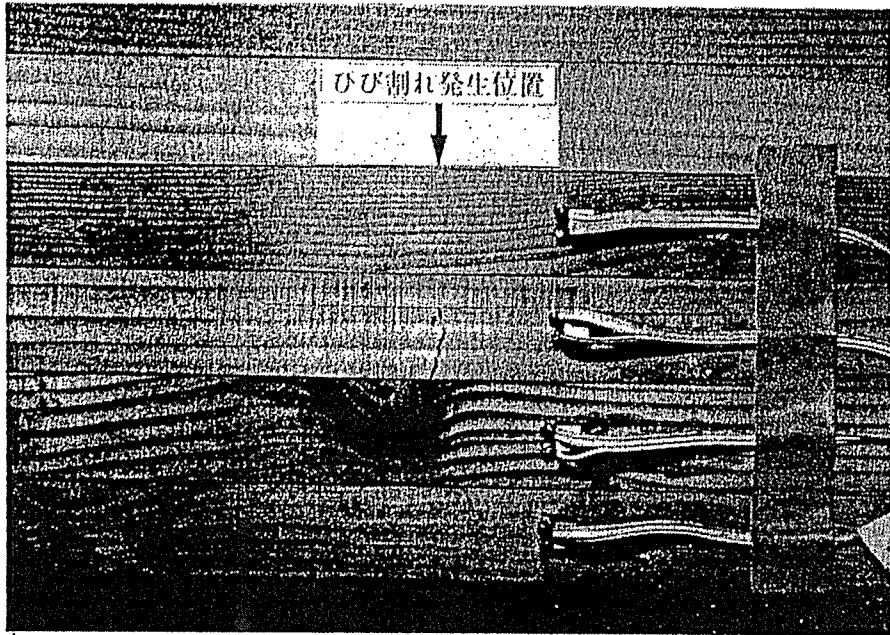


写真-5 南側ひび割れ状況

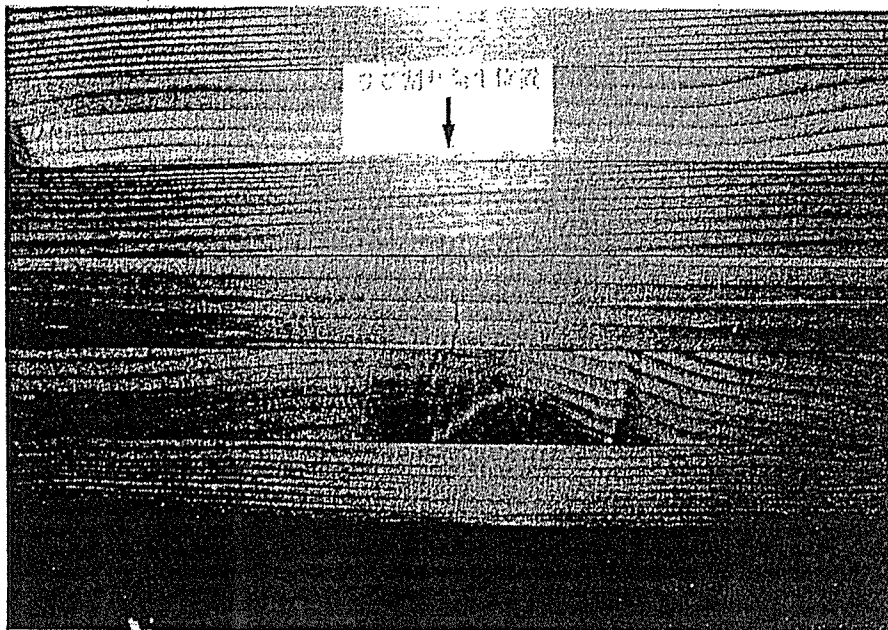


写真-6 北側ひび割れ状況

図-23は応力比0.5の試験体につき、計測開始の10月1日13時時点の変位を0として2280時間までの増減を示したものである。横軸の経過時間の0時は10月1日13時である。縦軸の中央変位増分は、負値が変位が戻る方向で、正値が変位が増える方向である。図中に温度と湿度の記録値を併せて示した。なお、連続計測開始後1852時間目(12月17日17時)から2038時間目(12月25日11時)までの間、計測機器の紙詰まりのため、図-23から図-27までについて、この期間のデータは得られていない。変位増分と湿度との関係を見ると、部分的に両者の増減が対応していると思われる所があるが、全期間を通しての一般性は認められない。

図-24は応力比0.5の試験体の側面に貼付した4枚のひずみゲージによる計測値から求めたひずみ増分を示したものである。横軸の経過時間は変位の計測時間を示し、ひずみ計測を開始した624時間目からデータが始まっている。ひずみ増分は624時間目の時点のひずみを0として、それからの増減を表わしている。大きな節のあるラミナに貼付したひずみゲージ(ゲージ3)のひずみ増分が最も増減の波が大きいことが分かる。最大で250 μ mの動きを示している。逆に最も増減の波が小さいのはひび割れの入ったラミナに貼付したひずみゲージ(ゲージ2)である。

図-25は図-23の4つのひずみデータのうち、ゲージ1及びゲージ2のデータにつき、温度及び湿度の記録値とともに示したものである。図-26も同様にゲージ3及びゲージ4のデータにつき、温度及び湿度の記録値とともに示したものである。ひずみ増分と湿度との関係を見ると、ゲージ3を除き、両者の増減が比較的明瞭に対応していることがわかる。これらの結果から、集成材の表面部分は環境湿度に応じて敏感に伸縮していると考えられる。

図-27は変位増分とひずみ増分の対応を調べるため両者を併せて示したものである。両者の関係を見ると、部分的に両者の増減が対応していると思われる所があるが、全期間を通しての一般性は認められない。

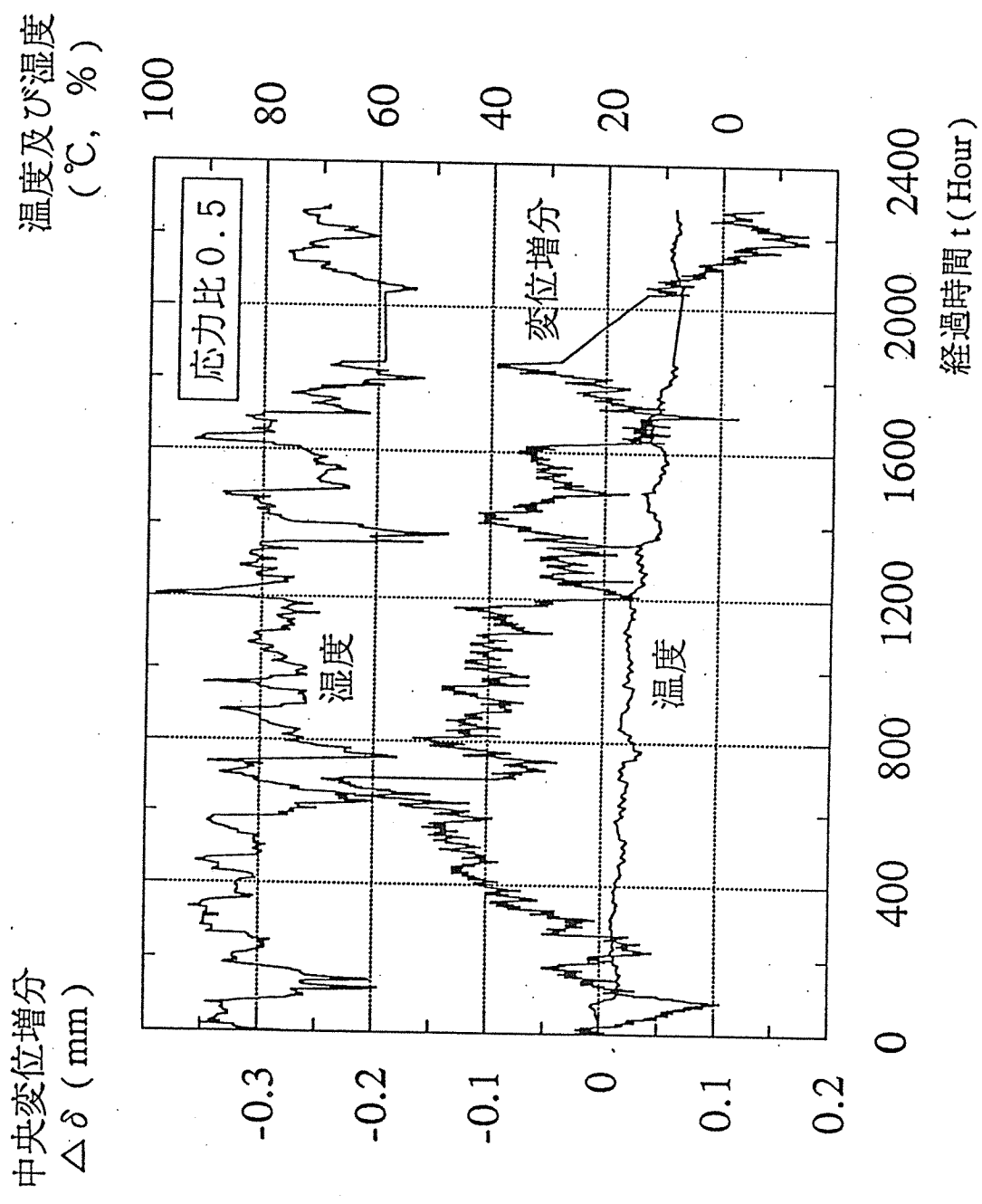


図-23 応力比 0.5 連続変位計測結果
(温度、湿度との関係)

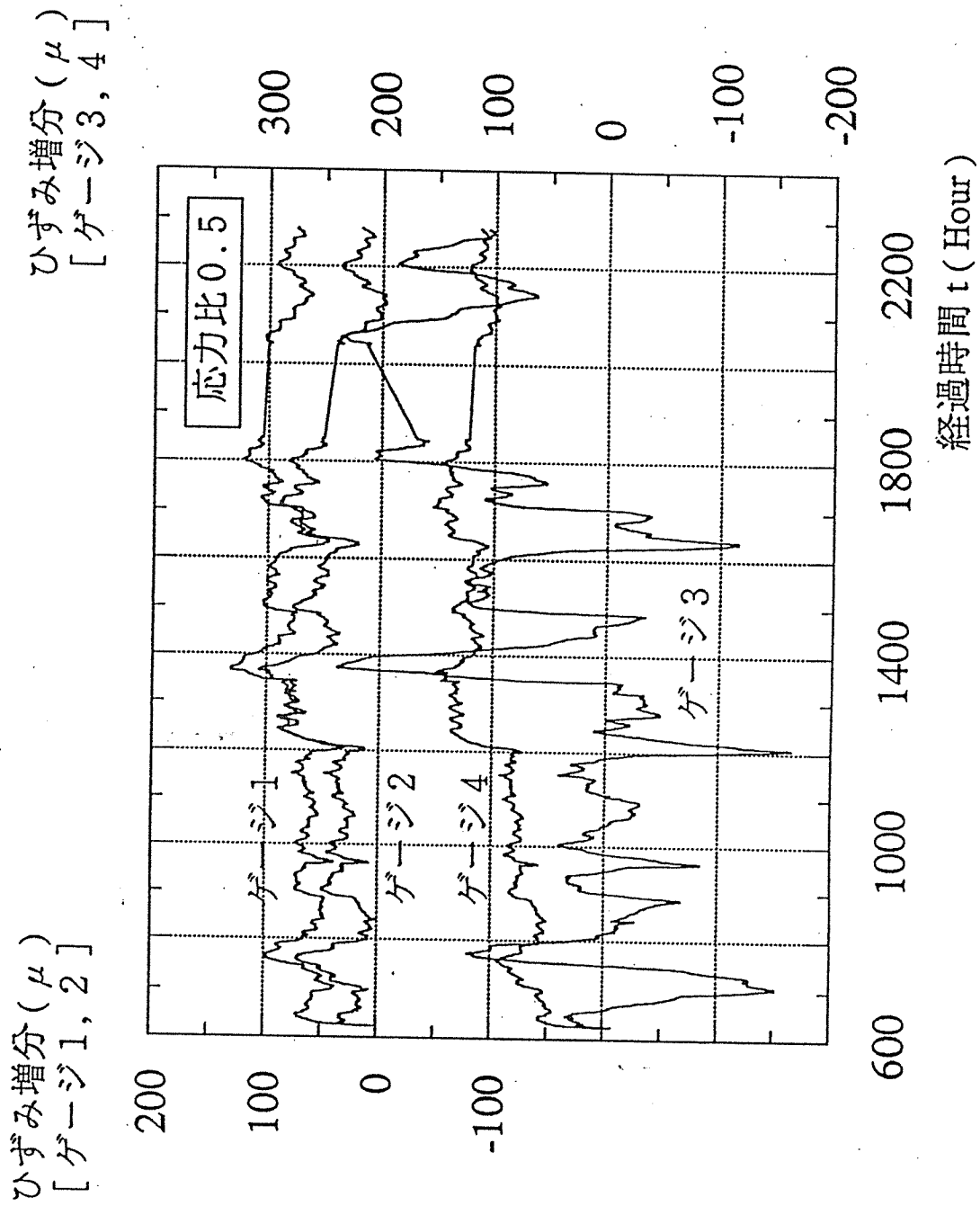
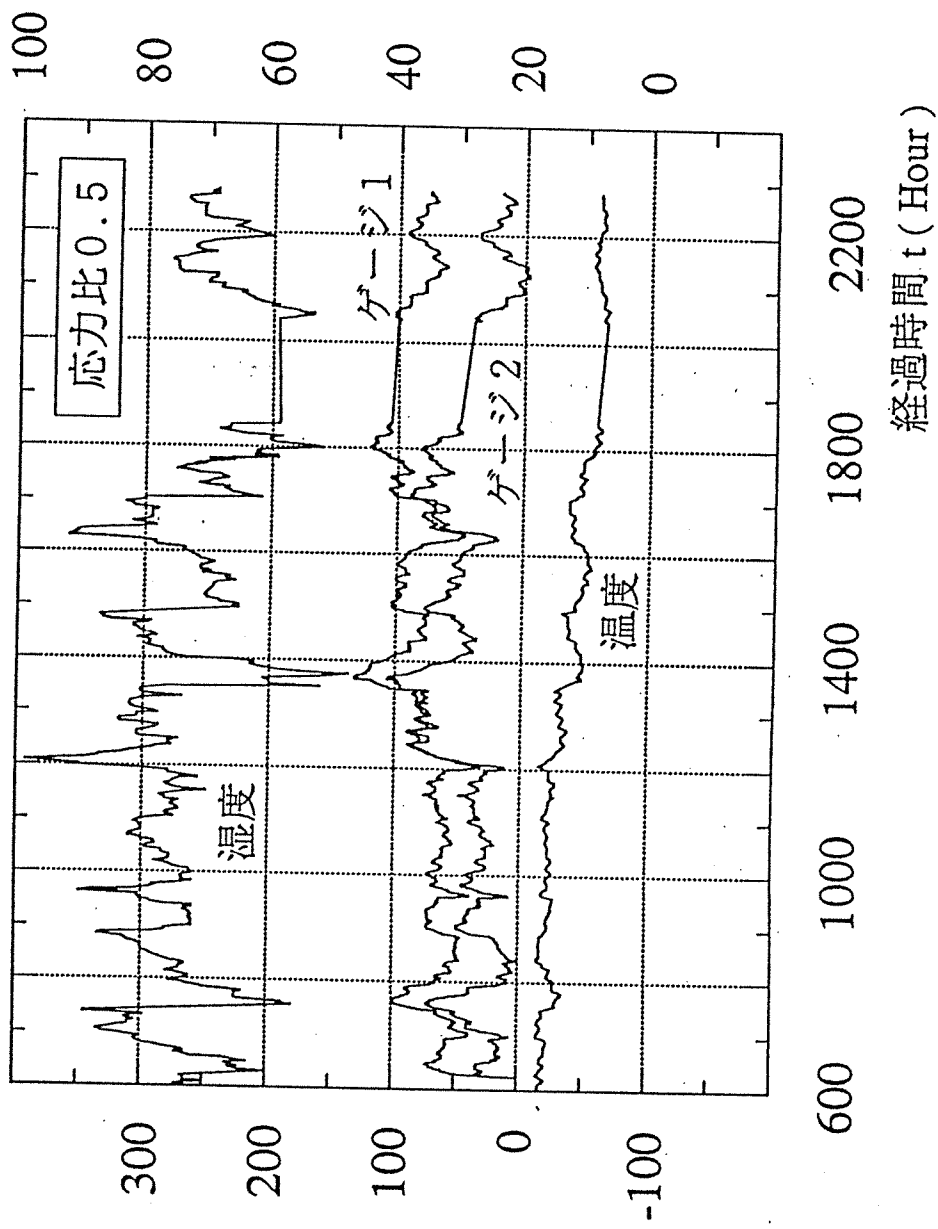


図-24 応力比 0.5 連続ひずみ計測結果：その1
(ゲージ1～4のひずみ増分比較)

ひずみ増分
 $\Delta \varepsilon (\mu)$

温度及び湿度
($^{\circ}\text{C}$, %)



図一25 応力比0.5連続ひずみ計測結果：その2
(ひずみと温度、湿度との関係：ゲージ1、2)

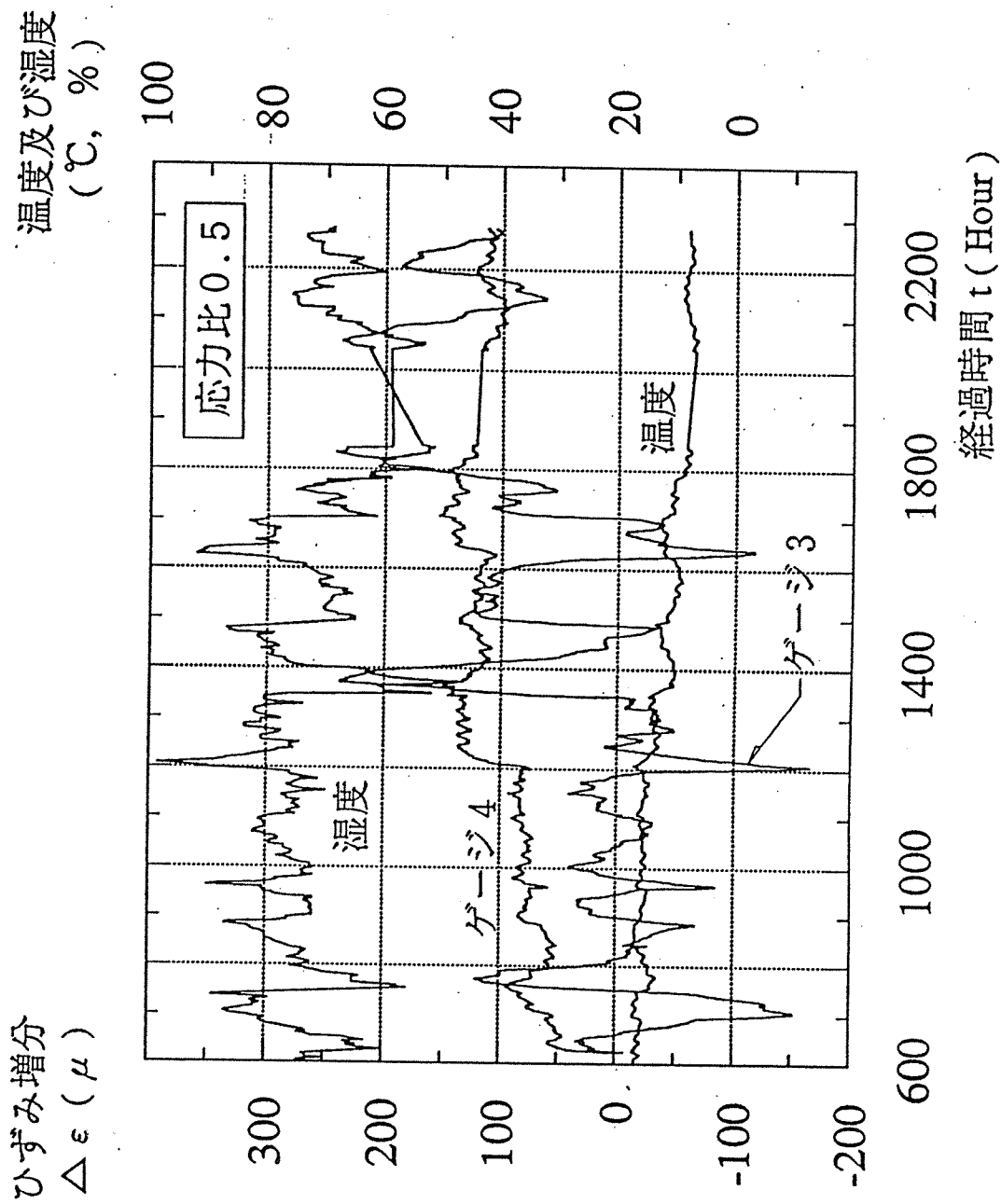


図-26 応力比 0.5 連続ひずみ計測結果：その 3
 (ひずみと温度、湿度との関係：ゲージ 3、4)

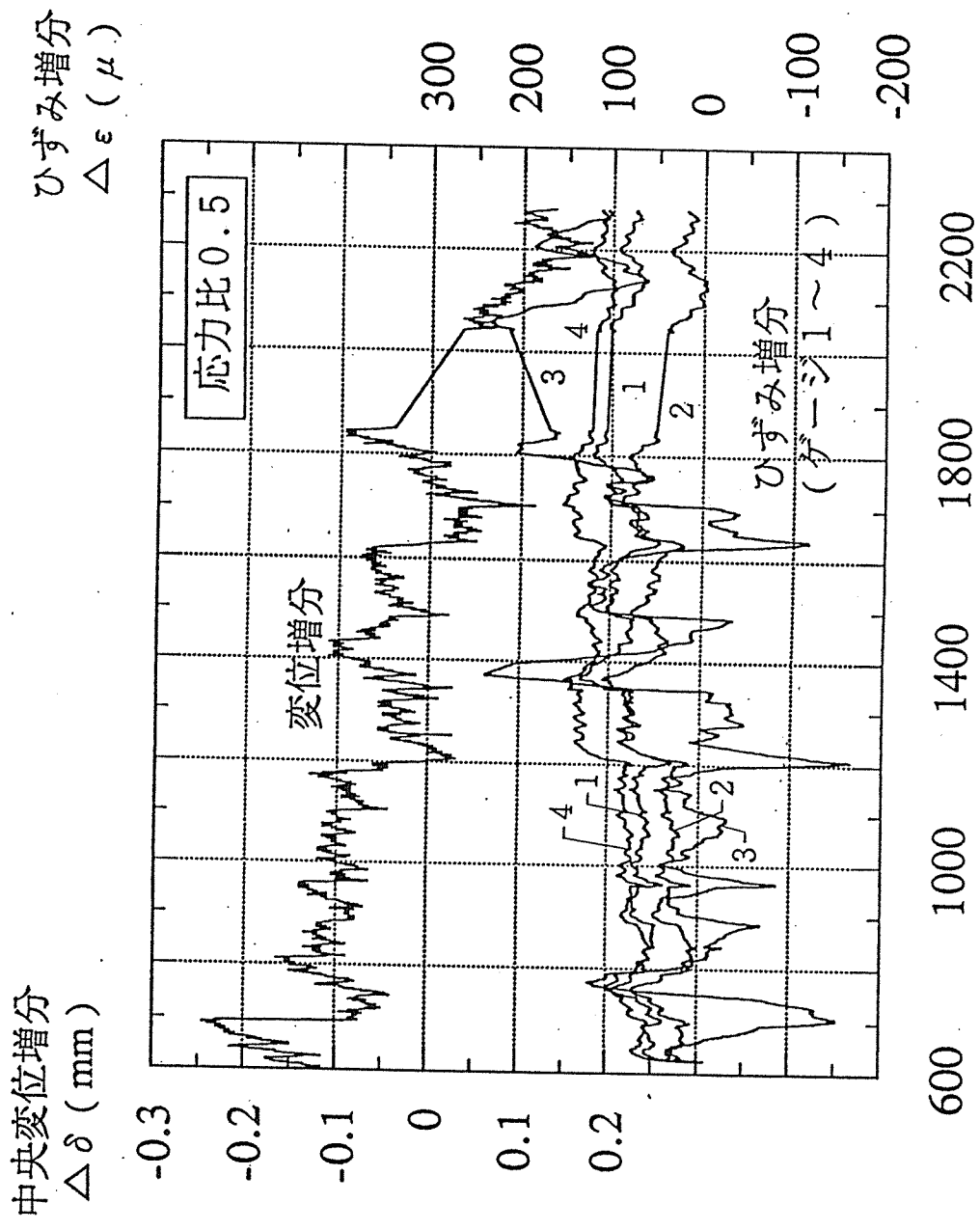


図-27 応力比 0.5 連続変位-ひずみ計測結果
(変位とひずみの関係)

6-7. 応力比0.5試験体連続計測結果

温度及び湿度のクリープ変位への影響を調べるため、応力比0.5の試験体につき、中央変位とひび割れ近傍のひずみの連続計測を行なった。

期 間 : 93年4月8日12時より8月3日12時まで

計 測 : 2時間毎 (合計2808時間)

本実験は、クリープ実験開始後、744日目(約17850時間)から861日目(約20660時間)に相当する。

※今回、温度及び湿度のデータについては、6月19日6時計測分(4月8日12時より合計1722時間)までを報告する。

温度及び湿度データは、3時間毎の計測とした。なお、温度については、1287~1317時間の間のデータが、湿度については1281~1317時間の間のデータが得られていない。

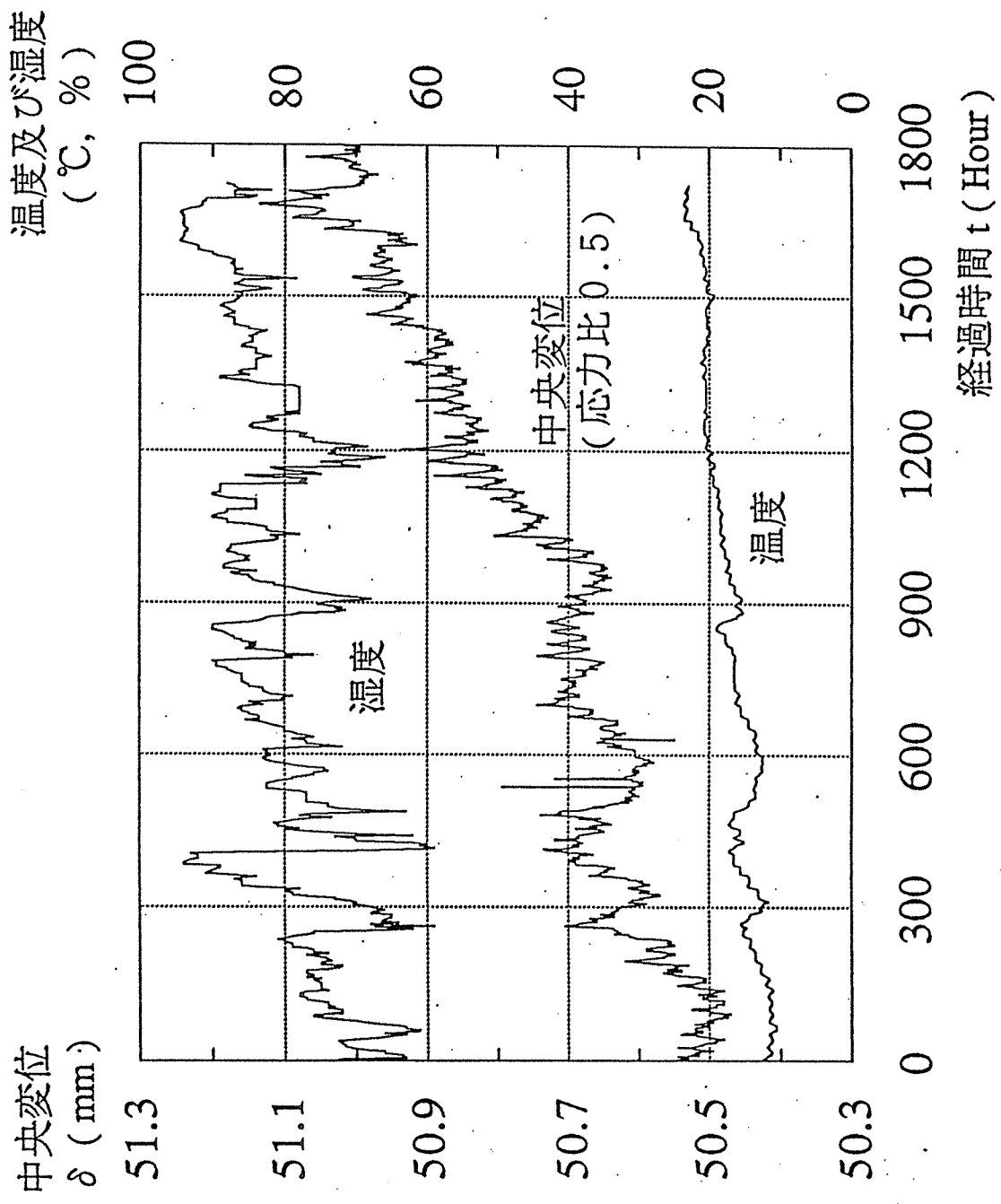


図-28 応力比 0.5 連続変位計測結果：温度及び湿度との関係

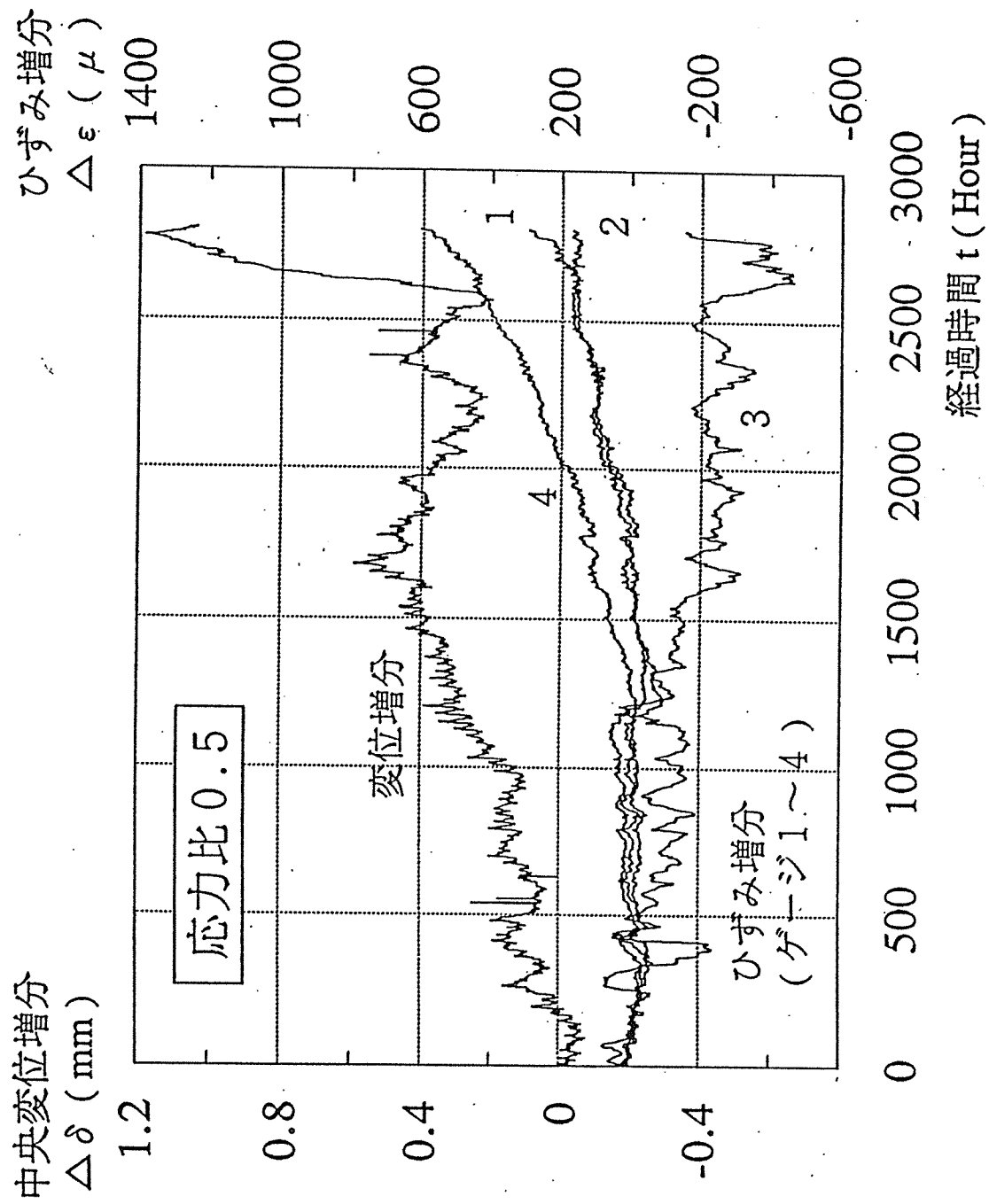


図-29 応力比0.5連続変位計測結果：変位とひずみとの関係

7. クリープ曲線の設定とクリープたわみの推定

7-1. 変位計測結果とクリープ曲線式

木材のクリープ曲線の近似式としてよく知られている次式²⁾に本実験結果のあてはめを行なってみる。

$$\delta(t) / \delta_0 = 1 + A / \delta_0 \cdot t^N$$

δ_0 は載荷直後の初期たわみ、 t は経過時間を表わす。ここでは A / δ_0 を a とおき、時間 t の単位は日 (Day) とする。応力比 0.3 及び 0.5 の各々の試験体につき、2 年間の実験結果によく適合する a と N の値を次のように設定した。

(応力比 0.3 の試験体)

$$a = 0.13 \quad N = 0.17$$

(応力比 0.5 の試験体)

$$a = 0.15 \quad N = 0.19$$

図-30、図-31にそれぞれ応力比 0.3、0.5 の実験結果と、設定した a と N によるクリープ曲線を示した。一般的に載荷後しばらくは、上式による曲線に実験値が一致しないとされているが、本実験結果に於いても 120 日～130 日目位までは計算値を下回っており、この間の実験値は a と N の値の設定の際に考慮しなかった。特に応力比 0.5 の試験体については、載荷後 150 日までの部分と、変位が急増した時期の部分を見捨て、緩やかに変位が増加している部分についてクリープ曲線式のあてはめを行なった。図-32、図-33は応力比 0.3、0.5 のそれぞれの試験体について、設定したクリープ曲線と実験結果との対応を示すもので、いずれも横軸を対数による経過時間 (日) とし、100 日目以降のデータを示した。縦軸については初期たわみに対する変位増分とし、これも対数目盛とした。これらの図より、設定したクリープ曲線と実験結果が非常に良く一致していることがわかる。

2) 「木質材料及び部材の長期耐力評価に関する研究」 有馬、佐藤、益田
建築研究報告 NO.95 1981年3月

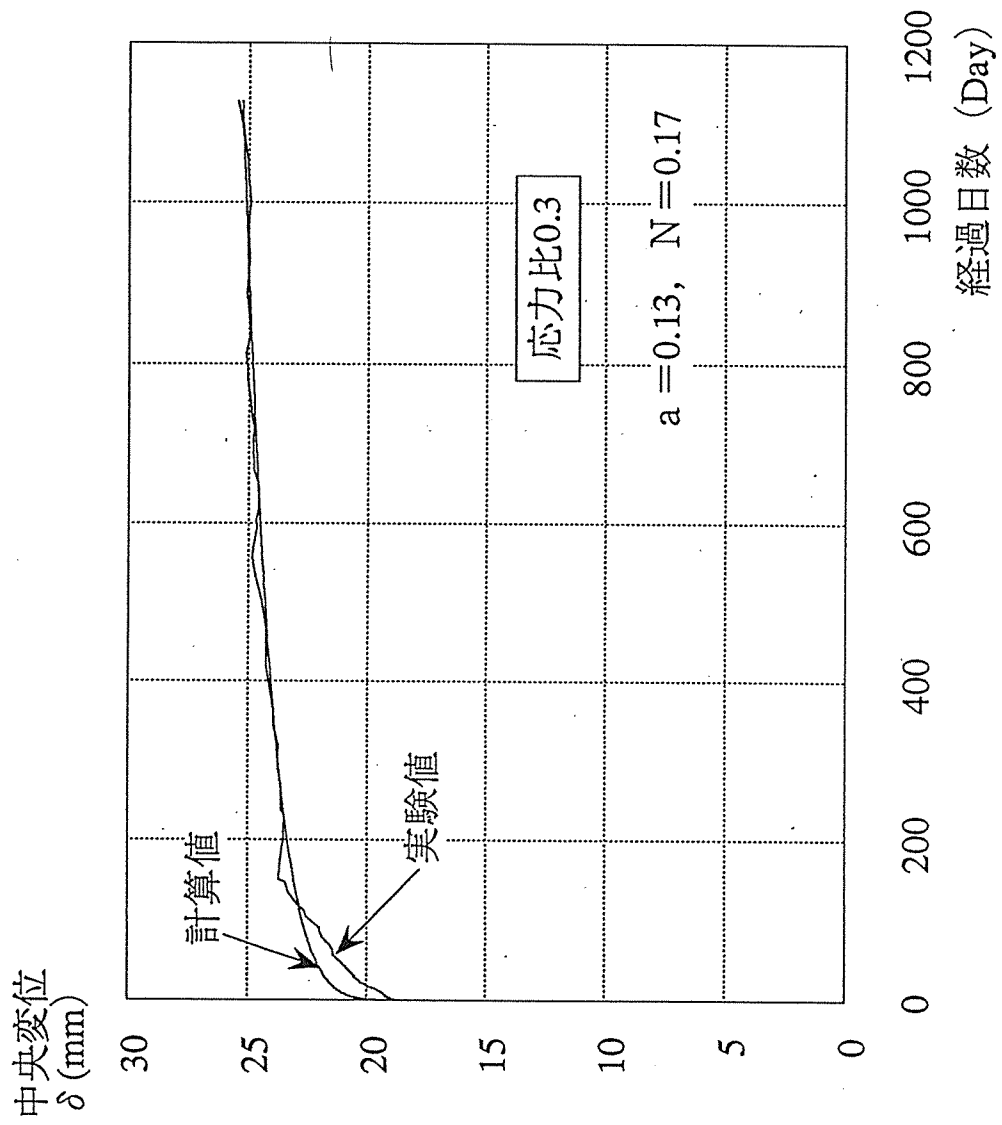


図-30 クリープたわみの推定 (応力比0.3)

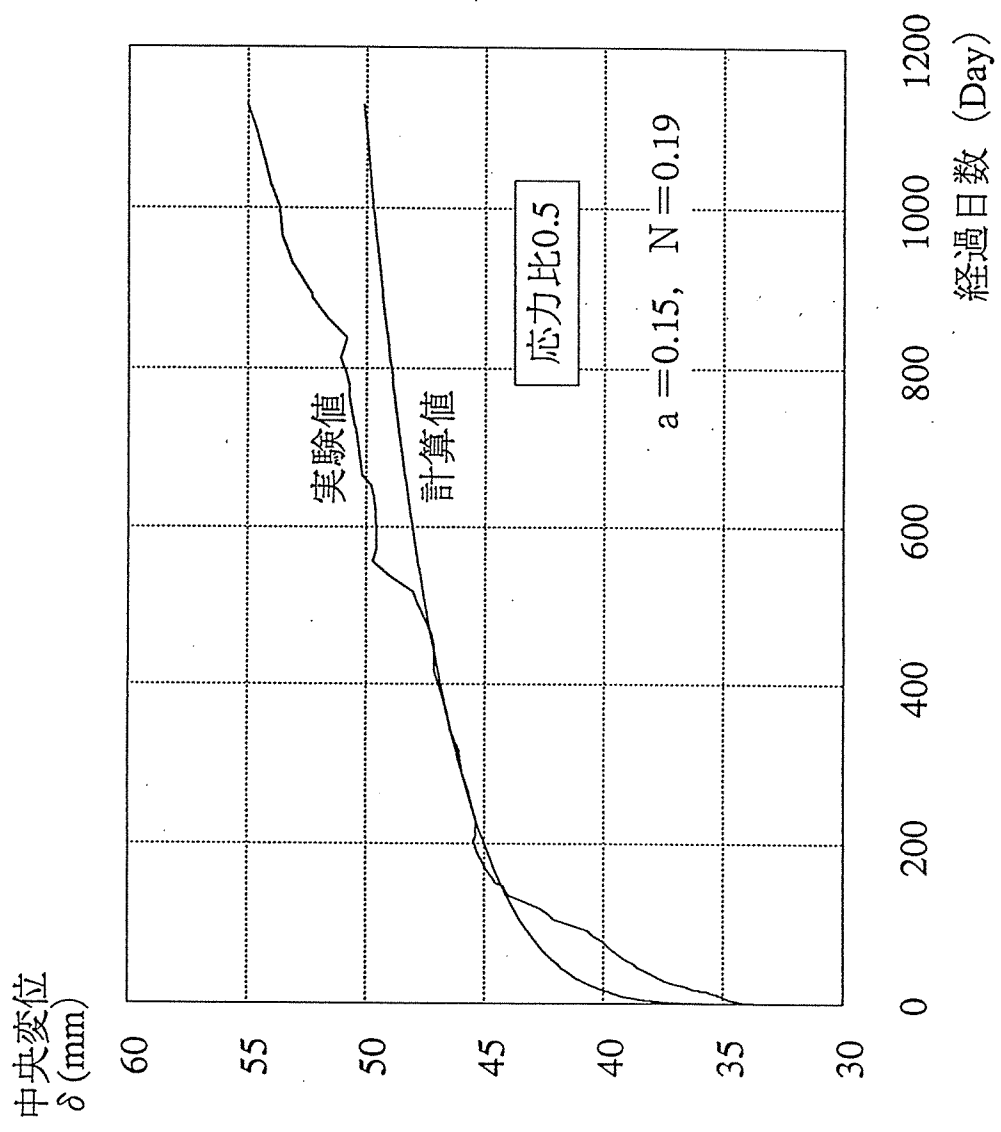
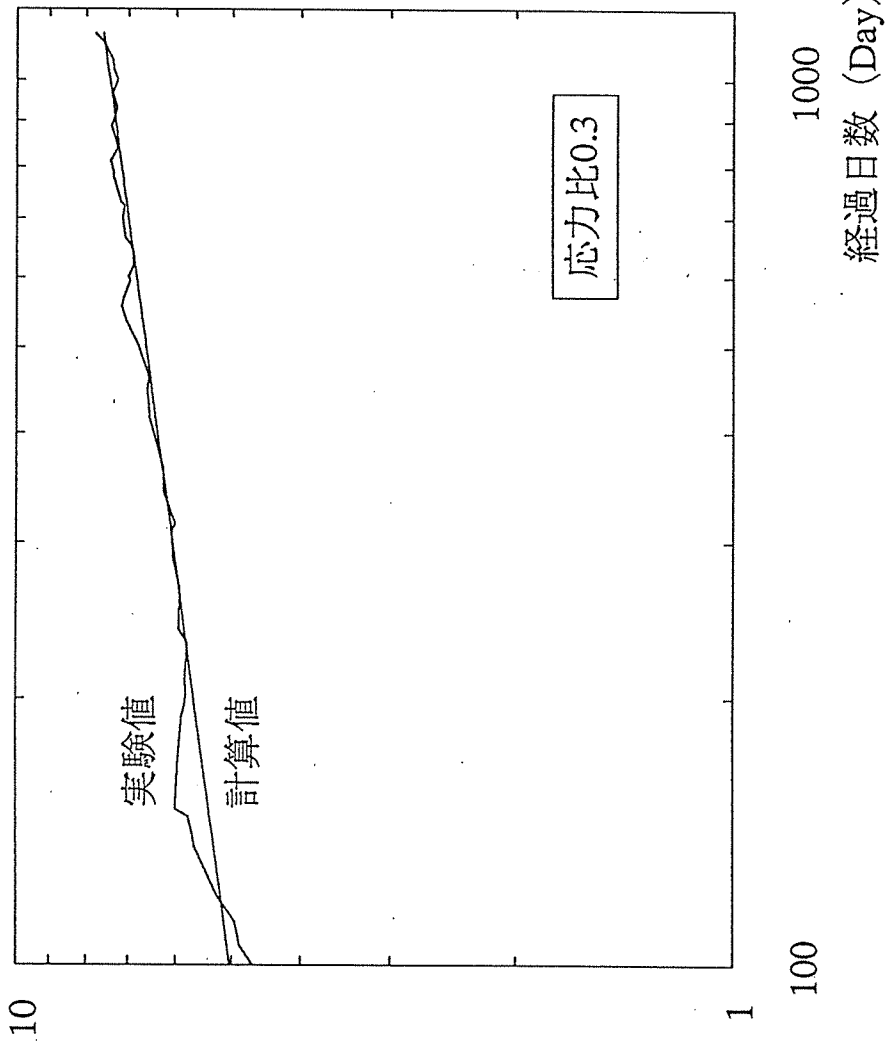


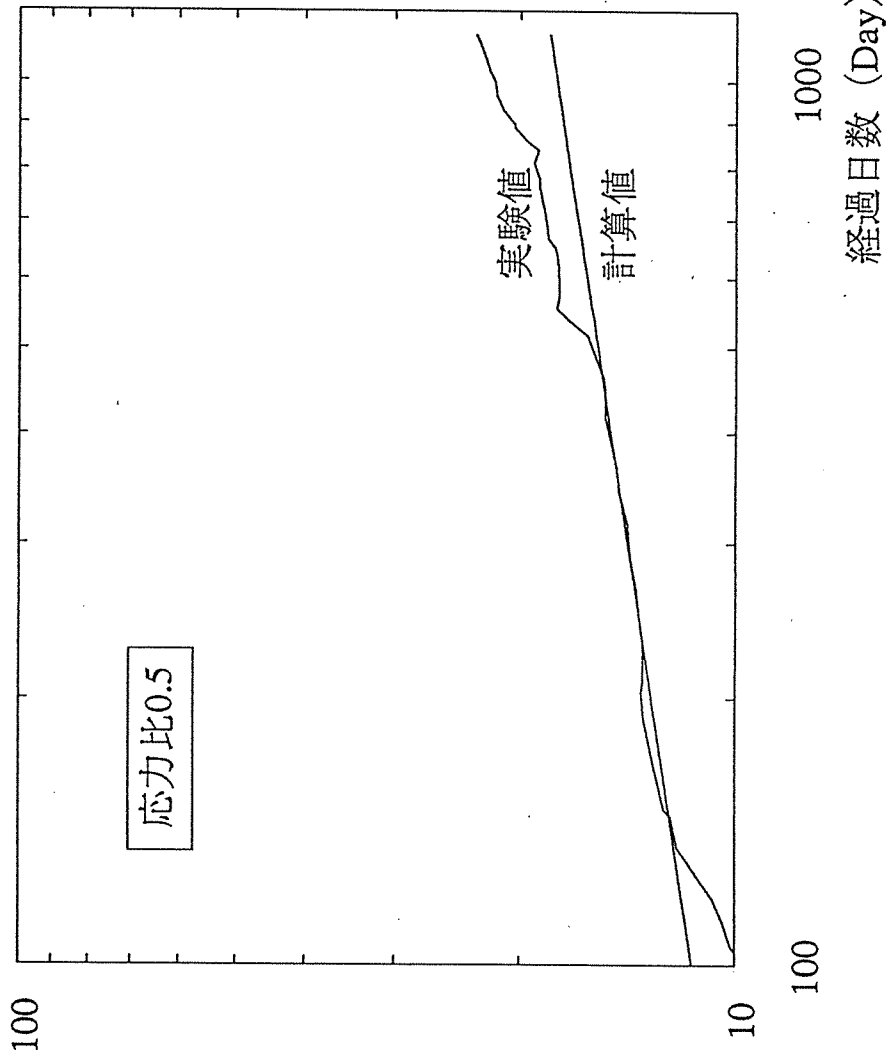
図-31 クリープたわみの推定 (応力比0.5)

初期たわみに対する
変位増分 $\Delta \delta$ (mm)



図一32 両対数目盛表示 (応力比0.3)

初期たわみに対する
変位増分 $\Delta \delta$ (mm)



図一33 両対数目盛表示 (応力比0.5)

7-2. 推定相対クリープの算出

実験結果をもとに設定したクリープ曲線式から、50年後及び100年後の相対クリープ ($\delta(t) / \delta_0$) を計算する。

(応力比0.3の試験体の場合)

$$\cdot 50 \text{ 年後} \quad : \quad \delta(t) / \delta_0 = 1.69$$

$$\cdot 100 \text{ 年後} \quad : \quad \delta(t) / \delta_0 = 1.78$$

(応力比0.5の試験体の場合)

$$\cdot 50 \text{ 年後} \quad : \quad \delta(t) / \delta_0 = 1.97$$

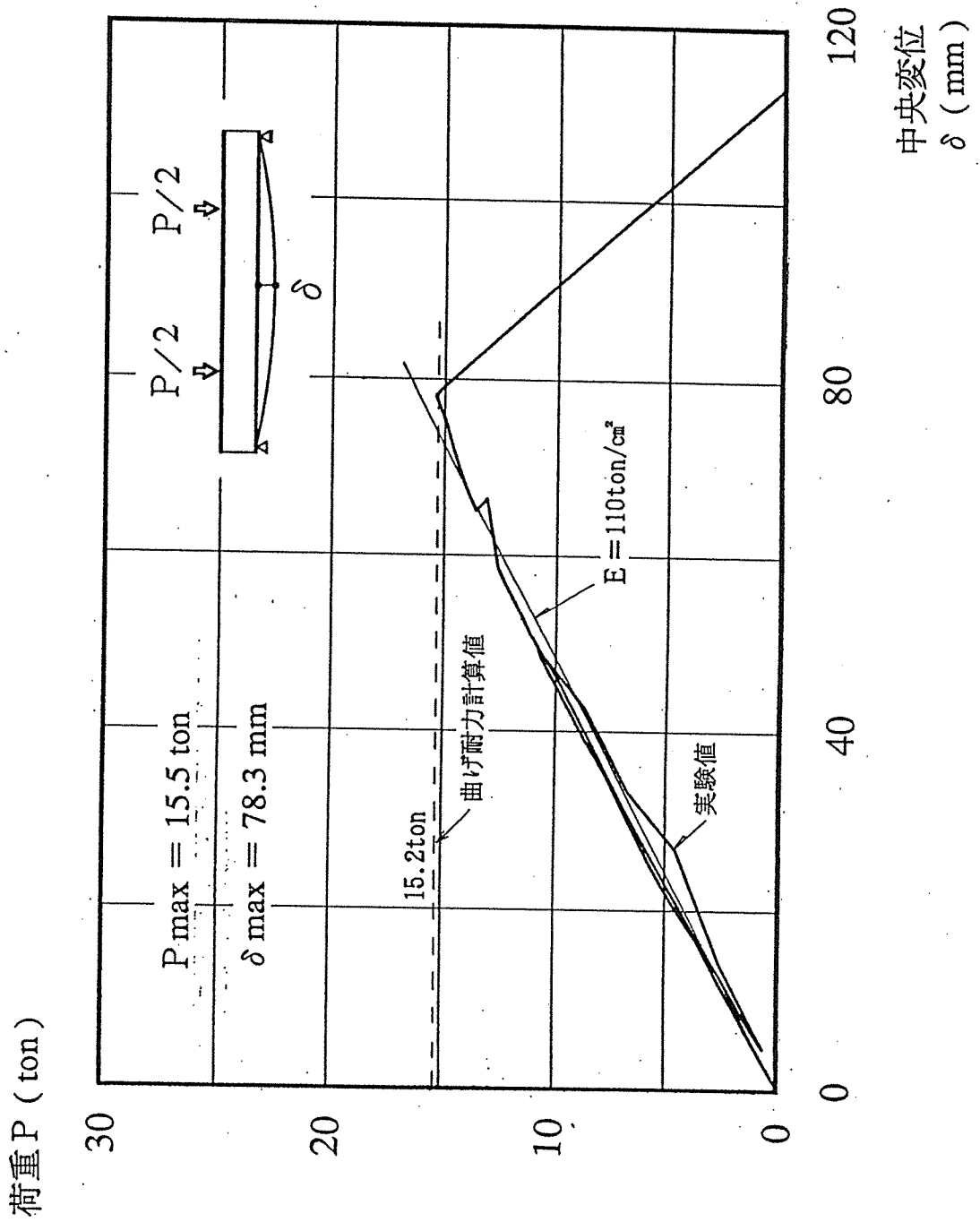
$$\cdot 100 \text{ 年後} \quad : \quad \delta(t) / \delta_0 = 2.10$$

一般的な木構造建築の耐用年数を50年と考えれば、長期許容応力度レベルの荷重の場合、集成材のクリープたわみは初期たわみの約70%程度になると予想される。

7-3. 曲げ破壊実験結果と推定相対クリープとの関係

図-34は、本実験で使用している試験体と全く同じ条件（寸法、樹種、ラミナ構成等）で製作した集成材により、2点集中載荷による曲げ破壊実験を行なった結果である。 載荷点は本実験に於ける錘の載荷点と同じである。

曲げ破壊実験によれば、試験体中央の変位が78.3mmの時に試験体が破壊している。 応力比0.5の試験体について設定したクリープ曲線によれば、50年後の相対クリープは1.97、変位にすれば62.9mmとなる。 同様に100年後については67.0mmとなり、昨年8月～9月に急増した分1.8mmを加えると68.8mmとなる。 クリープ実験と曲げ破壊実験との別なく、曲げ破壊実験による破壊時の変位点で集成材は破壊するものと仮定すると、応力比0.5の試験体については、載荷後100年経過時点でもまだクリープ破壊には至らないことになる。



図一34 曲げ破壊実験結果

8. まとめ

実大集成材試験体による曲げクリープ実験を3年間実施した。長期許容曲げ応力度レベルの応力比0.3の試験体については、載荷後1年を経過した時点ですでに変位の変動は小さくなっていたが、増加傾向を示していた。結果として1年経過時点で1.35であった対初期たわみ比が2年経過時点では1.41、3年経過時点で1.44になっている。しかし、この1年間の変位の増加は約0.6 mmである。今後も一時的な増減の波は認められるものの、全体的に見れば変位が僅かずつ増加する傾向が続くと予想される。一方、応力比0.5の試験体は、1年経過時点で1.46であった対初期たわみ比が2年経過時点では1.58、3年経過時点で1.72になっている。この1年間の変位の増加は約4.5 mmで、3年経過時点でも応力比0.3の試験体に比べてはっきりとした増加傾向を示しており、今後クリープ破壊の可能性を残している。

応力比0.3及び0.5の両試験体に共通して夏期の温湿度の高い時期に一時的に変位の増加率が大きくなり、変形曲線が凸状になることが分かった。応力比0.5の試験体では、2年目の温湿度の高い時期（8月～9月）に変位が急増した（50日間で約1.8 mm）が、ちょうどこの時期に大きな節のある部分にひび割れが発生した。しかしその後、ひび割れの目立った進展はなく、変位の急増は見られない。

温湿度の影響については、温度が1日を通じてほぼ一定という条件に近い実験環境であるため（1年を通じては当然変動するが）、湿度の影響を抽出するには好都合であった。変位の連続計測により、微視的なレベルでのクリープ変位の変化を調べた結果、応力比0.3と0.5の両試験体ともに、小さな増減を繰り返していることがわかった。また、両試験体ともに変位の増減がほぼ同時に起こっていることもわかった。特に湿度との対応が比較的明瞭に認められた。即ち、一定期間湿度が高い状態（90%以上）が続いた時に両試験体ともに変位がやや継続的に増え、湿度が90%以下の状態で変動し始めると、これに対応して変位が増減を繰り返すようになることがわかった。

3年間に亘る変位計測結果をもとに、応力比0.3と0.5のそれぞれの試験体のクリープ曲線の係数を設定した。このクリープ曲線を用いて50年後について相対クリープを求めると、応力比0.3の場合で1.69、応力比0.5の場合で1.97となった。現行の木構造計算規準では、長期荷重による集成材の気乾状態に於けるたわみは初期たわみの2倍とするとしているが、集成材については長期許容応力度レベルの荷重でも実際には初期たわみの1.7倍程度であると予想され、2倍という比率は集成材については妥当なものと考えられる。

第3章 スギ梁材のクリープ特性（第3報）

1. はじめに

木材を構造材として用いるとき、その材質特性が長期間に渡って安定していることは材料選定の基本であり、また、このような長期的な特性に基づいた材質の改良、材質に適した使用箇所、並びに施工の適正化を図ることは大変重要である。このため、近年各地で実大材を用いたクリープ試験データが蓄積され始めている。特に、水分（湿度）非定常状態における木材、及び木質材料のクリープ変形は、定常とは異なった挙動であるMechano-sorptive変形を示すことが認められているので、周囲の環境変化に伴う経時的な変形の評価を行うことは、長期間に渡る材質特性を解明するうえで必要不可欠と言えよう。

本研究では、日本における代表的な造林木であるスギの構造的利用に関する資料収集の一環として、水分（湿度）非定常状態におけるスギ実大梁材のクリープ特性を平成3年12月から継続的に調べている。

2. 実験方法

供試体には、宮崎県高岡町内山産スギ製材二体及び集成材一体を用いた。製材のうち一体は生材のまま、もう一体は蒸気式による人工乾燥処理後に後述する方法で載荷した（三体ほぼ同時）。なお、集成材についてはラミナ厚を2.1mm、積層数を10とし、構造用大断面集成材の特級に該当するようにラミナの選定、及び組み合わせを行った。

Stress levelは、生材、人工乾燥材、及び集成材の三体とも、載荷1年目を11%、2年目を22%、及び3年目を33%とした（現時点では2年4ヶ月経過、Stress level=33%で計測中）。この場合、Stress level算定の基礎となる曲げ強さ（MOR）は、前報¹⁾で示したように、既往の宮崎県及び他県のデータを総合して、MORと縦振動ヤング係数（Et）との関係を $MOR=3.15Et+157$ と仮定し、同式から推定した。

載荷方法は、図1に示す4点荷重方式とし、各Stress level（11%、22%、33%）に応じて、直径32mm、長さ1830mm（11.5kg/本）の鉄筋を必要量載荷した。この場合、載荷に際しては、

それぞれの支点、荷重点におけるめり込みを防ぐために、各位置に厚さ9mmの鉄板を当てた。さらに、たわみの測定位置においても、ダイヤルゲージ測定子のめり込みを防ぐために、各測定位置に厚さ2mmの平滑なガラスプレート当てた。なお、Stress levelの増加は（11%→22%→33%）、鉄筋を付加する方法で実施した。

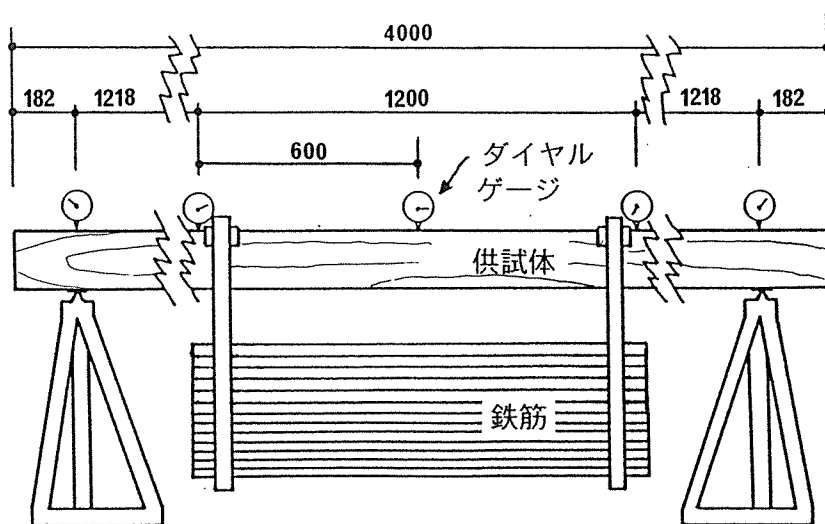


図1 実験装置

たわみは、各供試体とも中央、荷重点（2点）及び支点（2点）において、ストローク30mmのダイヤルゲージにより測定した。また、試験室の温湿度、供試体の高周波含水率計による含水率（4箇所）、及び供試体付近に置いたスギ小試験片（10.5cm×10.5cm×5cm、木口面をシリコンで被覆したもの、4個）の重量を、たわみ測定と同時に測定した。

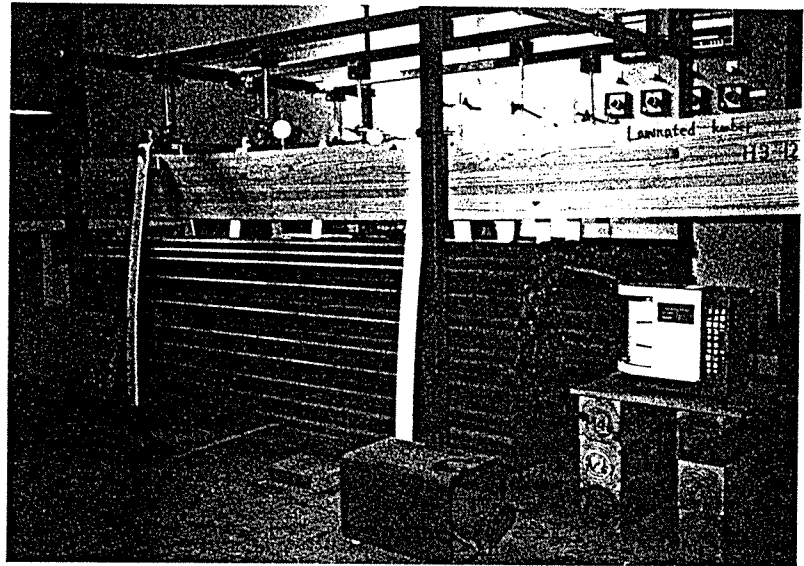


写真1 実験状況

測定時間間隔は、原則として載荷直後から10時間までを20分、それ以降を24時間とした。

試験時期等は、何れのStress levelも、ほぼ同一の環境下の比較が出来るように、載荷時期を12月、期間を1年間とした。

ここで、表1にクリープ試験開始時における各供試体の特徴を示す。

表1

	含水率	幅	厚さ	長さ	密度	縦振動ヤング係数
生材	42.0%	10.5cm	21.3cm	405.9cm	0.549gf/cm ³	69.4tf/cm ²
人工乾燥材	17.7%	10.5cm	21.0cm	407.3cm	0.450gf/cm ³	73.5tf/cm ²
集成材	13.3%	10.5cm	20.9cm	402.4cm	0.390gf/cm ³	87.7tf/cm ²

※ 含水率は、高周波含水率計（Kett,moko2）による値（支点、荷重点付近で測定した4箇所の平均値）である。

3. 結果と考察

3.1 全たわみ（ $\delta(t)$ ）-時間（ t ）曲線

図2に、全たわみ（ $\delta(t)$ ）-時間（ t ）曲線を示す。ここで、 $\delta(t)$ は、2箇所の支点（図1参照）において測定したダイヤルゲージの読みの増減の平均値を、供試体中央部の膨張または収縮と見なして換算した値である。

一般に、木材、及び木質材料のクリープ限度以下での荷重条件におけるクリープ曲線は、載荷直後に急増するが、やがて増加速度が緩慢になり、最終的にはクリープ休止に至る^{2,3)}。一方、同図から、何れの条件も載荷直後の急増傾向は明確には認められないが、Stress levelが11%と22%では、何れも1年経過時点までにはほぼクリープ休止に至っている。

また、人工乾燥材では、全期間にわたって $\delta(t)$ の増減を繰り返す傾向が顕著である。これは、後にも述べるように、相対湿度変動の影響が要因と考えられる。

3.2 Stress level別の $\delta(t)-t$ 曲線と相対湿度、温度、収縮量、含水率、及び小試験片重量の経時変化

図3に、Stress level別の $\delta(t)-t$ 曲線と相対湿度、温度の経時変化を示す。以下、同図から看取される傾向を定性的に検討する。

同図における $\delta(t)-t$ 曲線の全体的な傾向は、何れも前節で述べた一般的な傾向^{2,3)}とほぼ一致している。ここで、相対湿度の変化と $\delta(t)$ の挙動との関係を見てみると、何れも相対湿度の下降と上昇が $\delta(t)$ の増加と回復に対応する形で現れているが²⁾、この傾向は供試体間で差異が認められ、人工乾燥材で最も顕著であり、ついで生材、集成材の順となっている。この場合、生材と人工乾燥材における差異の原因には、材質、人工乾燥処理、あるいは立木時の履歴等が考えられるが、本研究では供試体数も少なく、明確に判断することはできない。ただし、現場におけるスギ個体間では、実際にこのような傾向の差異を生じているはずであり、構造材としての長期性能評価を行ううえで、今後、可能な限りこの原因を明確にする必要がある。

Stress level=11%時における生材と人工乾燥材の $\delta(t)$ の挙動は、集成材のそれとは明らかに異なっており、生材では、ほぼ2000時間から4000時間の範囲、人工乾燥材では載荷時点から4000時間の範囲で $\delta(t)$ の増加が顕著になっている。この原因は、図4に示すStress level=11%時の収縮量と含水率（高周波含水率計による）の経時変化から推察可能である。すなわち、同図によれば、集成材では全期間にわたって含水率がほぼ気乾状態で推移しているものの、生材と人工乾燥材では何れも載荷当初から4000～5000時間までは含水率が気乾状態を越えていたことが読み取れる。したがって、この期間における生材と人工乾燥材の水分脱着の経時変化は、乾燥による脱湿が支配的であったと考えてよい。この場合、木材のMechano-sorptive変形は、水分が離脱するときに著しい⁴⁾ことから、図3のStress level=11%時における生材と人工乾燥材の $\delta(t)$ の挙動は容易に理解できる。また、脱湿時に生成されるMechano-sorptive変形は一種の可塑変形に近いことから⁵⁾、生材と人工乾燥材に対する応力除去後の回復挙動は、集成材のそれとはかなり異なった傾向を示すことが予想される。

Stress level=11%時と22%時における $\delta(t)$ の挙動で、それぞれ5000時間、14000時間（何れも7月）付近で $\delta(t)$ の急増が認められる（特に集成材において著しい）。この傾向は、7、8月を除いた期間にクリープが安定状態に達していても、この期間になると、たわみが進展すると言う既往の報告⁶⁾と一致している。原因としては、木材の粘性係数が温度に鋭敏⁷⁾であることから、一定以上の温度上昇過程でクリープが顕著になる傾向を示す⁸⁾ことが考えられるが、さらに、図3の相対湿度や図4の収縮量、含水率、及び小試験片重量の経時変化をみると、特にこの時期の相対湿度変動が材の物性にかなりの影響を及ぼしたことが示されており、これらが相乗的な効果をもたらしたことが考えられる。一方、製材では、生材と人工乾燥材の何れも集成材ほどの急増傾向を示していない。前述したように、製材では個体間で材質にかなりの差異があり、この原因を一意に説明することは出来ないが、偏心の程度や繊維傾斜等と荷重方向との関連からこの時期の変形がかなり相殺されたことも考えられる（ただし、節の影響は考えにくい⁹⁾）。

ここで、図5に収縮量変動幅、含水率（高周波含水率計による）、及び小試験片重量と相対湿度の関係を示す。何れも相対湿度との関係が明確に現れており、相対湿度は、前述

したように木材の物性にかなりの影響を及ぼすことが示されている。

3.3 クリープ曲線の予測

木材のクリープ曲線は、次式に示すように、クリープたわみ ($\delta_c(t)$) - t 曲線を両対数で表示すると、高い直線性が認められる^{10,11)}。

$$\log(\delta_c(t)) = a \log(t) + b \quad (1)$$

ここで、 a 、 b は定数である。

また、以下に示すPOWER則 (t^N 則) や $\log(t)$ 則で近似されることも良く知られている¹²⁾。

$$\delta_c(t) = A t^N \quad (2)$$

$$\delta_c(t) = a \log(t) + b \quad (3)$$

ここで、 A 、 N は定数 (A をクリープ定数、 N を減速指数と呼ぶこともある¹³⁾)、(3)式はEyring粘性を示す粘性要素を有する粘弾性モデルから誘導される近似式である¹²⁾。

まず、 $\delta_c(t)$ - t 曲線に、(1)式と(2)式を適用した場合について検討する。この場合、本研究では、1年毎に荷重を付加 (Stress level = 11% → 22% → 33%) しているので、基本的にはSuper-position^{9,12)}の考え方に従い、それぞれの荷重 (各11%) が独立してたわみを生じたものとして取り扱う。

図6に、(1)式による $\delta_c(t)$ - t 曲線の両対数表示を示す。この場合、 b は載荷後1時間に外挿された定数である。Stress level = 11%時と33%時では、木材や木質材料のクリープ初期に通常見られる一次クリープ^{2,3)}が僅かに認められるが、Stress level = 22%時ではほとんど認められない。また、Stress level = 11%時と22%時では、何れも長時間側で凹型から凸型に変化する傾向を示している。この要因としては、Stress level = 11%時の生材と人工乾燥材では前項で述べた乾燥による脱湿の影響が考えられ、また、それ以外では7月頃のたわみ急増とその後の安定化が考えられる。本来は、荷重に対する安定化、あるいは将来の予測を行うといった意味から、長時間側において定数を検討することが望ましいが、以上の理由から、ここでは一応全期間にわたって直線性が認められるものとして、(1)式の定数を $\exp(b) = A$ 、 $a = N$ においてPOWER則 (2)式) に当てはめ、同式による予測値と $\delta_c(t)$ - t 曲線とを比較した。その結果を図7に示す。全体にはある程度適合しているが、個々には差異が認められる。特に、Stress level = 11%時の生材と人工乾燥材、及びStress level = 22%時の全供試体における測定の後半部で、POWER則による推定たわみ - t 曲線が実測値をかなり下回っている。この要因も、図6に関して前述した内容とほぼ同様と考えられる。ところで、 N は材料特有の値を有するが³⁾、スギではStress level = 20%時で0.23~0.26、40%時で0.30 (ただし、長時間側から求めたもの) との報告例がある¹²⁾。これらの値と図7における同値を比較すると、後者の方がやや高く現れている (すなわち、粘性の寄与が大きい¹⁴⁾)。また、 N は、Stress levelに依存しない様子がうかがわれるが^{2,3,15-17)}、本研究では、一般に言われるような集成材の方が製材よりも大きい傾向^{2,3)}は示していないのが特徴的である。

次に、湿度変動に伴うたわみ挙動の把握 (推定) について検討してみる。

湿度変動を受けるときの変形機構の推定には、比較的Stress levelの小さいときや釘接合部の負荷初期では、指数型¹²⁾を基本にした次式の適合性が良い¹⁸⁻²⁰⁾。

$$\delta(t, \Delta RH) = r_0 + r_1 [1 - \exp(-\beta t)] + f(\Delta RH) \quad (4)$$

ここで、 r_1 と β は係数、 r_0 は瞬間弾性たわみ、 $f(\Delta RH)$ は湿度変動によって生じるたわみである。

一方、比較的Stress levelの大きい場合で、長期にわたって湿度変動を受けるときの変

形機構の推定には、初期の湿度変動後のPOWER則を基本にした次式の適合性が良い^{21,22)}。

$$\delta_c(t, \Delta RH) = A t^N + h \cdot \Delta RH \quad (5)$$

ここで、 $h \cdot \Delta RH$ は湿度変動によって生じるたわみで、(4)式の $f(\Delta RH)$ を原点を通る回帰式としたものである。

本実験条件では、(5)式の適合性が比較的良いと考えられるので、同式に当てはめた場合について検討してみる。

図8に、クリープたわみ変動幅($\Delta \delta_c(\Delta RH)$)と相対湿度変動幅(ΔRH)の関係を示す。なお、ここでは、 $\Delta RH = RH - \text{平均相対湿度}$ とし、 $\Delta \delta_c(\Delta RH) = h \cdot \Delta RH$ とした。また、負荷初期においては、湿度変動への対応が不明確との報告があり^{18,21)}、本研究でも検討したところ同様の結果が得られたので、Stress level=11%では負荷後5000時間以後(初期の乾燥による脱湿を考慮した)、それ以外では1000時間以後における両者の関係をプロットした。以下に各条件下における単回帰分析結果を示す。

Stress level=11%, 生材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.000578 \Delta RH$	$r = 0.222$
Stress level=11%, 人工乾燥材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00601 \Delta RH$	$r = 0.576$
Stress level=11%, 集成材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.000427 \Delta RH$	$r = 0.174$
Stress level=22%, 生材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00146 \Delta RH$	$r = 0.315$
Stress level=22%, 人工乾燥材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00565 \Delta RH$	$r = 0.504$
Stress level=22%, 集成材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.000347 \Delta RH$	$r = 0.106$
Stress level=33%, 生材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00368 \Delta RH$	$r = 0.496$
Stress level=33%, 人工乾燥材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00879 \Delta RH$	$r = 0.694$
Stress level=33%, 集成材:	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00208 \Delta RH$	$r = 0.417$

図8と上記の結果から、 ΔRH に対する $\Delta \delta_c(\Delta RH)$ は、Stress level別では33%、供試体別では人工乾燥材における関係が明確に現れている。その一方で、Stress level=11%の生材と、Stress level=33%を除く集成材では ΔRH との対応が明確に現れていない。また、全体には負の関係を示す傾向がある。一般に、最初の湿度変動以後の湿度に対するたわみ変動傾向は、木材では個々に異なる²²⁾が、集成材ではこれまで正の関係を示した例が多く^{18,21,22)}、本実験結果と異なっている。したがって、木質材料でも、湿度に対するたわみ変動傾向は、実験時の周囲条件や材質、あるいは製造条件等によって異なった傾向を示すことが考えられる。

ここで、算出した $\Delta \delta_c(\Delta RH)$ を(5)式に適用した結果得られた $\delta_c(t, \Delta RH)$ と、 $\delta_c(t) - t$ 曲線を比較したものを図9に示す。なお、同図は前述した負荷初期における湿度との対応を考慮し、Stress level=11%では負荷後5000時間以後、それ以外では1000時間以後について示したものである。同図から、図8と上記の結果において ΔRH との対応が明確なものは、同値に伴う変形の性状が何れも良く現れている。したがって、スギの実大材レベルにおいても、(5)式により湿度変動に伴う挙動の把握を行うことは、ある程度可能と考えられる。

ま と め

日本における代表的な造林木であるスギの構造的利用に関する資料収集の一環として、水分(湿度)非定常状態におけるスギ実大梁材(生材, 人工乾燥材, 集成材)のクリープ特性を検討した。主な結果は以下のとおりである。

1) 載荷時に含水率が気乾状態を越える製材(生材, 人工乾燥材)のMechano-sorptive変形は、含水率がほぼ気乾状態に達するまで著しい傾向を示した。

2) 7, 8月を除いた期間にクリーブが安定状態に達していても, この期間になると, たわみが急増する傾向を示した。この傾向は, 特に集成材で顕著であった。

3) 木材の収縮量, 含水率, 及び重量は, 相対湿度変動に鋭敏に対応した。

4) たわみに対する湿度変動の影響は, 载荷一定期間以後に明確になる傾向を示した。また, 全体には負の関係を示す傾向が認められた。

5) 载荷一定期間以後の段階にPOWER則を当てはめ, その外挿値と湿度差によって生じるたわみ量を加算することによって, 湿度変動に伴うたわみ挙動を把握出来ることが示唆された。

文 献

- 1) 平成4年度農林水産省補助事業(財)日本住宅・木材技術センター事業技術開発推進事業報告書(集成材構造), 71-80(1993)。
- 2) 有馬孝禮, 丸山則義: 昭和61年度日本建築学会学術講演梗概集, 1986, p. 1269-1270。
- 3) 有馬孝禮, 丸山則義: 昭和61年度日本建築学会関東支部研究報告集, 1986, p. 325-328。
- 4) 有馬孝禮: 昭和53年度日本建築学会関東支部研究報告集, 1977, p. 349-352。
- 5) 有馬孝禮, 佐藤雅俊, 益田恵吾: 建築研究報告, No. 95, 1-24(1981)。
- 6) 杉山英男: 建築構造学大系22木構造, 彰国社, 1971, p. 101-109。
- 7) 北原覚一: 木材物理, 森北出版, 1976, p. 110。
- 8) 有馬孝禮: 木材学会誌, 18(7) 349-353(1972)。
- 9) 有馬孝禮, 丸山則義: 昭和62年度日本建築学会学術講演梗概集, 1987, p. 1401-1402。
- 10) 有馬孝禮: 木材学会誌, 13(2) 36-40(1967)。
- 11) 丸山則義, 有馬孝禮: 昭和61年度日本建築学会学術講演梗概集, 1986, p. 1267-1268。
- 12) 有馬孝禮, 佐藤雅俊, 益田恵吾: 建築研究報告, No. 95, 25-80(1981)。
- 13) 有馬孝禮: 木材学会誌, 13(2) 36-40(1967) [北原覚一, 岡部登: 木材学会誌, 5(12) (1956)]。
- 14) 有馬孝禮: 木材学会誌, 13(2) 36-40(1967) [小野木重治訳: 高分子の力学的性質, 52(1965)]。
- 15) 有馬孝禮: 昭和49年度日本建築学会学術講演梗概集, 1973, p. 109-110。
- 16) 有馬孝禮, 益田恵吾, 佐藤雅俊: 昭和55年度日本建築学会関東支部研究報告集, 1980, p. 373-376。
- 17) 三輪雄四郎, 有馬孝禮, 北原覚一: 木材工業, 25(7) 314-316(1970)。
- 18) Hong, S.; Arima, T.: Mokuzai Gakkaiishi, 39(9) 1020-1026(1993)。
- 19) Hong, S.; Arima, T.: Abstracts of the 43rd Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, Morioka, 1993, p. 27。
- 20) 平成4年度農林水産省補助事業(財)日本住宅・木材技術センター事業技術開発推進事業報告書(集成材構造), 81-87(1993)。
- 21) 有馬孝禮, 鴛海四郎: 平成4年度日本建築学会学術講演梗概集, 1992, p. 23-24。
- 22) 有馬孝禮, 丸山則義: 昭和63年度日本建築学会学術講演梗概集, 1988, p. 123-124。

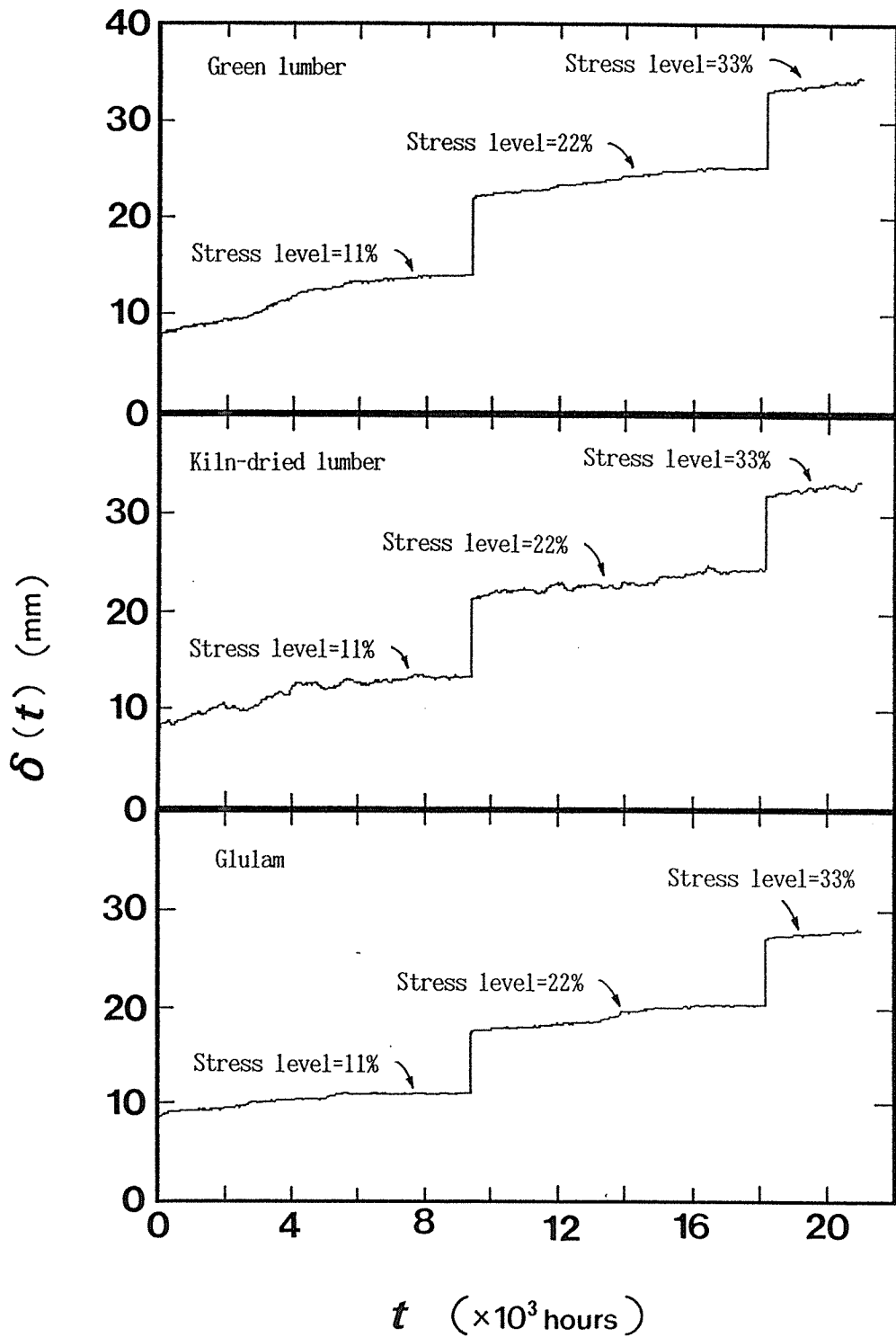


図2 全たわみ ($\delta(t)$) - 時間 (t) 曲線

※図中の生材 (Green lumber) は、あくまで載荷時の水分状態を示すものである (以後も同じ)

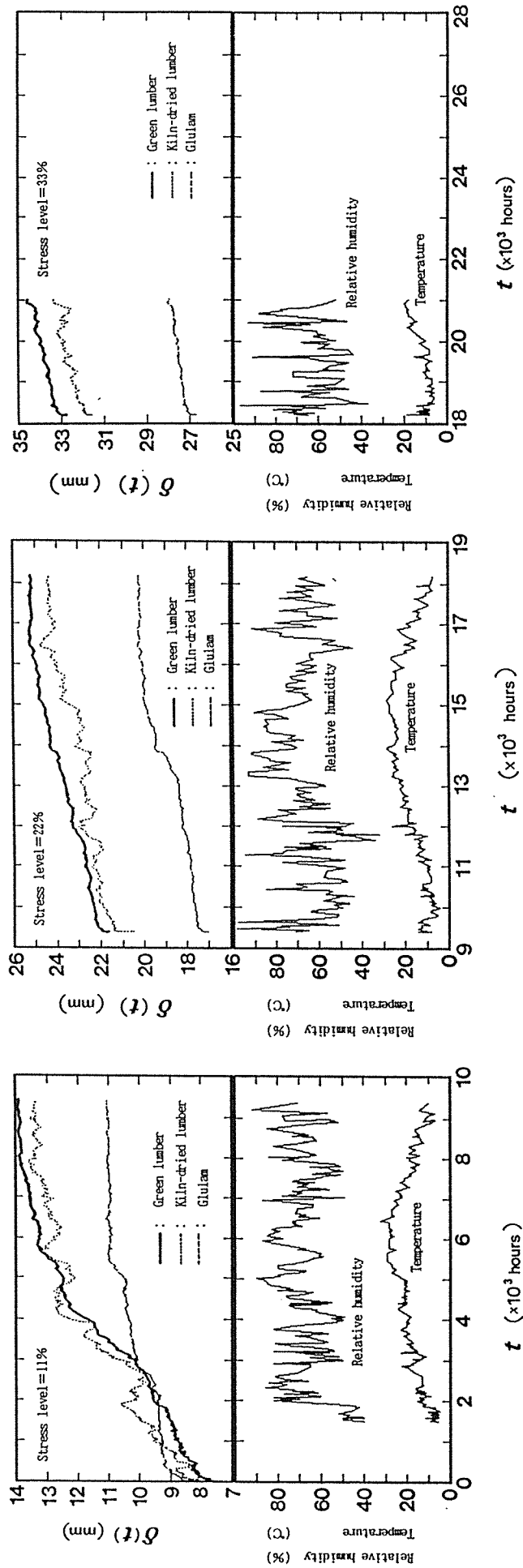


図3 Stress level別の全たわみ ($\delta(t)$) - 時間 (t) 曲線と相対湿度、温度の経時変化

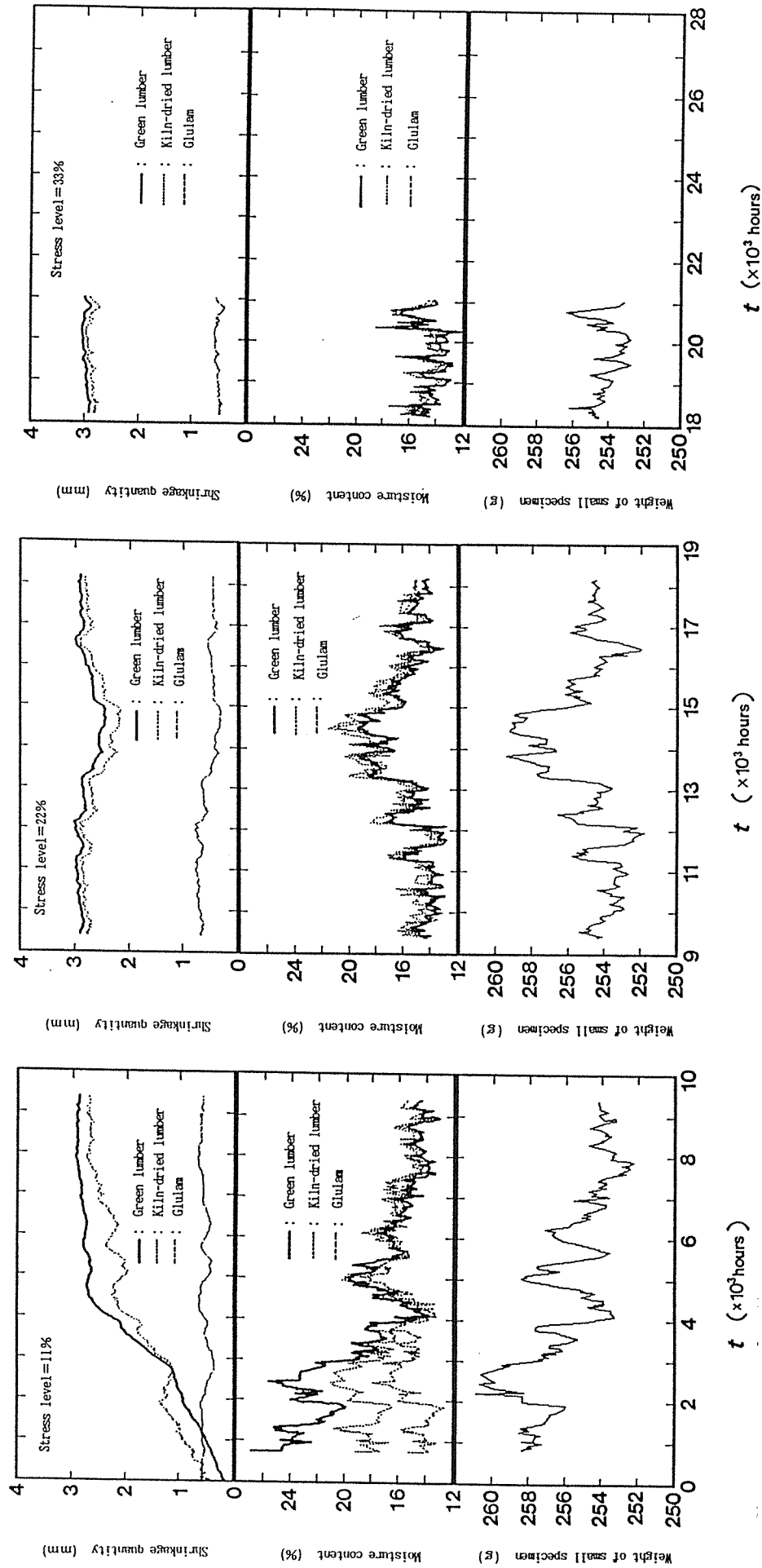


図4 収縮量，含水率，及び小試験片重量の経時変化
 ※含水率は，高周波含水率計 (Kett, moco2) による測定値

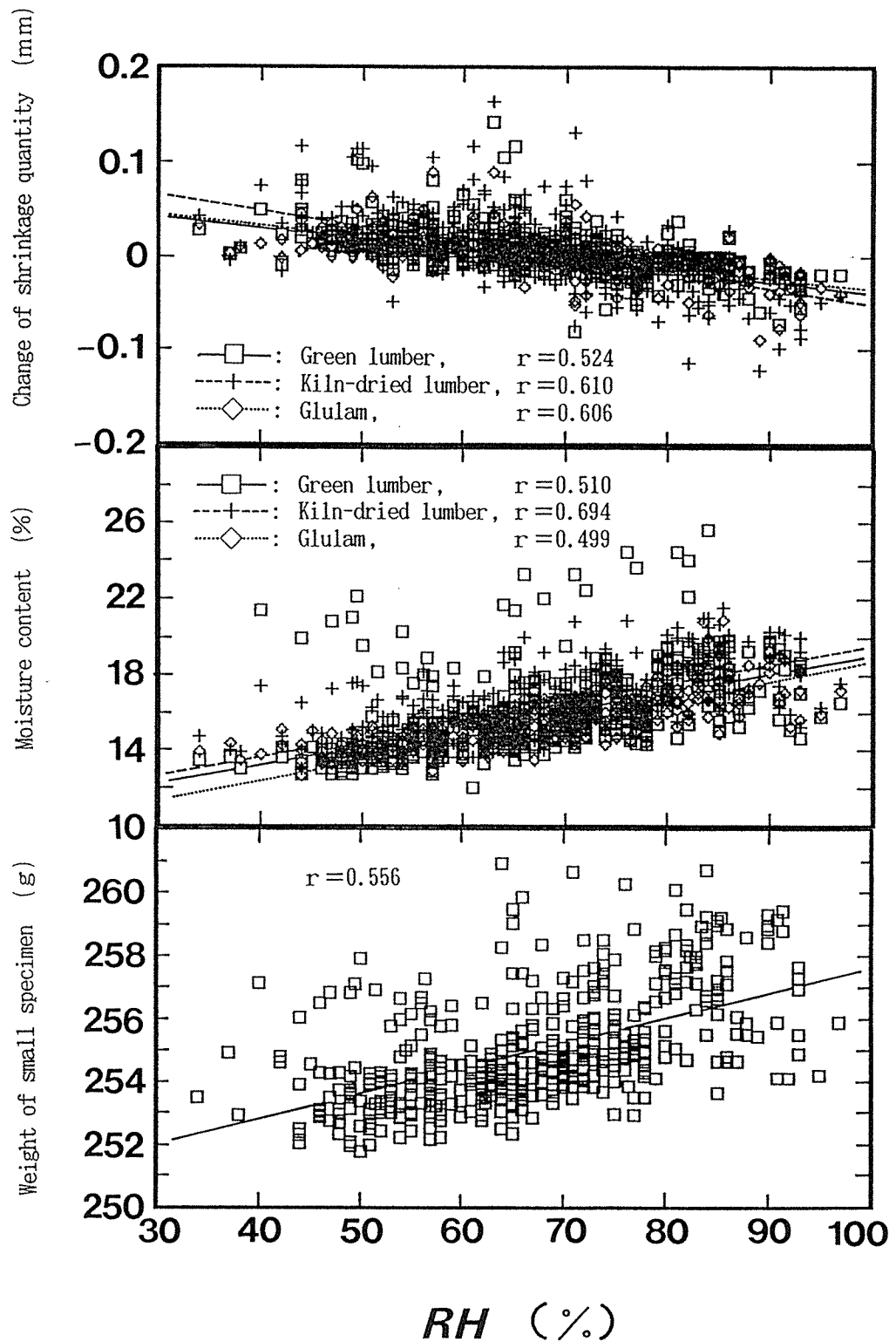


図5 収縮量変動幅, 含水率, 及び小試験片重量と相対湿度 (RH) の関係

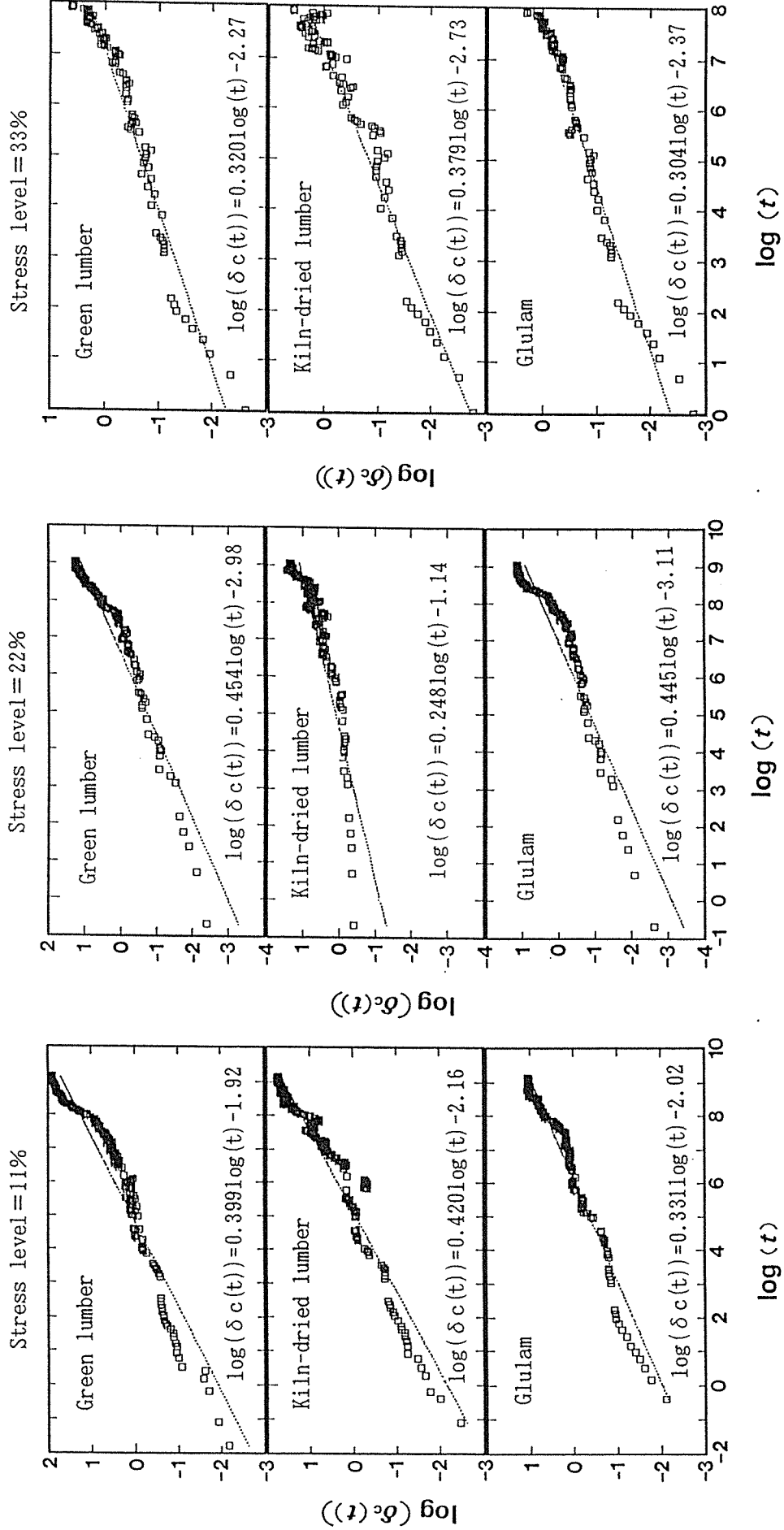


図6 クリープたわみ ($\delta_c(t)$) - 時間 (t) の両対数表示

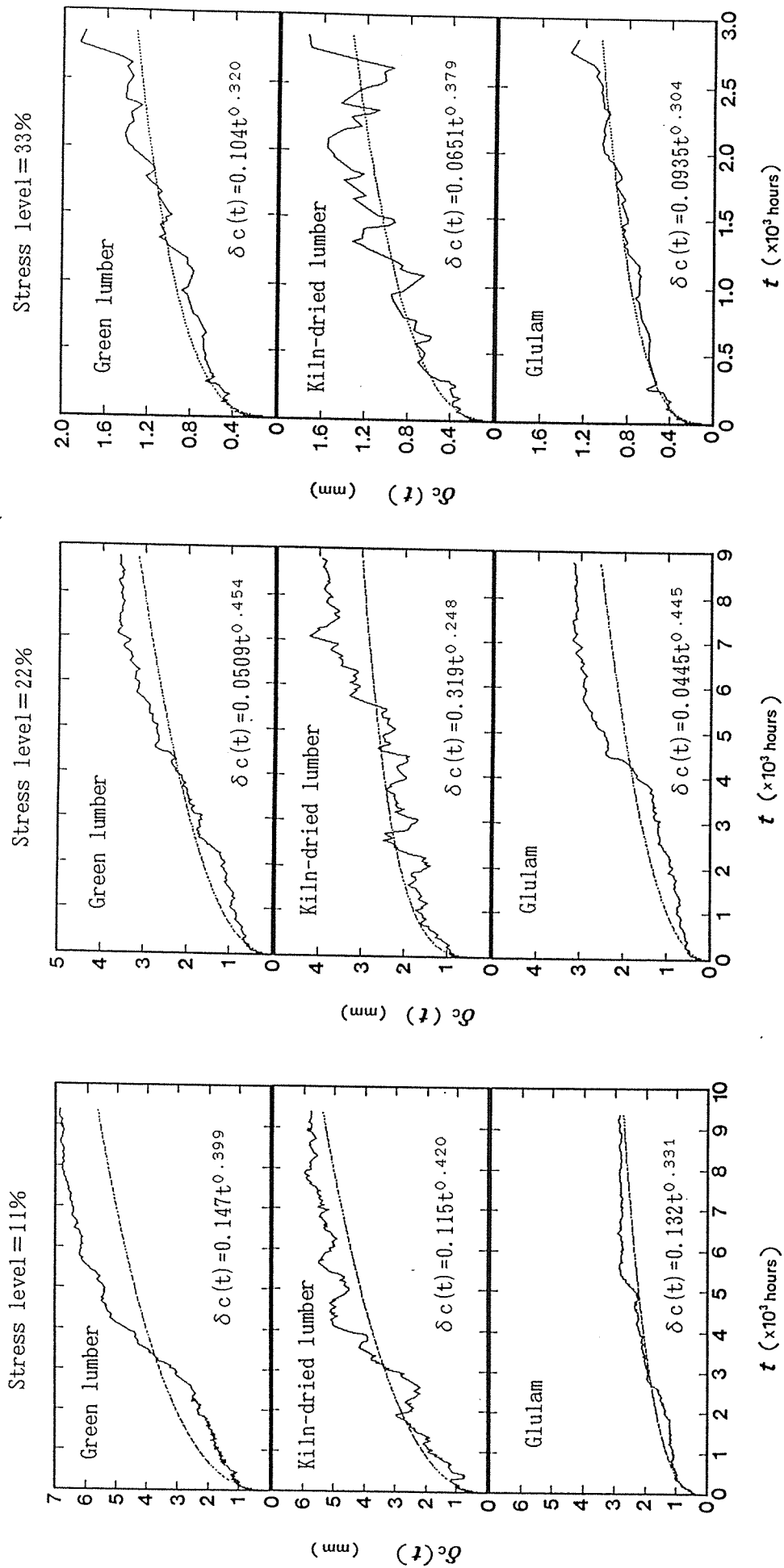


図7 クリープたわみ $\delta c(t)$ - 時間 t 曲線とPOWER則による推定たわみ t 曲線の比較

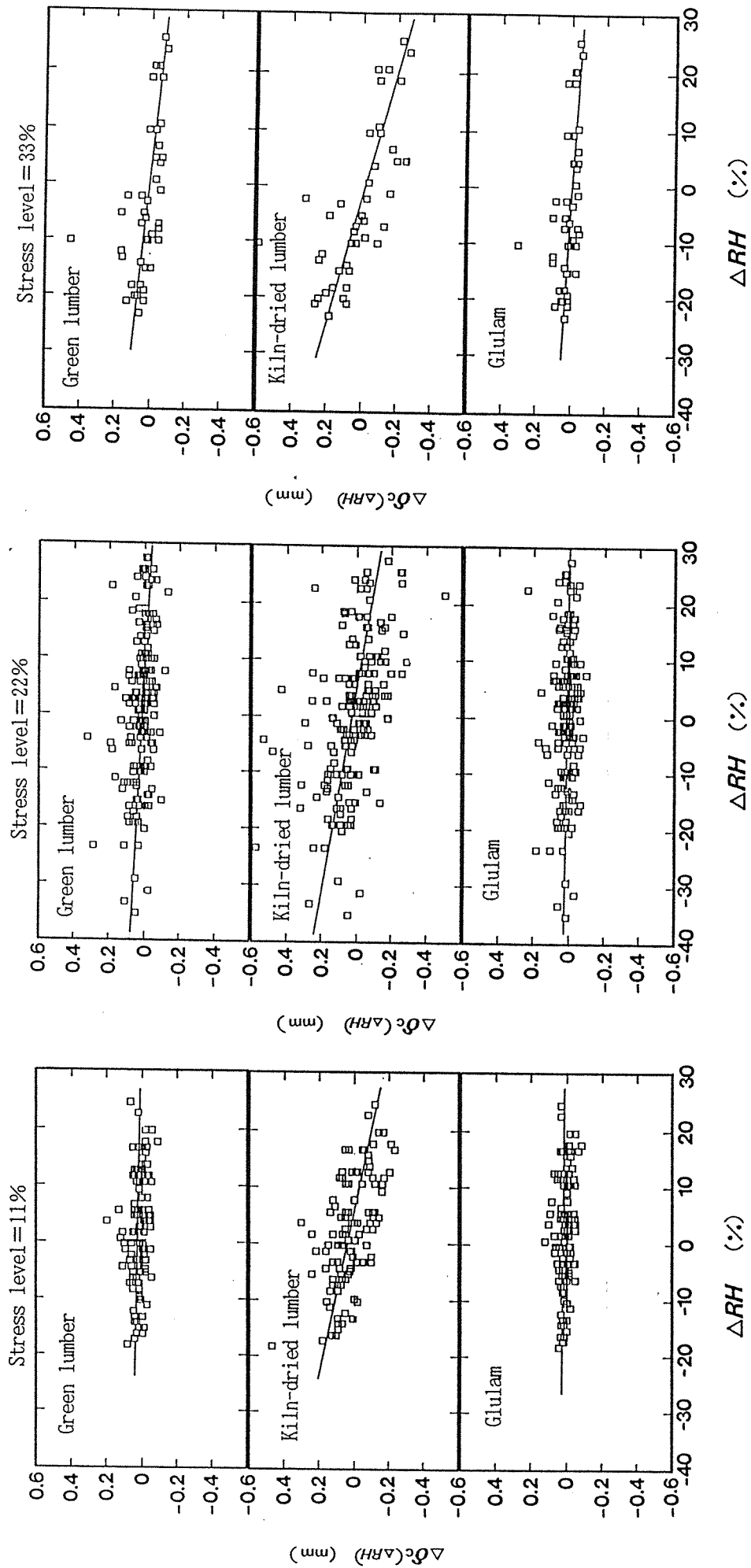


図8 クリープたわみ変動幅 ($\Delta\delta_c(\Delta RH)$) と相対湿度変動幅 (ΔRH) の関係

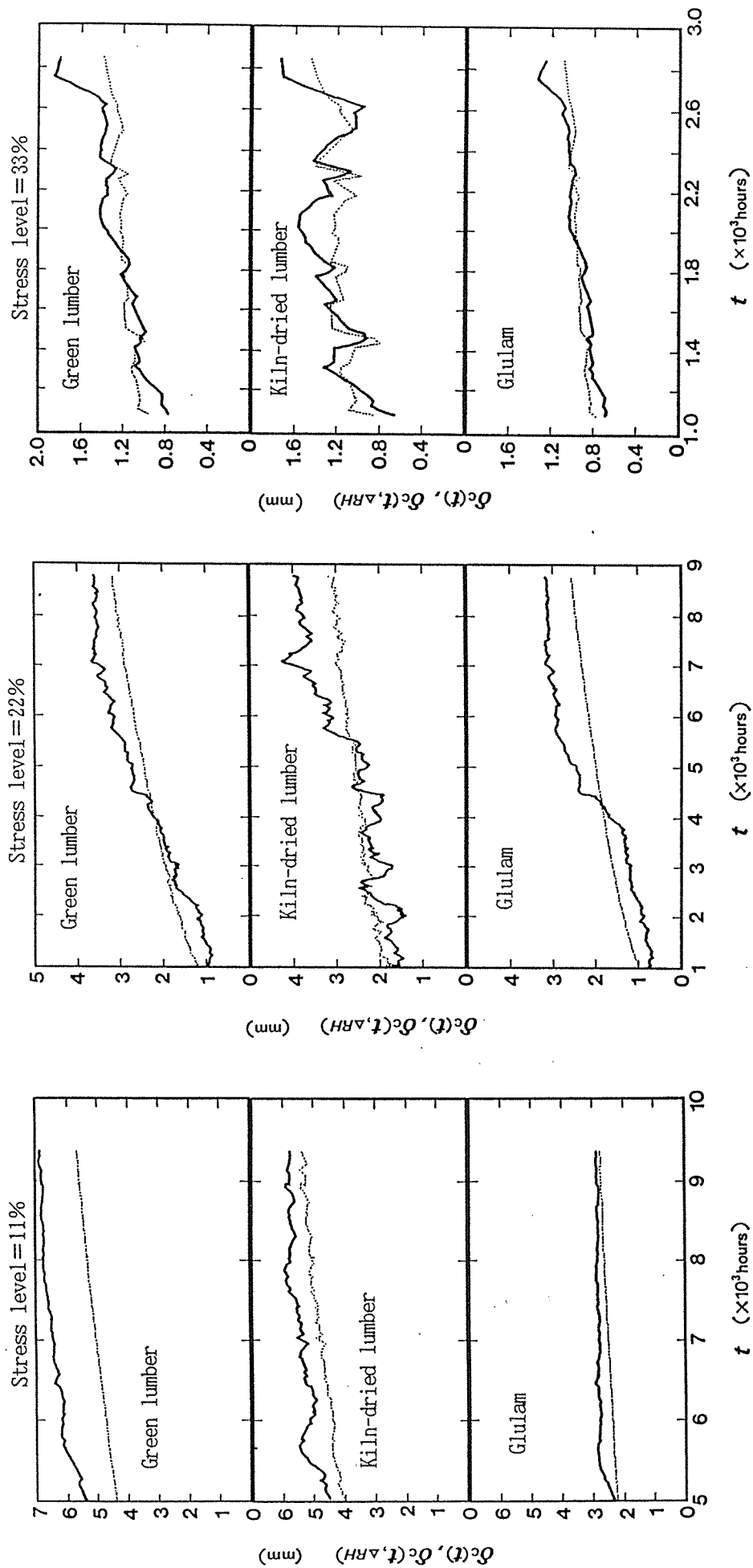


図9 クリープたわみ $\delta_c(t)$ - 時間 (t) 曲線とクリープたわみ変動幅 $(\Delta\delta_c(\Delta RH))$ を (5) 式に適用して得られたクリープたわみ $(\delta_c(t, \Delta RH))$ の比較

— : $\delta_c(t)$
 - - - : $\delta_c(t, \Delta RH)$

第4章 集成材構造におけるラグスクリュー接合部とボルト接合部のクリープ性能の比較

4.1 目的

集成材構造における接合の種類は多様化してきている。ボルトの重要性は依然として変わらないが、ドリフトピンやラグスクリューといったボルト以外の接合具も使用部位によっては威力を発揮する。ラグスクリューは先穴の精度がボルト穴ほど要求されず、また貫通させる必要がないので、ボルトの使用が困難な所や、梁背が極端に大きい集成材等に向いている。ラグスクリューに関する強度データは、ボルトに比べれば、はるかに少ないが、それでもここ数年蓄積されている。しかし、設計の際重要な長期荷重に対する実験データは極めて少なく、クリープ性能は未だに明らかになっていない。そこで、本研究は、ラグスクリューとボルト接合部のクリープ試験を同一条件で行い、ラグスクリューのクリープ性能をボルトとの比較で評価してみた。

昨年度は、集成材にマッチングを施して両者の比較を行ったが、実験データのばらつきが大きく、はっきりした結論を出すには至らなかった。そこで、本年度は、ラグスクリューとボルト接合の比較を、昨年度以上に同一の条件とするために、同じ集成材の両端にラグスクリュー接合とボルト接合を共存させて、直接両者を比較する方式をとった。これによって、ラグスクリューのボルトとの相対的な位置づけが可能になると考えている。

4.2 実験

木材：スギ集成材（比重0.47-0.52）、ベイマツ集成材（0.52-0.55）

接合具：ボルト、ラグスクリュー（いずれも、径12mm、図4-1参照）

側材：6mm厚さ鋼板

試験体の概要を図4-2に示した。集成材のは幅90mm、厚さ33mmのラミナを使用しており、寸法は90 x 250 x 400mmである。一方の端部から7d（85mm）の

所にボルトを、他方にラグスクリューを鋼板を側材として取付けた。ボルトに対しては、ボルト径の2mm増しの先孔を、ラグスクリューに対しては、ネジ部はネジの谷径の、また胴部には同径の先孔を二段に開けた。ボルト、ラグスクリューともレンチで十分に締めつけた。

試験方法を図4-3に示した。試験機はテコ形式で、デッドロードを順次載荷していき、試験体に引張り力が加わる方式になっている。テコの倍率は1：10である。重りは20kgずつ載せていき、そのつど、鋼板と母材とのスリップを順次測定していった。スリップの測定にはダイヤルゲージを用いた。両側の側材鋼板にダイヤルゲージを1個ずつ固定し、センサーの先端を主材に接触させた。スリップ量は2個の平均をとった。

クリープ荷重には次の4種類がある。

表4-1. クリープ試験における載荷方式

試験の種類	クリープ荷重	設計荷重との比	荷重比
Aシリーズ	2800 kgf	約4	約50%
Bシリーズ	2400 kgf	約3.4	約40%
Cシリーズ	1800 kgf	約2.6	約30%
Dシリーズ	1200 kgf ----> 1800kgf (1200 kgf を20日間載荷後、 1800 kgfに増加)	1.7----> 2.6	約20%---->30%

なお、荷重比は、昨年度の静的加力試験から、最大荷重の平均を約6000 kgfとして計算した。建築学会の木構造計算規準によれば、設計荷重は次の通りである。

ラグスクリュー（2本分）：スギ 576 kgf ベイマツ 756 kgf

ボルト ：スギ 575 kgf ベイマツ 630 kgf

ここで、設計荷重を一律700 kgfと考えて、設計荷重との比を示した。

4.3 結果

図4-4にクリープ荷重に達するまでの荷重-スリップ曲線を示した。各シリーズ間でボルトとラグスクリューを比較すると、ボルト接合は加力の初期において、すべりが見られ、Bシリーズ以外はラグスクリューよりもスリップがやや大きかった。

図4-5に、瞬間スリップ (δ_0) を差し引いたクリープ変位 (δ_c) と時間との関係を示した。クリープ試験期間はまだ20日 (約500時間) ほどであるが、いずれの試験体も、200時間を過ぎる頃から、スリップの増加がほとんど見られなくなった。この理由としては、木材と接合具の間がしまってきて、変形がほとんど止るのと、荷重比50%程度では、まだボルトもラグスクリューも降伏点に達していないためと考えられる。ちなみにS S 41の引張りの降伏点/最大強度の比は60%である。

図4-6に実験室の温湿度変化の様子を示した。試験の初期に測定できていないが50-450時間の間が記録されている。これを見ると、気温は試験期間を通じてほぼ20-25℃の間であった。湿度は試験開始から、5日までは比較的乾燥していて、40-50%、6日目から梅雨に入って、徐々に増加し、10日目には70%に達し、その後60%から80%の間を上下した。湿度の変化の大きかったのが、試験開始10日目までで、その間はクリープの進行が速かったのと、クリープがおさまったころには湿度変動が小さかったので、湿度変化がクリープに及ぼす影響ははっきりでなかった。しかし、木材の曲げクリープ等に比べると、金属による接合の場合は温湿度変化の影響は受けにくいと考えられる。

次に、CシリーズとDシリーズで、あるクリープ荷重に達するまでに、荷重を徐々に何段階かで上げていく方式 (複数段階方式) と、一気に所定の荷重まで上げていく場合 (一段階方式) とで比較をしてみた。Dシリーズは480時間のところで、1200 k g f から1800 k g f に荷重が上がり、スリップもその時点で増加した。1800 k g f のときのスリップCとDで比べると、Dがやや小さい。200時間後には

もう少し増加が見込まれるが、複数段階式よりも一段階式の方が、クリープ変形は大きい傾向にある。ただし、この点に関しては、さらに追実験が必要である。

4.4 結論

1) ラグスクリューとボルトのクリープ性状をを木材、荷重、環境条件を一定にして、比較した結果、試験期間はまだ短期間ではあるが、両者に有意差は認められなかった。少なくとも、ラグスクリュー接合部はボルト接合部よりもクリープ変形は少ないことが判明した。

2) 金物による接合のクリープにおいては、周りの温湿度の変化がクリープ変形に及ぼす影響は、木材単体のクリープ試験に比べると少ないと考えられる。この点に関しては、明言するには、現在行っている実験をさらに継続していく必要がある。

3) 複数段階式よりも一段階式の方が、クリープ変形は大きい傾向にある。ただし、この点に関しては、さらに追実験が必要である。

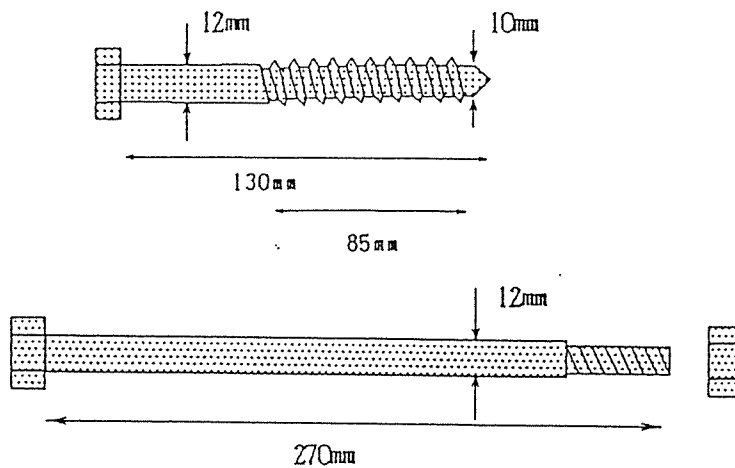


図4-1 ラグスクリューおよびボルトの形状

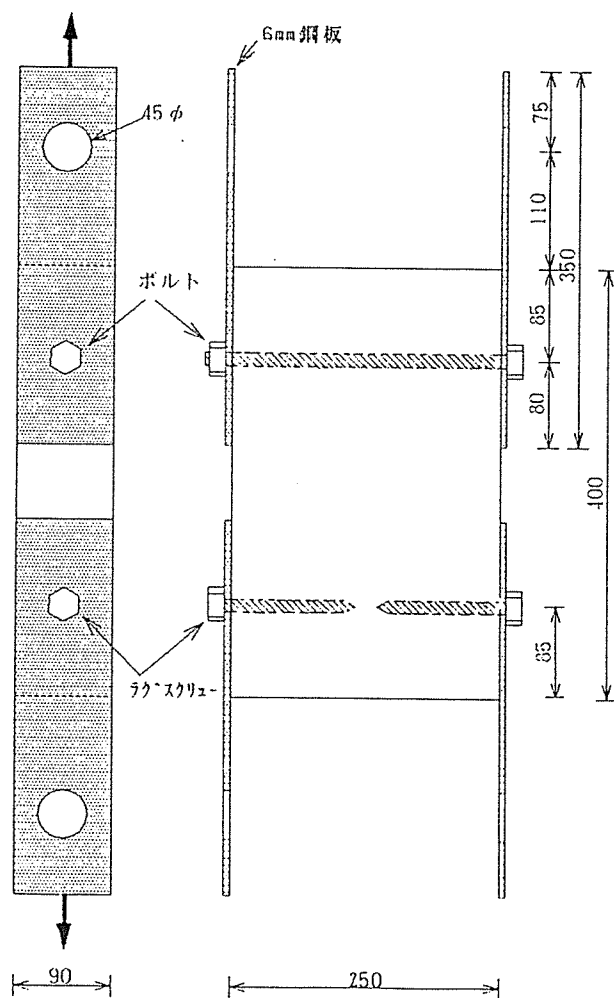


図4-2 試験体の形状と寸法

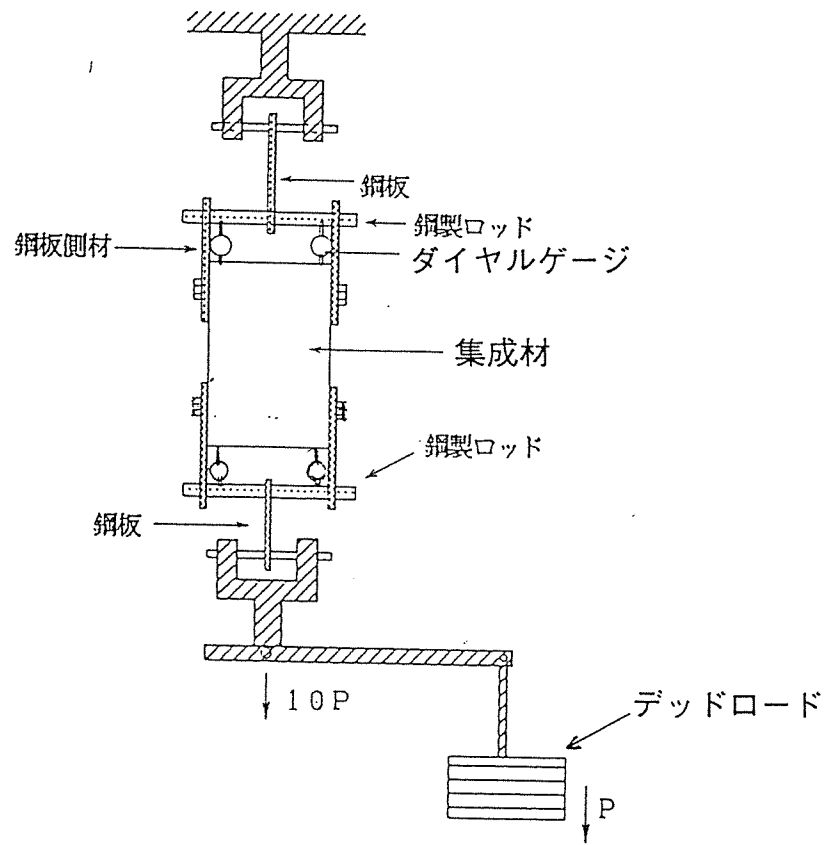


図4-3 クリープ試験装置

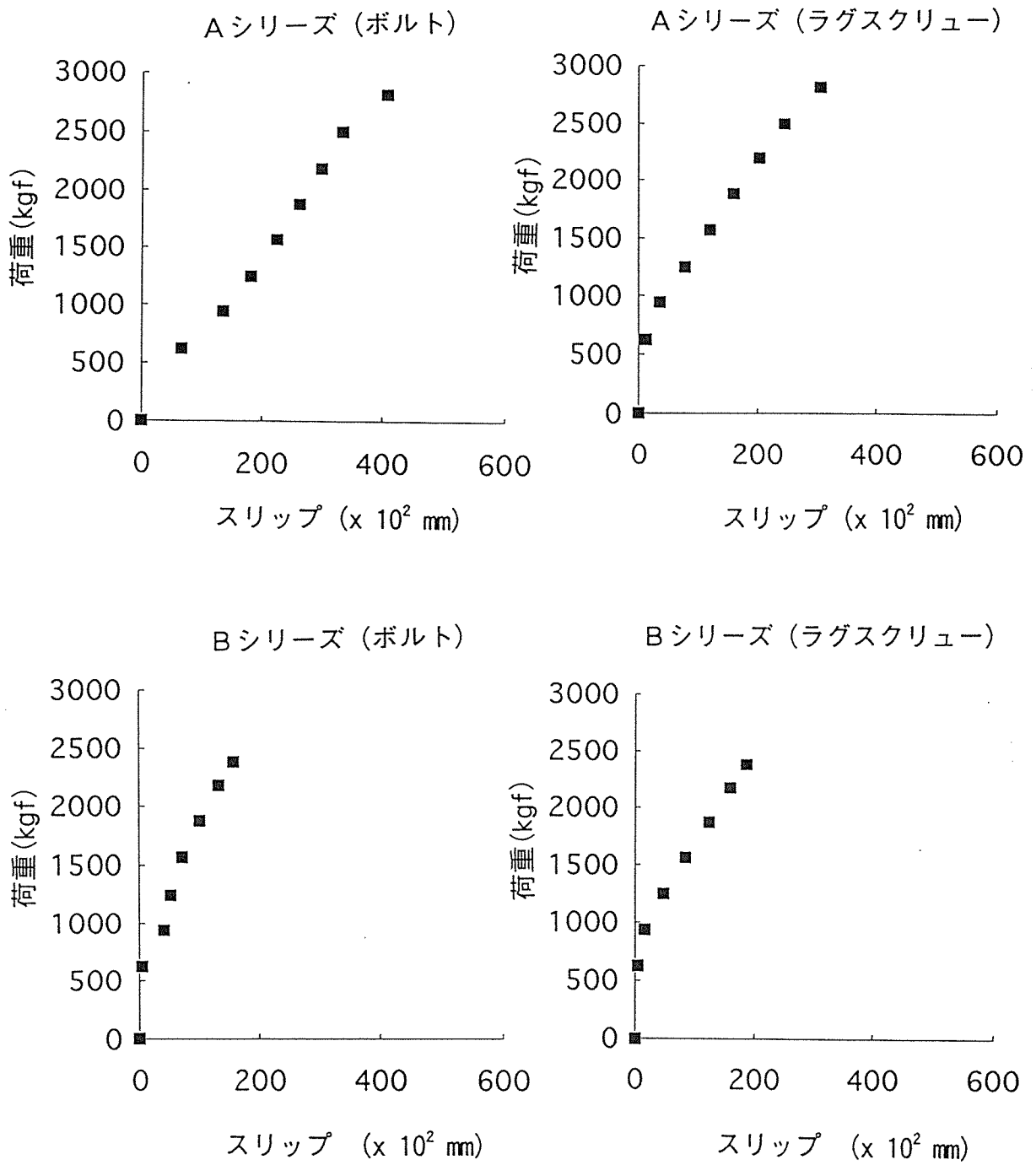


図4-4 クリープ荷重に達するまでの静的試験における、荷重-スリップ曲線

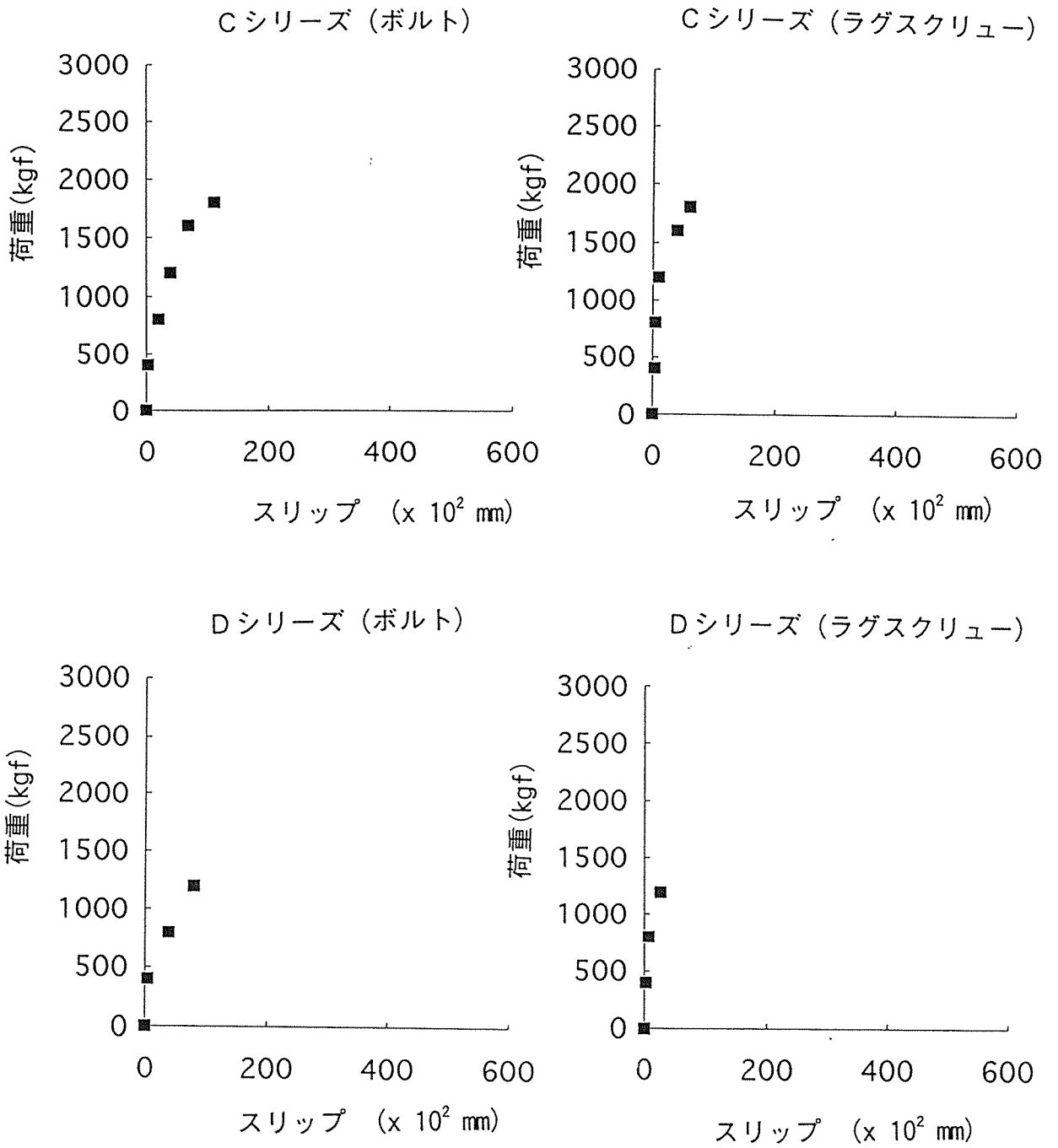


図4-4 クリープ荷重に達するまでの静的試験における、荷重-スリップ曲線

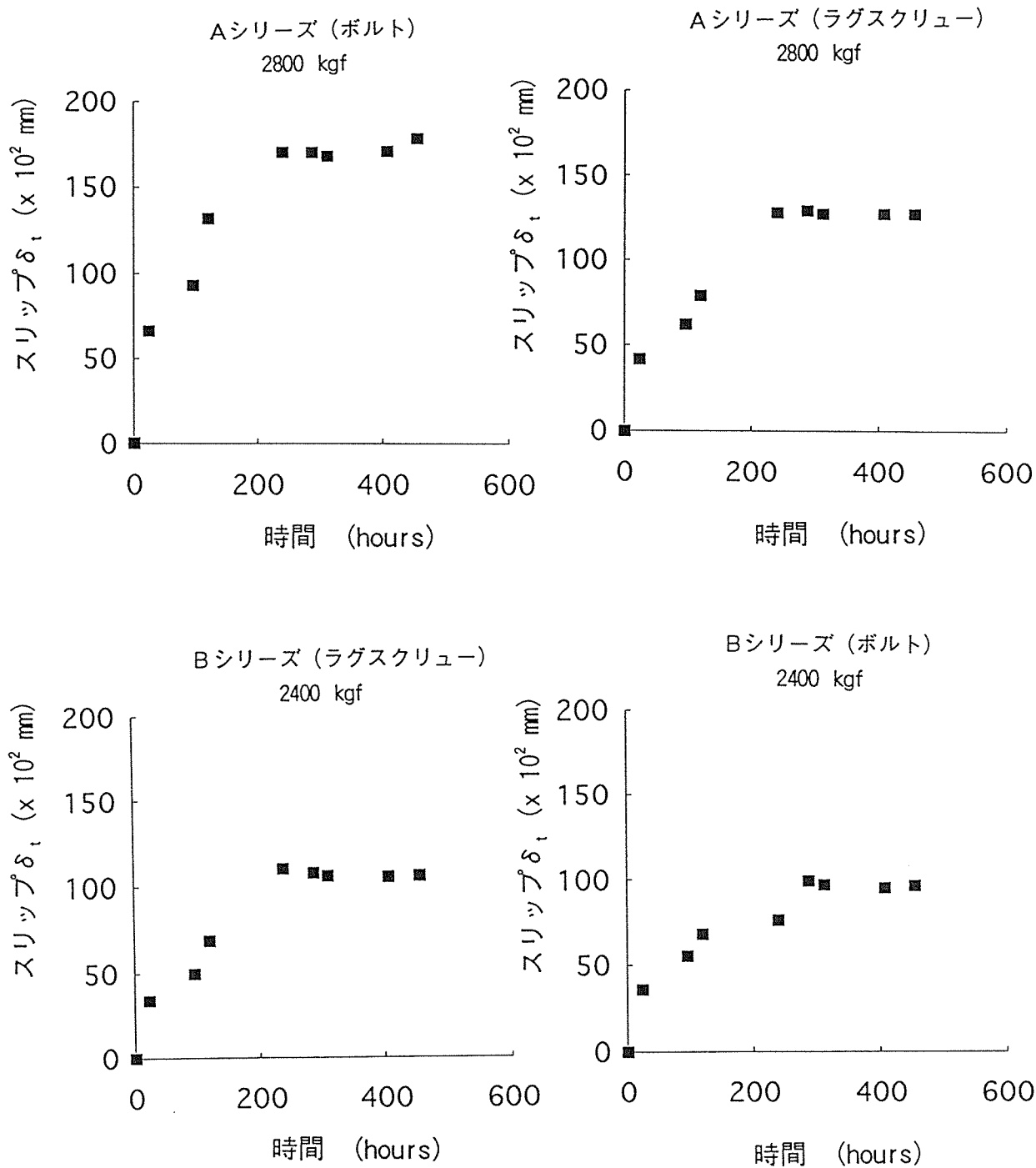


図4-5 クリープによるスリップの増加量 (δ_t) と時間 (t) の関係

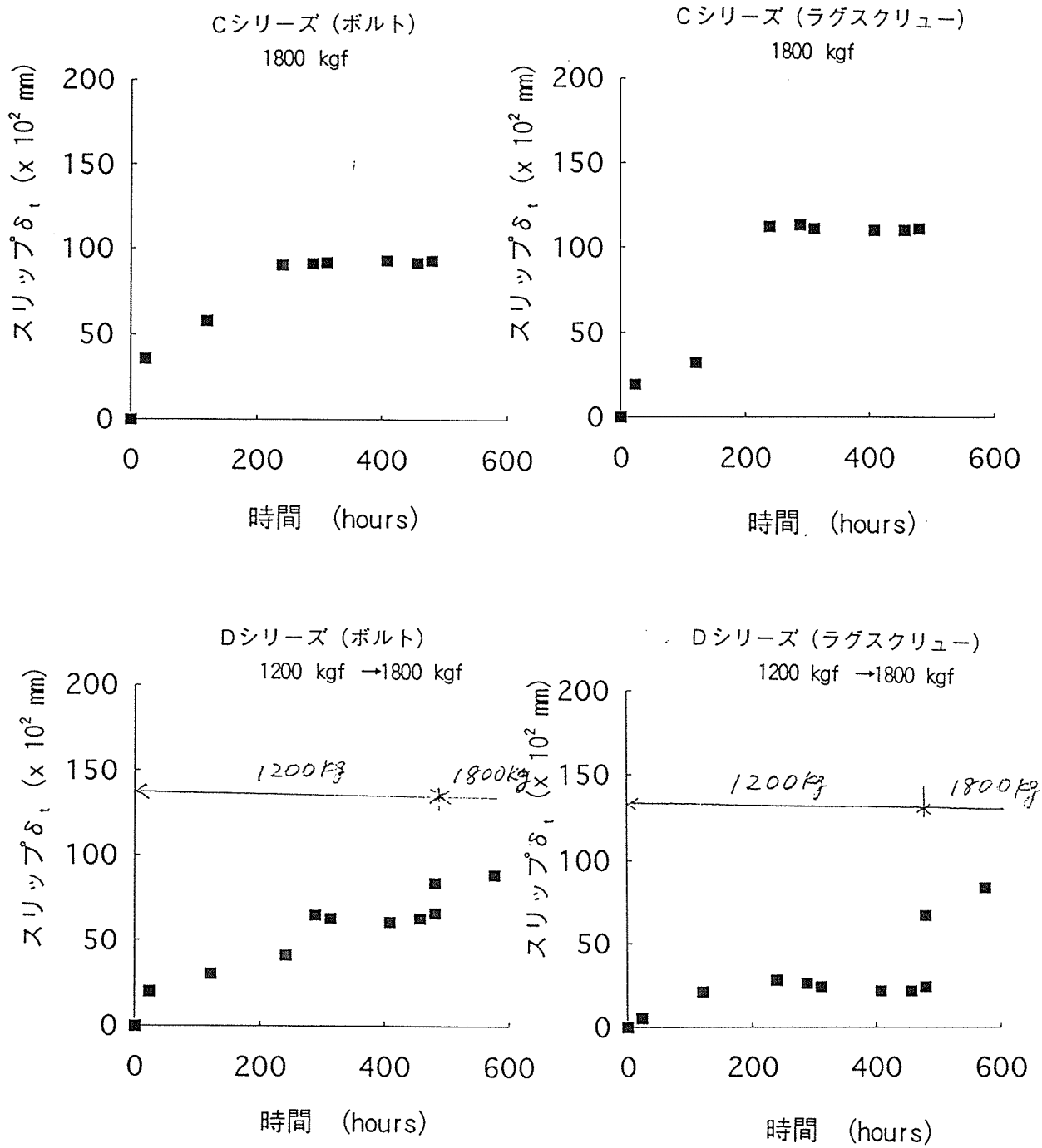


図4-5 クリープによるスリップの増加量 (δ_t) と時間 (t) の関係

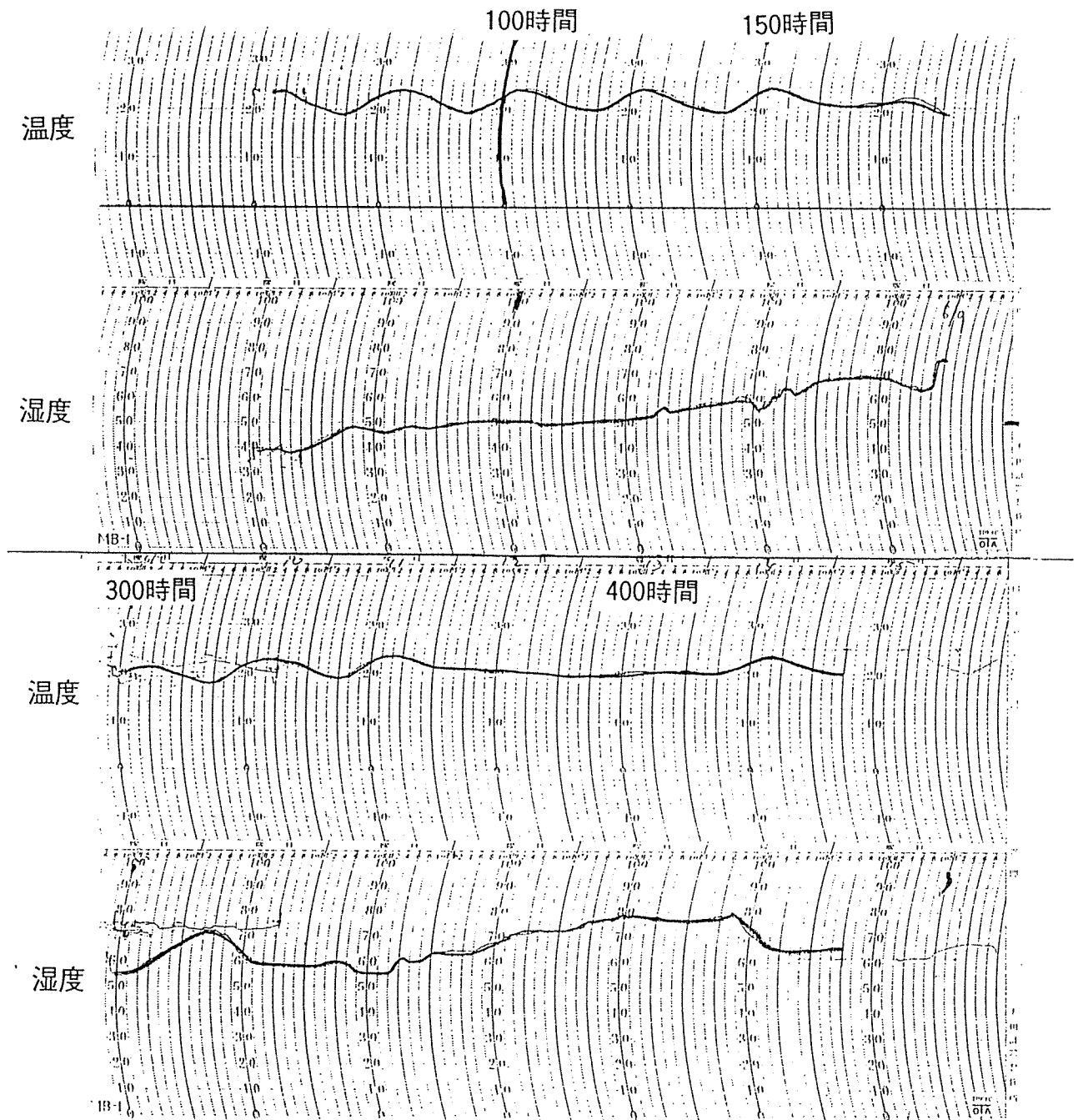


図4-6 実験室の温湿度の変化

図中の時間は試験開始からのもの。

一部測定のできていないところがある。

第5章 低質ベイマツラミナの曲げ及び引張強度試験

1. 緒言

ベイマツは針葉樹の中で最も許容応力度が高いこと、また入手が容易であることなどから、構造用製材として様々な用途に用いられてきた。ところが近年、環境問題による伐採制限や二次林への産地移行などによって、品質の低い材、特に年輪幅の広い材が目立つようになり、従来どおりの強度的性能が維持されているかどうか危惧されている。

当然このようなベイマツを原材料とする集成材の強度特性についても同様の問題が生じていると考えられており、実大の集成材を用いた試験によって品質の低下について検討することが望まれている。

しかしながら、この種の実大実験を実施するには、原料の収集や費用など実施面での問題点が多い。そこで本研究では、集成材工場で等外品と判定された低質のラミナについて曲げ・引張試験を行い、その強度特性を検討することにした。等外品を対象にしたのは、実際に使用されているラミナの最下限の品質保証になると考えられたからである。

2. 実験

2.1 材料

日本農林規格¹⁾の工場認定を受けた大断面構造用集成材工場4カ所(A, B, C, D)に依頼して、何らかの理由で等外品(4級より低質)と判定されたラミナ(長さ2.5~3.0m)を各100本ずつ収集した。100本のうち、半数の50本が通しラミナ(NJラミナ)で、残り50本が縦つぎラミナ(FJラミナ)であった。

FJラミナの製造の際には、ラミナ同士が無作為にフィンガージョイントされ、大断面集成材の製造規準²⁾に規定された制限、例えば節からジョイントまでの距離などについては全く考慮されなかった。

これら400本のラミナについて、比重、最大集中節径比、平均年輪幅、芯持ちの有無、打撃法によるヤング係数(MOE_t)などの基礎データを測定した後、その半数を曲げ試験に、残り半数を引張試験に供した。ただし、Dのラミナについては曲げ試験を行わず、NJラミナとFJラミナをランダムに積層して、2プライの積層材^{3, 4)}とし、引張試験のみを行なった。これはDのラミナ厚さが1.5cmと薄いため、適切なスパン-梁せい比の曲げ試験が出来なかったためである。また同時に、欠点の非常に多い材同士を積層したときの積層効果が、このような試験によって検討できると考えたためである。

表1 試験体の条件

工場	縦つき	試片数	心持ち 試片数	断面 (mm)	比重	含水率 (%)	平均年輪 (mm)	節径比 (%)	フィンガー	
									長さ (mm)	ピッチ (mm)
A	なし	50	31	184x33	0.48	14.2	6.59	35.2	--	--
	FJ	50	19	184x33	0.486	14.3	5.51	34.6	25	5.4
B	なし	50	27	95x38	0.458	15.1	6.7	40.9	--	--
	FJ	50	33	95x38	0.463	15.5	6.08	38.6	27	6.6
C	なし	50	9	103x27	0.508	10.7	4.69	33.5	--	--
	FJ	50	5	103x23	0.508	11.8	5.31	36.1	17	3.7
D	なし	50	1	184x19	0.496	11.7	3.38	43.5	--	--
	FJ	50	0	175x15	0.512	11.6	2.79	45.5	19	6.2

表1に、これらのラミナの寸法と測定値を示す。なお、表中の含水率は試験終了後に小試験片を採取し、全乾法によって測定したものである。

この表から、低質な等外ラミナといっても、工場によって様々な特徴が見られることがわかる。

各ラミナの特徴を挙げてゆくと、まずAラミナは芯持ちの割合が高くて平均年輪幅が高いため、等外と判定されたものが多いと思われる。

Bラミナは米国で機械等級区分されたMSR材であり、曲げヤング係数が100tonf/cm²に満たないため等外になったものである。小径の生節が多く材幅が狭いため、高い集中節径比の値を示した。また、他の3種のラミナと比較して比重が低く、芯持ちの割合が高いことも特徴的であった。

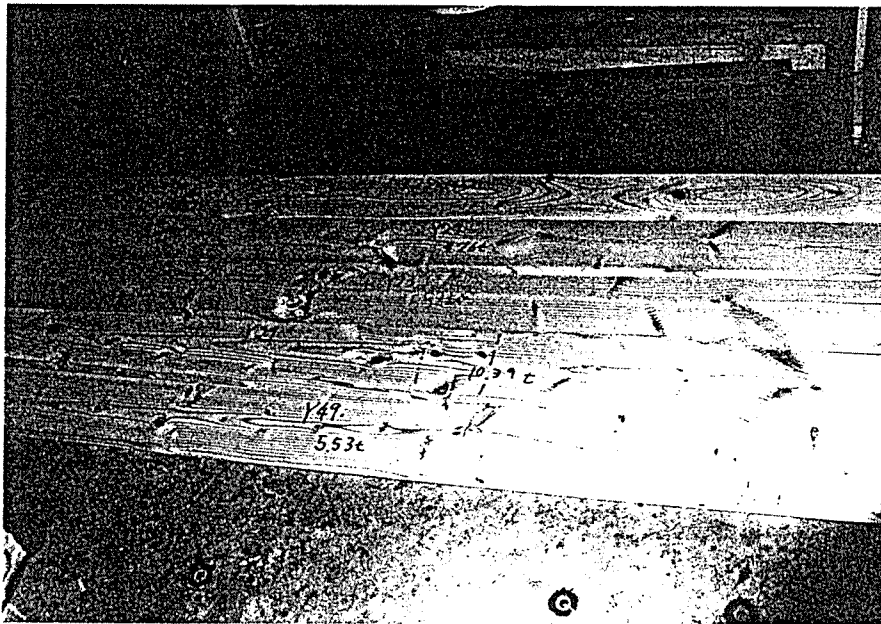


写真1、Aラミナ

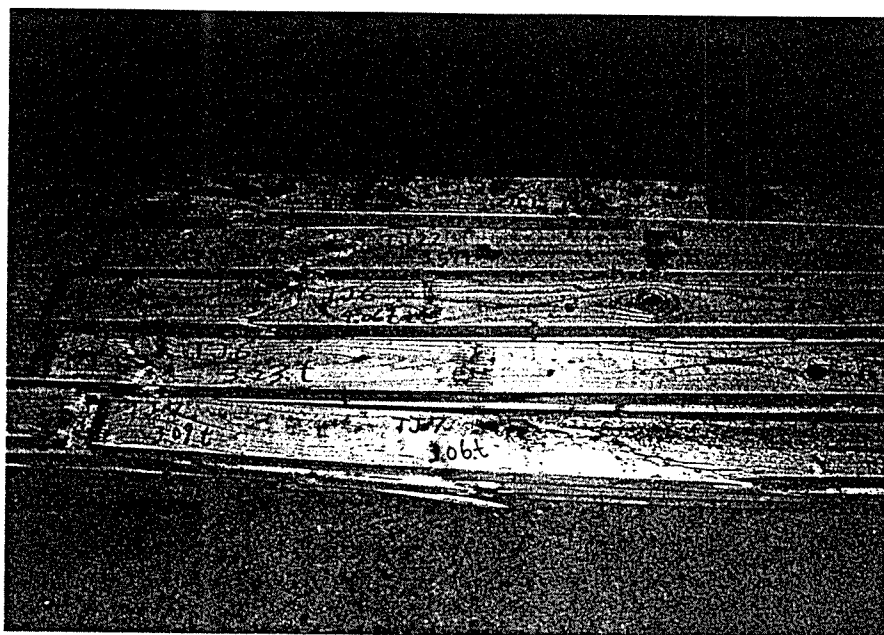


写真2、Bラミナ

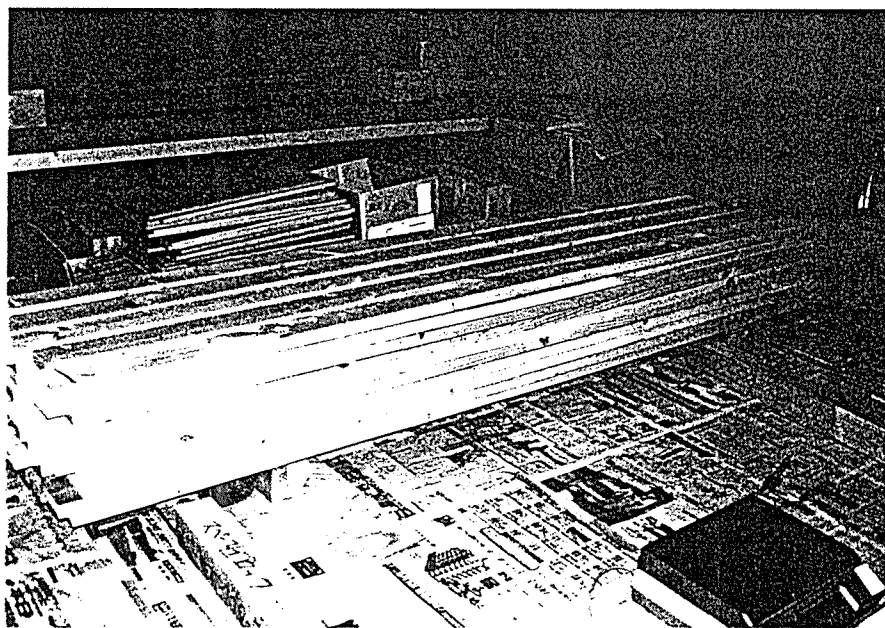


写真3、Cラミナ

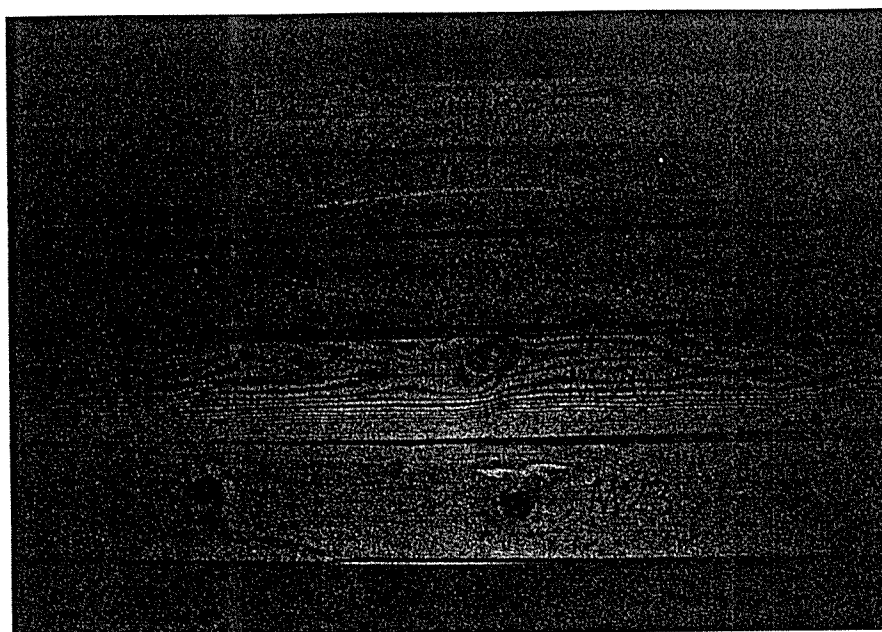


写真4、Dラミナ

Cラミナは等外とはいえ、比較的高いMOE_rの値を示した。ただし、各特性のパラッキは非常に高い値となった。

Dラミナは他に比べて死節や抜け節の多いことが特徴であった。平均年輪幅は小さいものの、集中節径比は4種類のラミナの中で最も高い値を示した。

2.2 試験方法

曲げ試験における試験体寸法とスパン等の関係を表2に示す。加力方式は両端支持の2点加力とし、油圧で試験体が最大荷重に達するまで荷重を単調増大させた。加力方向はいずれも試験体の幅広の面に荷重が加わる方向（フラットワイズ曲げ）とした。破壊までの時間は試験体により異なるが、およそ3～8分程度であった。

表2 試験条件

工場	縦つぎ	曲げ		引張
		L	l	d
A	なし	230	70	110
	FJ	230	70	55
B	なし	190	70	110
	FJ	230	70	55
C	なし	220	80	110
	FJ	220	80	110
D	なし	--	--	110
	FJ	--	--	110
	2PLY	--	--	110

なお、表2に示すように荷重スパンを大きくし、JAS規格に規定されたスパン-梁せい比の値(21)より大きな値に設定したのは、モーメント一定区間に含まれる欠点の量を出来るだけ大きく取ろうとしたためである。

曲げヤング係数については、モーメント一定区間(MOE₁)と全スパン間(MOE_L)の2種類を測定した。ただし、結果と考察にはモーメント一定区間のMOE₁を用いることとする。

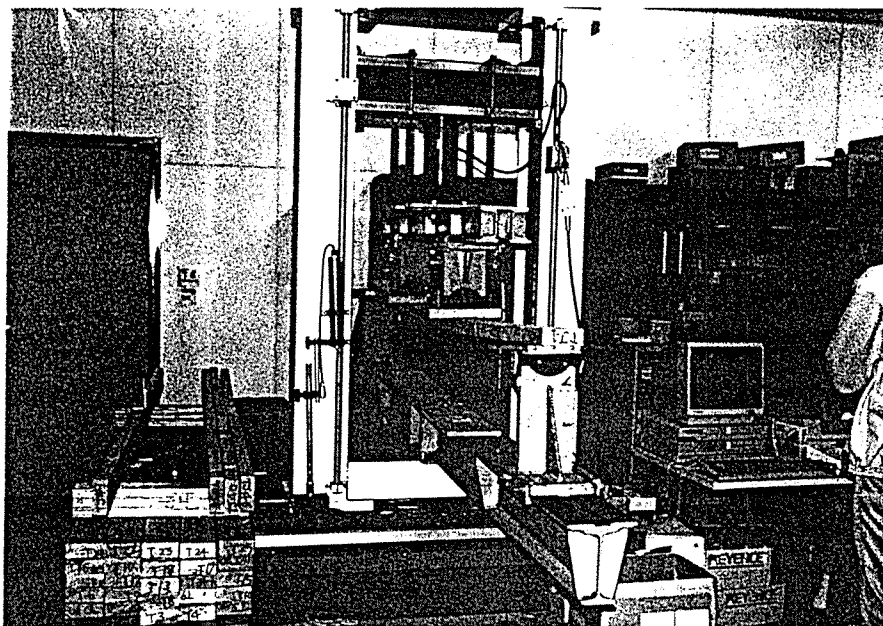


写真5、曲げ試験

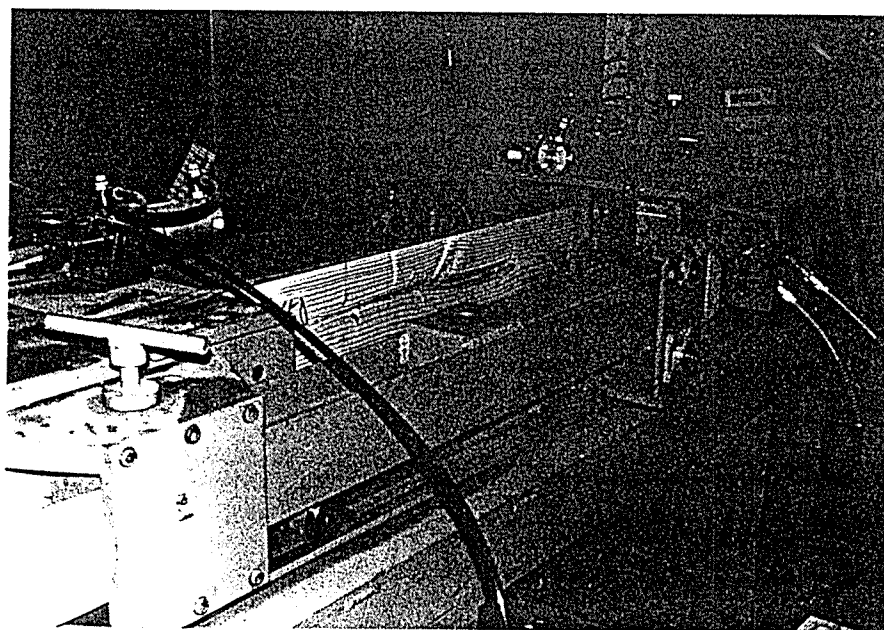


写真6、引張試験

引張試験には容量40トンの引張プルーフロダを用いた。引張グリップ間の距離は55~110cm (Table1)、破壊までの試験時間は約1~2分であった。

なお、AとBのFJラミナについては、ジョイントがラミナ長さの中央部に位置していなかったため、まずジョイントをグリップの中央にセットして(グリップ間距離55cm)引張試験を行ない、次に残りの部材について再度引張試験を行なった。すなわち1本の試験体について2度試験を行なった。ただし、最初の試験で大きなクラックや破損が生じて2度目の試験が不可能になったものについては、試験を行わなかった。

3. 結果と考察

3.1 曲げ強度特性

3.1.1 破壊形態

試験体の破壊形態の分類を表3に示す。低質ラミナの破壊形態の最も大きな特徴は節、FJ、目切れからの破壊が生じることであり、本試験では無欠点小試験体で観察されるような典型的な曲げ破壊は全く生じなかった。

表3 破壊位置

工場	縦つぎ	試片数	破壊箇所			
			荷重スパン間		せん断 スパン	目切れ
			節	FJ	節	
A	なし	25	17	--	4	4
	FJ	25	12	11	1	1
B	なし	25	20	--	4	1
	FJ	25	11	9	4	1
C	なし	22	22	--	--	--
	FJ	25	12	10	1	2

表3から明らかなように、破壊はモーメント一定区間で生じるとは限らず、せん断スパン内で生じたものも多い。さらに、FJラミナであっても節で破壊したものも多い。なお、Cラミナで試験体数が22体となったのは、25体のうち3体で破壊が生じず、試験を中断したためである。

3.1.2 等級区分と曲げ強度特性の関係

表4に試験体の比重、平均年輪幅、最大集中節径比、曲げヤング係数(MOE_i)、曲げ強度(MOR)の一覧を示す。なお、比較参照のために森林総合研究所集成加工研究室のデータベースに入力されているベイマツNJラミナのデータ⁵⁾を表中に示した。ただし、この参照データは一調査例であって、調査当時(1985年頃)のベイマツラミナの強度特性を代表しているわけではない。

表4 曲げ試験結果

工場または等級	縦つぎ	試片数	比重	平均年輪幅 (mm)	集中節径比 (%)	MOE (tonf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
A	なし	25	0.483(8.7%)	6.39(19.9%)	34.6%(38.6%)	105(13.3%)	428(22.1%)
	FJ	25	0.481(4.5%)	5.43(20.3%)	38.1%(28.0%)	107(15.6%)	399(16.8%)
B	なし	25	0.461(9.7%)	6.49(23.4%)	41.0%(42.4%)	90(16.3%)	336(25.3%)
	FJ	25	0.472(6.1%)	6.03(25.1%)	36.1%(35.6%)	88(11.0%)	297(18.6%)
C	なし	22	0.489(12.7%)	4.73(33.4%)	32.1%(44.8%)	135(22.3%)	576(32.6%)
	FJ	25	0.514(10.0%)	6.17(27.1%)	36.6%(37.2%)	123(18.6%)	405(29.3%)
既データ3等	なし	43	0.499(9.4%)	5.07(33.2%)	28.5%(7.2%)	109(20.2%)	464(28.6%)
既データ4等	なし	43	0.481(8.2%)	5.73(27.8%)	40.3%(12.6%)	92(19.2%)	353(35.5%)
既データ等外	なし	25	0.483(13.4%)	5.68(29.9%)	61.5%(18.1%)	74(27.6%)	259(48.7%)

A、B、Cの各ラミナ毎に強度特性と等級区分の関係を検討すると、まずAラミナでは構造用大断面集成材の製造基準による3等の基準値（試料の95%以上で、 $MOE > 105 \text{ ton} \cdot \text{f} / \text{cm}^2$ および $MOR > 405 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ 、さらに集中節径比が1/3以下）程度の平均値を示していることがわかる。したがって、4等ラミナの集中節径比の規定（1/2以下）がなければ、強度的には4等ラミナとして使用可能なものも含まれていると思われるが、視覚等級区分のみではこの程度の精度となるのは避けられないであろう。

BラミナはMOEもMORも低い値であるため、4等ラミナとして使用するのには困難であると思われる。本ラミナの等級区分方法で用いられているストレスグレンジングマシン法は、全く使用に適さないラミナを除外するという意味で非常に適切なものであると言えよう。

一方Cラミナでは材質の良否のバラツキが大きく、2等に適合するようなラミナも少数含まれていた。また、心持ちの規定により3等とはならないが、4等には適合するようなラミナも含まれていた。このようにCラミナについては工場における等級区分方法をより厳密にする必要があると思われるが、材料の母集団としては等外と判断せざるを得ないと考えられる。

AおよびCラミナでは参照ラミナの4等および等外より高い強度性能値を、またBラミナでも参照ラミナの等外より高い値を示している。これだけの事実から、直ちにベイマツラミナの強度特性の低下の有無を結論付ける事は出来ないが、少なくとも集成材の製造基準に従っている限り、同一等級におけるラミナの質的な低下は少ないのではないかと推定される。もちろん、上位等級のラミナの絶対数の減少といったような量的な問題は、別個に検討すべき内容であろうし、またこのような見解は低質のラミナについてであって、上位等級のラミナについてはさらに検討する必要があるだろう。

3.1.3 フィンガージョイントラミナと通しラミナの比較

表4で、FJラミナとNJラミナのMORを比較すると、いずれも平均値はNJラミナの方が高いことがわかる。しかしながら、FJラミナの方が変動係数が小さいため、下限5%値（正規分布を仮定）を比較すると、AとBではその関係が逆転する。このような平均値と下限値の大小関係の逆転は、ベイマツ低質ラミナのみならず、一般的なスギの縦つぎ材においても報告^{3,4)}されている。

3.1.4 心持ちの有無と曲げ強度特性の関係

試験体のデータを心持ちと心去りに区分し、それぞれの比重、平均年輪幅、曲げヤング係数（MOE）、曲げ強度（MOR）を一覧表にしたものを表5に示す。平均年輪幅を比較してみると、Bラミナでは心持ちの方が大きな値を示しているが、Aラミナでは心去りの方が大きな値となっている。

表5 心持ちと心去りの比較

工場	縦つぎ	種類	試験体数	比重	平均年輪幅 (mm)	MOE (ton·f/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
A	なし	心持ち	16	0.477(10.2%)	6.30(23.8%)	105(14.9%)	408(10.2%)
		心去り	9	0.493(4.7%)	6.57(10.3%)	117(15.0%)	463(19.0%)
	FJ	心持ち	9	0.480(3.6%)	5.15(22.9%)	107(16.3%)	393(13.1%)
		心去り	16	0.482(4.9%)	5.58(18.2%)	103(12.2%)	402(18.5%)
B	なし	心持ち	12	0.469(12.1%)	4.55(38.0%)	90(26.5%)	322(26.5%)
		心去り	13	0.455(6.2%)	7.11(13.7%)	86(12.7%)	349(23.7%)
	FJ	心持ち	11	0.472(6.3%)	5.99(28.4%)	94(16.5%)	292(16.5%)
		心去り	14	0.471(5.8%)	6.06(22.1%)	84(20.9%)	301(19.9%)

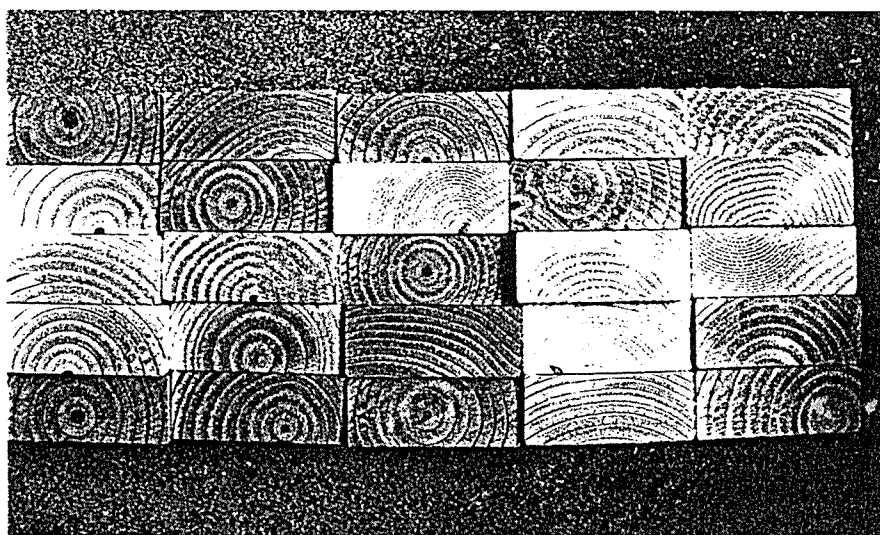


写真7、ラミナの断面（Bラミナ）

またMORを比較してみても、Aラミナでは心去りの方が高い値を示し、逆にBでは心持ちの方が高い値を示している。このように、ラミナによって心持ちの有無と曲げ強度特性の関係は逆転するが、その差は大きなものではない。Aの通しラミナでは若干大きな差が見られるがこれはMOEの差が大きいためであろう。

いずれにしてもここで得られたデータから判断する限り、両者に大きな差は無く、本試験体のように欠点の非常に多い材料では、心持ちの有無が強度特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.1.5 曲げ強度と諸因子の相関

比重、平均年輪幅、集中節径比、MOE_iを独立変数とし、MORを従属変数としたときの相関係数の一覧を表6に示す。

独立変数の範囲が広いCラミナの場合には、比重とMOR、あるいはMOEとMORの間に比較的強い相関が得られるが、その他の場合にはいずれの因子ともMORとの相関が弱い。

ラミナの種類によって傾向は異なるが、一般的に低質ラミナでは諸因子とMORの相関は明確でないと考えてよいであろう。

表6 曲げ強度と他の因子の相関係数

工場	縦つぎ	比重	平均年輪	節径比	MOE
A	なし	0.45	-0.459	-0.236	0.486
	FJ	0.267	-0.295	-0.196	0.367
B	なし	0.285	-0.239	-0.224	0.504
	FJ	0.323	-0.254	-0.104	0.487
C	なし	0.604	-0.571	-0.484	0.769
	FJ	0.716	-0.572	-0.147	0.705

3.2 引張強度特性

3.2.1 破壊形態

試験体には曲げの場合と同様に節、FJ、目切れからの破壊が生じ、破壊部分がささくれ立つような典型的引張破壊は全く生じなかった。

NJの破壊形態は、いずれのラミナでも節から破壊するものが大部分であった。一方FJの場合、節から破壊するものが約半数で残りはフィンガージョイントから破壊を生じた。

なお、Dの2プライ積層材でもフィンガージョイントから破壊するものが半数を占めた。

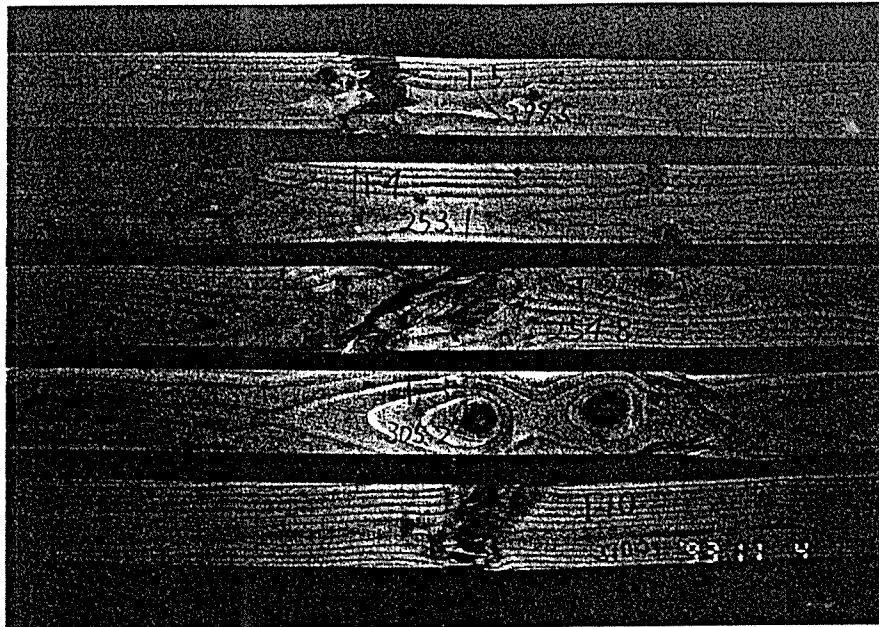


写真 8、引張破壊の一例（Bラミナ）

3.2.2 引張強度と諸因子の関係

表 7 に試験体の平均年輪幅、最大集中節径比、曲げヤング係数（ MOE_t ）、引張強度（ TS ）、 TS と MOR の比を示す。なお、AとBのFJラミナの TS の値は、1本の試験体について2度試験を行なったうちの低い方の値である。

まず、NJラミナの TS/MOR を見てみると、およそ50%程度の値を示していることが分かる。木構造計算規準に示された許容応力度では両者の比を約60%程度に仮定していることを考えれば、低質なラミナでは TS/MOR の値が単なる素材より低いと言えよう。

表 7 引張試験結果

工場または等級	縦つき	試片数	平均年輪幅 (mm)	集中節径比 (%)	MOE (ton·f/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	引張/曲げ (%)
A	なし	25	6.79(19.8%)	35.8%(32.2%)	103(13.1%)	207(27.5%)	48.3
	FJ	25	5.59(16.5%)	32.8%(50.9%)	110(18.6%)	271(27.6%)	67.9
B	なし	25	6.91(20.0%)	40.7%(32.3%)	88(12.7%)	165(38.8%)	49.1
	FJ	25	6.14(24.9%)	40.0%(25.2%)	87(11.1%)	186(23.5%)	62.6
C	なし	25	4.69(39.6%)	34.9%(36.6%)	136(21.6%)	293(51.6%)	50.9
	FJ	25	5.31(31.5%)	35.6%(55.4%)	121(17.6%)	238(41.7%)	58.8
D	なし	25	3.38(63.7%)	45.2%(33.9%)	97(22.7%)	138(36.5%)	-----
	FJ	25	2.79(47.2%)	43.8%(28.1%)	108(19.0%)	128(34.8%)	-----
	2プライ	25	-----	-----	-----	205(31.6%)	-----

次に TS の変動係数を見てみると、 MOR のそれ（表5）に比べ高い値を示していることが分かる。本試験体のように非常に欠点の多いラミナにおいても、 TS の方が MOR よりばらつきやすい傾向にあるのは、実大材の欠点と強度発現のメカ

ニズムを考える上で興味深い。

N J と F J を比較すると、A と B では F J ラミナの方が高い T S の値を示している。先にも説明したように両者の T S の値は 2 度試験を行なったうちの低い方の値であるため、F J で破壊したものだけに限れば、T S の値はさらに高いものとなる。すなわち、このように欠点の多い材ではフィンガージョイントで接合した方が高い平均値となることもあることが分かる。

心持ちの有無が T S に及ぼす影響については、曲げの場合と同様に顕著でなかったため、ここでは比較のための一覧表を省略した。

比重、平均年輪幅、集中節径比、M O E f を独立変数とし、T S を従属変数としたときの相関係数の一覧を表 8 に示す。

表 8 引張強度と他の因子との相関係数

工場	縦つぎ	比重	平均年輪	節径比	M O E
A	なし	0.311	-0.376	-0.202	0.769
	F J	0.48	-0.11	-0.395	0.603
B	なし	0.193	-0.55	-0.259	0.373
	F J	0.062	-0.018	-0.301	0.462
C	なし	0.187	-0.632	-0.632	0.77
	F J	0.334	-0.219	-0.479	0.765
D	なし	0.699	-0.344	-0.537	0.791
	F J	0.212	-0.06	-0.277	0.431

A、C、D の N J ラミナでは、M O E と T S の間に比較的強い相関が得られているが、B ではその傾向が見られない。他の場合にも、C の N J における平均年輪幅や D の N J における比重のように比較的強い相関が見られるものもあるが、概していずれの因子とも T S との相関が弱い。

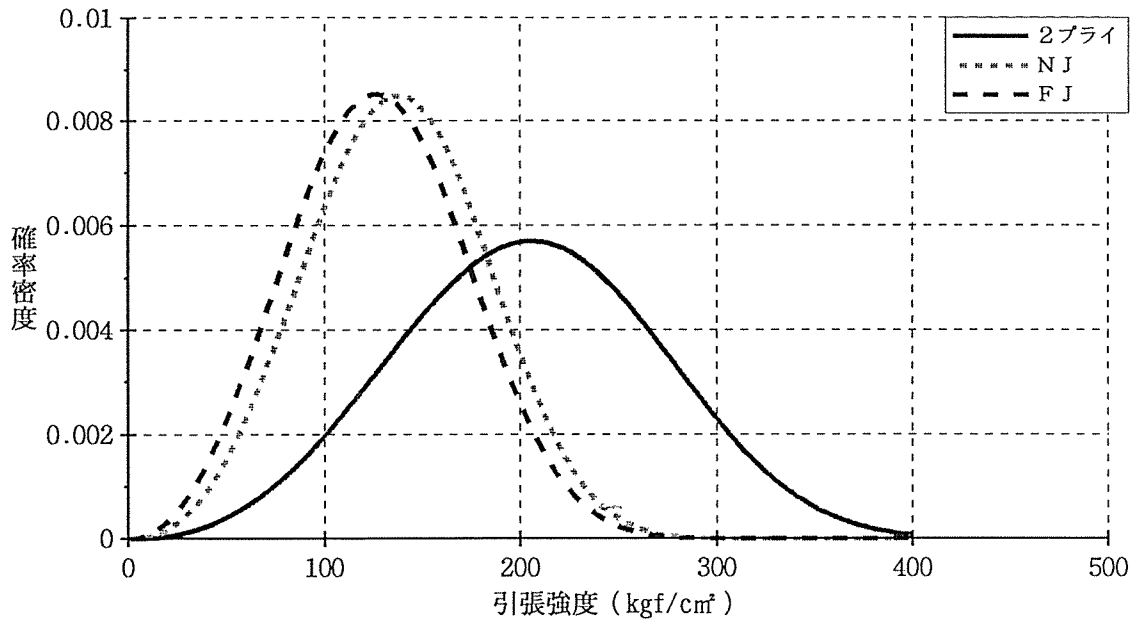
曲げの場合と同様に、一般的に低質ラミナでは T S と諸因子との相関が明確ではないと考えてよいであろう。

3.2.3 積層による引張強度の向上

D ラミナの N J、F J、および 2 プライの T S のデータに 2 パラメータワイブル分布を当てはめ、これを確率密度曲線として図示したものを図 1 に示す。この図から明らかなように、積層によって T S が顕著に増加していることが分かる。平均値で見ると 2 プライでは単層ラミナの約 50% 増加となっている（表 7）。

一般的なラミナを用いた 2 プライ積層材では、T S の平均値が単層ラミナの平均値に等しくなることが明らかにされているが、これに対し、本試験のように欠点の非常に多い低質ラミナでは、平均値が顕著に増大する事が明らかになった。

2プライ積層材とラミナの引張強度の比較



一方バラツキについてみると、2プライ積層材はNJとFJに比べ小さな変動係数の値を示している。今単純な確率変数の分散の加算が成立する⁶⁾と仮定すれば、2プライ積層材の分散 (σ^2_{2PLY}) はNJの分散 (σ^2_{NJ}) とFJの分散 (σ^2_{FJ}) の和から、

$$\begin{aligned}\sigma^2_{2PLY} &= \sigma^2_{NJ} + \sigma^2_{FJ} \\ &= (138 \times 0.365)^2 + (128 \times 0.348)^2 \\ &= 4520\end{aligned}$$

となる。従って、2プライ積層材の標準偏差 (σ_{2PLY}) は

$$\sigma_{2PLY} = \sqrt{4520} = 67.23$$

となる。この値は実験データから得られた64.78に近く、確率変数の分散については単純な加算がほぼ成立していると推定される。

4. まとめ

わが国の集成材工場4カ所から、何らかの理由で等外品と判定されたラミナを各100本（通しラミナ50本、縦つぎラミナ50本）ずつ収集し、曲げ・引張試験を行って強度特性を検討したところ、次のような結果が得られた。

①、低質な等外ラミナといっても、ラミナの寸法や形状によって様々な特徴が見られる。

②、試験体の破壊は節、目切れ、F J等の欠点から生じ、無欠点小試験片のような破壊形態とはならない。

③、F Jラミナの方が通しラミナより強度下限値が高くなることも多い。

④、通しラミナの場合、曲げ強度に対する引張強度の比は50%程度である。

⑤、心持ちの有無は曲げおよび引張強度に対して、ほとんど影響を及ぼさない。

⑥、一般的に比重、平均年輪幅、集中節径比、曲げヤング係数等の因子と曲げおよび引張強度の相関は弱い。

⑦、低質ラミナを2プライ積層した材料の引張強度は単層のラミナのそれより著しく高く、顕著な積層効果が見られる。

参考文献

- 1) 日本農林規格：“構造用大断面集成材の日本農林規格”，日本合板検査会，1987，p.1-22.
- 2) 日本木材加工技術協会：“構造用大断面集成材の製造基準”，1991，p.1-34.
- 3) 林 知行ほか3名：木材学会誌，38(11)，1026-1034（1992）.
- 4) 林 知行ほか3名：木材学会誌，39(9)，980-984（1993）.
- 5) 森林総研集成加工研究室：“集成材ラミナのデータベース”、未発表
- 6) 林 知行：木材工業，47(4)，p.152-156（1992）.