

平成8年度 農林水産省補助事業
技術開発研究推進事業
技術開発推進事業

複合ばり開発事業報告書

平成9年3月

財団法人 日本住宅・木材技術センター

序

当財団は、林野庁の助成を受けて「技術開発推進事業」を長年にわたり進めている。この事業の実施に当たっては課題ごとに委員会を組織し、また必要に応じて分科会を組織して実施計画・実行内容を検討し、年度ごとに報告書を作成している。

本書は、第Ⅰ編には「複合梁開発委員会」で取りまとめた昭和62～平成5年度のスギ正角材の現場接着接合による重ね梁の製造試験と性能試験のうち、重ね梁の曲げクリープ試験の部分を、第Ⅱ編には「集成材構造委員会」で取りまとめた平成3～5年度の集成材のクリープ試験と集成材を用いた接合部及びファスナーのクリープ試験のうち、集成材のクリープ試験の部分を、「木質系梁材の曲げクリープ特性」の観点で当(財)日本住宅・木材技術センターにおいて整理したものである。

本書の内容を企画・実行した二つの委員会の構成は次のとおり。

(1)複合梁開発委員会の構成

(所属・肩書きは事業実施当時)

委員長	平嶋 義彦	静岡大学農学部 森林資源科学科 助教授
委員	上西 秀夫	東京工芸大学工学部 建築学科 教授 (昭和62～平成2年度)
委員	徳田 迪夫	三重大学生物資源学部 森林資源学コース 教授
委員	丸山 則義	静岡大学農学部 森林資源科学科 (昭和62～平成元年度)
委員	宮澤 健二	工学院大学工学部 建築学科 助教授 (平成元年度～)
委員	佐藤 雅俊	建設省建築研究所 第二研究部 有機材料研究室 主任研究員
委員	井上 明生	農林水産省森林総合研究所 木材化工部 接着研究室 主任研究官
委員	故川元 紀雄	農林水産省森林総合研究所 木材利用部 接合研究室 (昭和62～平成4年度)
委員	藤井 良隆	三井ホーム(株)技術開発研究センター 次長 (昭和62～平成2年度)
委員	宮林 正幸	三井木材工業(株) システム建築室長 (昭和62～平成2年度)
委員	本田喜美登	日本木造住宅産業協会(殖産住宅相互(株)課長) (平成3～5年度)
委員	荒木 五郎	全国LVL協会 (大鹿振興(株)部長) (平成3～5年度)
協力委員	高橋 哲弘	林野庁林政部 林産課 企画官 (昭和62年度)
協力委員	保立 透	林野庁林政部 林産課 住宅木材専門官 (昭和62～63年度)
協力委員	春川 真一	林野庁林政部 林産課 課長補佐 (平成元～3年度)
協力委員	塚田 市朗	林野庁林政部 林産課 課長補佐 (平成4～5年度)
協力委員	宮澤 俊輔	林野庁林政部 林産課 係長 (平成4年度)
事務局	小倉 高規	(財)日本住宅・木材技術センター 試験研究部長 (昭和62～63年度)
事務局	倉田 久敬	(財)日本住宅・木材技術センター 試験研究部長 (平成元～2年度)
事務局	牧 勉	(財)日本住宅・木材技術センター 試験研究部長 (平成3年度～)
	鷺海 四郎	(財)日本住宅・木材技術センター 主任研究員

(2)集成材構造委員会の構成

(所属・肩書きは事業実施当時)

委員長	有馬 孝禮	東京大学農学部 林産学科 助教授
委員	徳田 迪夫	三重大学生物資源学部 森林資源学コース 教授
委員	五十田 博	信州大学工学部 社会開発工学科(建築学) (平成5年度)
委員	佐藤 雅俊	建設省建築研究所 第二研究部 有機材料研究室 主任研究員
委員	林 知行	農林水産省森林総合研究所 木材利用部 集成加工研究室 主任研究員
委員	楠 寿博	(株)竹中工務店 技術研究所 研究員 (平成3～4年度)
委員	木村 衛	(株)竹中工務店 技術研究所 主任研究員 (平成5年度)
委員	丸山 則義	鹿島建設(株) 技術研究所 第二研究部 主任研究員
委員	伊東 洋路	セブン工業(株) 課長
委員	高木 和芳	トリスミ集成材(株)
協力委員	春川 真一	林野庁林政部 林産課 課長補佐 (平成3年度)
協力委員	塚田 市朗	林野庁林政部 林産課 課長補佐 (平成4～5年度)
協力委員	宮澤 俊輔	林野庁林政部 林産課 係長 (平成4年度)
協力委員	荒武 志朗	宮崎県工業試験場 工芸支場
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

木質系梁材の曲げクリープ特性

まえがき

本書は次の2編から成り立っている。

第I編 接着接合によるスギ材重ね梁の曲げクリープ特性

第II編 梁用の製材及び集成材の曲げクリープ特性

第I編では、スギ正角材を現場接着接合によって重ね梁とした材料について、含水率変動に伴う長期の曲げクリープ特性を調査し、曲げ性能改善の試みを提案している。

第II編では、現在利用されている、あるいは今後利用が期待されているスギ、カラマツ、ベイマツの3樹種について、集成材(スギ製材を含む)の曲げクリープ実験の結果を示している。

編・章だて及び本書の基となった報告書の執筆者は次のとおり。

第I編 接着接合によるスギ重ね梁の曲げクリープ特性

第1章 乾燥過程におけるスギ材の曲げクリープ特性

第2章 スギ製材及び接着重ね梁の含水率低下過程での曲げクリープ特性

第3章 スギ接着重ね梁の曲げクリープ特性に及ぼす初期含水率の影響

第4章 スギ接着重ね梁の曲げクリープ特性改善の試み

第5章 スギ接着重ね梁の曲げクリープに関する使用指針

徳田 迪夫 三重大学生物資源学部 森林資源学コース

第II編 梁用の製材及び集成材の曲げクリープ特性

第1章 梁用のスギ製材及びスギ集成材の曲げクリープ特性

荒武 志朗 宮崎県工業試験場 工芸支場

第2章 梁用カラマツ集成材の曲げクリープ特性

五十田 博 信州大学工学部 社会開発工学科

第3章 梁用ベイマツ集成材の曲げクリープ特性

楠 寿博 (株)竹中工務店 技術研究所

要 約

今後増加する国産材の用途開発及びユーザーの多様化に対応できる技術開発として、昭和62年度から複合梁開発委員会において、複合梁開発の調査・検討を進めてきたところである。

本年度は、これまで委員会で調査・検討して取りまとめた事業報告書を基に、「接着接合によるスギ材重ね梁の曲げクリープ特性」及び「梁用の製材及び集成材の曲げクリープ特性」を体系的に取りまとめたものである。

第Ⅰ編では、スギ正角材を現場接着接合によって重ね梁とした材料について、含水率変動に伴う長期の曲げクリープ特性を調査し、曲げ性能改善の試みを提案している。

第Ⅱ編では、現在利用されている、あるいは今後利用が期待されているスギ、カラマツ、ベイマツの3種について、集成材（スギ製材を含む）の曲げクリープ実験の結果を示している。

キーワード

クリープ特性、ヤング係数、曲げ剛性、重ね梁、含水率、たわみ、全乾法、せん断試験、曲げ試験、載荷方法、負荷荷重、相対湿度、収縮量、経時変化、小荷重法、グレーディングマシン、ラミナ、ひずみ、乾燥材、正角材

目 次

第 1 章 乾燥過程におけるスギ材の曲げクリープ特性

1. はじめに	.....	3
2. 試験体	.....	3
3. 試験方法	.....	3
4. 試験結果と考察	.....	5
4.1 生材及び乾燥材の含水率分布	.....	5
4.2 生材及び乾燥材の曲げヤング係数と曲げ剛性	.....	5
4.3 曲げクリープ性能	.....	7
5. 結論	.....	11

第 2 章 スギ製材及び接着重ね梁の含水率低下過程での曲げクリープ特性

1. はじめに	.....	12
2. 試験体	.....	12
3. 試験方法	.....	12
4. 試験結果と考察	.....	14

第 3 章 スギ接着重ね梁のクリープ特性に及ぼす初期含水率の影響

1. はじめに	.....	17
2. 試験体	.....	17
2.1 スギ材の含水率	.....	17
2.2 重ね梁の製造	.....	17
2.3 重ね梁の含水率	.....	17
3. 試験方法	.....	19
4. 試験結果と考察	.....	20
4.1 クリープたわみ	.....	20
4.2 クリープ曲線の実験式への適合性	.....	21
4.3 高周波式含水率計による測定値と全乾法による測定値の比較	.....	23

5. まとめ	24
--------	----

第4章 スギ接着重ね梁の曲げクリープ性能改善の試み

1. はじめに	25
2. 実験	25
2.1 試験体	25
2.1.1 スギ供試材の選定	25
2.1.2 重ね梁の断面構成	26
2.1.3 重ね梁の製造方法	27
2.1.4 せん断試験片	31
3. 試験方法	31
3.1 曲げ強度試験	31
3.2 せん断試験	31
3.3 曲げクリープ試験	32
4. 試験結果と考察	32
4.1 曲げ試験	32
4.1.1 Aシリーズ試験体について	32
4.1.2 Bシリーズ試験体について	34
4.2 曲げクリープ試験	35
5. 結論	36
6. 総括	36

第5章 スギ接着重ね梁の曲げクリープに関する使用指針

1. はじめに	52
2. 接着重ね梁のクリープ試験の総括	52
2.1 実験1	52
2.1.1 試験体	52
2.1.2 試験方法	52
2.1.3 試験結果	52
2.2 実験2	53
2.2.1 試験体	53
2.2.2 試験結果	53
3. ユーロコードにおけるクリープに及ぼす含水率の取り扱い	55

目 次

第1章 梁用のスギ製材及びスギ集成材の曲げクリープ特性

1.	はじめに	59
2.	試験方法	59
2.1	試験体	59
2.2	載荷方法及び測定方法	59
2.3	負荷荷重	60
3.	結果と考察	61
3.1	全たわみ-時間曲線 ($\delta(t)$ - t 曲線)	61
3.2	応力比別の $\delta(t)$ - t 曲線と温度、相対湿度、収縮量、含水率、小試験片重量の 経時変化	62
4.	クリープ曲線の予測	65
4.1	実験値の t^N 則への当てはめ	65
4.2	湿度変動に伴うたわみ挙動の把握	69
5.	まとめ	70

第2章 梁用カラマツ集成材の曲げクリープ特性

1.	はじめに	74
1.1	研究の背景	74
1.2	研究の目的	74
2.	試験体の概要	74
2.1	試験体の形状・寸法	74
2.2	試験体の曲げヤング係数の算出	75
2.2.1	小荷重法によるラミナの曲げヤング係数	75
2.2.2	グレーディングマシンによるラミナの曲げヤング係数	75
2.2.3	集成材の曲げヤング係数の算出	76
3.	試験方法	78
3.1	実験装置	78
3.2	載荷荷重の計算	78
3.3	治具の重量並びに錘の枚数と不足荷重の計算	79
3.4	載荷方法	79

3.5 計測方法	80
4. 実験結果	81
5. 考察	82
5.1 ヤング係数の実測値とラミナ構成に基づく計算値との比較	82
5.2 載荷初期のクリープたわみについて	83
5.3 温度・湿度の影響	86
5.4 含水率の影響	88
5.5 クリープ式(t^N 則)との対応	88
6. むすび	90

第3章 梁用ベイマツ集成材の曲げクリープ特性

1. はじめに	95
2. 試験体の概要	95
3. 試験装置概要	96
3.1 支持架台	96
3.2 錘及び載荷・除荷	96
3.3 計測方法	96
4. 試験方法	97
4.1 載荷方法	97
4.2 計測方法	99
5. 試験経過	100
6. 試験結果	101
6.1 載荷後4か月目までの変位	101
6.2 載荷後20日間のひずみ	102
6.3 初年度における2週間の連続変位測定(夏期第1回)	102
6.4 第2年度における2週間の連続変位測定(夏期第2回)	104
6.5 応力比0.5試験体において変位急増後の変位及びひずみの連続測定結果	104
6.6 載荷後3年間の変位	108
7. クリープ曲線の設定とクリープたわみの推定	110
7.1 変位計測結果とクリープ曲線式	110
7.2 推定相対クリープの算出	111
7.3 曲げ破壊実験の結果と推定相対クリープとの関係	111
8. まとめ	114

第 I 編

接着接合によるスギ重ね梁の曲げクリープ特性

第1章 乾燥過程におけるスギ材の曲げクリープ特性

1. はじめに

木材を曲げ部材として用いる際、重要なのはクリープ性能である。クリープ現象は複雑で、特に含水率が変化する場合の挙動については一定の法則さえ見いだされていない現状である。しかし、乾燥による木材の収縮が生じるときに荷重が加わると、予想されるよりもはるかに大きい変形が起こることが認められている。重ね梁は乾燥が十分でない材を使用して製造し、施工後に徐々に乾燥することが考えられるので、曲げクリープに及ぼす含水率変化の影響を的確に把握しておく必要がある。

乾燥過程のクリープ変形の定量的な考察は木材断面が大きくなるほど困難であるが、重ね梁を実際に使用する上で問題となるのは、初期含水率がどの程度ならば支障がないかという点である。従って本章では解明の糸口として、断面60×60mmのスギたるき材の単体による曲げクリープ試験を予備的に行った。

2. 試験体

スギの生材から60mm角、長さ3mのたるき材(心去り材)40本を製材した。スパン200cmで9kgまで荷重をかけて曲げヤング係数を測定した後、半分の長さに切断して2組に分け、一方(試験体番号01~40)は約2週間の人工乾燥を行った。他方(試験体番号01'~40')はクリープ試験まで乾燥しないようにシートをかけて保存した。

これらの試料の含水率を表1に示した。

クリープ試験にはこれらの中から表2に示した生材5本、乾燥材4本(内2本は気乾含水率程度)を供試した。

3. 試験方法

曲げクリープ試験は図1のごとく、スパン1,200mm、3等分点2点荷重方式で行った。支点と試験体の間には鉄プレートをはさみ、試験体のめり込みを防止した。

荷重はかご型の受けをスパン3等分点の2箇所それぞれ吊り下げ、そこに1本5kgの鉄棒を渡して載せていった。1/100mm目盛、ストローク50mmのダイヤルゲージを鉄アングルに固定し、スパン中央のたわみを測定した。載荷98kgまで、鉄棒を1本載せるごとにたわみを測定し、98kg載せた時点でクリープ試験を開始した。

試験は特別な温湿度コントロールのない実験室内で行った。

表1 スギ(断面60×60mm)生材・乾燥材の性質及び剛性(EI)の比較

試料 番号 生材	含水率 %	全乾 比重	MOE tf/cm ²	E I ×10 ⁵ kgf·cm	試料 番号 乾燥材	含水率 %	全乾 比重	MOE tf/cm ²	E I ×10 ⁵ kgf·cm	$\frac{(E I)_D}{(E I)_C}$
01'	60.8	0.46	54.4	61.5	01	14.2	0.46	59.4	62.0	1.01
02'	61.1	0.31	53.8	66.1	02	13.3	0.31	48.0	51.8	0.78
03'	70.7	0.36	40.6	44.2	03	14.9	0.36	62.0	63.9	1.45
04'	107	0.36	53.6	61.4	04	21.2	0.36	54.7	58.7	0.96
05'	41.1	0.46	97.3	113.0	05	12.9	0.46	92.8	98.2	0.87
06'	92.5	0.30	39.4	45.7	06	13.8	0.30	50.4	53.3	1.17
07'	129	0.31	57.2	67.3	07	13.1	0.31	70.1	73.7	1.10
08'	85.1	0.37	54.4	62.3	08	14.4	0.37	43.6	46.8	0.75
09'	37.5	0.47	76.4	89.3	09	12.5	0.47	117.6	124.5	1.39
10'	113	0.31	60.4	68.8	10	13.1	0.31	81.3	87.2	1.27
11'	177	0.35	48.5	55.2	11	21.2	0.35	62.4	66.9	1.21
12'	132	0.32	73.8	84.0	12	13.7	0.32	60.1	62.8	0.75
13'	63.9	0.32	51.8	59.0	13	13.6	0.32	61.4	64.1	1.09
14'	51.2	0.35	97.9	109.3	14	12.5	0.35	82.5	84.7	0.77
15'	113	0.47	71.7	82.2	15	28.1	0.47	96.6	106.4	1.29
16'	119	0.43	76.2	87.9	16	23.4	0.43	88.8	94.7	1.08
17'	63.1	0.36	112.2	128.4	17	13.2	0.36	105.0	112.0	0.87
18'	57.9	0.38	55.1	64.0	18	13.3	0.38	70.6	72.7	1.14
19'	48.7	0.37	98.0	112.0	19	15.2	0.37	102.2	109.6	0.98
20'	86.9	0.36	49.4	57.0	20	30.3	0.36	56.8	59.3	1.04
21'	75.7	0.31	57.7	60.3	21	14.5	0.31	60.7	63.4	1.05
22'	91.2	0.37	76.6	90.2	22	16.8	0.37	87.8	103.4	1.15
23'	40.7	0.44	88.0	91.3	23	12.2	0.44	98.9	102.6	1.12
24'	77.8	0.38	90.9	98.9	24	19.7	0.38	92.3	100.4	1.02
25'	90.8	0.36	66.8	68.4	25	23.7	0.36	74.2	76.0	1.11
26'	89.7	0.35	61.5	66.4	26	15.8	0.35	71.6	73.8	1.11
27'	104	0.43	91.7	101.0	27	16.9	0.43	110.2	121.4	1.20
28'	36.8	0.41	72.7	76.5	28	18.3	0.41	72.6	76.4	1.00
29'	36.8	0.47	90.2	93.6	29	13.7	0.47	91.0	94.4	1.01
30'	136	0.32	58.8	59.8	30	18.2	0.32	53.5	54.4	0.91
31'	80.7	0.37	57.8	62.0	31	12.6	0.37	55.9	59.9	0.97
32'	156	0.33	55.8	57.5	32	25.0	0.33	59.3	61.1	1.06
33'	54.9	0.50	52.4	66.6	33	21.5	0.50	62.3	79.2	1.19
34'	105	0.39	74.8	81.8	34	23.1	0.39	107.9	118.0	1.44
35'	119	0.30	51.6	53.6	35	16.1	0.30	57.0	59.2	1.10
36'	112	0.31	53.9	59.0	36	13.6	0.31	67.6	74.0	1.25
37'	87.0	0.40	76.9	81.9	37	19.2	0.40	88.8	94.7	1.16
38'	174	0.35	48.6	52.1	38	23.2	0.35	61.0	65.4	1.26
39'	46.3	0.35	74.6	78.5	39	12.6	0.35	99.2	104.4	1.33
40'	111	0.31	58.2	60.8	40	14.4	0.31	60.1	62.8	1.03
平均	88.4	0.37	67.0	74.5		17.0	0.37	75.0	80.0	1.09
S. D.	36.9	0.056	17.8	20.1		4.8	0.056	19.8	23.9	0.177
C. V. (%)	41.8	15.1	26.6	26.9		27.9	15.1	26.4	29.8	16.2

含水率：釘打ち込み式含水率計による。

(E I)_D：乾燥材の曲げ剛性 (E I)_C：生材の曲げ剛性

表2 クリープ実験に用いた試料

試験体記号	表1の試料番号	初期含水率 (%)	初期含水率時のMOE (tf/cm ²)	MOR ^{*1} (kgf/cm ²)
A-1	生材 19'	48.7	98.0	—
A-2	生材 17'	63.1	112.2	—
A-3	生材 12'	131.9	73.8	—
A-4	生材 24'	77.8	90.9	—
A-5	生材 14'	51.2	97.9	—
B-1	乾燥材 34	23.1	107.9	—
B-2	乾燥材 24	19.7	92.3	649
C-1	生材 19	15.2	102.2	621
C-2	生材 17	13.2	105.0	593

*1 クリープ荷重除荷後に、スパン1200mm、3等分点2点荷重で求めた値

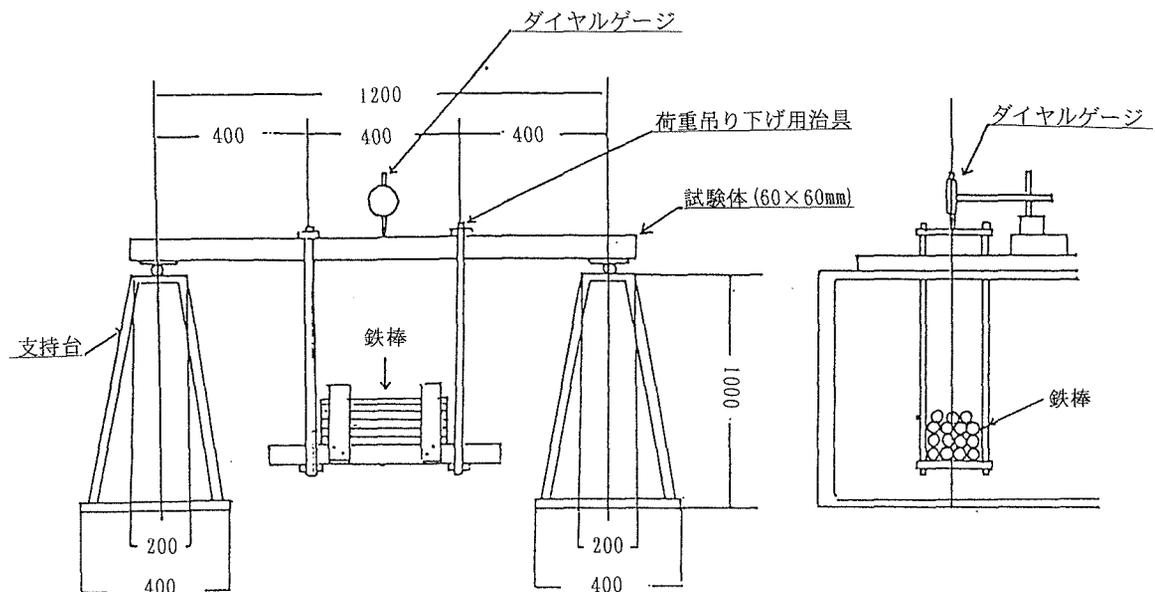


図1 曲げクリープ試験の方法(単位:mm)

4. 試験結果と考察

4.1 生材及び乾燥材の含水率分布

図2に生材、乾燥材それぞれ40本の含水率分布を示した。生材はばらつきが大きく、従って変動幅も大きい。乾燥材は分布の山が13~15%と、21~25%の二つに現れている。これはスギ材の特色として乾燥の早いものと遅いものがあるために人工乾燥の際にその違いが現れたものと思われる。

4.2 生材及び乾燥材の曲げヤング係数と曲げ剛性

生材及び乾燥材の曲げヤング係数と曲げ剛性の測定結果を表1に含水率と併せて示した。生材のヤング係数平均値は67.0tf/cm²、乾燥材は75.0tf/cm²で、乾燥により約12%増加し

ている。中井ら²⁾は70×70mm角のスギ材で17%増加したと報告しており、本実験の結果とほぼ一致している。また、スギの曲げヤング係数の平均値である60~90tf/cm²のうちにそれぞれ収まっている。

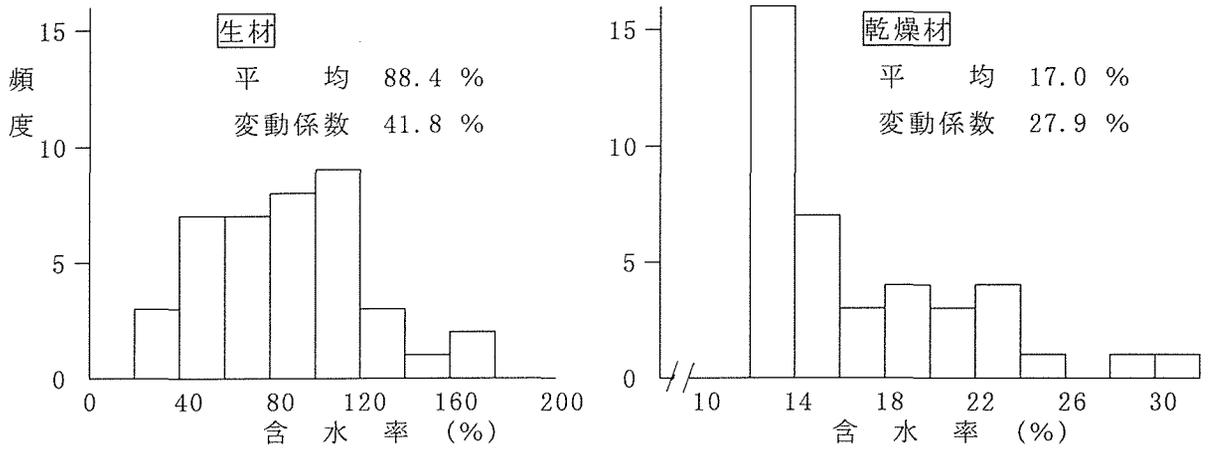


図2 スギ生材及び乾燥材の含水率分布(各40本)

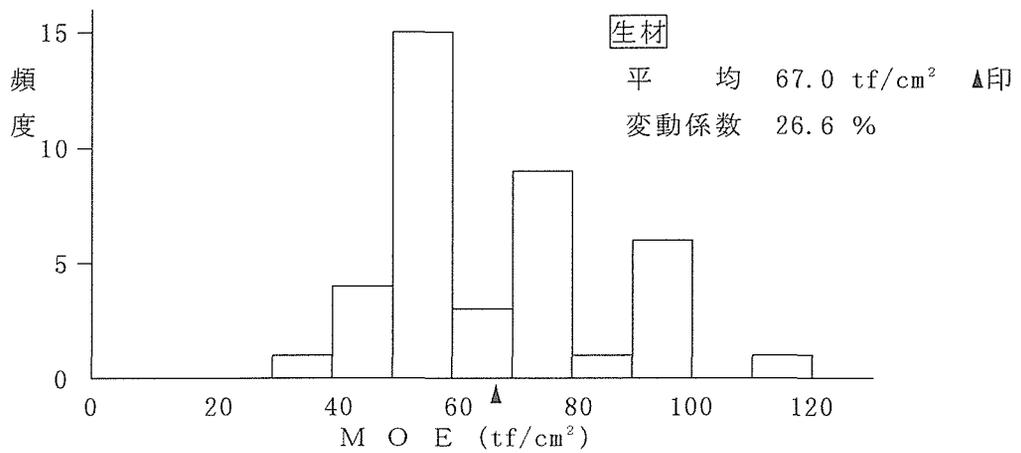


図3 スギ生材の曲げヤング係数の分布(40本)

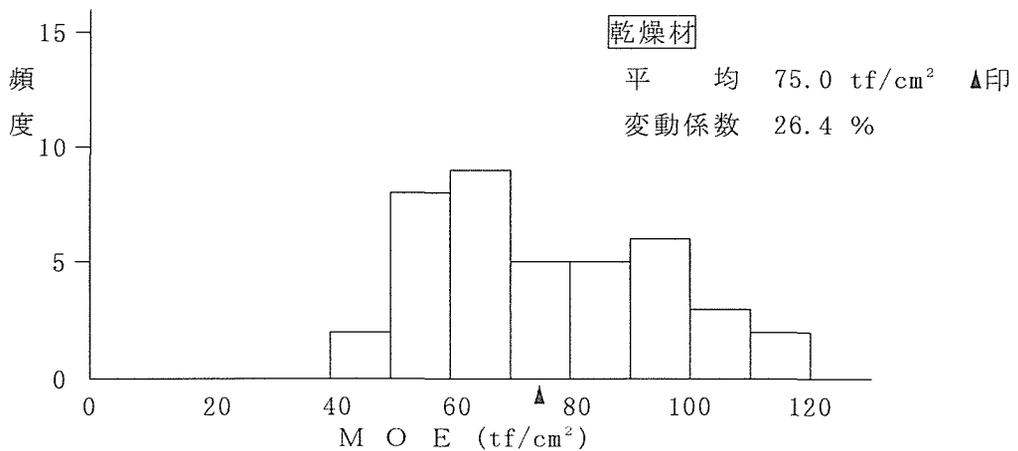


図4 スギ乾燥材の曲げヤング係数の分布(40本)

曲げ剛性についても測定結果を表1に併せて示した。生材と乾燥材の平均値について検定を行った結果、1%有意水準で両者に差はなかった。この結果も中井らの結果と同じである。しかし表1の $(EI)_0 / (EI)_c$ 欄に示したように、生材と乾燥材の比較では、 $(EI)_0 / (EI)_c > 1$ となるものが多く、乾燥材の曲げ剛性の方が僅かだが大きい傾向にある。

4.3 曲げクリープ性能

クリープたわみ曲線を図5及び図6に示した。

木材のクリープ曲線の実験式は、 t^N 則や $\log t$ 則で近似されるものが多い。すなわち、

$$\delta_c(t) = A \cdot t^N \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta_c(t) = a \cdot \log t + b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 t : 時間
 $\delta_c(t)$: クリープたわみ
 A, N, a, b : 定数

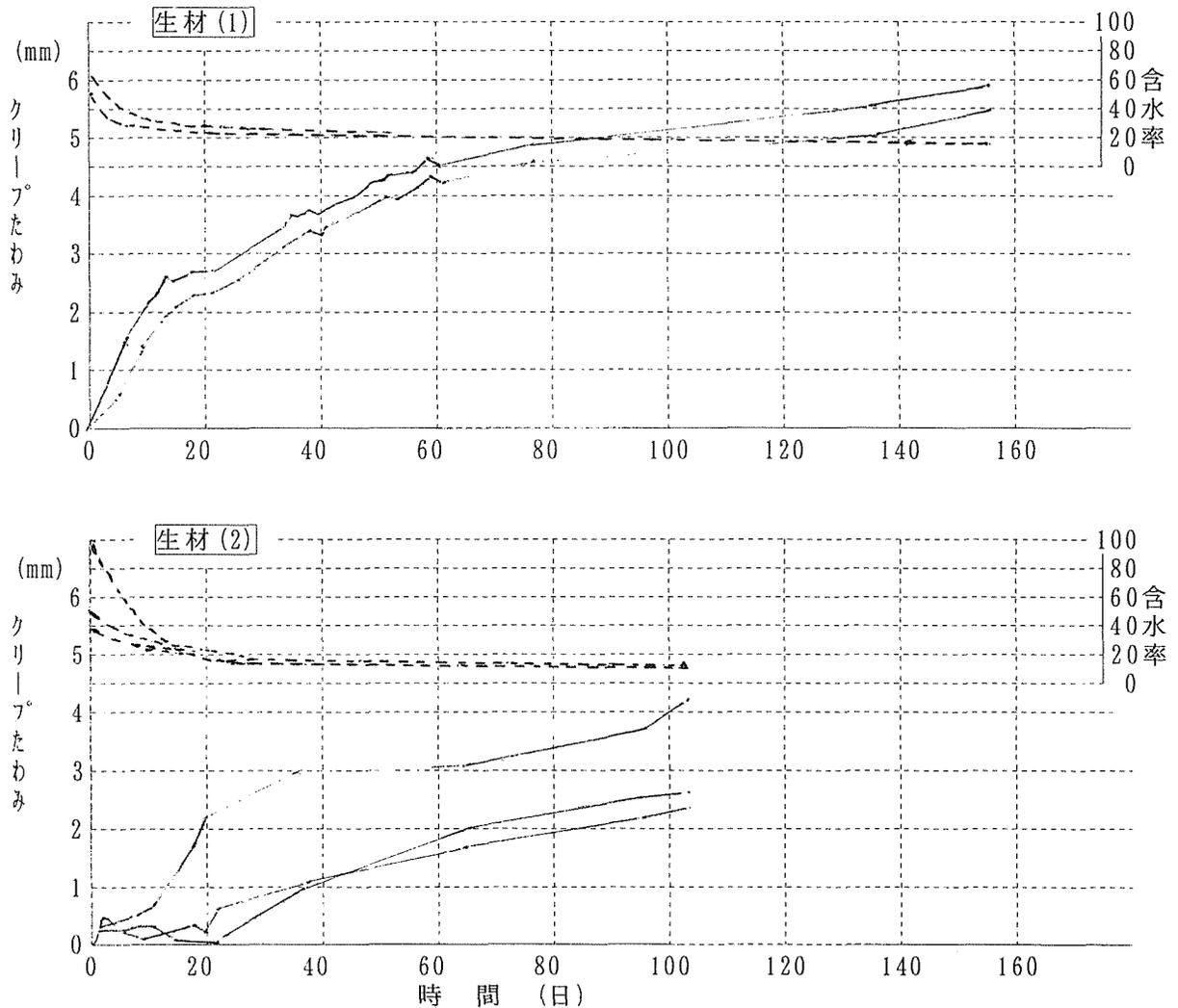


図5 生材の曲げクリープたわみ曲線と試験体含水率の推移

(1)式は比較的長時間で適合がよいとされているので、ここでは(1)式を採用する。
 時間 t に対する変位を $\delta(t)$ とすれば、

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_c(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

δ_0 : 初期たわみ

クリープたわみとして t^N 則の(1)式を採用すれば

$$\delta(t) = \delta_0 + A \cdot t^N \quad \dots\dots\dots (4)$$

これを相対クリープで表せば、

$$\delta(t)/\delta_0 = 1 + (A/\delta_0) \cdot t^N \quad \dots\dots\dots (5)$$

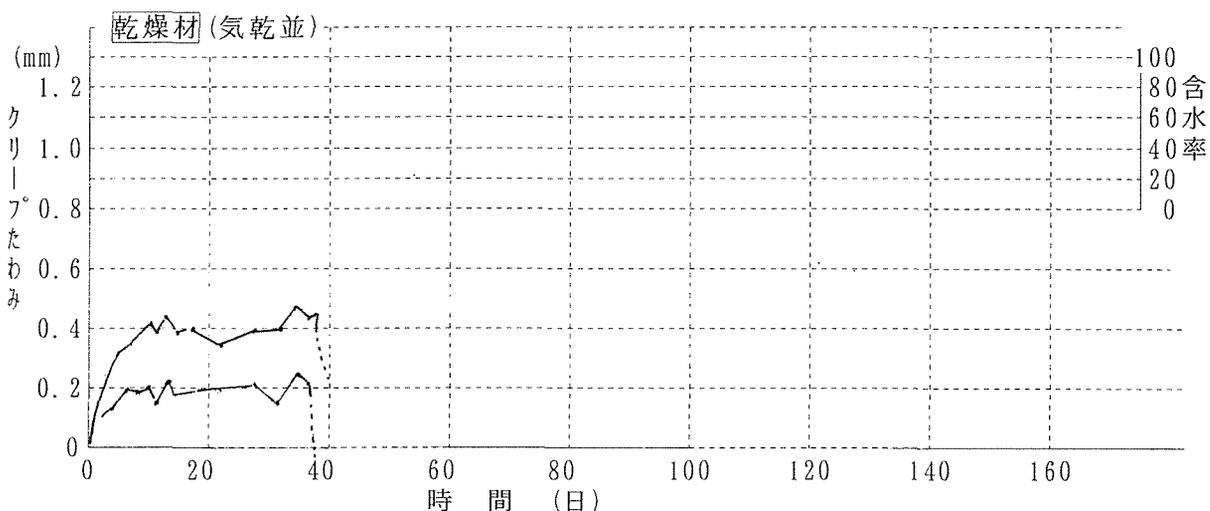
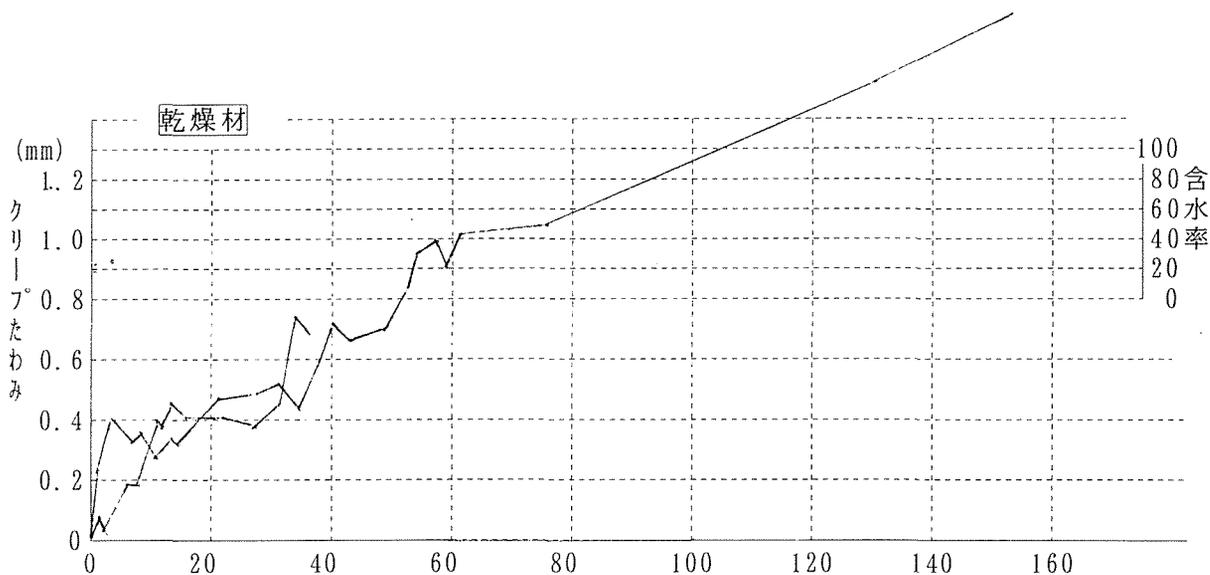


図6 乾燥材の曲げクリープたわみ曲線と試験体含水率の推移

図7にたわみと時間の両対数の関係を示した。この直線回帰から定数 A 、 N を求め、この値から10年後のたわみを算定して表3に示した。これを見ると、含水率が変化するときのクリープ性状は含水率一定の時とはかなり違っている。

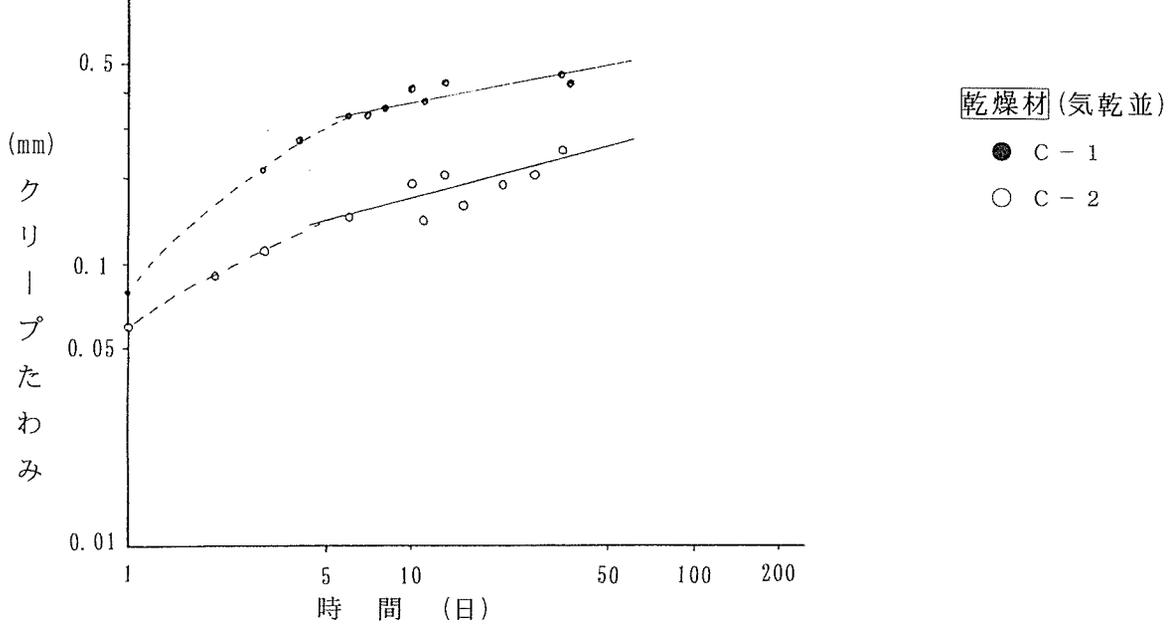
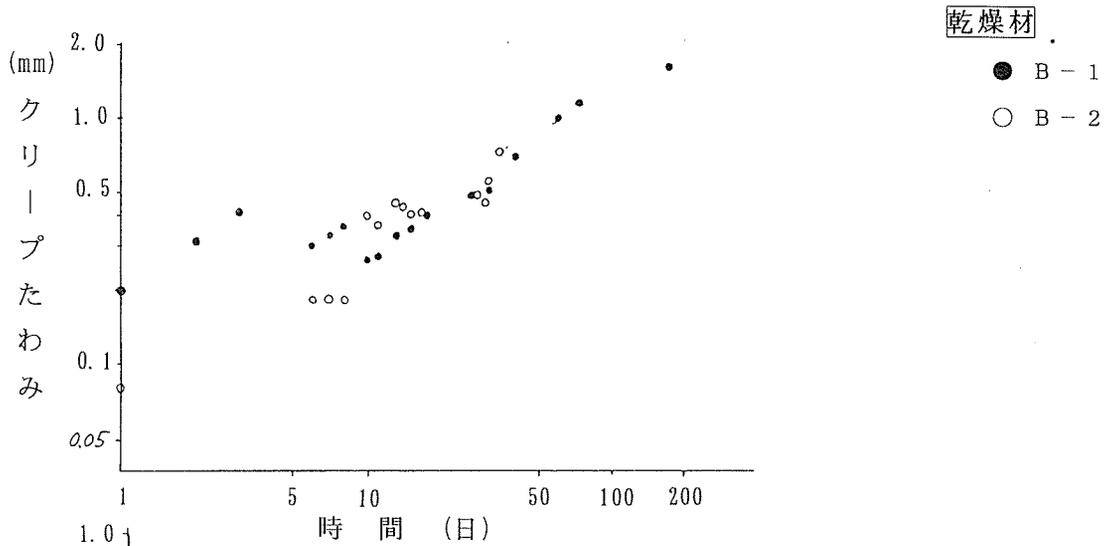
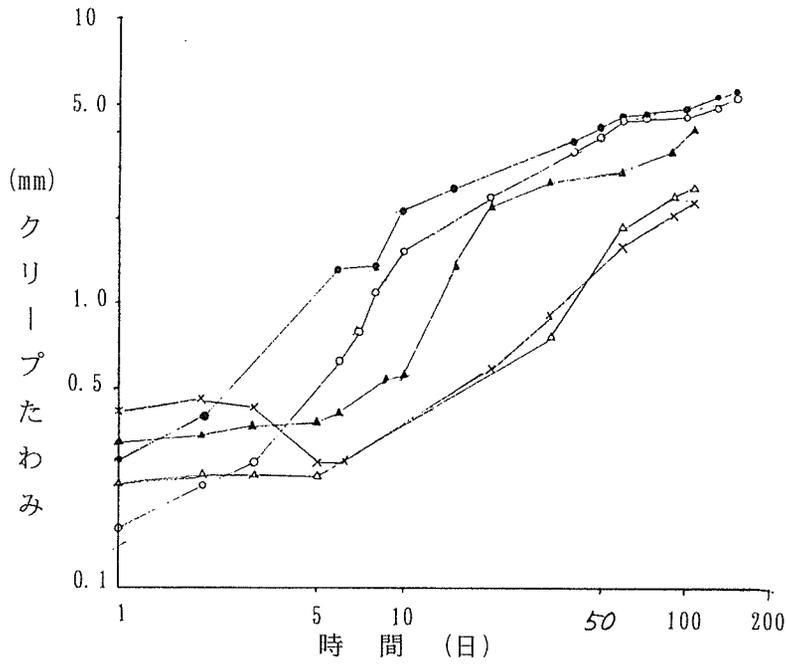


図7 対数グラフで示した時間(日)とクリープたわみの関係

定数Nについて見ると乾燥材では約0.2であるのに対し、高含水率材では0.35~0.6と大きい。従って初期たわみに対する10年後の推定たわみの比は気乾材で平均1.30であり、スギとしては比較的小さく、文献3)のヒノキ材の値に近い。それに対し、人工乾燥はされていても初期含水率が20%のBシリーズは5.10、生材のAシリーズでは平均6.42と極めて大きな値となっている。しかし、この値は載荷後50日から200日までのNの値が一定と考えた場合の値で、いわばクリープたわみの上限値と考えられる。実際には高含水率材でもやがて定常状態に入って、Nの値が気乾材のNに近づくと考えられる。いま、載荷後200日後にAシリーズ、BシリーズのNの値がCシリーズのNの値と等しくなったと仮定して $[\delta_{10\#}/\delta_0]$ を求めたのが表4である。この表の値は推定クリープたわみの下限値と考えられる。この考え方で表3と表4をまとめたのが表5でCシリーズの $\delta_{10\#}/\delta_0$ の平均値を1としたときの比を示してある。これを見ると湿潤材のクリープたわみは気乾材の2~5倍と見積もることができよう。これは床梁に用いる際は大きな問題で、スギ材では少なくとも含水率が20%以下でないとなわみ障害が生ずる恐れがある。

今後、断面の異なる材についての定量的なクリープ特性、及び定量的な特性を明らかにしていく必要がある。

表3 クリープ定数と10年後の推定相対クリープ
(適用した関数) $\delta(t)/\delta_0 = 1 + (A/\delta_0) \cdot t^N$

試験体記号と含水率状態		定数 A	A / δ_0	定数 N	相対クリープ° $\delta_{10\#}/\delta_0$
A-1	生材	0.946	0.336	0.352	7.03
A-2		0.759	0.296	0.387	8.08
A-3		0.437	0.107	0.440	4.95
A-4		0.155	0.046	0.552	5.26
A-5		0.139	0.045	0.592	6.72
B-1	乾燥材	0.099	0.037	0.573	5.10
B-2		B-1 にほぼ同じ			
C-1	乾燥材 (気乾並)	0.236	0.078	0.188	1.36
C-2		0.092	0.029	0.256	1.24

表4 載荷後200日以降のNの値が気乾材(Cシリーズ)と同一になると仮定したときの推定相対クリープ

試験体記号	δ_0 (mm)	$\delta_{200\#}$ (mm)	$\delta_{10\#}$ (mm)	相対クリープ° $\delta_{10\#}/\delta_0$
A-1	2.82	8.93	9.93	3.52
A-2	2.56	8.46	9.46	3.70
A-3	4.10	8.60	9.60	2.34
A-4	3.40	6.29	7.29	2.14
A-5	3.07	6.27	7.27	2.37
B-1	2.68	4.76	5.76	2.15

表5 10年後の推定相対クリープの範囲

試験体 記号	相対クリープ° $\delta_{10年} / \delta_0$	$\frac{(\delta_{10年} / \delta_0)_{Wet}}{(\delta_{10年} / \delta_0)_{Dry}}$
A-1	3.5~7.0	2.7~5.4
A-2	3.7~8.1	2.8~6.2
A-3	2.3~5.0	1.8~3.8
A-4	2.1~5.3	1.6~4.0
A-5	2.4~6.8	1.8~5.2
B-1	2.2~5.1	1.7~3.9
C-1 C-2	平均1.3	1

5. 結論

(1) スギたるきの乾燥による曲げヤング係数の上昇は約12%で、曲げ剛性は乾燥による断面寸法の減少もあって、生材と乾燥材とで、ほとんど差がなかった。

(2) 含水率20%以上の材に長期載荷荷重が加わると、木材の乾燥過程でクリープ変形が急激に進む。従ってスギを曲げ部材として使用する場合は、少なくとも初期含水率が20%以下であることが望ましい。

参考文献

- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発事業報告書 複合梁開発（昭和63年3月）
54-79(1988)
- 2) 中井 孝、田中俊成：間伐材等小径木の強度性質－曲げ剛性と曲げ破壊係数、
木材工業 Vol.39、No.5(1986)
- 3) 有馬孝礼ら：木質材料材料及び部材の長期耐力評価に関する研究、
建築研究所報告、No.95(1981)

第 2 章 スギ製材及び接着重ね梁の含水率 低下過程での曲げクリープ特性

1. はじめに

前章では断面60×60mmのスギ材を用いて含水率変動下の曲げクリープ性状について実験したが、初期の平均含水率が20%以上の場合には、初期たわみ(δ_0)に対する10年後の推定たわみ($\delta_{10年}$)の比($\delta_{10年}/\delta_0$)は5以上で、初期含水率が20%以下の場合の1.2~1.4に比べると極めてクリープし易いことが判明した。本章では実際に接着重ね梁として用いる105mm正角心持ち材と、これを3段に現場接着した接着重ね梁の実験を行い、果たして正角材の初期含水率が25~30%でよいのか、20%以下に乾燥させる必要があるのかについて検討した。

2. 試験体

試験材には国産のスギ材を用い、Aシリーズ、Bシリーズ、Cシリーズの3種類の実験を行った。各実験の試験体は次のとおり。

Aシリーズ：断面60×60mm、1.5m材(心去り材)

Bシリーズ：105mm正角、4m材(心持ち材)

Cシリーズ：105mm正角の4m材を3段に積層接着した接着重ね梁

スギ材はヤング係数の揃ったものを選び出した。接着重ね梁はウレタン系合成樹脂接着剤を塗布し、900mm間隔でM12ボルトによって締めつけて作製した。

クリープ載荷時の平均含水率(釘打ち込み式含水率計による)は次のように区分した。

平均含水率30%以上：以後 W と略す。自然乾燥材使用

20~30%：以後 D と略す。自然乾燥材使用

20%以下：以後 DD と略す。除湿乾燥材使用

3. 試験方法

曲げクリープ試験の方法を図1、図2に示す。シリーズごとの載荷条件は次のとおり。

実 験	試 験 体	スパン	荷重点	荷 重
Aシリーズ	断面60×60mm	120 cm	3等分点2点荷重	98 kg
Bシリーズ	105mm正角	360 cm	3等分点2点荷重	100 kg
Cシリーズ	105mm正角3層接着重ね梁	360 cm	5等分点4点荷重	1265 kg

接着重ね梁の場合に想定した載荷条件は床梁で、荷重は以下に基づく。

固定荷重 65 kg/m²

積載荷重 130 kg/m²

合計 195 kg/m²

195kg/m² × 1.8m(負担幅) × 3.6m(スパン) = 1,265kg

支点と試験体の間には鉄プレートをはさみ、試験体のめり込みを防止した。載荷は鉄の丸棒を順次載せ、クリープ荷重に達した時点からクリープ試験をスタートした。変位の測定はスパン中央1点とし、ダイヤルゲージを用いた。

実験室は特別な温湿度のコントロールはしていない。試験体の含水率変化をモニターするために、あらかじめ試験体の端部から切りだした小試片の木口面をアルミホイルでシールし、これをクリープ試験体の脇に置いた。そしてその重量を経時的に測定することにより試験体含水率の推移を推定した。

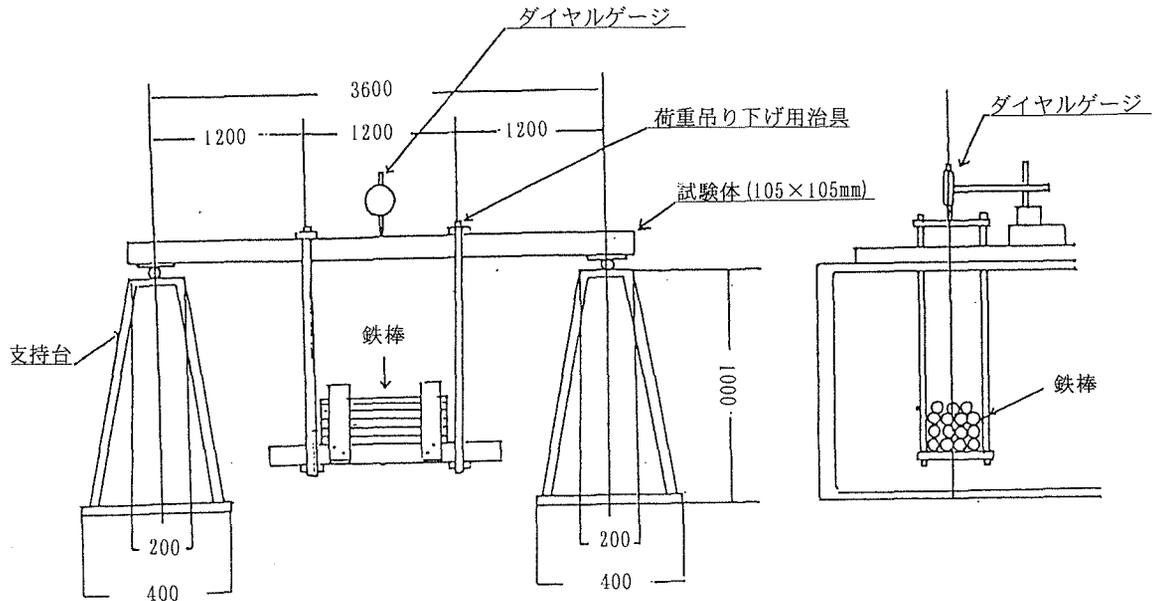


図1 A、Bシリーズの曲げクリープ試験の方法(単位:mm)
(寸法はBシリーズの場合。Aシリーズはスパン1200mm)

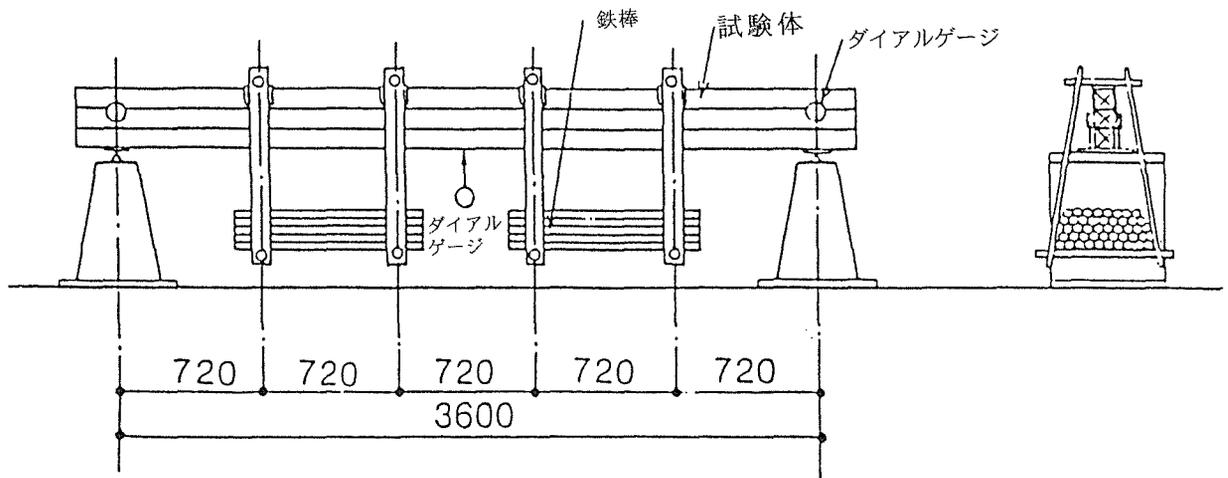


図2 Cシリーズの曲げクリープ試験の方法(単位:mm)

4. 試験結果と考察

クリープ曲線を図3～図5に示した。一般に木質材料のクリープ曲線の実験式は t^N 則や $\log t$ 則で近似できるものが多い。長時間側では t^N 則の適合性がよい。今、初期たわみを δ_0 、クリープたわみを $\delta_c(t)$ 、全たわみを $\delta(t)$ とすれば、

$$\delta_c(t) = A \cdot t^N \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_c(t) = \delta_0 + A \cdot t^N \quad \dots\dots\dots(2)$$

と表せる。ここで、A 及び N は定数。

これらを相対クリープで表せば、

$$\delta(t) / \delta_0 = 1 + (A / \delta_0) \cdot t^N \quad \dots\dots\dots(3)$$

この式に従い、たわみと時間の両対数関係の直線回帰式から実験定数 A 及び N を求め、(3)式によって算定した10年後の相対クリープを表1に示す。A-Wシリーズ(60×60mm材、平均含水率30%以上)では載荷後約30日までのクリープの進行が大きく、両対数グラフにプロットしたとき直線からずれる。そこで30日以降の値を使った場合の相対クリープの値も併せて示した。

表1で $(\delta_{10\#} / \delta_0)$ の値を通して眺めると、BシリーズとCシリーズは初期含水率に関係なく1.5～3の値をとっている。Aシリーズは心去り材を使用したために、木材内部の含水率分布が比較的均一で、乾燥に伴うクリープ変形が生じたが、BシリーズとCシリーズでは、水分の大部分は心材に集中していて材表面に近い部分は乾いており、曲げを受けたときにその曲げ剛性が乾燥材と大差無かったために、初期の平均含水率の違いによる相対クリープの違いは大きくなかったものと考えられる。この点については更に詳細な実験的検証が必要である。いずれにしても実験的事実として105mm角以上の心持ちスギ材を梁として用いる場合、平均含水率が70%程度であってもクリープたわみは平均含水率20%程度の材と変わりが無く、 $(\delta_{10\#} / \delta_0)$ の値は2～3と考えてよいであろう。

重ね梁(Cシリーズ)

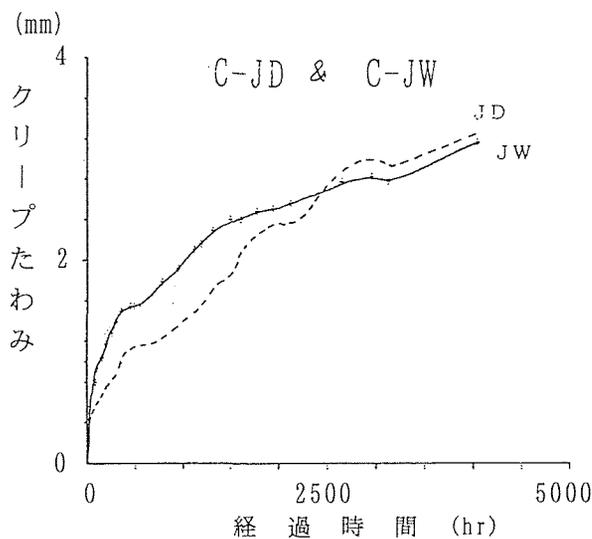
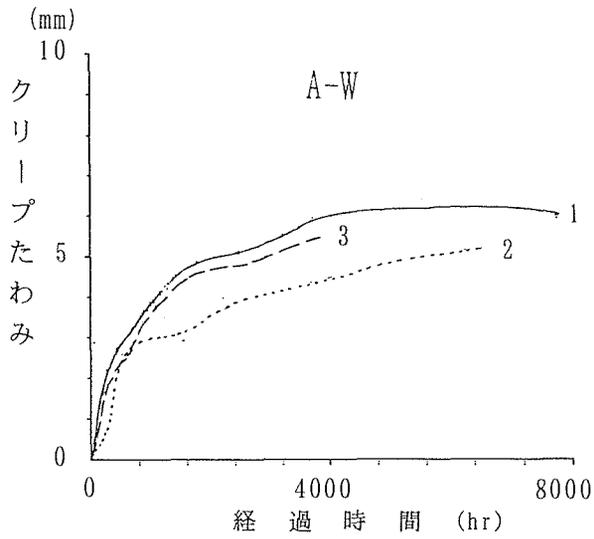


図3 クリープたわみ曲線(1)

60×60mm材 (Aシリーズ)



105mm正角 (Bシリーズ)

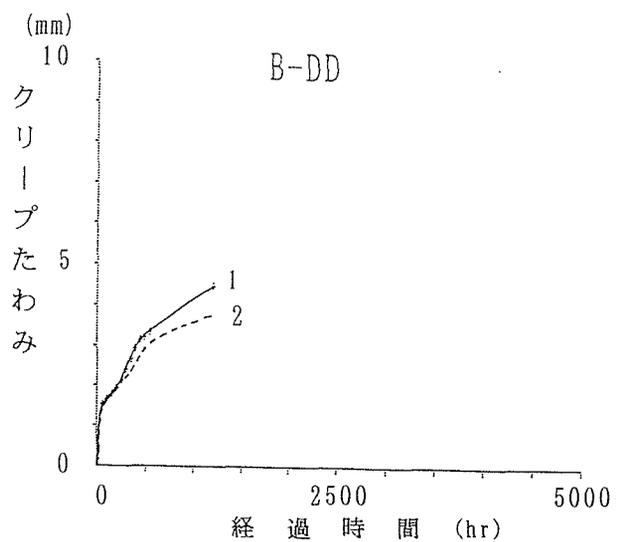
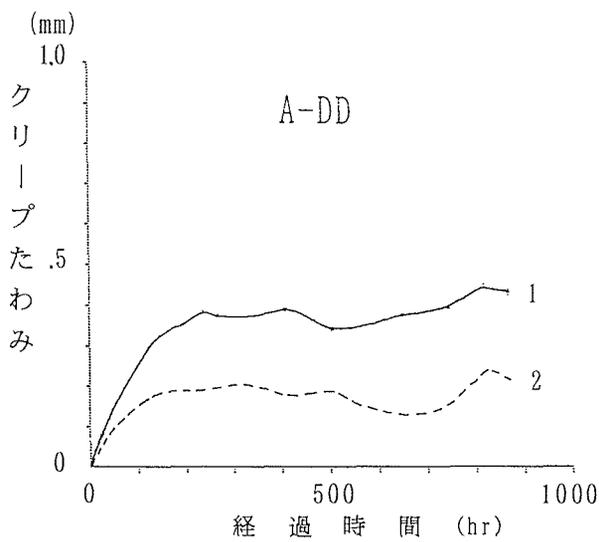
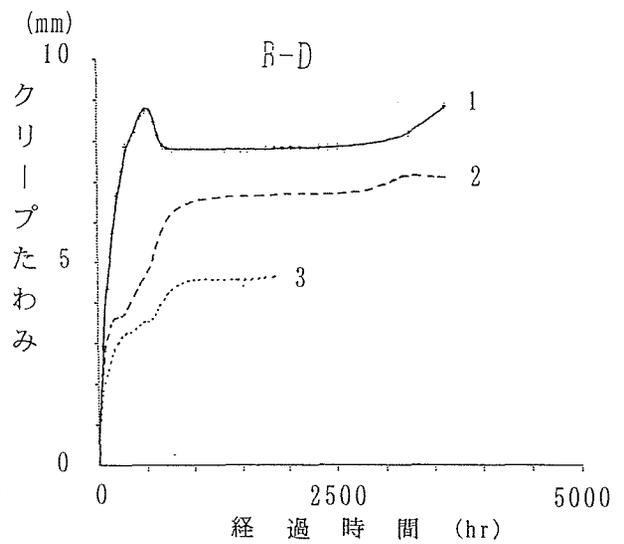
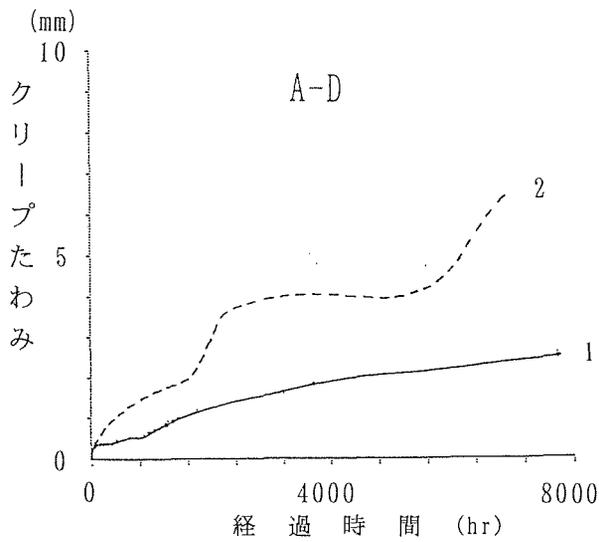
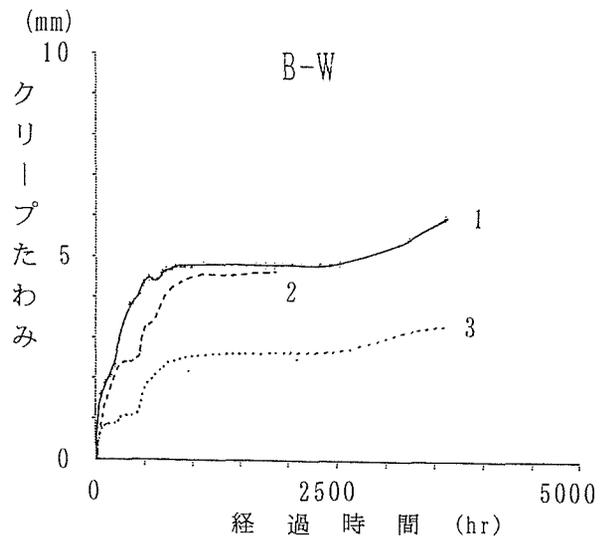


図4 クリープたわみ曲線(2)

図5 クリープたわみ曲線(3)

表1 t^N則による定数と10年後の推定相対クリープ

試験体	データ期間	*1 平均含水率		ヤング係数 (tf/cm ²)	初期たわみ δ_0 *2 (mm)	定数 A	定数 N	比 $\delta_{10年} / \delta_0$ (相対クリープ°)	
		・ 期間	・ 最終日						
A シ リ ー ズ	W-1	2~322日	48.7	11.7	98.0	2.82	0.0842	0.5468	16.1
		31~322日					0.5924	0.2725	6.81
60 × 60 mm 材	W-2	2~322日	63.1	11.8	112.0	2.56	0.0416	0.6234	20.6
		31~322日					0.5241	0.2774	11.3
60 × 60 mm 材	W-3	2~273日	95.4	11.8	73.8	4.14	0.0210	0.6743	12.0
		34~273日					0.3507	0.3064	4.49
	D-1	2~322日	23.1	11.8	107.9	2.68	0.0231	0.4966	3.42
		D-2	2~36日	19.7	19.0	92.3	3.37	0.0075	0.6498	4.63
	DD-1	2~36日	15.2	15.6	102.2	3.02	0.1074	0.2061	1.37
		DD-2	2~36日	13.2	13.8	105.0	3.16	0.0484	0.2171	1.18
B シ リ ー ズ	W-1	2~151日	31.8	20.2	68.7	12.93	0.6567	0.2747	2.16
		W-2	2~77日	63.7	49.2	62.0	12.81	0.1740	0.4584	3.50
105 mm 正 角	W-3	2~151日	68.0	30.6	63.6	12.44	0.1027	0.4374	2.20
		D-1	2~151日	19.2	16.0	57.1	15.30	3.002	0.1364	1.93
	D-2	2~151日	23.8	18.0	67.8	11.97	10.884	0.0723	3.06
		D-3	2~77日	27.3	20.7	65.4	12.10	0.6333	0.2800	2.27
	DD-1	2~66日	20.1	17.5	58.1	13.19	0.3031	0.3735	2.61
		DD-2	2~66日	18.1	18.0	75.5	10.69	0.3307	0.3389	2.46
*3 C シ リ ー ズ	J W	2~168日	61.2	27.9	72.4	20.00	0.0582	0.4390	1.43
		J D	2~168日	30.1	16.8	73.5	12.51	0.1925	0.3376

*1 定数A及びNを求めるために用いたデータの期間

*2 初期(瞬間)たわみ

*3 重ね梁

参考文献

- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発事業報告書 複合梁開発 (平成元年3月)

34-45(1989)

第3章 スギ接着重ね梁のクリープ特性に及ぼす初期含水率の影響

1. はじめに

前章までの実験により含水率の高い生材を接着接合した重ね梁はクリープに対してかなり大きいたわみを生ずることが分かった。そこで重ね梁に用いるスギ材の初期含水率設定値を15%、20%、25%として人工乾燥し、クリープたわみに対する含水率の影響を確認することとした。

2. 試験体

2.1 スギ材の含水率

スギ材(105mm正角、4m材)の人工乾燥における含水率管理は、高周波式含水率計モコ2(ケット(株)製)によった。3段階の設定値に乾燥されたスギ材各30本を実験に使用した。

これらスギ材の含水率を表1に示す。測定は正角材の各面3箇所(一端から113cm、185cm、257cm)、4面で計12箇所、重ね梁のクリープ試験時にも測定可能な位置とした。測定器は高周波式モコ2と、釘打ち込み式タークによった。同時にヤング係数と重量を測定した。なお、釘打ち込み式は含水率35%以下しか測定できない。

これらの測定結果から明らかになった点は次のとおり。

- ①高周波式含水率計は、釘打ち込み式より1.5~1.7倍程度高い数値を示す。
- ②心材部分は辺材部分に比較して高い含水率を示した。
- ③重量が大きいものは含水率が高い傾向を示す。

以上の結果から、本実験では2種の含水率計の数値を参考に、表1において網掛けした材を重ね梁の製造に使用した。すなわち、初期含水率設定値15%の重ね梁にはスギ材番号41、42、45、46、48、50を、設定値20%には06、07、19、26、51、55を、設定値25%には52、54、56、59、62、64を供した。

2.2 重ね梁の製造

上記で選定されたスギ材は接着面をプレーナがけした後、ヤング係数を考慮しながら組み合わせ、一液型ウレタン系合成樹脂接着剤を用いて3段の重ね梁を製造した。製造方法は「ボルト締め接着重ね梁及び機械圧縮接着重ね梁の製造規格(案)³⁾」に準じた。1週間の養生を行った後、クリープ試験に供した。クリープ試験体の長さは370cm(スパン360cm)とし、製造した重ね梁の端部より全乾法含水率測定用試料(長さ10cm)及び含水率変化をモニターする重量測定のための試料(長さ20cm)を採取した。

2.3 重ね梁の含水率

接着重ね梁の端部より採取した試料を用い、重ね梁の含水率を全乾法により測定した結果を表2に示す。これらの値を基準にして高周波式含水率計による値をみると、平均値で

は指標になり得る数値を示している。そこで今後の含水率測定には高周波式による測定と、重量測定により重ね梁試験体の含水率を測定していくこととした。

なお、試験体No. 201は目標含水率をはずれており、むしろ25%グループに入る。

表1 人工乾燥したスギ正角材の含水率

供試材 番号 スギ [*] 105 mm正角	打ち込み式含水率計(ターク) による含水率 (%)					高周波式含水率計(モコ2) による含水率 (%)					曲げヤン グ係数 (tf/cm ²)	重量 (kg/本)	
	最小	最大	平均	S. D.	C. V.	最小	最大	平均	S. D.	C. V.			
*1 初期 含水 率 15 % を 想 定	41	11.5	16.5	13.4	1.38	10.3	20.0	27.5	23.6	2.38	10.1	83.2	22.6
	42	13.0	17.8	14.6	1.25	8.6	17.0	29.0	21.8	4.39	20.1	63.7	18.0
	43	13.0	19.6	18.3	0.94	5.1	16.0	38.0	26.8	6.37	23.8	69.8	20.3
	44	13.5	18.9	15.6	1.74	11.1	23.0	30.5	26.8	2.88	10.7	67.7	20.7
	45	14.7	17.2	15.6	0.91	5.8	17.5	28.5	21.7	3.58	16.5	49.5	17.0
	46	14.3	20.8	17.1	2.14	12.5	16.0	25.5	20.0	2.78	13.9	62.3	18.7
	47	15.2	28.8	17.6	3.65	20.7	21.5	49.0	28.3	7.47	26.4	65.9	21.3
	48	12.2	16.9	15.0	1.39	9.3	17.5	21.0	19.8	1.21	6.1	76.7	17.0
	49	12.9	15.6	14.2	0.76	5.4	21.0	29.5	24.2	2.46	10.2	87.2	21.8
	50	11.8	15.3	13.7	1.05	7.7	17.0	26.0	20.4	2.85	14.0	62.5	20.0
*1 初期 含水 率 20 % を 想 定	04	15.2	26.0	21.8	3.37	15.5	29.0	46.0	37.8	4.33	11.5	71.8	26.3
	05	12.2	20.2	15.9	3.06	19.2	20.5	30.5	26.9	3.91	14.5	78.3	22.6
	06	17.8	25.1	20.3	2.43	12.0	30.5	50.0	37.0	6.09	16.5	67.7	24.0
	07	15.5	22.6	18.0	2.00	11.1	24.5	45.0	31.4	5.43	17.3	68.5	20.0
	19	18.2	25.8	21.3	2.09	9.8	28.0	43.5	34.6	4.94	14.3	70.9	27.0
	20	17.7	29.1	22.7	3.60	15.9	30.0	44.5	36.0	4.46	12.4	67.9	24.7
	26	16.8	25.5	19.7	2.50	12.7	24.0	40.0	30.7	4.38	14.3	59.4	22.0
	27	17.1	32.6	24.3	5.14	21.2	29.0	42.0	36.6	5.71	15.6	86.6	23.2
	28	17.3	26.0	22.2	3.26	14.7	29.5	50.5	38.8	5.60	14.4	65.6	26.2
	30	14.0	21.7	18.7	2.74	14.7	24.0	52.0	35.4	9.62	27.2	76.5	27.1
*2 初期 含水 率 25 % を 想 定	51						22.5	40.0	29.7	4.68	15.8	66.1	23.2
	52						33.0	50.5	41.8	4.94	11.8	53.5	25.0
	53						25.5	54.5	38.4	9.62	25.1	62.9	25.8
	54						23.0	57.5	42.1	10.8	25.7	60.9	23.5
	55						25.0	39.0	31.9	4.12	12.9	67.3	24.6
	56						27.5	54.0	41.2	9.76	23.7	61.2	23.1
	57						29.0	85.0	47.1	19.3	41.0	75.9	27.7
	58						34.5	63.0	50.8	9.51	18.7	61.3	25.6
	59						25.5	79.5	44.0	15.1	34.4	61.9	27.9
	60						31.0	49.5	37.5	7.09	18.9	63.4	
*2 生 材	61						40.5	82.5	54.2	13.7	25.3	71.2	32.1
	62						32.0	51.5	40.2	6.49	16.1	67.7	24.2
	63						29.5	49.0	37.8	6.39	16.9	74.2	25.3
	64						34.0	58.0	44.0	9.16	20.8	73.6	25.5
	65						45.0	73.5	56.0	8.08	14.4	85.0	31.5

S. D. : 標準偏差 C. V. : 変動係数

網掛けは重ね梁に用いた正角材。3段重ね各2本、含水率3水準で計18本

51・55は初期含水率20%用、62・64は初期含水率25%用

*1 打ち込み式含水率計で35%を超えたものは個数に加えていない。

*2 打ち込み式含水率計では35%を超えるものが多いので、数値は示していない。

表 2 重ね梁製造時の含水率

重ね梁の 試験体No. *1	初期設定 含水率 (%)	全乾法含水率(%)			高周波式含水率計(%)	
		全体 *2	外表面 *3	内部 *4	含水率測定用 試験体 *5	重ね梁試験体 *6
151 152	15	18.4 19.0	16.6 —	18.8 —	n=6 15.8 —	n=18 19.3 —
201 202	20	34.8 22.0	27.3 —	39.4 —	27.8 —	29.5 —
251 252	25	29.2 38.6	23.8 28.0	32.0 45.1	25.5 27.4	29.4 31.9

- *1 試験体番号の最初の2桁は初期設定含水率、3桁目はその中での通し番号
- *2 2個の平均
- *3 重ね梁の外側1.5~2cm程度
- *4 残りの部分
- *5 長さ20cm、全乾法試験体の隣接部分より採取した試験体の、3段、前・後面各1箇所、計6箇所の平均
- *6 スギ正角材の測定位置と同じで、3段、前・後面各3箇所、計18箇所の平均

3. 試験方法

曲げクリープ試験の方法を図1に示す。スパンを360cmとし、荷重は5等分点4点荷重、荷重には32φ(6.3kg/m)の鉄棒を利用し、合計1,260kgを吊り下げ方式で、2支点同時載荷した。支点と試験体の間には鉄プレートをはさみ、試験体のめり込みを防止した。

想定した荷重条件は床梁で荷重は以下のとおり。

固定荷重	65 kg/m ²
積載荷重	130 kg/m ²
合計	195 kg/m ²

195kg/m² × 1.8m(負担幅) × 3.6m(スパン) = 1,264kg である。

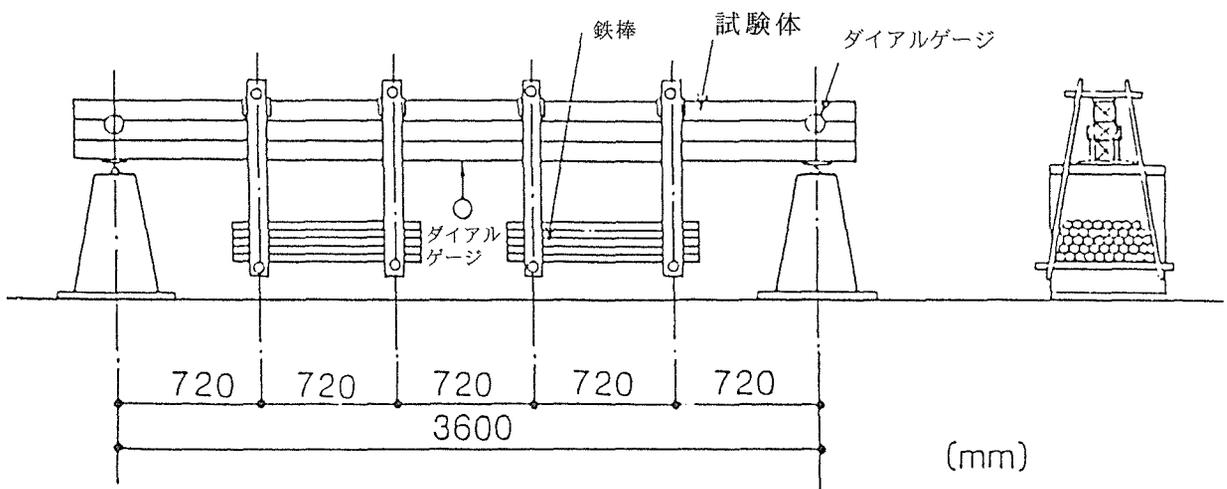


図1 曲げクリープ試験の方法

変位の測定はスパン中央1点とし、ダイヤルゲージを用いた。なお、試験は倉庫で行ったため、温湿度はコントロールされていない。

なお、重ね梁の含水率変化をモニターするために、製造した重ね梁の端部から全乾含水率測定用試料に併せて切り出した長さ20cmのブロックを試料とし、その木口面をアルミホイルでシールしてクリープ試験体の脇に置いた。そしてその重量を経時的に測定することにより試験体含水率の推移を推定した。

4. 試験結果と考察

4.1 クリープたわみ

図2に載荷後約1年間のクリープたわみと含水率の変化を示した。含水率はモニター用ブロックで求めた値である。

表3には初期たわみに対する100日目のクリープたわみの比を示した。傾向としてみると、含水率の高い試験体はこの比が0.8~0.9で、含水率が低い試験体で0.7程度である。

木質構造設計規準(日本建築学会)では、梁の所要剛性として $l/300$ または2cm以内と定められている。そうするとNo. 251とNo. 252は100日ですでに $l/300$ を超えており、建築用の梁としては問題となる。ただし、本実験の設計荷重はやや大きすぎたという見方もある。

表3 初期たわみに対する100日目のクリープたわみの比

試験体No.	全乾法の 初期含水率 (%)	初期たわみ δ_0 * ¹ (mm)	100日たわみ δ_{100} * ² (mm)	比 δ_{100} / δ_0
151	18.4	5.10	4.54	0.890
152	19.0	6.00	4.66	0.777
201	34.8	5.97	4.43	0.742
202	22.0	5.42	3.98	0.734
251	29.2	7.06	5.88	0.833
252	38.6	6.80	6.12	0.901

*¹ 初期(瞬間)たわみ

*² 100日目のクリープたわみ

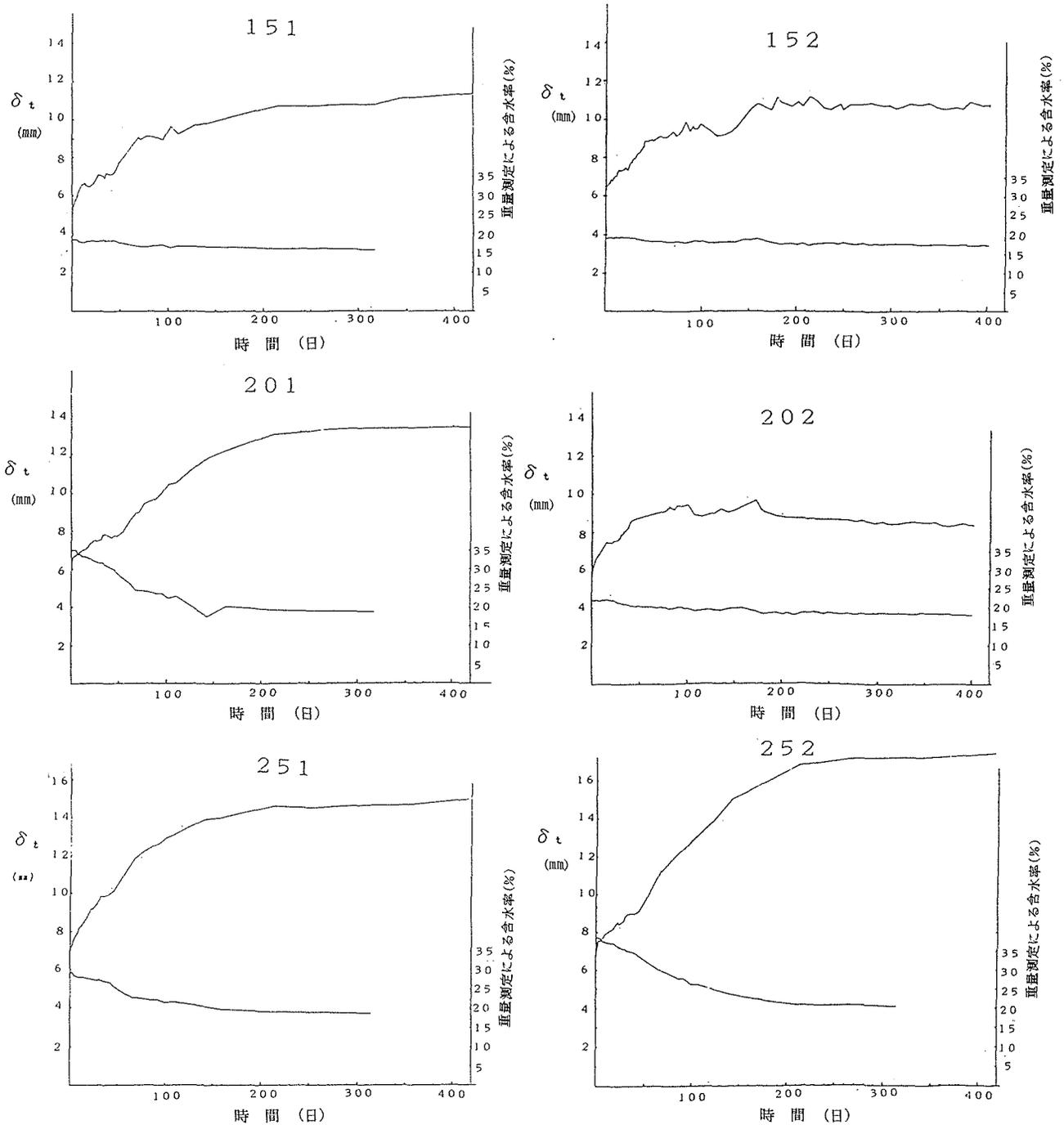


図2 スギ接着重ね梁の曲げクリープたわみと含水率の推移
(含水率はモニター試験体での測定値)

4.2 クリープ曲線の実験式への適合性

木質材料のクリープ曲線の実験式は、一般に t^N 則や $\log t$ 則で近似されるが、長時間のクリープに関しては t^N 則の方が適合性が良いと言われている。すなわち、

$$\delta_c(t) = A \cdot t^N \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\delta_c(t)$: クリープたわみ

A 及び N : 定数

また、全たわみを $\delta(t)$ とすれば

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_c(t) = \delta_0 + A \cdot t^N \quad \dots\dots\dots(2)$$

δ_0 : 初期たわみ

これらを相対クリープで表せば、

$$\delta(t) / \delta_0 = 1 + (A / \delta_0) \cdot t^N \quad \dots\dots\dots(3)$$

この式に従い、たわみと時間の両対数関係の直線回帰式から実験定数 A、N を求めた結果を表4に示す。この表はクリープ試験開始から400日までのデータを用いて10年後のクリープたわみを推定したものである。これを見ると、初期たわみに対する10年後のクリープたわみの比は、初期含水率が比較的低いものは2～5であるのに対して、初期含水率が高いものでは8を超え、実用上、不都合である。乾燥材を用いたボックスビームでは2～2.5程度の値に収まっており、これに比べると4～5というのも大きすぎる値である。

この原因としては、含水率変動下の変形(Mechano-sorptive 変形)が考えられる。これは木材や木質材料がクリープ荷重を受けながら水分が変動する場合、クリープたわみが定常状態に比較して極端に大きくなる現象である。本実験では乾燥材と言っても材内部にはかなりの水分が残っており、これが外周部に移動して、水分の非定常状態を形成したと考えられる。

ただし、Mechano-sorptive 変形は長時間続くわけではなく、含水率が平衡に達した時点からはボックスビームと同様のクリープ挙動を示す。図2で含水率の低下の様子を見ると、載荷後3000時間(125日)までが大きく、その後は20%に落ちつき、極めて緩やかに低下している。そこで積載3000時間以降のデータを式(1)～(3)に適用して推定したクリープたわみに、3000時間の時のたわみを加えることによって、10年後のクリープたわみを求めた(図3参照)。こうすれば非定常と定常とを区別した推定が可能となる。こうして求めた結果を表5に示す。先の値よりかなり低くなり、初期含水率が20%以下ならば10年後のクリープたわみは初期たわみの2～3倍に収まり、ボックスビームの値とほぼ同じになる。しかし、含水率20%以上ではやはり実用上、問題がある。

現実には、梁としては含水率の高い平角材を使用しているわけであるから、実用上、どの程度のクリープたわみならば不都合がないのか、改めて確認することも必要であろう。

表4 スギ接着重ね梁における10年後の推定クリープたわみと関数定数(1)
(適用したクリープ関数) $\delta_{10年} = \delta_0 + A \times 87600^N$

試験体No.	全乾法の 初期含水率 (%)	A	N	初期たわみ δ_0 *1 (mm)	10年たわみ $\delta_{10年}$ *2 (mm)	比 $\delta_{10年} / \delta_0$
151	18.4	0.0908	0.4790	5.10	26.26	5.15
152	19.0	0.1103	0.4347	6.00	21.48	3.58
201	34.8	0.0531	0.5431	5.97	31.65	5.30
202	22.0	0.6240	0.1996	5.42	11.47	2.12
251	29.2	0.0336	0.6456	7.06	59.27	8.40
252	38.6	0.0342	0.6447	6.80	59.34	8.73

*1 初期(瞬間)たわみ

*2 10年後のクリープたわみ推定値(87600=24×365×10)

表5 スギ接着重ね梁における10年後の推定クリープたわみと関数定数(2)
(適用したクリープ関数) $\delta_{10年} = \delta_{3000時間} + A \times (87600 - 3000)^N$

試験体No.	全乾法の 初期含水率 (%)	A	N	初期たわみ δ_0 * ¹ (mm)	3000時間 たわみ $\delta_{3000時間}$ * ² (mm)	10年たわみ $\delta_{10年}$ * ³ (mm)	比 $\delta_{10年} / \delta_0$
151	18.4	0.7369	0.2320	5.10	4.60	15.43	3.03
152	19.0	0.8320	0.1987	6.00	3.21	13.93	2.32
201	34.8	0.5560	0.2904	5.97	5.23	21.12	3.54
202	22.0	(3000時間以降のたわみ増加が無く、算出不可能)					
251	29.2	1.9570	0.1538	7.06	6.43	18.33	2.60
252	38.6	0.8460	0.2813	6.80	7.53	27.58	4.06

*¹ 初期(瞬間)たわみ *² 荷重後3000時間時点のクリープたわみ

*³ 10年後のクリープたわみ推定値

(1) $\delta_{10年} = \delta_0 + \delta_c$

(2) $\delta_{10年} = \delta_{3000時間} + \delta_c'$

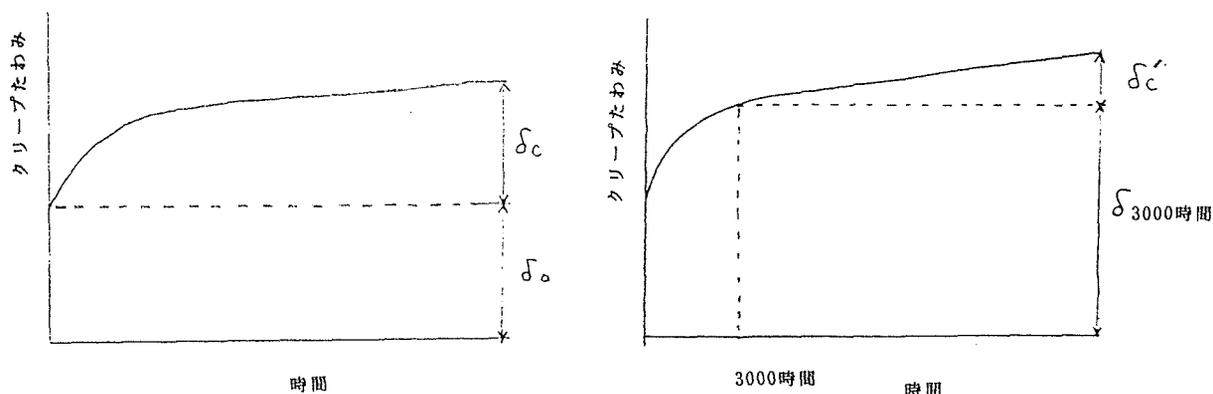


図3 2種類のクリープたわみ推定法

4.3 高周波式含水率計による測定値と全乾法による測定値の比較

高周波式含水率計による含水率の測定値(x)と全乾法による測定値(y)の相関関係を見ると、xの値12~25%程度の範囲で次のとおりであった。

$$y = 0.645x + 8.26 \quad r = 0.597 \quad (n = 56)$$

含水率が18%以下の乾いた状態では両者の相関は比較的良いが、それ以上ではばらつきが大きい。全乾法もモニター試験片であるので、スギ試験体の含水率を正確に表しているわけではないが、気乾状態で両者の測定値がほぼ等しいということは、モニター試験片がスギ材の含水率を代表していると考えて差し支えない。従って、含水率が高い所での変動は高周波式の測定値のばらつきと考えられる。実際に含水率計を材に押しつける際の圧力や、位置(心材か辺材か)で測定値のばらつきが大きくなる。

現場では高周波式含水率計は非常に便利であるので、今後利用されることが多くなるであろう。その際にはあらかじめ全乾法との相関を把握しておき、含水率の適用範囲を念頭に置くこと、一定の測定方式、例えば押しつける圧力などを守ることが肝要である。

5. まとめ

設計荷重を載荷したスギ接着重ね梁のクリープ限度内の曲げクリープ試験を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) スギ接着重ね梁のクリープたわみは初期含水率に大きく影響される。
- (2) 初期含水率が20%以上の場合とそれ以下とで、載荷約3000時間までのクリープたわみ速度に差が見られるが、その後は顕著な差はない。
- (3) 完全に気乾状態に達していない重ね梁の10年後のクリープたわみを、載荷1年のデータから t^n 則で推定すると、載荷初期(3000時間程度)の影響が強く現れ、クリープたわみを過大評価する可能性がある。
- (4) スギの含水率低下は載荷後3000時間位までが大きく、その後は20%程度に落ちつき、極めてゆるやかに低下していく。このことは(2)に符合する。
- (5) (1)～(4)の点を考慮すると、載荷3000時間以降のクリープたわみを基準にした推定が実用上適当と考えられる。すなわち、載荷3000時間におけるクリープたわみをスタートとして10年後のクリープたわみを求め、これに3000時間でのたわみを加える方法である。
- (6) 高周波式の含水率計による測定値は、全乾法の測定値と相関はあるものの、ばらつきが大きい。使用に際してはあらかじめ全乾法との相関を把握しておき、含水率の測定範囲を念頭に置くこと、一定の測定方式を守る、例えば押しつける圧力を一定にすること等が肝要である。
- (7) スギ接着重ね梁のクリープ試験を総括すれば、スギ材の含水率がクリープたわみに及ぼす影響は、含水率15%、15～20%、20%以上の3グループに分けられる。そして実用上は20%以下に乾燥させた材を用いることが必要である。

参考文献

- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発事業報告書 複合梁開発 (平成2年3月) 2-15(1990)
- 2) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発事業報告書 複合梁開発 (平成3年3月) 2-20(1991)
- 3) (財)日本住宅・木材技術センター：複合ばり開発事業報告書 (平成8年3月) 1-27(1996)

第4章 スギ接着重ね梁の曲げクリープ性能改善の試み

1. はじめに

スギ重ね梁を実用化する際、問題となるのは剛性とクリープ性能である。前章までの実験で除湿乾燥で含水率を20%程度に落としても、10年後の推定たわみは初期たわみの2～3倍になり、実用上、問題があった。そこでこの章ではこのクリープ問題を解決するために重ね梁の最外層にLVLを配して剛性とクリープ性能の向上を試みた。その他、中実重ね梁と透かし梁についても実験し、透かし梁の実用可能性も検討した。

2. 実験

2.1 試験体

2.1.1 スギ供試材の選定

スギ正角材(90×90×4,000mm)40本について曲げヤング係数を測定した。測定方法はスパン3,600mm、中央に重量10kgの円盤4枚を載せ、中央の変位をダイヤルゲージで測定して求めた。その中から27本を選び出した。また、厚さ38mmのスギ材(38×90×4,000mm)6本についてもスパン3,600mm、中央集中荷重方式で曲げヤング係数を求めた。この場合、フラットワイズ方向に1.5～4kgの重りを3～4回に分けて加え、中央たわみを測定した。正角材の測定結果を表1及び図1に示す。

表1 供試正角材40本の曲げヤング係数と重ね梁試験体における使用部位

試験体番号 と部位	正角材 番号	MOE (tf/cm ²)	試験体番号 と部位	正角材 番号	MOE (tf/cm ²)		正角材 番号	MOE (tf/cm ²)
A 1-1	上	2 6	B 1-1	上	2 0	不使用 正角材 (13本)	1	59.6
	中	3 7		下	2 1		4	87.1
	下	2 4		80.3	8		66.2	9	86.8
A 2-1	上	3 8	B 1-2	上	4 0		1 5	79.5
	中	3 6		下	8		64.1	1 6	58.7
	下	1 8	80.3	79.0	1 7		58.1	
A 3-1	上	3 3	B 2-1	上	2 5		2 2	61.3
	中	3 4		下	2 3		72.6	2 7	60.5
	下	2 9	83.8	71.9	2 8		97.0	
ク-フ° -LVL	上	1 4	B 2-2	上	6		3 0	60.3
	下	1 3		73.2	78.8		3 1	86.7
ク-フ° -スキ°	上	1 1	B 3-1	上	1 9		3 2	51.8
	下	1 0		70.8	70.2		3 5	89.9
			B 3-2	上	1 2			
				下	3	67.6		
			B 4-1	上	5			
				下	2	72.4		
					73.7			
試験数	40	平均値	72.0	分散	13.0			
		最小値	48.1	標準偏差	11.4			
		最大値	97.0					

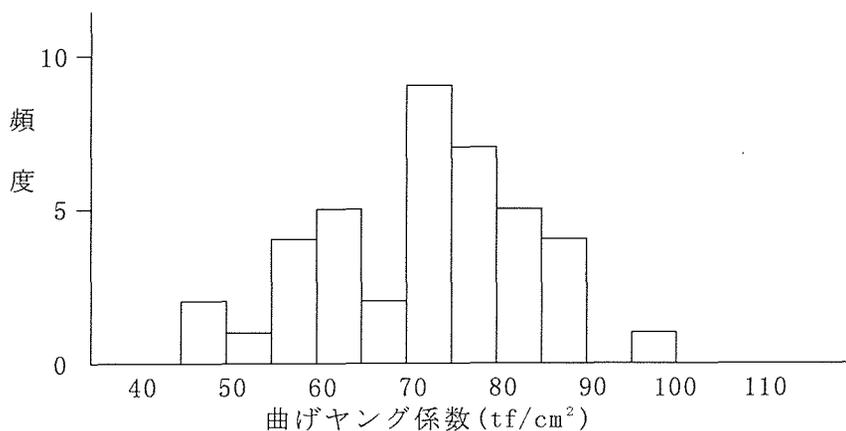


図1 供試スギ正角材の曲げヤング係数(MOE)分布(全40本)
(数値は「未満」「以上」で区分)

2.1.2 重ね梁の断面構成

重ね梁試験体はAシリーズとBシリーズ、及びクリープ試験体に区別した。これらの試験体の断面を図2～3に、正面を図4～5に示す。長さは4m。

(1) Aシリーズ試験体

スギ90mm正角材3段の重ね梁の上下最外層に、LVLを接着積層した。使用したLVLは次のとおり。

商品名マイクロラム：トラスジョイント(柵)製、ベイマツ単板積層材

接着剤：熱硬化型フェノール樹脂

グレード：2.0E (MOE = 140tf/cm²)

サイズ：38×90×4,000mm

Aシリーズ4体のうち、3体はいわゆる透かし梁(別名はしご梁)で、中央の正角材に透かしが入っている。30cmのつなぎブロックが4本入っている試験体をA1、6本入っている試験体をA2、透かしの入っていない中実重ね梁をA3、120cmのつなぎブロックが2本入っている試験体をA4とした(図4参照)。

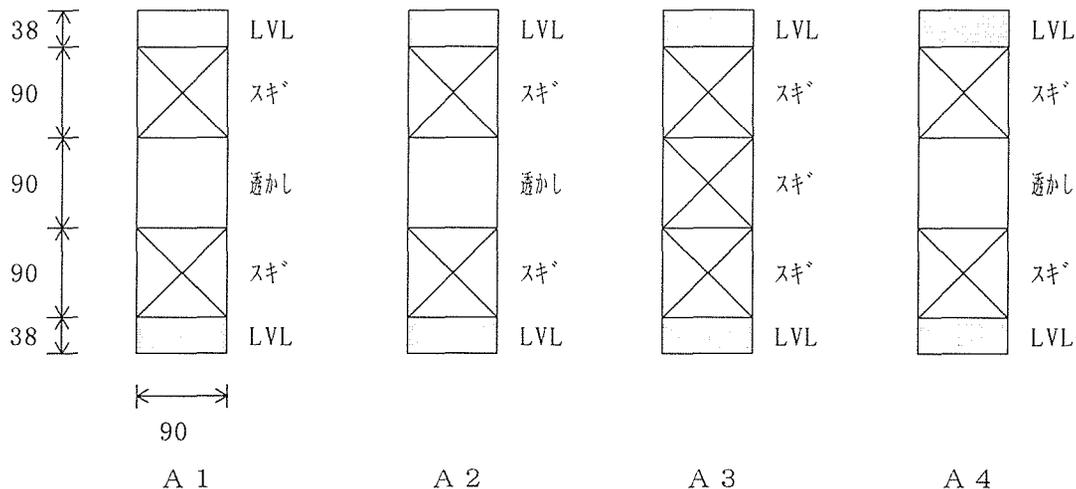


図2 Aシリーズ試験体断面 (単位：mm)

(2) Bシリーズ

スギ90mm正角材2段の重ね梁の上下最外層に、LVL(38×90×4,000mm)またはスギ(38×90×4,000mm)を接着積層した。

Bシリーズ4種類のうち、最外層にLVLを接着した試験体をB1、スギを接着した試験体をB2とした。B3はB1と同じ形態であるが、2段に重ねた90mm正角材のうち、上の正角材が4本に切断されて、パットジョイントの状態になっている。2枚のLVLを引張側に積層した試験体をB4とした(図5参照)。

製造した試験体数は、B1、B2、B3は各2体、B4は1体で、Bシリーズは計7体である。

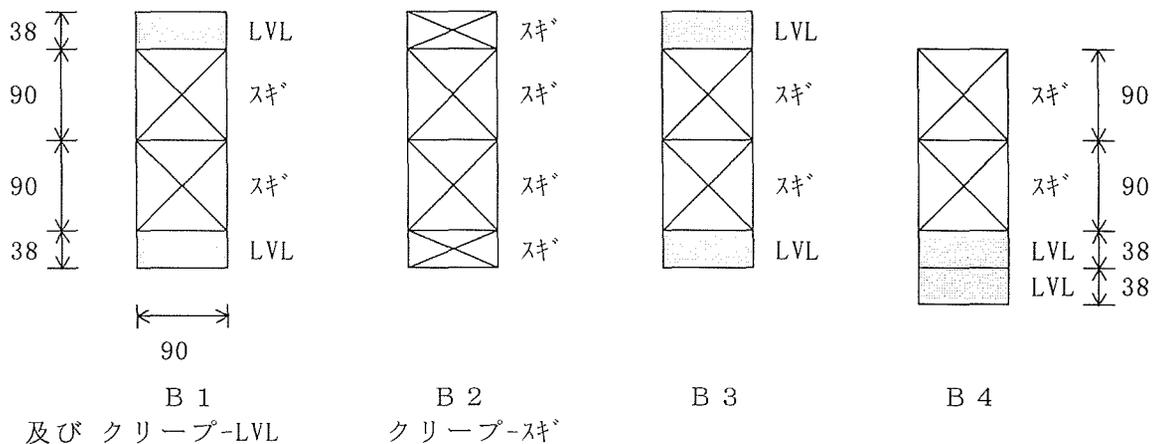


図3 Bシリーズ及びクリープ試験体断面(単位:mm)

(3) クリープ試験体

上述のBシリーズのうち、B1とB2のタイプで、別に準備した各1体の試験体[クリープ-LVL]、[クリープ-スギ]についてクリープ試験を行った。

2.1.3 重ね梁の製造方法

Aシリーズ：予め圧縮のためのボルト穴をあけ、接着面はプレーナをかけ、ほこり等を取り除いておき、一液型ウレタン系合成樹脂接着剤(商品名：ウッドロック、日本ポリウレタン工業㈱製、カートリッジタイプ)を帯状に2列塗布した。塗布量は圧縮したときに横からはみ出る程度とした。圧縮はA1とA3についてはボルト(M12)7本、A2はボルト6本で行った。養生2～7日後、試験に供した。

Bシリーズ：圧縮はターンバックルで6～7箇所締めつけた。その他はAシリーズ同様。各試験体に用いた正角材の曲げヤング係数と重ね順序を表2に、正面図を図4、図5に示した。

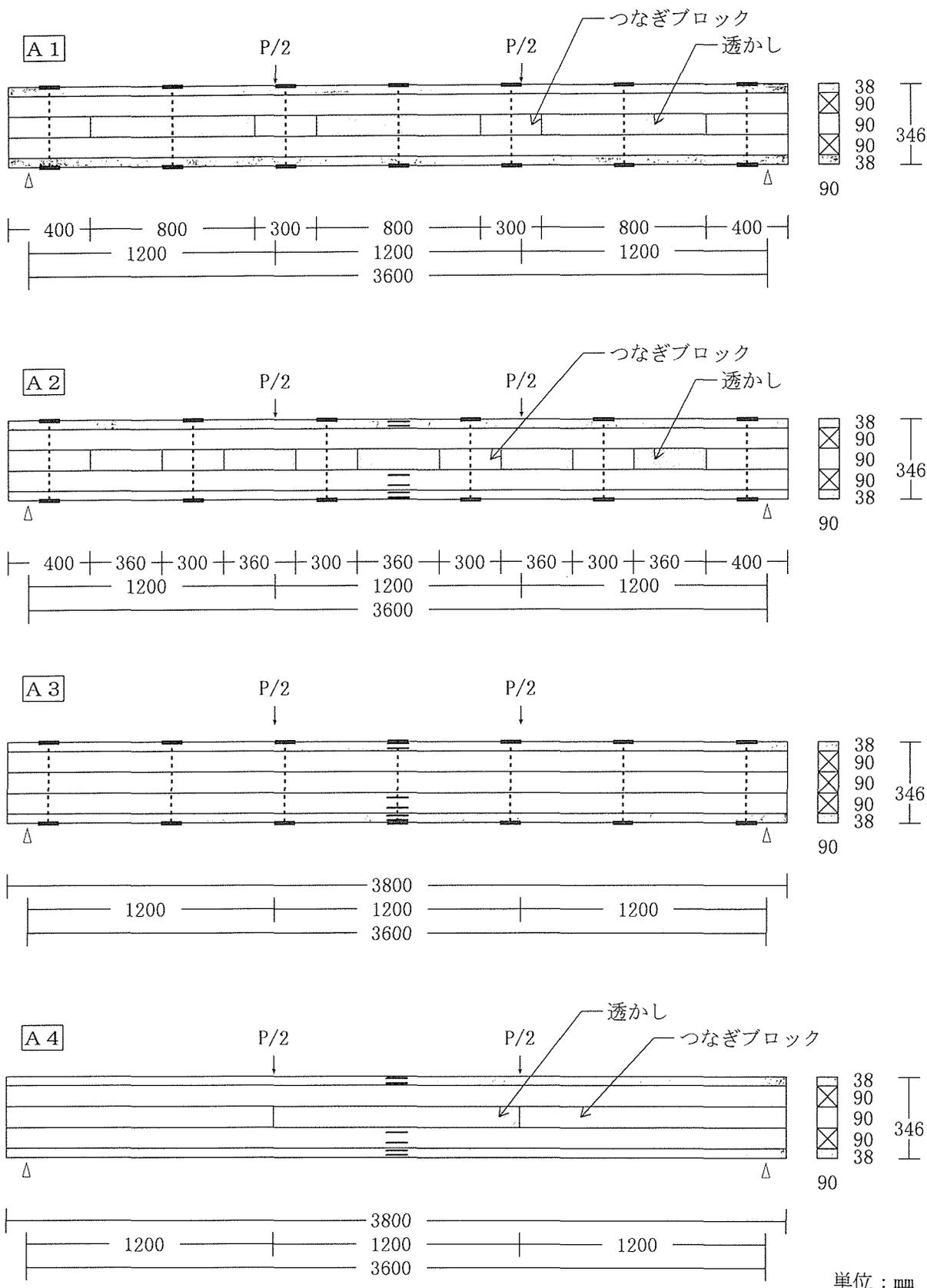


図4 Aシリーズ試験体の正面図

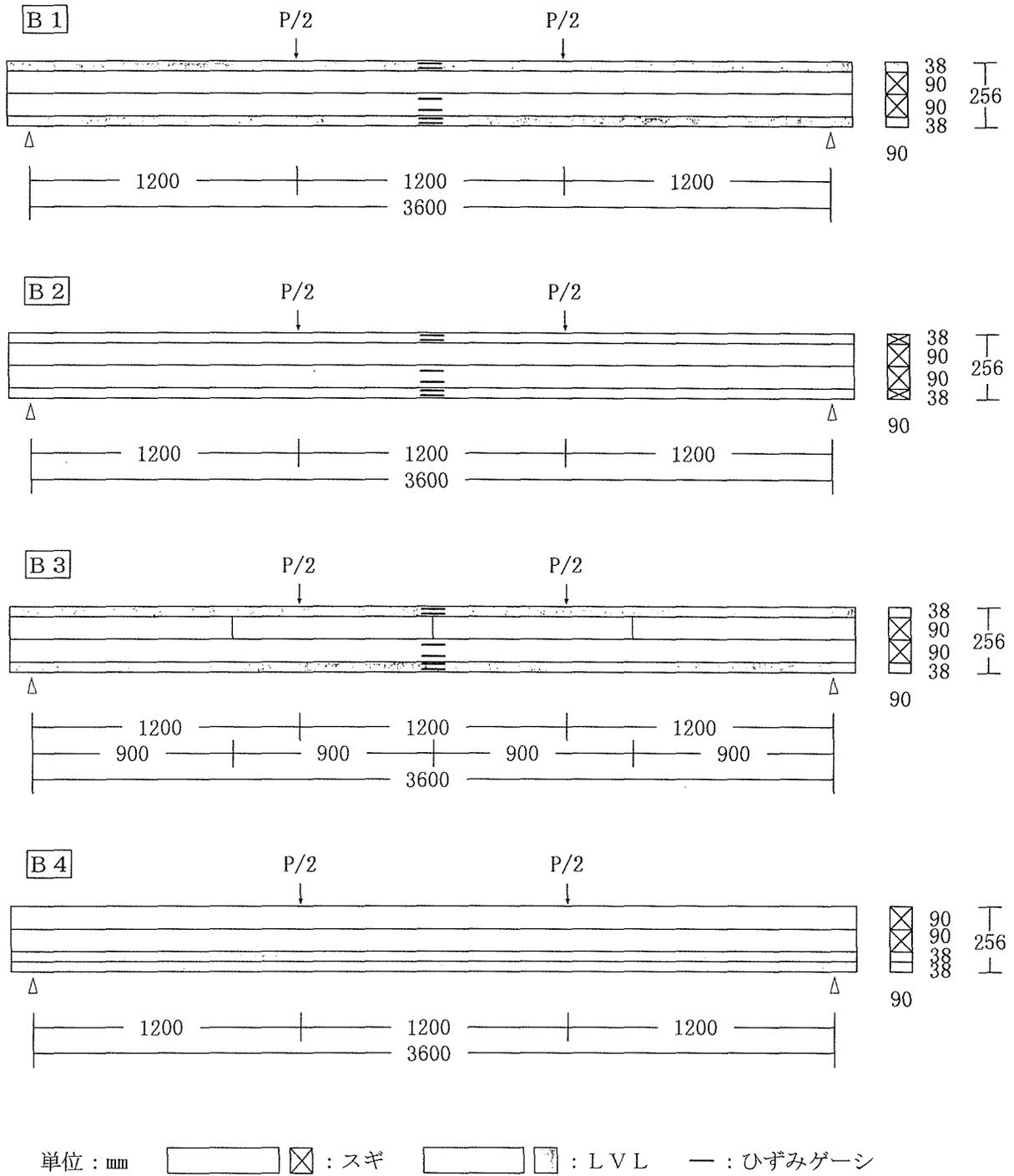


図5 Bシリーズ試験体の正面図

表2 試験体各層の曲げヤング係数と試験時の含水率

試験体番号	試験体断面	含水率* ¹ (%)	MOE (tf/cm ²)	試験体番号	試験体断面	含水率 (%)	MOE (tf/cm ²)
A 1		11.0	140.0	A 3		8.4	140.0
		20.5	82.8			20.8	83.8
		—	48.1			25.7	49.5
		20.4	80.3			18.2	83.8
		10.3	140.0			9.1	140.0
平均 20.5	全体* ² 112.8	平均 21.6	全体 112.7				
A 2		11.3	140.0	A 4		11.0	140.0
		18.1	78.4			20.5	82.8
		—	56.8			—	80.3
		17.3	80.3			20.4	80.3
		10.8	140.0			10.3	140.0
平均 17.7	全体 111.7	平均 20.5	全体 112.8				

試験体番号	試験体断面	含水率 (%)	MOE (tf/cm ²)
B 1-1		12.5	140.0
		20.4	76.6
		21.2	66.2
		12.1	140.0
平均 20.8	全体 116.1		
B 2-1		17.2	100.3
		19.5	72.6
		21.1	71.9
		16.5	53.9
平均 18.6	全体 74.0		
B 3-1		12.0	140.0
		18.3	73.6
		20.1	70.2
		12.4	140.0
平均 19.2	全体 116.3		

試験体番号	試験体断面	含水率 (%)	MOE (tf/cm ²)
B 1-2		11.3	140.0
		17.4	64.1
		17.6	79.0
		11.7	140.0
平均 17.5	全体 116.1		
B 2-2		16.9	68.8
		18.2	64.4
		17.6	78.8
		16.1	107.5
平均 17.2	全体 80.7		
B 3-2		11.0	140.0
		16.5	67.6
		16.9	76.1
		11.6	140.0
平均 16.7	全体 116.3		
B 4		16.6	72.4
		16.5	73.7
		11.2	140.0
		11.1	140.0
平均 16.6	全体 97.5		

試験体番号	試験体断面	含水率 (%)	MOE (tf/cm ²)
クリープ LVL		20.4	140.0
			73.2
			75.4
			140.0
			全体 117.2
クリープ スギ		18.3	106.0
			71.6
			70.8
			90.0
			全体 88.5

*¹ 含水率平均値はLVLを除外して算出

*² MOEの「全体」は各層のMOEから計算で求めた全体のMOE

2.1.4 せん断試験片

つなぎブロックの必要長さを求めるために、曲げ試験を終了したA3試験体の非破壊部分からせん断試験片を切り出した(図6)。試験片(図7)の試験対象面は幅90mm、長さ l は100mm、150mm、250mmの3種類で、圧縮用ボルト穴を含んでいる。試験片数は各1片である。

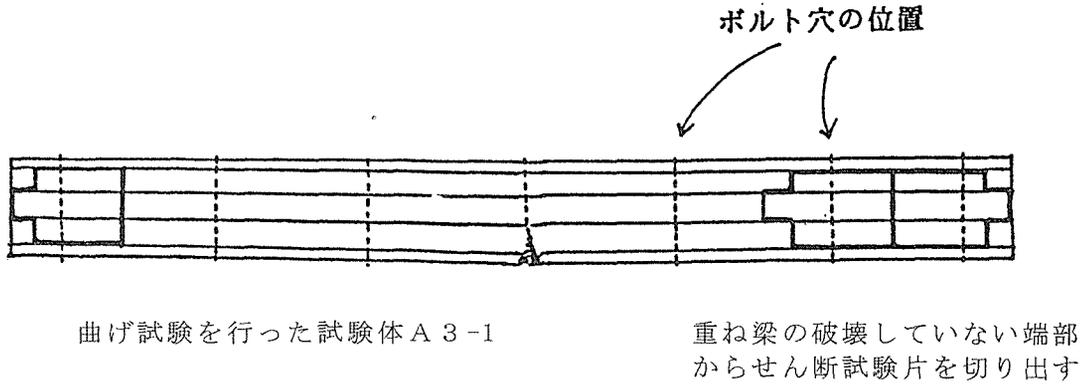
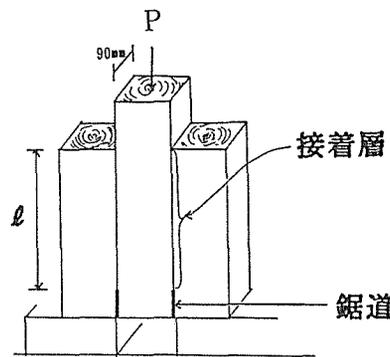


図6 せん断試験片の採取法



$l = 100\text{mm}$ 、 150mm 、 250mm の3種類

図7 せん断試験片の形状と試験法

3. 試験方法

3.1 曲げ強度試験

曲げ強度試験はスパン3,600mm、3等分点2点荷重方式で行った。荷重点と試験体の間にはローラーをはさみ、滑るようにした。変位計は中央と荷重点の3箇所に設置し、試験体側面の中央部にはひずみゲージ(タイプ:KFC-5-C1-11、ゲージ長:5mm、ゲージファクター:2.10±1%、共和社製)を貼ってひずみも測定した。ただし、B1-2、B2-2、B3-2及びB4についてはひずみゲージを貼らなかった。試験終了後、端部から小片を切り出して含水率を測定した。

3.2 せん断試験

図7に示すように、中央の材に万能試験機によって荷重をかけ、最大荷重を測定した。

3.3 曲げクリープ試験

曲げクリープ試験の方法を図 8 に示す。スパンを 3,600mm とし、載荷は 5 等分点 4 点荷重、積載荷重は 1,260kg とした。支点と試験体の間には鉄プレートをはさみ、試験体のめり込みを防止した。

想定した載荷条件は床梁で荷重は以下のとおり。

固定荷重	65 kg/m ²
積載荷重	130 kg/m ²
合計	195 kg/m ²

195kg/m² × 1.8m(負担幅) × 3.6m(スパン) = 1,264kg である。

変位の測定はスパン中央 1 点とし、ダイヤルゲージを用いた。

なお、重ね梁の含水率変化の測定は、製造した重ね梁の端部から予め切り出し、その木口面をアルミホイルでシールしたモニター試験片の重量測定による方法と、高周波式含水率計によった。

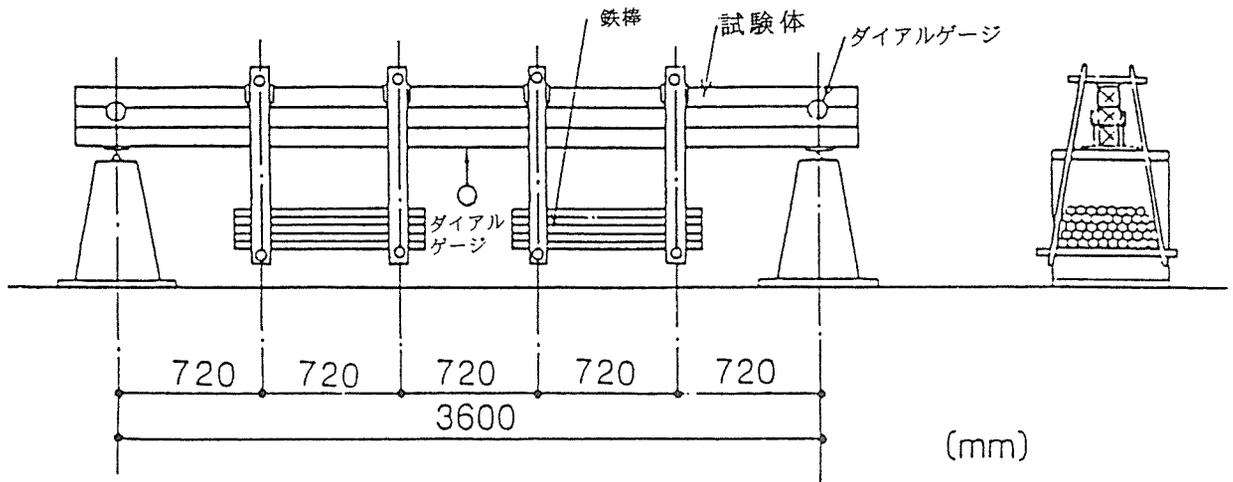


図 8 曲げクリープ試験の方法(単位:mm)

4. 試験結果と考察

4.1 曲げ試験

付図 1-1 ~ 1-6 に曲げ強度試験の荷重と変位の関係を、付図 2-1 ~ 2-7 に荷重とひずみの関係を示す。また、各試験体の MOE や MOR 等について表 3 に示す。

4.1.1 A シリーズ試験体について

A シリーズでは A 1 と A 2 がつなぎブロックの上、または下の接着層でせん断破壊を起こした。これはつなぎブロックの長さが短く、接着面積が少なかったためと考えられる。接着層のせん断耐力の実験値は次式で計算し、表 4 に結果を示した。

$$\tau_s = P_{max} / A \quad A : \text{接着面積}$$

平均値は 20kgf/cm² であり、既存のデータとほぼ一致した⁶⁾。また、P_{max} 時につなぎブロックの接着層にかかるせん断応力(τ_s)は次式で表せる。

$$\tau_b = \frac{Q}{2I} \times \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right)$$

$$Q = P / 2$$

ここで、透かし梁(はしご梁)が中央重ね梁と同等の耐力を有するための条件は次のように表せる。

$$\tau_g \times l_g \times b \geq (Q / 2I) \times (h^2 / 4 - y^2) \times (l / 3) \times b$$

(ただし、A3の結果から $P = 8,420\text{kg}$ とする)

l_g : つなぎブロックの長さ (cm) l : 梁のスパン

y : 中立軸からつなぎブロックの接着層(中立軸側)までの距離 (cm)

b : 梁の幅 (cm) h : 梁せい (cm)

表3 曲げ強度試験結果

試験体番号	MOE 計算値 (tf/cm ²)	MOE 実験値 (tf/cm ²)		MOR *1 (kgf/cm ²)		中立軸 *2 (cm)		MOE比 計算/実験		MOR比 ゲージ 実験	中立軸 比 計算 実験	破壊 状況
		荷重点	中央値	実験値	$E \times \varepsilon$	計算	実験	荷重点	中央値			
A 1	112.8	41.1	50.1	113.3	64.4	17.4	13.2	2.74	2.25	0.57	1.32	せん断
A 2	111.7	65.1	55.1	121.7	125.6	17.2	13.6	1.72	2.03	1.03	1.27	せん断
A 3	112.7	68.1	64.5	369.0	442.5	17.3	17.2	1.65	1.75	1.20	1.01	引張
A 4	112.8	80.3	73.8	290.4	172.9	17.4	15.7	1.40	1.53	0.60	1.11	せん断
B1-1	116.1	100.6	102.5	505.4	517.0	13.1	12.8	1.15	1.13	1.02	1.02	引張
B2-1	74.0	61.4	62.0	397.6	374.5	14.9	13.5	1.21	1.19	0.94	1.10	引張
B3-1	116.3	92.4	96.2	418.3	324.7	12.9	9.1	1.26	1.21	0.78	1.40	せん断
B1-2	116.1	124.2	110.0	554.1		12.4		0.93	1.06			引張
B2-2	80.7	69.5	72.7	402.8		11.7		1.16	1.11			引張
B3-2	116.3	110.0	109.6	500.1		12.6		1.05	1.06			せん断
B 4	97.5	87.1	94.8	615.2		8.8		1.12	1.03			引張

*1 $E \times \varepsilon$: 最下層の曲げヤング係数に4番のひずみゲージのひずみ値を乗じたもの

*2 中立軸 : 下面からの距離

せん断たわみを考慮した場合

試験体番号	MOE 計算値 (tf/cm ²)	MOE 実験値 (tf/cm ²)		MOE比 計算/実験	
		荷重点	中央値	荷重点	中央値
A 1	112.8	52.9	58.8	2.13	1.92
A 2	111.7	80.6	68.4	1.39	1.63
A 3	112.7	87.3	73.4	1.29	1.54
A 4	112.8	118.0	94.2	0.96	1.20
B1-1	116.1	121.8	116.2	0.95	1.00
B2-1	74.0	66.9	68.5	1.11	1.08
B3-1	116.3	112.2	106.5	1.04	1.09
B1-2	116.1	125.8	128.6	0.92	0.90
B2-2	80.7	76.1	80.2	1.06	1.01
B3-2	116.3	135.0	126.3	0.86	0.92
B 4	97.5	99.8	108.1	0.98	0.90

こうして得られたつなぎブロックの必要な長さを表 4 に示した。この結果から、つなぎブロックの必要な長さを 120cm (ただし、重ね梁の右半分または左半分で) と考え、断面構成 A 4 の試験体を加えた。

表 4 重ね梁の接着層のせん断試験結果

l_g (cm)	P_{max} (kgf)	τ_g (kgf/cm ²)	必要な接着長さ (mm)
10	3550	19.7	115.1
15	5230	19.4	116.9
25	9620	21.4	106.0
平均		20.2	112.7

l_g : 試験体の接着層の長さ
 P_{max} : 最大荷重
 τ_g : 接着層のせん断耐力

試験体を構成する各層の曲げヤング係数から次式により全体の曲げヤング係数を推定した。

$$MOE = \frac{\sum (E_i I_i)}{I}$$

曲げヤング係数の実験値はせん断変形を考慮しないものと、考慮したものの二通り求めた。曲げヤング係数計算値の実験値に対する比は、接着層においてせん断破壊を起こした A 1 と A 2 の試験体では B シリーズに比べ大きな値であった。せん断変形を考慮すると曲げヤング係数が大きくなり、この値も小さくなる。

ひずみゲージで測定したひずみ (ε) に、材の曲げヤング係数 (E) を乗じた [$MOR_{ゲージ}$] ($E \times \varepsilon$) の諸荷重における応力分布を付図 2-1~2-7 に示した。ただし、二つまたは三つあるスギ正角材のうち最上部 (重ね梁の 2 枚目) の応力分布図は、上下にある材の曲げヤング係数を乗じた値を直線で結んだものであって、実験値から推定したおおよその応力分布である。

最大荷重時におけるひずみゲージ 4 の値に最下層の材の曲げヤング係数を乗じた [$MOR_{ゲージ}$] と破壊荷重から求めた [MOR_{*}] は A 2 と A 3 においてよく一致した。しかし A 1 と A 4 は中央部に比較的大きな透かしが入っており、 [$MOR_{ゲージ}$] の値が低くなった。これは引張側の LVL の引張応力が十分伝わらないうちにせん断破壊を生じたためである。

4.1.2 B シリーズ試験体について

破壊の状況を見ると、B 1、B 2、B 4 は引張破壊を起こしていたが、B 3 は重ね梁の 2 段目のバットジョイント付近でせん断破壊を起こしていた。B 2 はスギ材のみで製造されているので、LVL の接着してある B 1、B 3 よりも曲げヤング係数が低かった。曲げヤング係数計算値の実験値に対する比は 1 に近く、計算値の方が常に大きな値をとるものの、計算によってある程度まで曲げヤング係数を知ることができる。

曲げ強さ (MOR) に関してはやはり B 2 が低い値をとっている。ここで特に気付くことは B 4 の MOR が高いことである。これは下層に LVL が 2 層あるためと考えられる。

[MOR_{試験}]/[MOR_{計算}]に対する比はB1、B2で1に近く、B3は0.78という低めの値をとっている。B3は正角材のうち、上の材にバットジョイントがあり、A1のように引張側に応力が集中したためと思われる。

中立軸は計算によって推定することができるが、B3については計算式がバットジョイントを考慮していないので、実験値と一致しなかった。A1、A2についても透かしがあるために実験値と計算値の中立軸の位置がずれる結果となった。

4.2 曲げクリープ試験

クリープたわみと時間の関係を含水率の変化とともに図10に示した。ここでの含水率はモニター試験片の重量測定によるものである。100日間の試験でクリープたわみは落ち着いてきている。最外層にLVLを積層接着した試験体(B1タイプ)はスギ材を積層接着した試験体(B2タイプ)よりも初期たわみが小さく、クリープたわみの増加も多少小さい。

tⁿ則(前章参照)で10年後のクリープたわみを推定した結果を表5に示す。その際用いた時間と試験体のクリープたわみの関係を両対数グラフで付図3に示した。

10年後の推定クリープたわみの初期たわみに対する比を見ると、最外層にLVLを積層したものの方がスギ材のみの試験体より低い値を示してはいるが、両者に大きな差はなく、10年後のクリープたわみは初期たわみの1.5~1.7倍という結果になっている。この理由としては、最外層に積層したスギ小割材が十分乾燥した材であったため、スギ正角材のみの梁よりクリープたわみが少なくなったと考えられる。この結果は予期しなかったものである。最外層にLVLを積層した重ね梁のみならず、十分乾燥したスギ材を積層したものも、曲げクリープに対して問題ないことが確認された。実用面から言うと、スギ材を積層する方が普及の可能性がある。

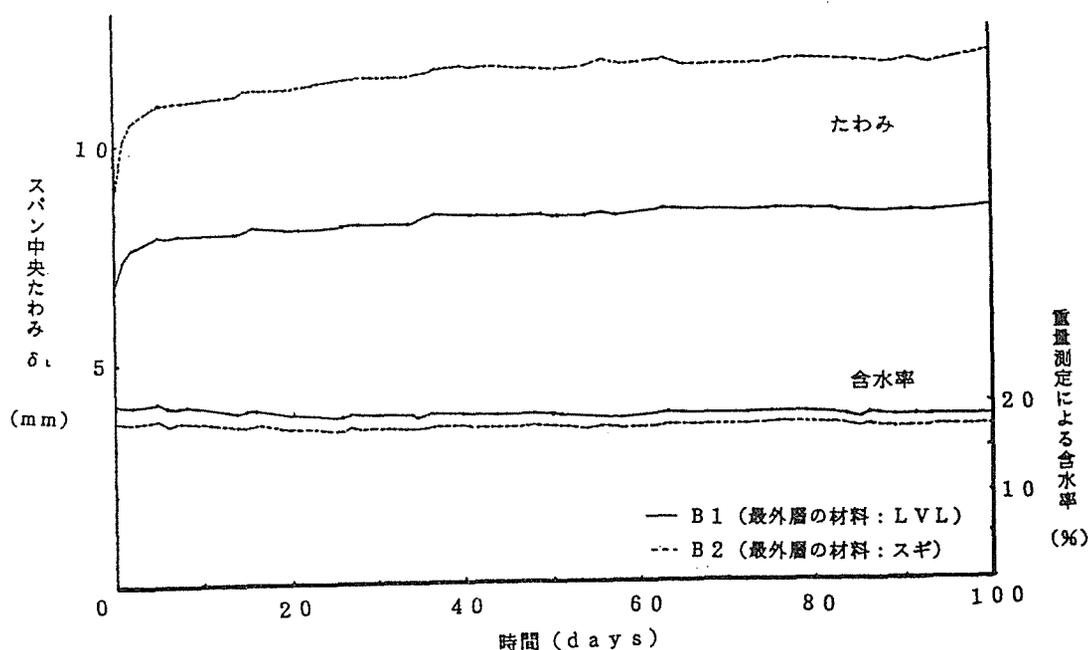


図10 クリープ試験体-LVL(B1タイプ)とクリープ試験体-スギ(B2タイプ)の中央たわみと時間の関係

表5 スギ接着重ね梁における10年後の推定クリープたわみと関数定数
(適用したクリープ関数) $\delta_{10\#} = \delta_0 + A \times 87600^N$

最外層の 材料	初期含水率 (%)	A	N	初期たわみ δ_0 * ¹ (mm)	10年たわみ $\delta_{10\#}$ * ² (mm)	比 $\delta_{10\#} / \delta_0$
LVL スギ	20.4	0.5007	0.1678	6.675	10.06	1.51
	18.3	0.7377	0.1837	8.960	14.93	1.67

*¹ 初期(瞬間)たわみ

*² 10年後のクリープたわみ推定値 ($87600 = 24 \times 365 \times 10$)

5. 結論

(1)透かし梁は計算上せん断力に耐えるだけの材を用いると、中実重ね梁と比べ曲げヤング係数は低下しないものの、曲げ強さは約20%低下した。これは接着層におけるせん断破壊のためであった。このことから、透かし梁は実用的ではない。

(2)10年後の推定クリープたわみの初期たわみに対する比は最外層にLVLを積層したもので1.51、スギ材を積層したもので1.67という低い値であり、両者とも実用上、問題はなかった。特に十分乾燥したスギ小割材を最外層に接着する方法は、正角材のみの重ね梁よりも大幅にクリープを抑えることができ、コスト面からも有効である。

6. 総括

本章及び前章までの正角材と重ね梁の曲げクリープ試験の結果を総括すると次のようにまとめることができる。

(1)スギ正角材においては、材中心部の含水率が局部的に高くても、材表面が乾燥した状態であれば曲げヤング係数は乾燥材の約92~95%と見積もることができる。また、スギ正角材内部の含水率分布から全体の曲げヤング係数を推定できる。

(2)スギ正角材のクリープ挙動は表面が乾燥した状態であれば、乾燥材とほとんど変わらない。

(3)正角材のクリープ試験において、木材の含水率が急激に変化する際(乾燥状態→湿潤状態)には、クリープたわみが大きくなる。

(4)透かし梁は、中実重ね梁と比べると曲げヤング係数の低下はないものの、曲げ強さは約20%低下した。これは接着層におけるせん断破壊のためであり、このことから透かし梁は実用的ではない。

(5)完全に気乾状態に達していないスギ接着重ね梁の10年後のクリープたわみを1年程度の実験データから t^N 則で推定すると、載荷初期(3000時間)の影響が大きく作用してクリープたわみを過大に評価する恐れがある。この点を考慮すると、載荷3000時間のクリープたわみを基準にして推定するのが実用上適当と考えられる。しかし、この場合でも実用範囲である初期たわみの2倍を超え、実用上支障が出た。

(6)材中心部が十分乾燥していない心持材を重ね梁として用いる際に、クリープたわみ

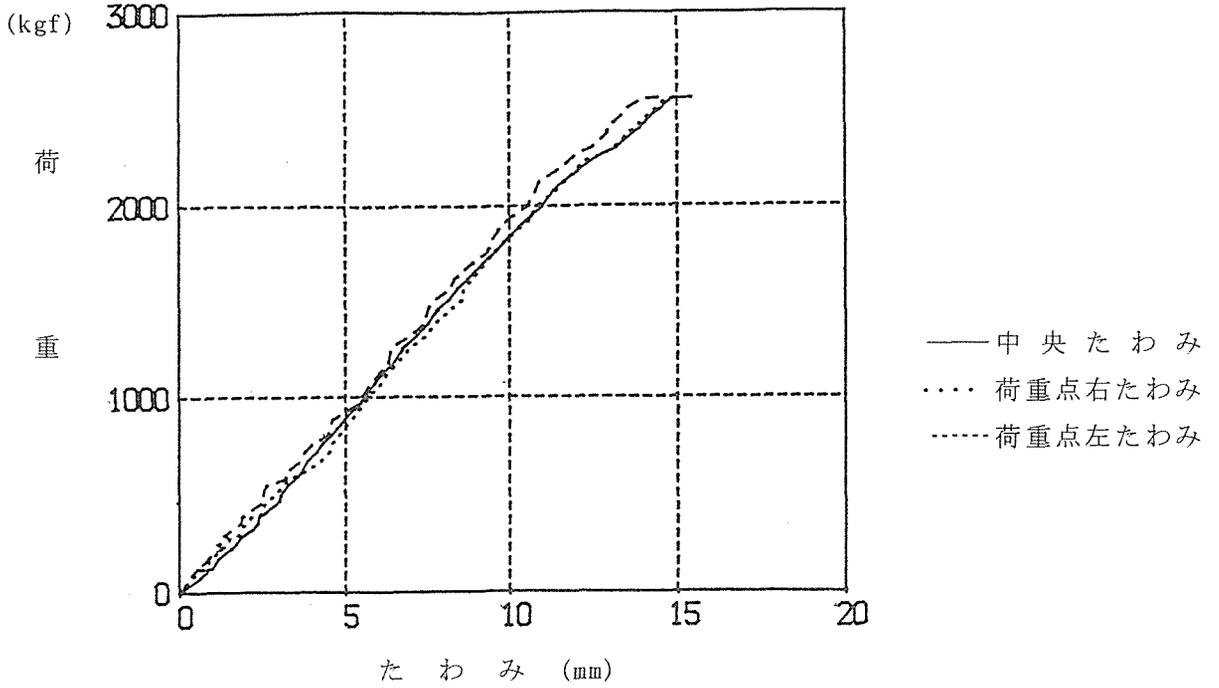
を小さくする方法として、最外層にLVLを接着するか、あるいは十分乾燥したスギ小割材を接着する方法が有効であった。特に後者はコスト面からいっても、スギ材の有効利用という面からも優れている。

参考文献

- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発事業報告書 複合梁開発（昭和4年3月）
30-68(1992)
- 2) 中井 孝：国産造林木の材質、木材工業 Vol.39, No.11(1986)
- 3) 有馬孝礼 ほか2名：木質材料材料及び部材の長期耐力評価に関する研究、
建築研究所報告、No.95(1981)
- 4) 平嶋義彦 ほか4名：正角材を用いた接着重ね梁の曲げ性能、木材工業 Vol.43, No.2(1986)
- 5) 稲垣(現姓:辻)かおり、徳田迪夫：スギ正角材の含水率と曲げヤング係数の関係、
日本木材学会大会研究発表要旨集(1990)
- 6) 稲垣(現姓:辻)かおり、徳田迪夫、駕海四郎：スギ正角材重ね梁の曲げクリープ性状に及ぼす
含水率の影響、日本木材学会大会研究発表要旨集(1991)
- 7) Aplin, Nicholas et. al. : The Influence of Moisture Content on the Flexural Properties
of Douglas Fir Dimension Lumber, US Dept. of Agri., Forest Products Laboratory, Research
Paper FPL 475(1986)

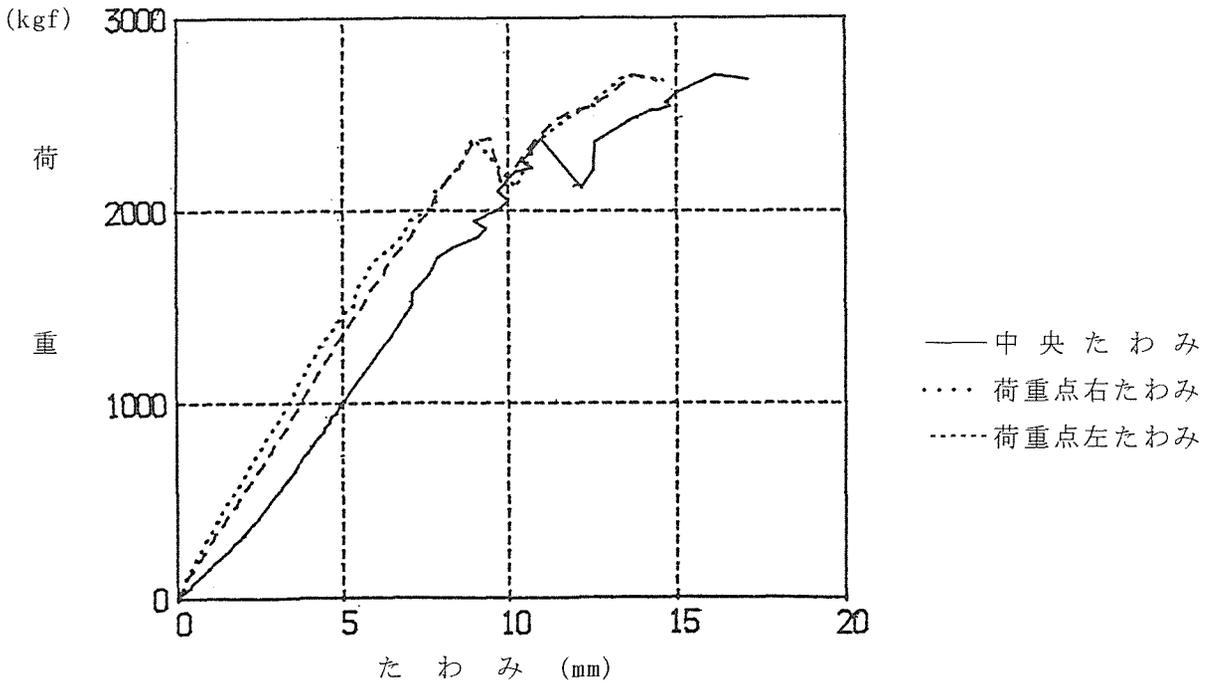
A 1

$P_{max} = 2555 \text{ kgf}$ 破壊性状：せん断破壊



A 2

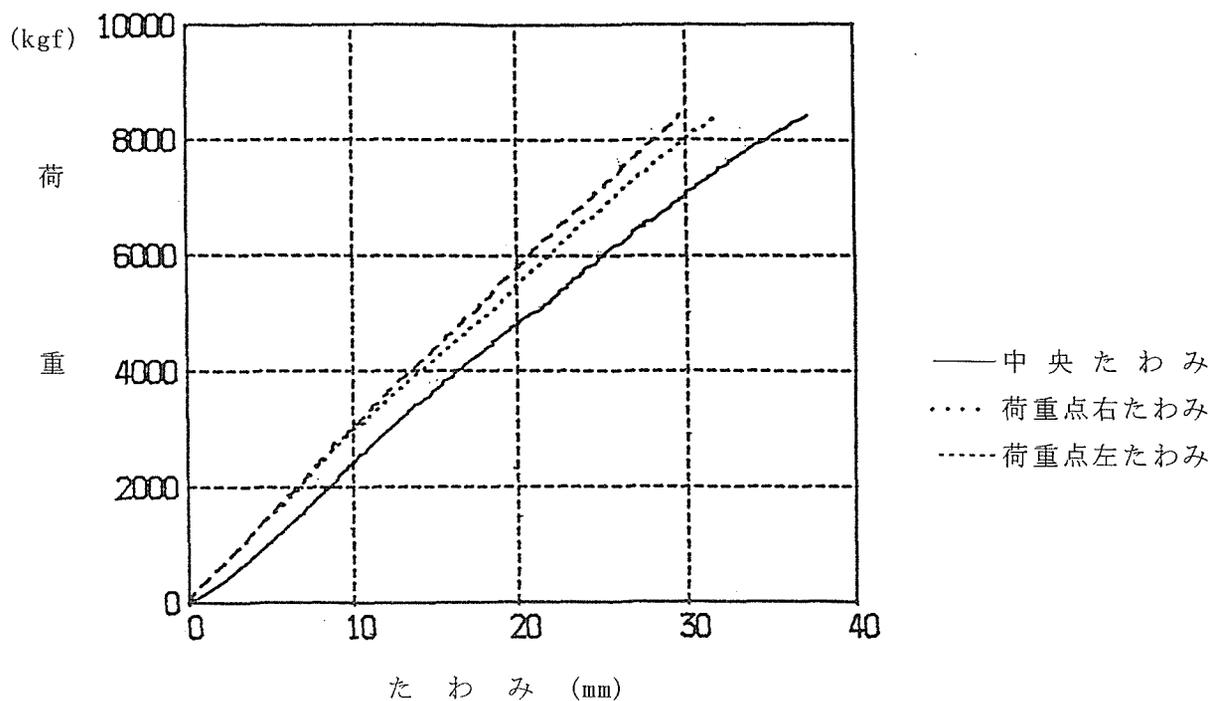
$P_{max} = 2745 \text{ kgf}$ 破壊性状：せん断破壊



付図 1-1 曲げ試験における荷重とたわみの関係(1)

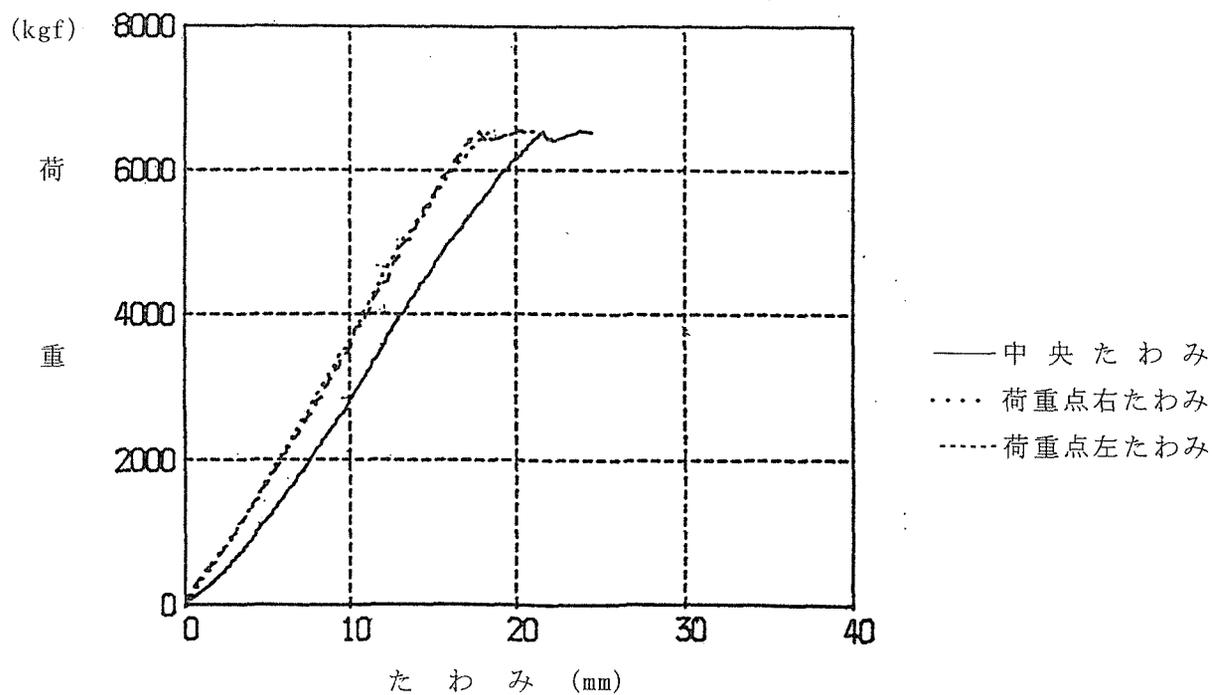
A 3

$P_{max} = 8420 \text{ kgf}$ 破壊性状：引張破壊



A 4

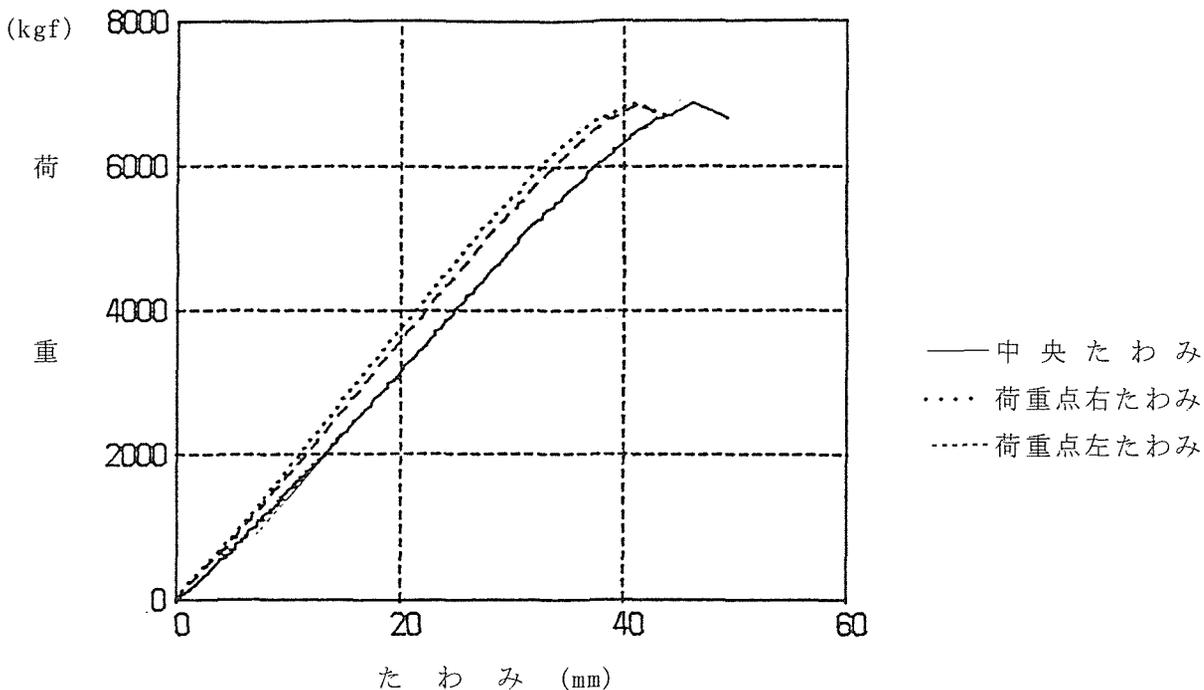
$P_{max} = 6550 \text{ kgf}$ 破壊性状：せん断破壊



付図 1-2 曲げ試験における荷重とたわみの関係(2)

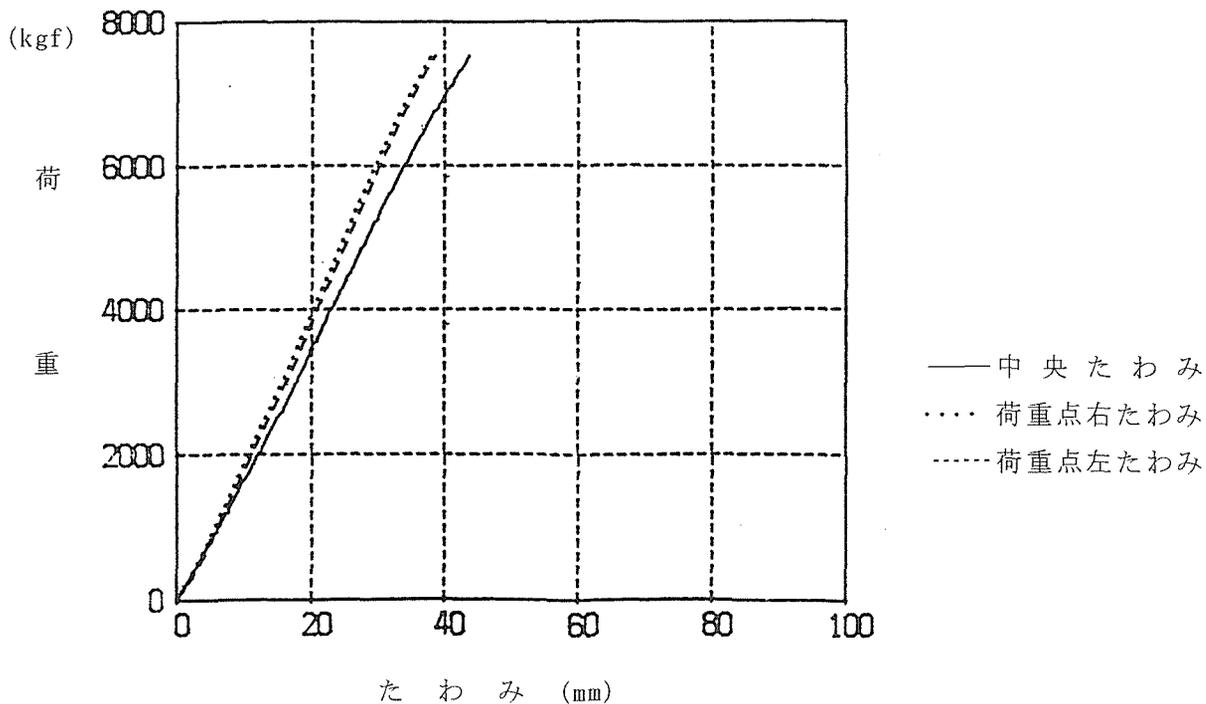
B 1-1

$P_{max} = 6870 \text{ kgf}$ 破壊性状：引張破壊



B 1-2

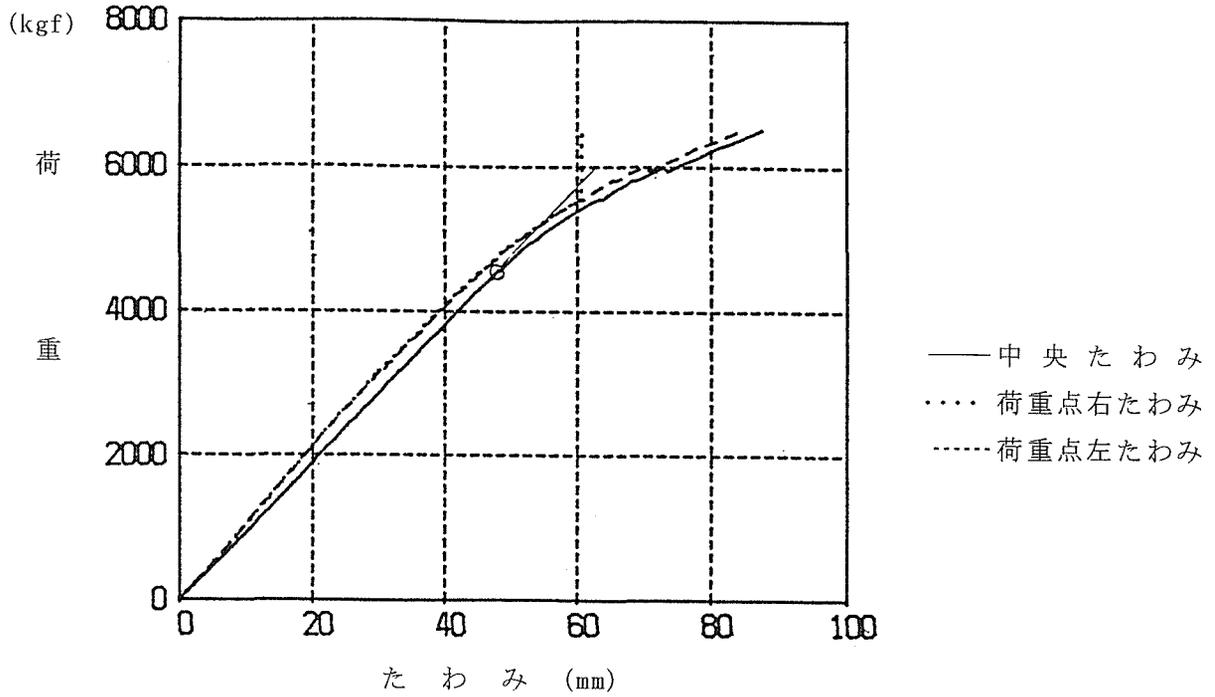
$P_{max} = 7530 \text{ kgf}$ 破壊性状：引張破壊



付図 1-3 曲げ試験における荷重とたわみの関係 (3)

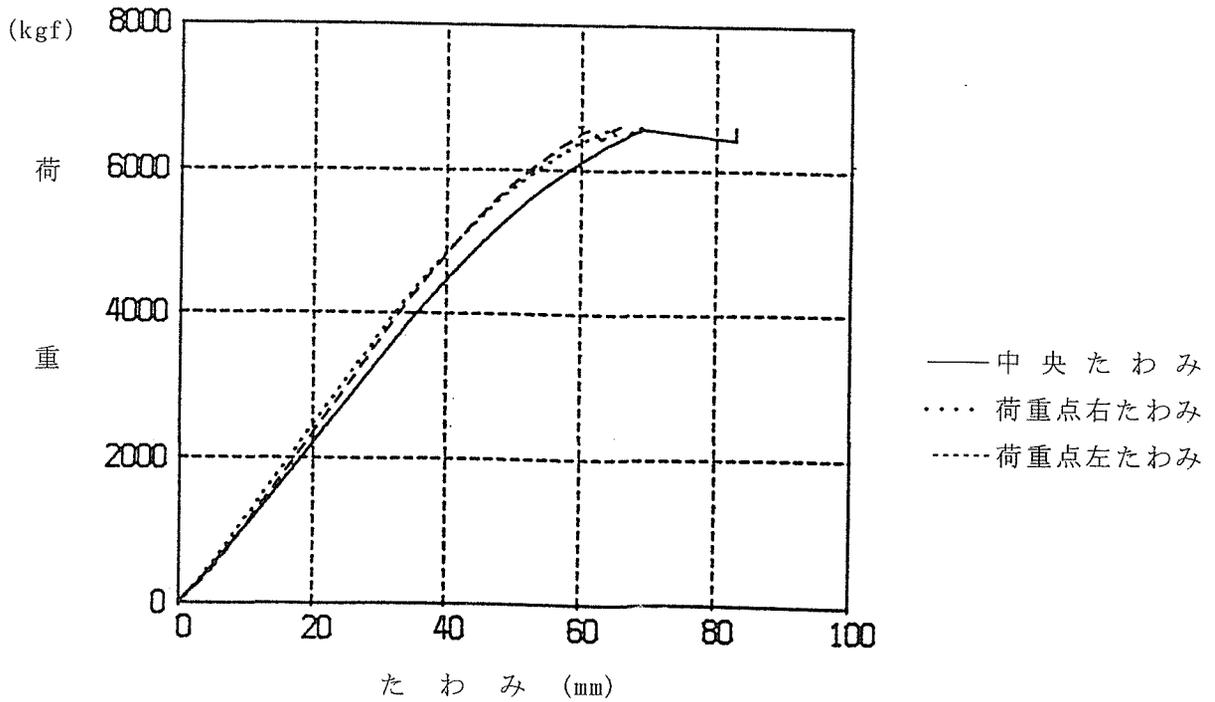
B 2-1

$P_{max} = 6515 \text{ kgf}$ 破壊性状：引張破壊



B 2-2

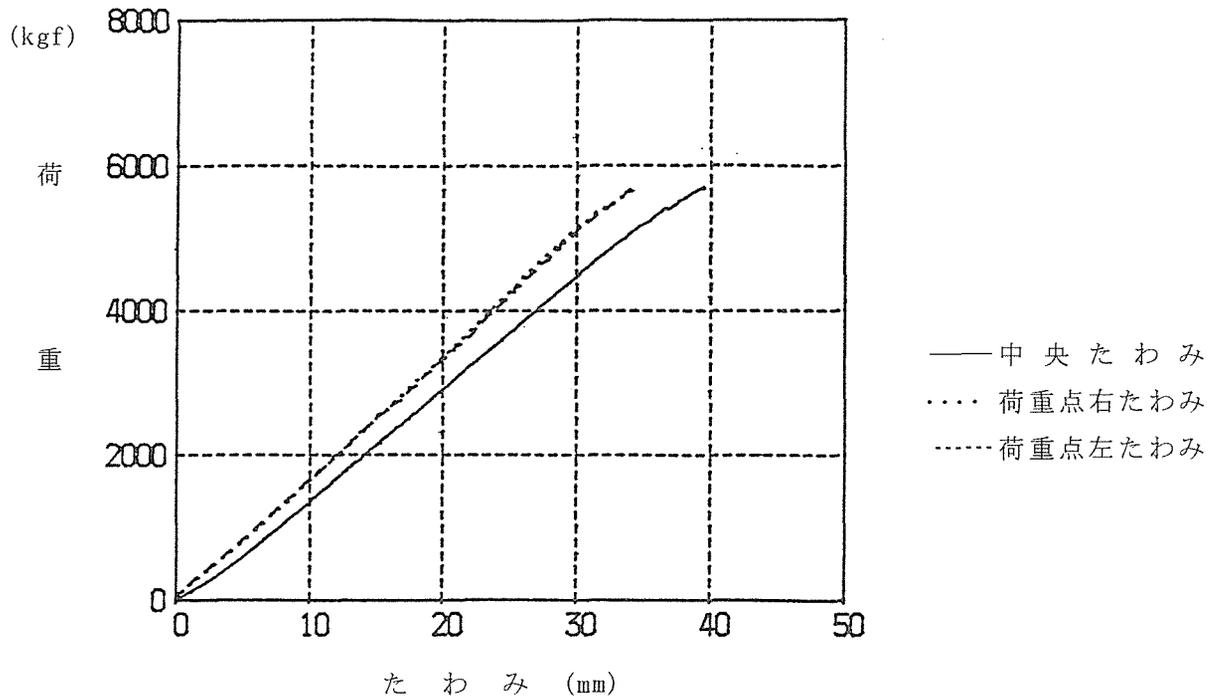
$P_{max} = 6600 \text{ kgf}$ 破壊性状：引張破壊



付図 1-4 曲げ試験における荷重とたわみの関係(4)

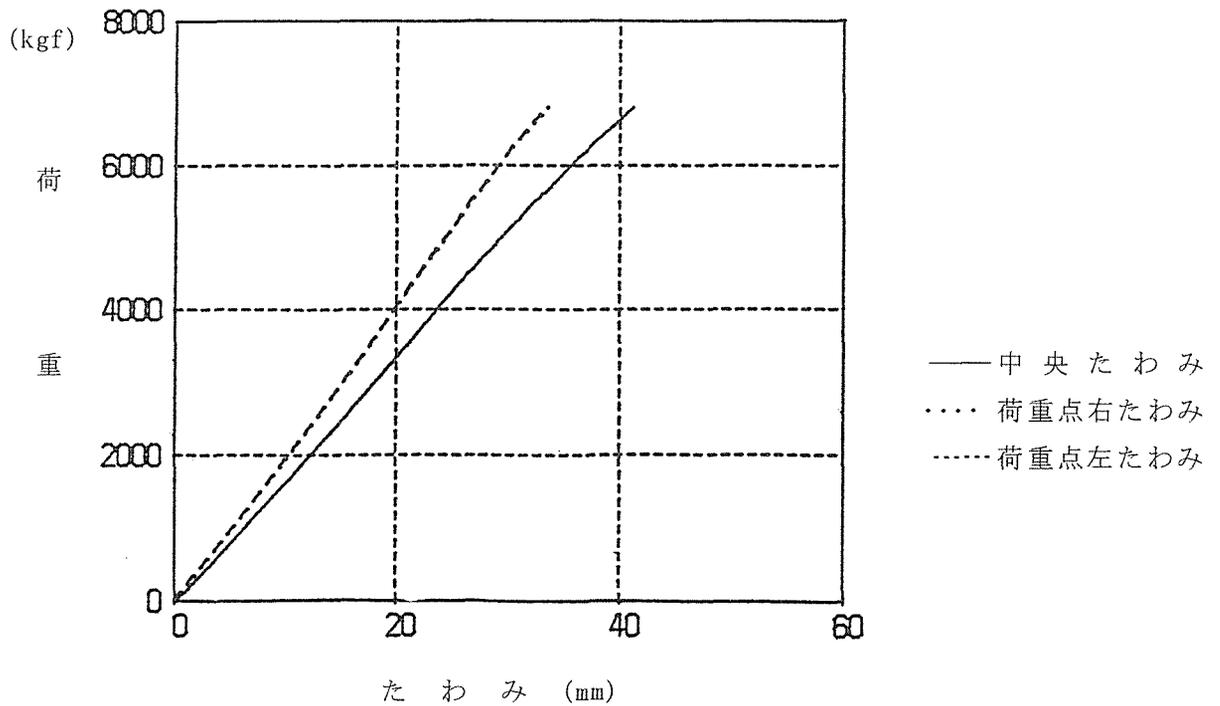
B 3-1

$P_{max} = 5695 \text{ kgf}$ 破壊性状：せん断破壊



B 3-2

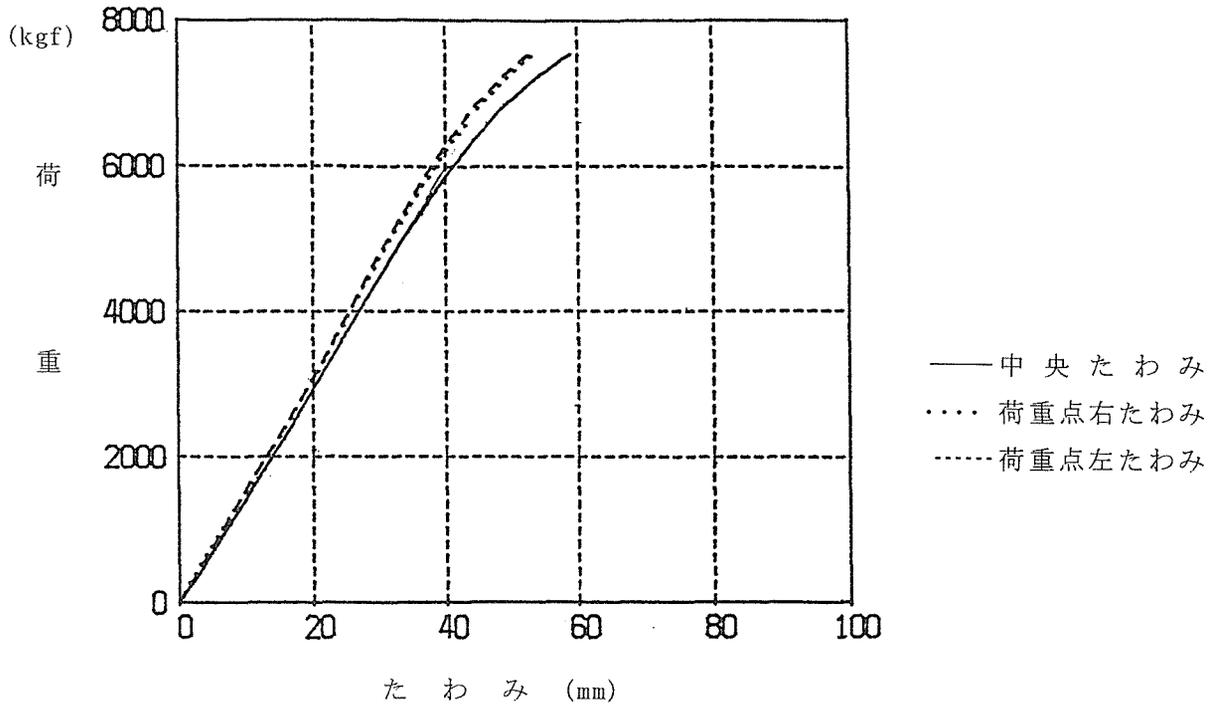
$P_{max} = 6805 \text{ kgf}$ 破壊性状：せん断破壊



付図 1-5 曲げ試験における荷重とたわみの関係 (5)

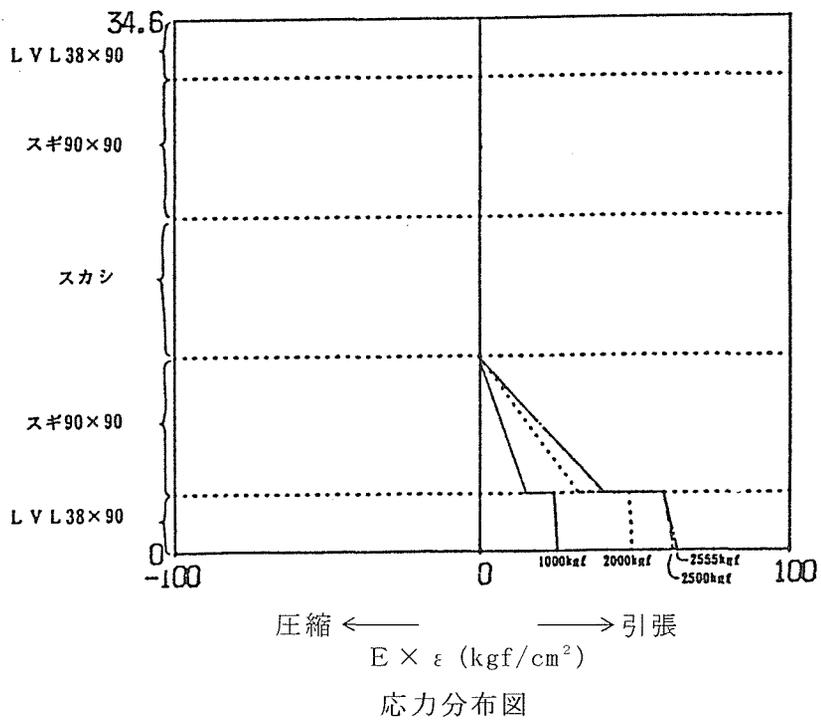
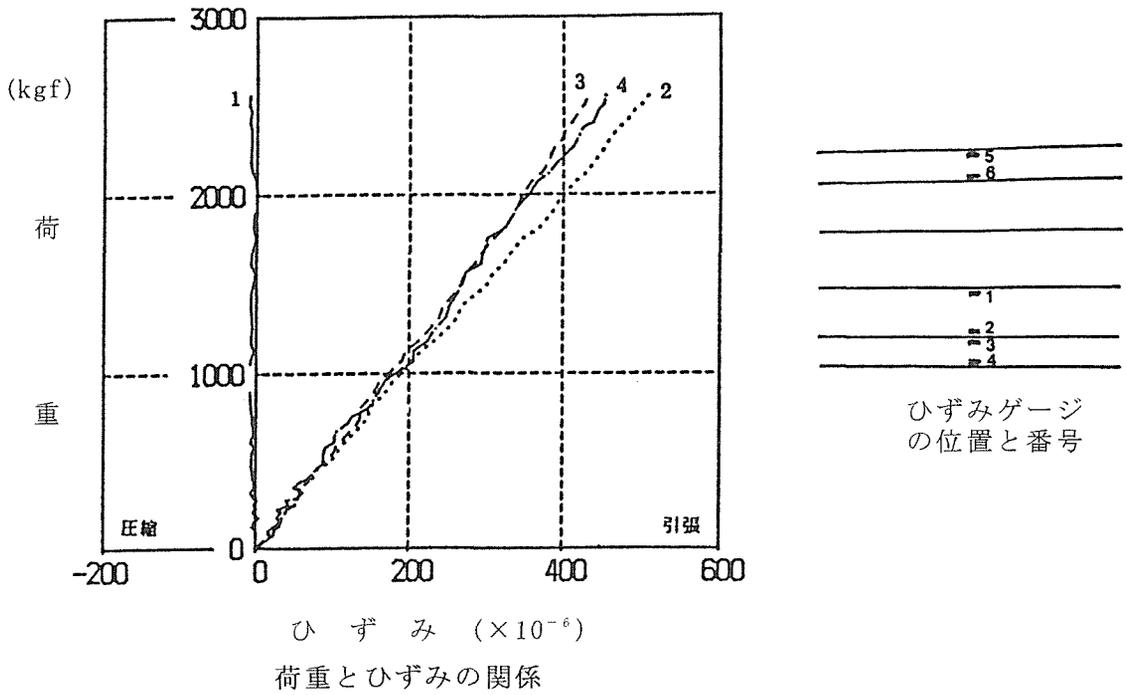
B 4 - 1

$P_{max} = 7545 \text{ kgf}$ 破壊性状：引張破壊



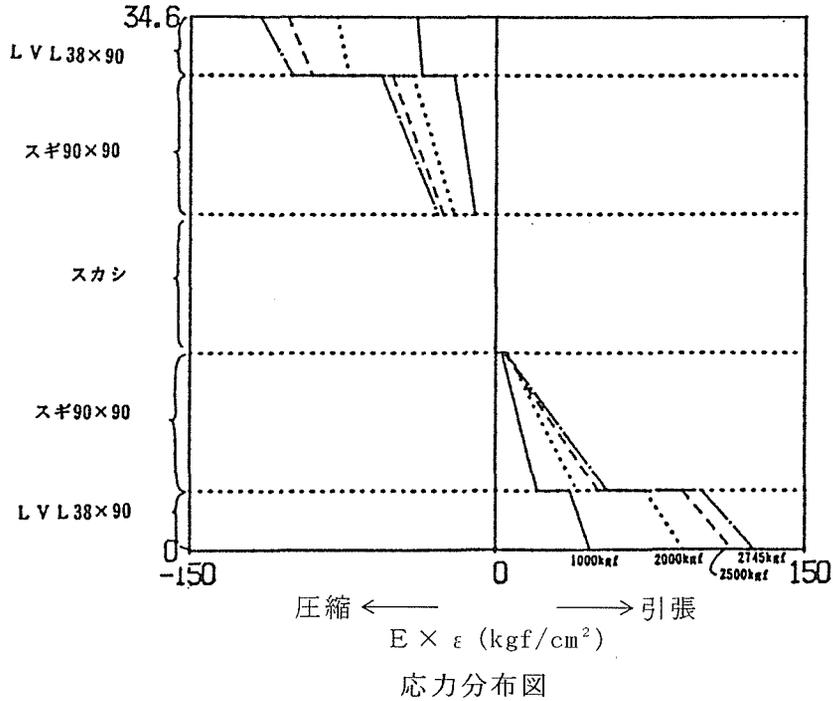
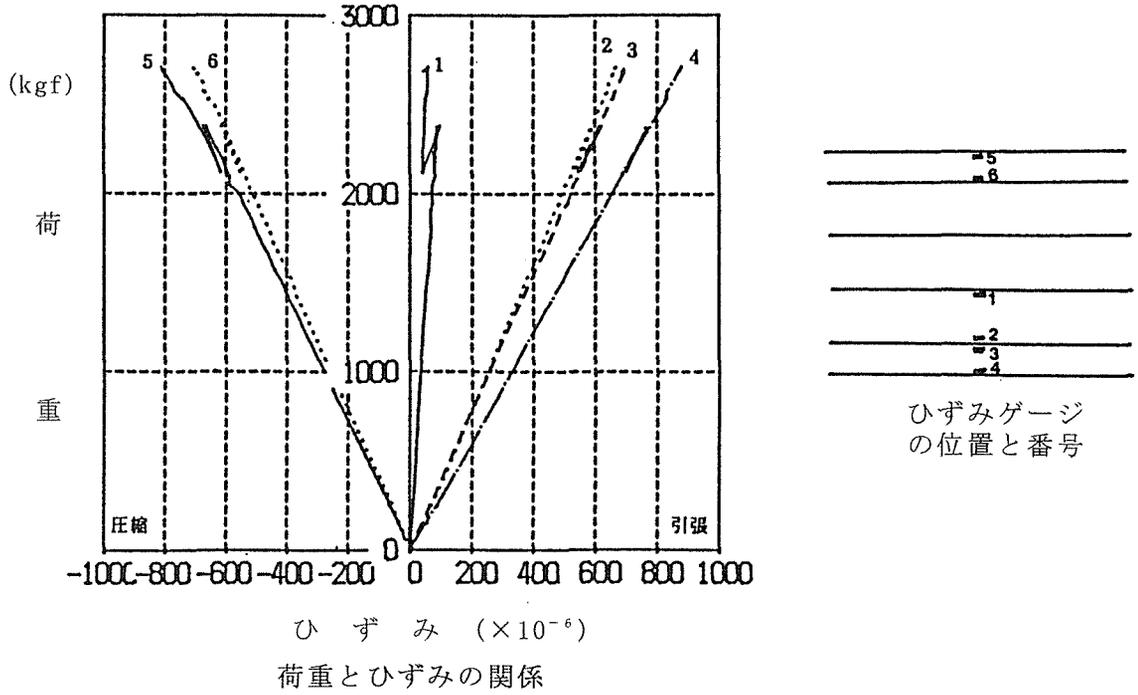
付図 1 - 6 曲げ試験における荷重とたわみの関係 (6)

A 1



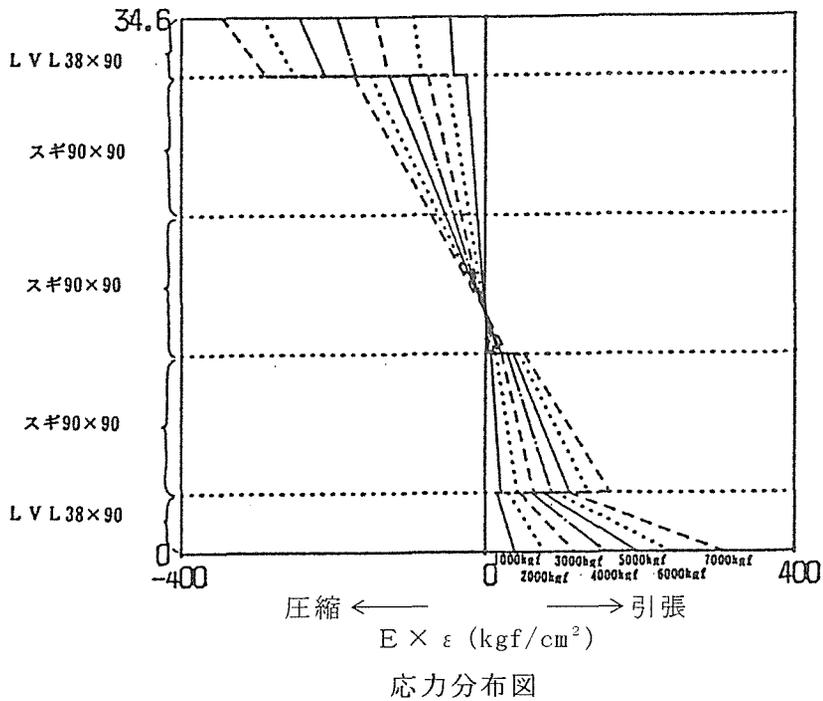
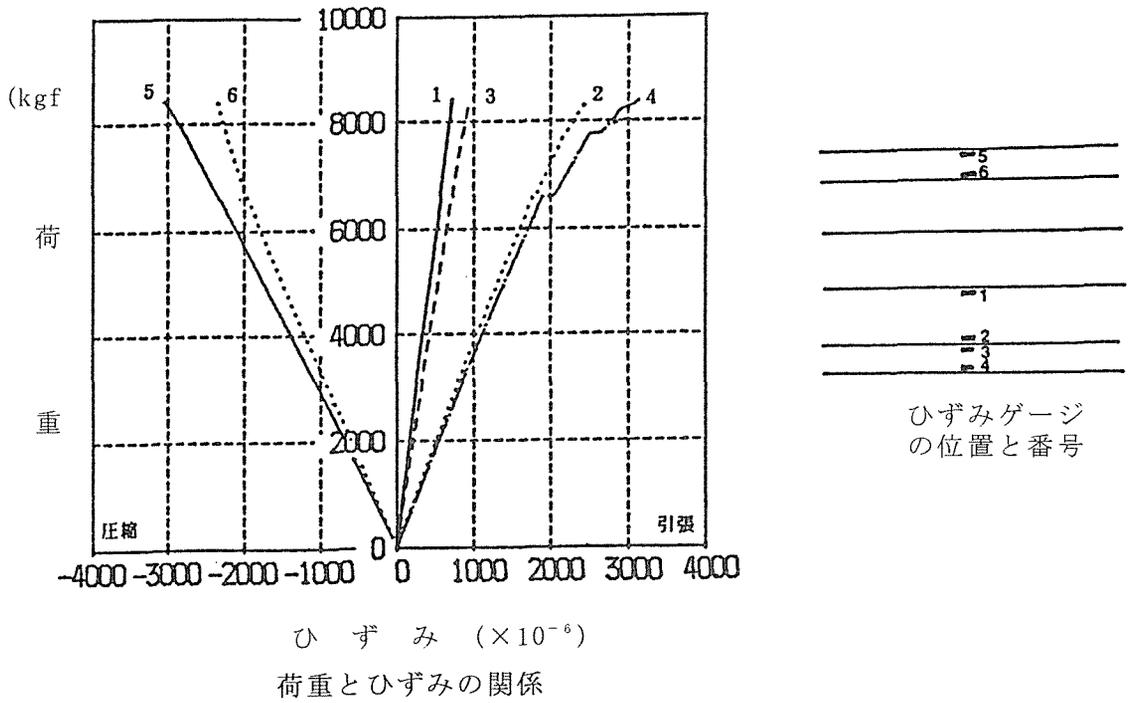
付図 2-1 荷重とひずみの関係(上)及び応力分布図(下)
(試験体 A 1)

A 2



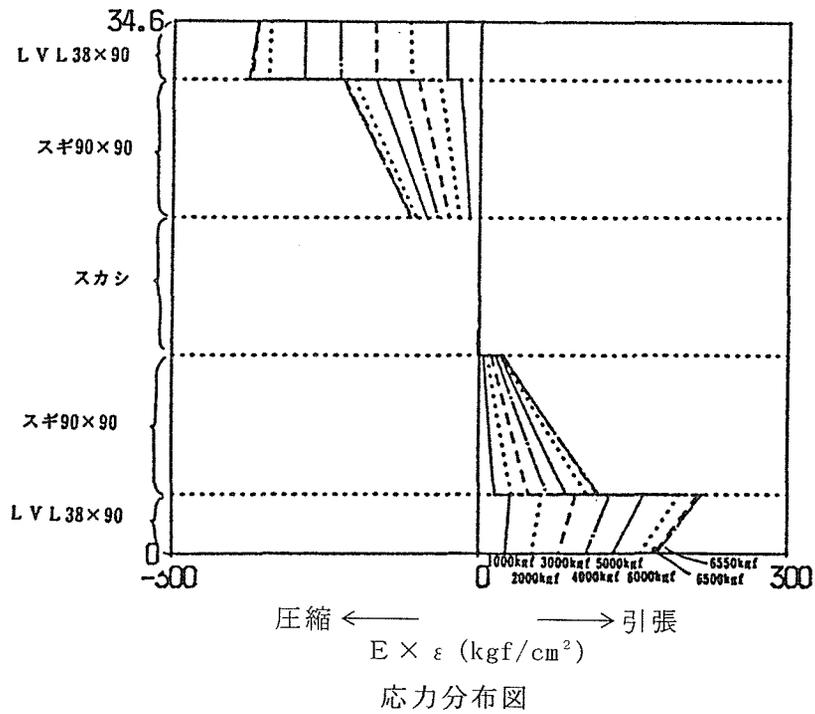
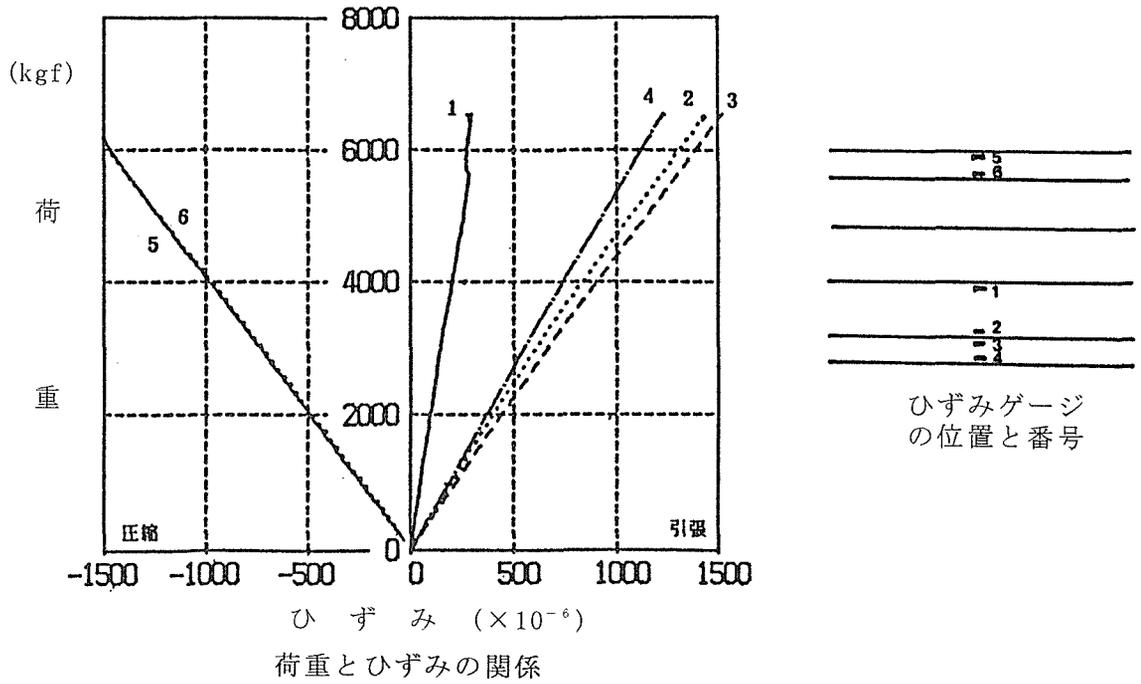
付図 2-2 荷重とひずみの関係(上)及び応力分布図(下)
(試験体 A 2)

A 3



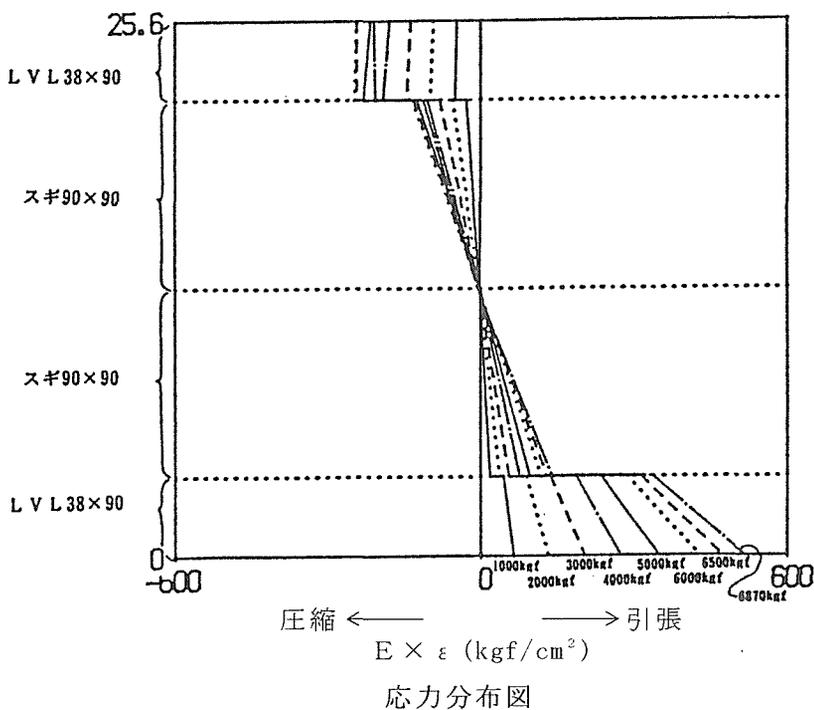
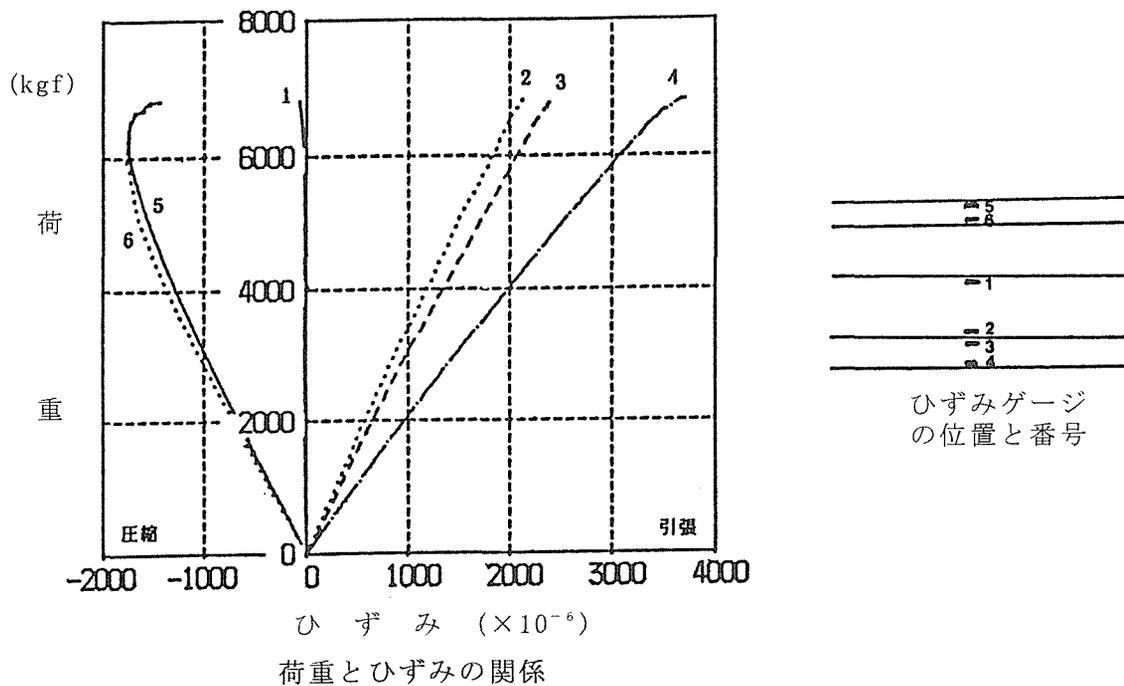
付図 2-3 荷重とひずみの関係(上)及び応力分布図(下)
(試験体 A 3)

A 4



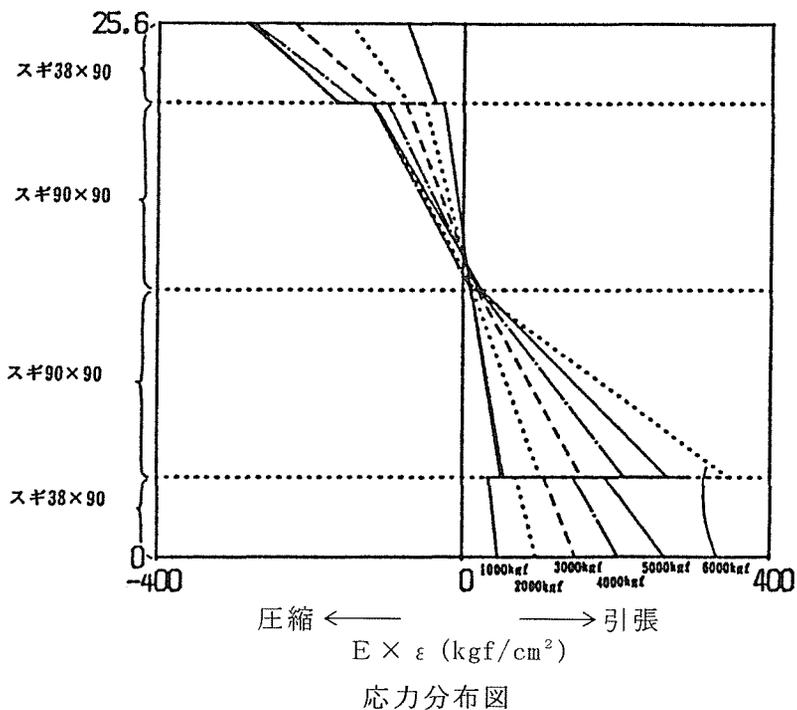
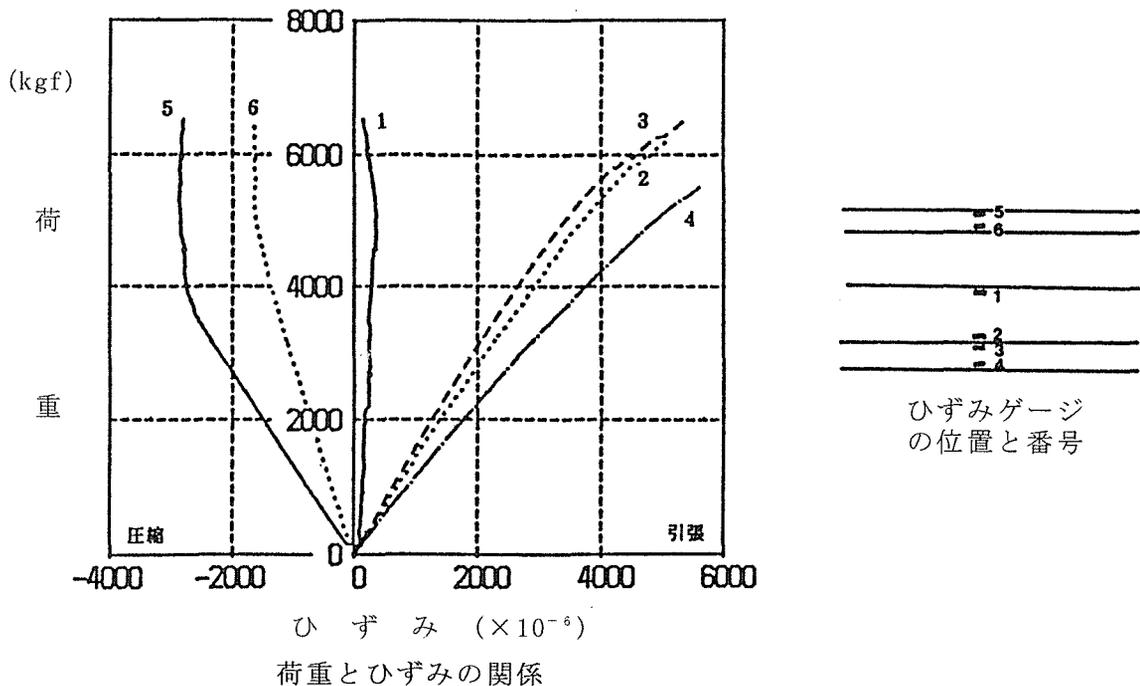
付図 2-4 荷重とひずみの関係(上)及び応力分布図(下)
(試験体 A 4)

B 1-1



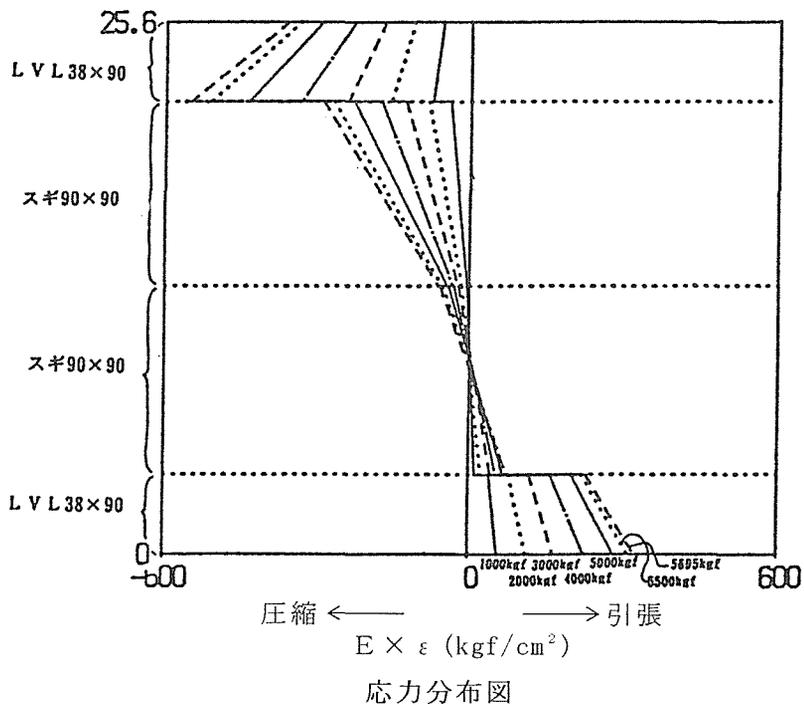
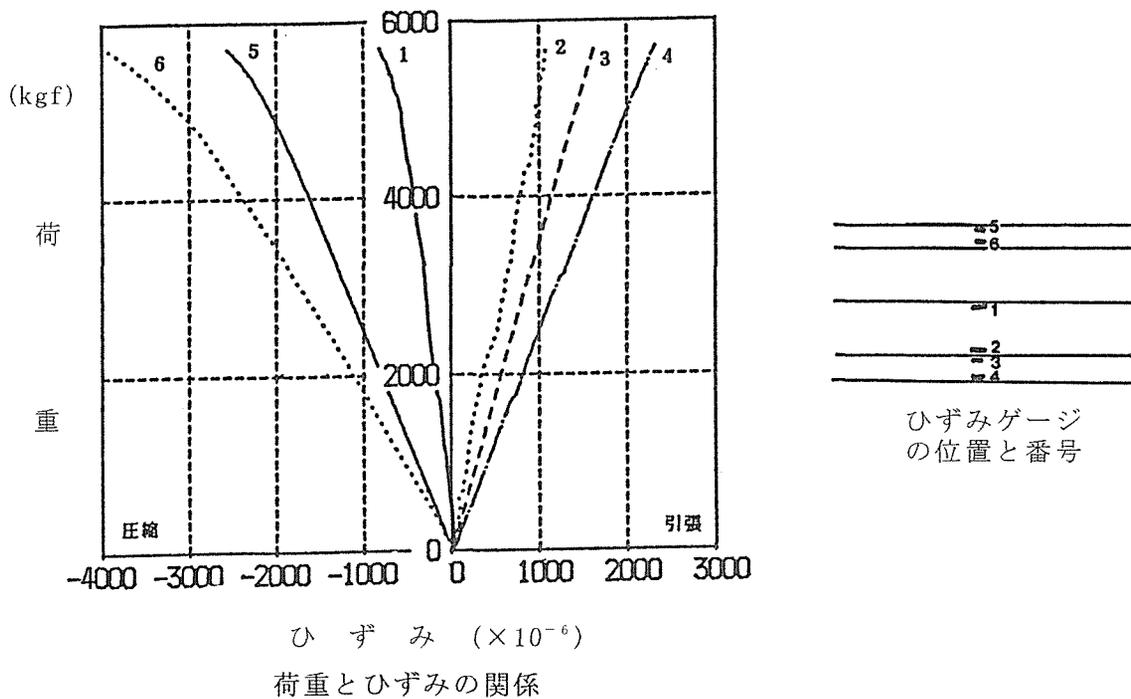
付図 2-5 荷重とひずみの関係(上)及び応力分布図(下)
(試験体 B 1-1)

B 2-1



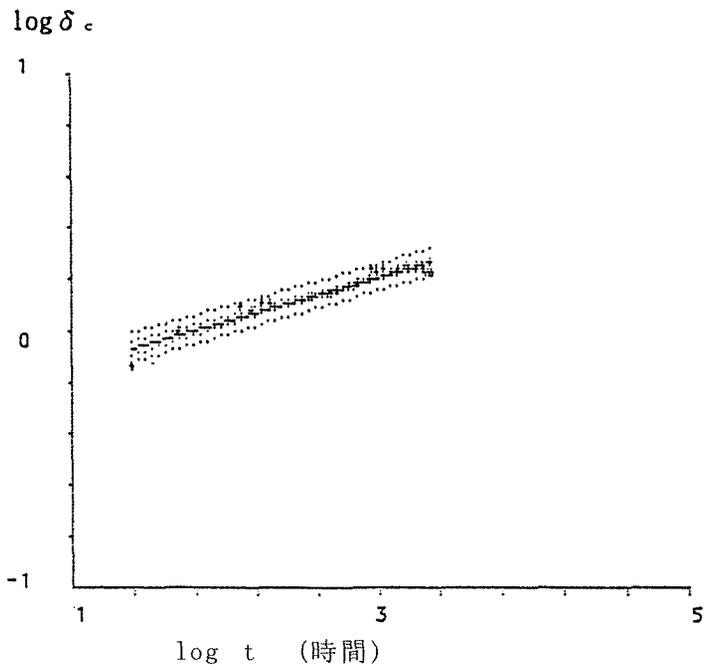
付図 2-6 荷重とひずみの関係(上)及び応力分布図(下)
(試験体 B 2-1)

B 3-1



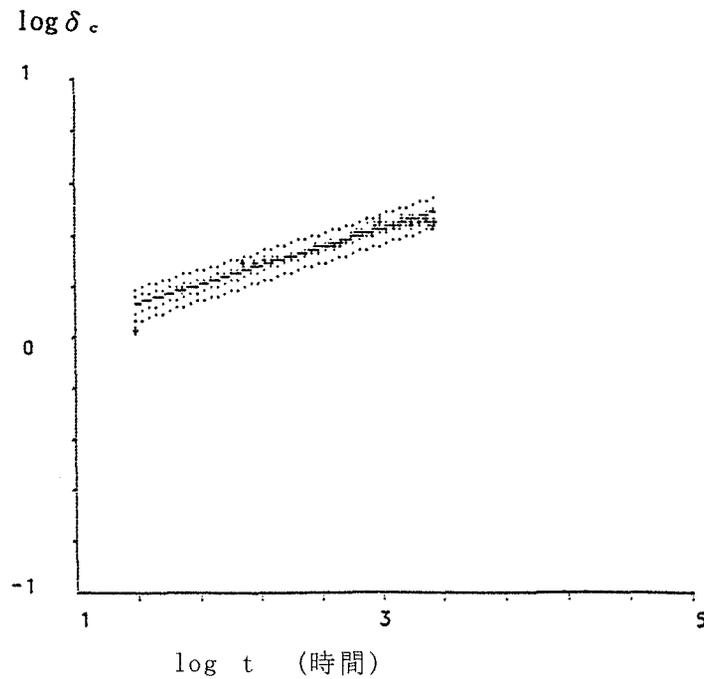
付図 2-7 荷重とひずみの関係(上)及び応力分布図(下)
(試験体 B 3-1)

クリープ-LVL



$n = 28$
 $y = -0.3004 + 0.1678 x$
 $r = 0.9624$

クリープ-スギ



$n = 28$
 $y = -0.1321 + 0.1837 x$
 $r = 0.9609$

付図3 クリープ試験における時間と中央たわみの関係(両対数)
 δ_c : クリープたわみ
 t : 載荷後の経過時間

第5章 スギ接着重ね梁の曲げクリープに関する使用指針

1. はじめに

スギ重ね梁を実用化する際、問題となるのは剛性とクリープ性能である。前章まで重ね梁のクリープ性能に及ぼす含水率の影響を実験により調べてきた。そこで、前章までのデータを総括し、また、ヨーロッパの基準を参考にして接着重ね梁の設計指針を提案する。

2. 接着重ね梁のクリープ試験の総括

前章までの実験の概略と、それから得られた結論をまとめると次のとおりである。主な実験は二つである。

2.1 実験 1

接着重ね梁に用いるスギ材の含水率を製造段階より調整し、含水率のクリープたわみに対する影響を検討した。

2.1.1 試験体

スギは105mm正角材で、含水率が15%、20%、25%になるように調整した。最終的に「ボルト締め接着重ね梁及び機械圧縮接着重ね梁の製造規格(案)」²⁾としてまとめられた「接着重ね梁の製作に関する手引書(案)」に基づいて、一液型ウレタン系合成樹脂接着剤を用いて3段に積層接着した。1週間養生後クリープ試験に供した。接着重ね梁の端部より切り出したブロックを用いて全乾法によって含水率を測定した。

2.1.2 試験方法

試験方法を図1に示す。載荷条件は以下のとおり。

固定荷重	65 kg/m ²
積載荷重	130 kg/m ²
合計	195 kg/m ²

梁にかかる総荷重は、 $195\text{kg/m}^2 \times 1.8\text{m}(\text{負担幅}) \times 3.6\text{m}(\text{スパン}) = 1,264\text{kg}$ である。

2.1.3 試験結果

スギを2～3週間程度除湿乾燥機にかけて、平均含水率を20%以下にすることは難しい。たとえ表面が20%以下であっても、平均含水率は20%以上あるので、クリープ試験を行うと、試験中に水分が抜けていく、いわゆる Mechano-sorptive 変形を生じる。従って、10年後の推定クリープたわみの初期たわみ(瞬間たわみ)に対する比は、材表面の含水率が20%程度のもので2～5と大きく、含水率が20～25%のものでは8を超え、実用上支障が出る。かつて行われた乾燥材を用いたボックスビームのクリープ試験では2～2.5に収まっていたことと比較すると、2～5という値は大きすぎる。

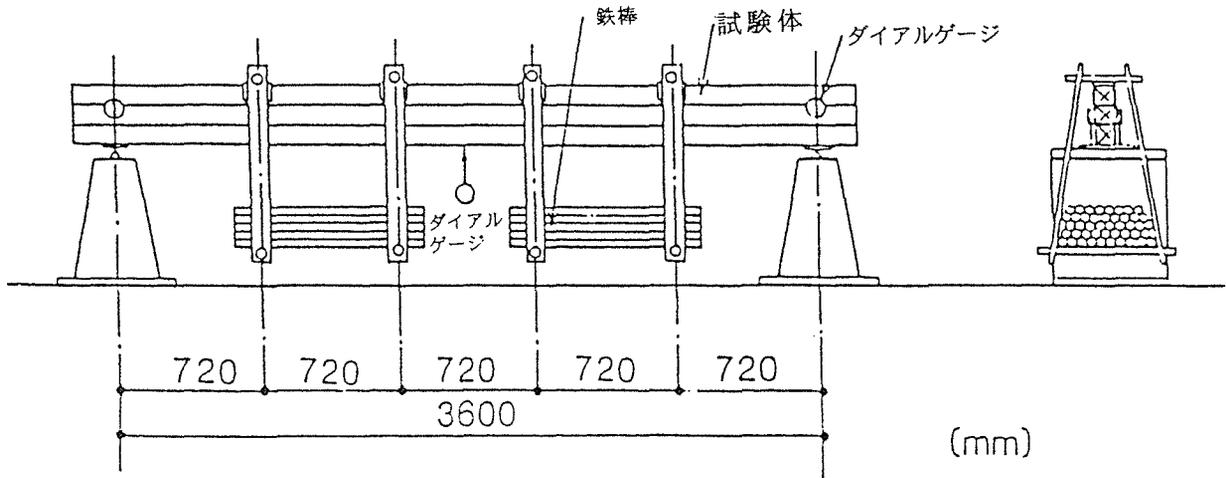


図1 曲げクリープ試験の方法(単位:mm)

2.2 実験2

2.2.1 試験体

実験1の結果を踏まえ、スギ重ね梁のクリープ問題を解決するために、重ね梁の最外層にLVLまたは気乾状態のスギ材を積層して剛性とクリープ性能の向上を図った。

最外層に使用した材料はLVL(商品名:マイクロラム、 $MOE: 140\text{tf/cm}^2$)とスギ材($MOE: \text{約}70\text{tf/cm}^2$ 、含水率:16~20%)で、これらの接着にはウレタン系合成樹脂接着剤を用いた。

試験体は図2のA、B、C、D(第4章のB1~B4)の4種で、試験体A、Bについて設計荷重載荷の曲げクリープ試験を行った。試験体Aはスギ2段重ねの両側にLVLを接着したもの、試験体BはAとの比較のために十分乾燥したスギの三つ割材を接着した。試験体CはAと同じタイプであるが、圧縮側のスギに3箇所のパットジョイントがある。試験体Dは2枚のLVLを引張側に集めたタイプである。

2.2.2 試験結果

LVLを接着することにより MOE は約50%、 MOR は約30%アップし、曲げ性能の向上が見られた。試験体Cのように圧縮側にパットジョイントがあっても、 MOE はパットジョイントのない試験体Aとほぼ同じである。 MOR の増加はないものの、LVLを接着することにより寸法の短いスギ材も重ね梁の部材として利用が可能である。試験体Dは MOE の向上が顕著である。試験体A~Cは MOE の実測値は計算値よりもやや低かった。引張り側の材に貼ったひずみゲージによって求めた MOR 値は試験体AとBではよく一致したが、試験体CではLVLが引張破壊する以前に P_{max} に達したため、低い値しか示さなかった。10年後のクリープたわみを推定したところ、試験体Aは約1.5で、十分実用可能であった。試験体Bも約1.7で、問題がなかった。これは最外層のスギが小割材で十分乾燥していたため、クリープ変形が抑えられたためと考えられる。従って、クリープたわみを初期たわみの2倍以内に抑えるためには、外側にLVLを接着するか、スギの場合には十分に乾燥した三つ割材を接着することが有効である。

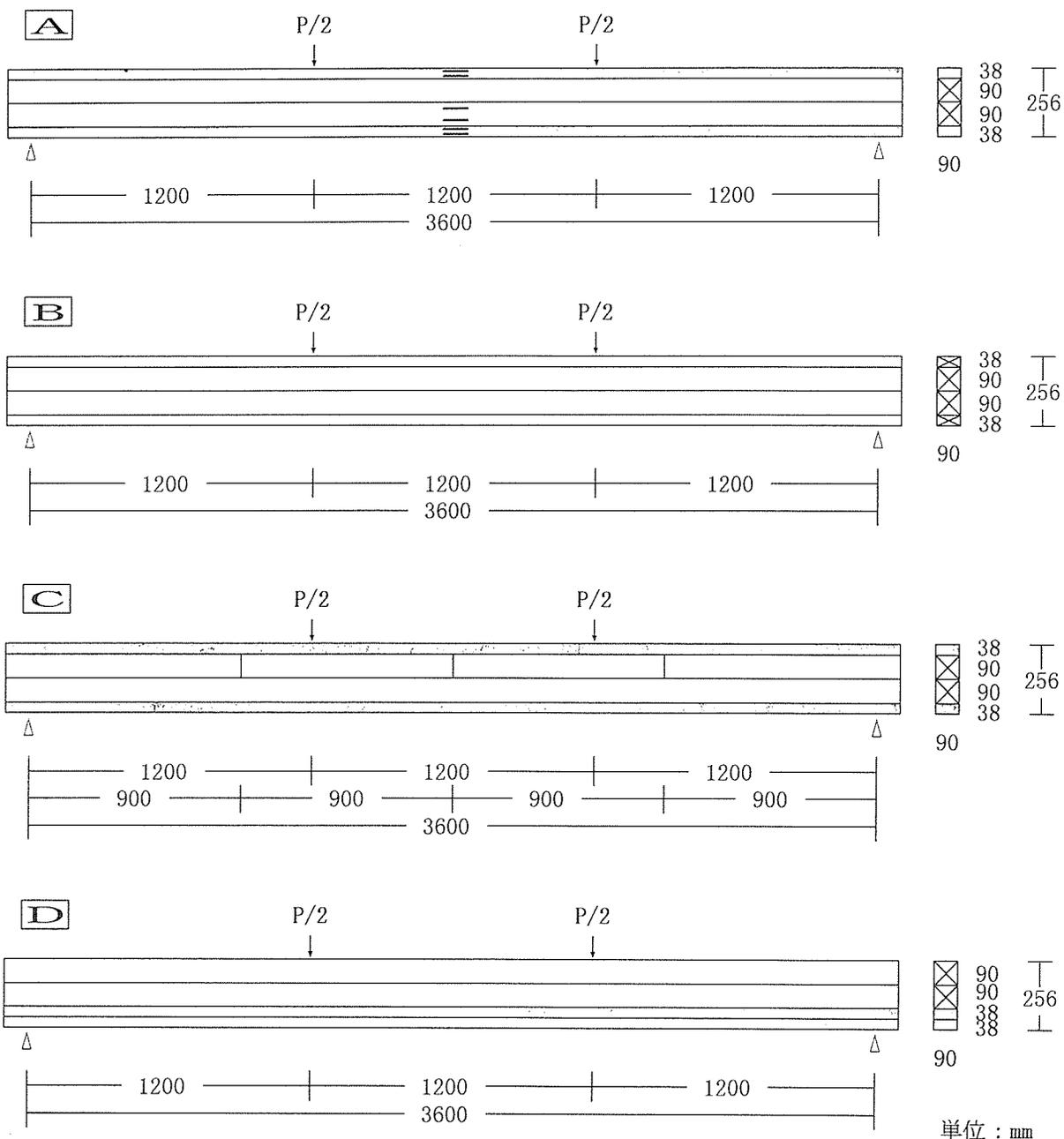


図 2 実験 2 に用いた試験体

3. ユーロコードにおけるクリープに及ぼす含水率の取り扱い

ヨーロッパの建築基準法であるユーロコードにおいては、木材の含水率区分を次のようにしている。

表1 ユーロコードにおける木材の含水率区分

含水率クラス1：平均含水率 12%未満
含水率クラス2：平均含水率 12%～18%未満
含水率クラス3：平均含水率 18%以上

また、荷重継続期間を次のように定めている。

表2 荷重継続期間(ユーロコード)

長期：10年
中期：6か月
短期：1週間
瞬間

ある含水率の木材がある期間曲げを受ける部材のたわみを計算するのに、クリープファクターの考えを取り入れている。含水率クラス1の材料が、短期荷重を受ける場合のたわみを1とした時の比で表した。

表3 クリープファクター(ユーロコード)

荷重継続期間	含水率クラス		
	1	2	3
長期	1.5	1.8	3.0
中期	1.2	1.3	2.0
短期	1.0	1.1	1.5

今回のクリープ試験によって定まる値を次に示す。

表4 クリープ試験によって求めたクリープファクター
(財)日本住宅・木材技術センター

荷重継続期間	含水率クラス		
	1	2	3
長期	—	1.5～2.0	3.0～5.0

これを見ると、ほぼユーロコードの値に符合している。そこで、接着重ね梁のクリープについては、安全を見込み、含水率15%未満のスギを使用した場合、または最外層に気乾のスギを積層した場合には2.0とする。表面含水率が15%以上20%未満の場合にはむくりを付ける等の措置を条件として2.0とする。表面含水率が20%以上では、気乾木材を最外層に配して用いなければならない。

ここでいう含水率は高周波式の含水率計で測定したものである。

表5 スギ接着重ね梁の含水率管理

表面含水率	接着重ね梁としての使用可能性
15%未満	そのまま使用可
15%以上 20%未満	厚さ38mmのLVLまたは厚さ38mmの気乾のスギ材を最外層に用いるか、そうでない場合はむくり等の措置をとる。
20%以上 25%未満	厚さ38mmのLVLまたは厚さ38mmの気乾のスギ材を最外層に積層
25%以上	使用不可

参考文献

- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発事業報告書 複合梁開発（昭和5年3月）
2-8(1983)
- 2) (財)日本住宅・木材技術センター：複合ばり開発事業報告書（昭和8年3月）pp.27(1996)

第Ⅱ編

梁用の製材及び集成材の曲げクリープ特性

第1章 梁用のスギ製材及びスギ集成材の曲げクリープ特性

1. はじめに

木材を構造材として用いる場合、その材質特性が長期間にわたって安定していることが材料選択の基本であり、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が大変重要である。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状態とは異なる挙動、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、長期間にわたる材質特性を解明する上で不可欠と言える。

この実験では、わが国における代表的な造林樹種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梁用のスギ製材及びスギ集成材の曲げクリープ特性を試験した。

2. 試験方法

2.1 試験体

試験体は宮崎県高岡町内山産スギの製材2体、集成材1体である。製材のうち1体は生材のまま、他の1体は蒸気式乾燥機による人工乾燥材とした。集成材はラミナ厚さ21mm、積層数10で、構造用大断面集成材のJAS(1986)特級に該当するよう、ラミナの選定、組み合わせを行った。クリープ試験開始時の状況を表1に示す。

表1 クリープ試験開始時の供試体の状況

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

* 高周波式含水率計(ケッ、モ2)による。支点、荷重点付近で測定した4箇所の平均値

2.2 載荷方法及び測定方法

図1に示す4点荷重方式とし、各応力比(Stress level、 $\alpha = 11\%$ 、 22% 、 33%)に応じて直径32mm、長さ1.83m(11.5kg/本)の鉄筋を必要量載荷した。載荷に際しては支点、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。更に、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の平滑なガラス板を当てた。応力比の増加(11%→22%→33%)は鉄筋を付加する方法によった。

たわみの測定は中央、荷重点2箇所、支点2箇所の計5箇所において、ストローク30mmのダイヤルゲージによった。

試験体の含水率は高周波式含水率計により4箇所、及び試験体の傍らに置いた4個のスギ小試験片(10.5cm×10.5cm×5cm、木口面をシリコン樹脂で被覆したもの)の重量を、たわみ測定と同時に測定した。

測定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。

試験時期はどの応力比(11%、22%、33%)もほぼ同一の環境下での比較ができるように、載荷時期を12月、期間を各1年間とした。

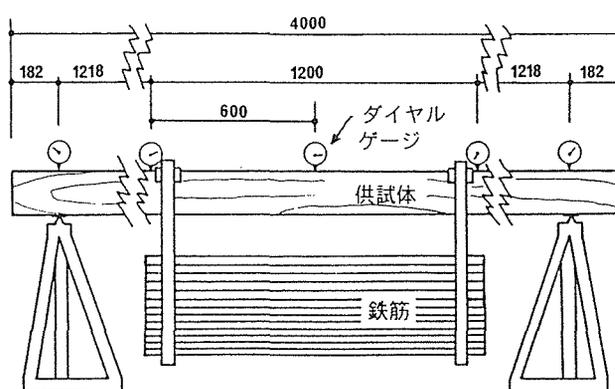


図1 実験装置 (単位: mm)

2.3 負荷荷重

既往のデータを総合して、曲げ強度(MOR)と縦振動ヤング係数(E_t)との関係を次式と仮定し、この式を用いて各試験体の E_t からMORを推定した。

$$(MOR) = 3.15 E_t + 157$$

更に、応力比(Stress level)を α とすると

$$\alpha \times (MOR) = 3 P \cdot a / b \cdot h^2 \quad (a : \text{ここでは図1で} 121.8 \text{cm})$$

から、負荷荷重(P)は次式で求められる。

$$P = \alpha \times (MOR) \times b \cdot h^2 / 3 a$$

このことから、以下に示すように各試験体の負荷荷重Pを定めた。

①生材

$b = 10.5$ 、 $h = 21.3$ 、 $E_t = 69.4$ であるから

$$\text{曲げ強度 } (MOR) = 3.15 \times 69.4 + 157 = 375.6 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{せん断強度 } \sigma_s = 6 \times 3 = 18 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\text{許容応力度} \times 3)$$

$$\text{曲げ耐力 } M = (MOR) \times Z = 375.6 \times 794.0 = 298,226.4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$\text{せん断耐力 } Q = \sigma_s \times A / 1.5 = 18 \times 223.6 / 1.5 = 2,683.2 \text{ kgf}$$

・せん断スパンを L_q とすると

$$M / L_q < Q \quad \text{から} \quad L_q > 111.1 \text{ cm}$$

この実験では図1のように $L_q = 121.8 \text{ cm}$ であるから条件を満足している。

・負荷荷重は、応力比0.11の場合は $P_{11} = [0.11 / (3 \times 121.8)] \times (MOR) \times b h^2 = 539 \text{ kgf}$
 $[0.11 / (3 \times 121.8) = 0.00030104]$

応力比0.22の場合は $P_{12} = 2 \times P_{11} = 1,078 \text{ kgf}$

②人工乾燥材

$b = 10.5$ 、 $h = 21.0$ 、 $E_1 = 73.5$ であるから

曲げ強度 (MOR) $= 3.15 \times 73.5 + 157 = 388.5 \text{ kgf/cm}^2$

せん断強度 $\sigma_s = 6 \times 3 = 18 \text{ kgf/cm}^2$ (許容応力度 $\times 3$)

曲げ耐力 $M = (\text{MOR}) \times Z = 388.5 \times 771.8 = 299,844.3 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$

せん断耐力 $Q = \sigma_s \times A / 1.5 = 18 \times 220.5 / 1.5 = 2,646.0 \text{ kgf}$

- ・せん断スパンを L_q とすると

$M / L_q < Q$ から $L_q > 113.3 \text{ cm}$

この実験では $L_q = 121.8 \text{ cm}$ であるから条件を満足している。

- ・負荷荷重は、応力比0.11の場合は $P_{21} = 0.00030104 \times (\text{MOR}) \times b h^2 = 542 \text{ kgf}$

応力比0.22の場合は $P_{22} = 2 \times P_{21} = 1,084 \text{ kgf}$

③集成材

$b = 10.5$ 、 $h = 20.9$ 、 $E_1 = 87.7$ であるから

曲げ強度 (MOR) $= 3.15 \times 87.7 + 157 = 433.3 \text{ kgf/cm}^2$

せん断強度 $\sigma_s = 9 \times 3 = 27 \text{ kgf/cm}^2$ (許容応力度 $\times 3$)

曲げ耐力 $M = (\text{MOR}) \times Z = 433.3 \times 764.4 = 331,214.5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$

せん断耐力 $Q = \sigma_s \times A / 1.5 = 27 \times 219.4 / 1.5 = 3,949.2 \text{ kgf}$

- ・せん断スパンを L_q とすると

$M / L_q < Q$ から $L_q > 83.9 \text{ cm}$

この実験では $L_q = 121.8 \text{ cm}$ であるから条件を満足している。

- ・負荷荷重は、応力比0.11の場合は $P_{31} = 0.00030104 \times (\text{MOR}) \times b h^2 = 598 \text{ kgf}$

応力比0.22の場合は $P_{32} = 2 \times P_{31} = 1,196 \text{ kgf}$

3. 結果と考察

3.1 全たわみ-時間曲線 ($\delta(t)$ - t 曲線)

図2に全たわみ-時間曲線 ($\delta(t)$ - t 曲線) を示す。ここで、全たわみ $\delta(t)$ は2箇所
の支点(図1参照)において測定したダイアルゲージの読みの増減の平均値を、試験体中央
部の膨張または収縮と見なして補正したたわみ量である。一般に木材及び木質材料のクリ
ープ限界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、図2からいずれの条件も
載荷直後の急増傾向は明確には認められないが、応力比が11%と22%では1年経過時点ま
で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。これは後述のように相対湿度の変動が影響しているもの
と考えられる。

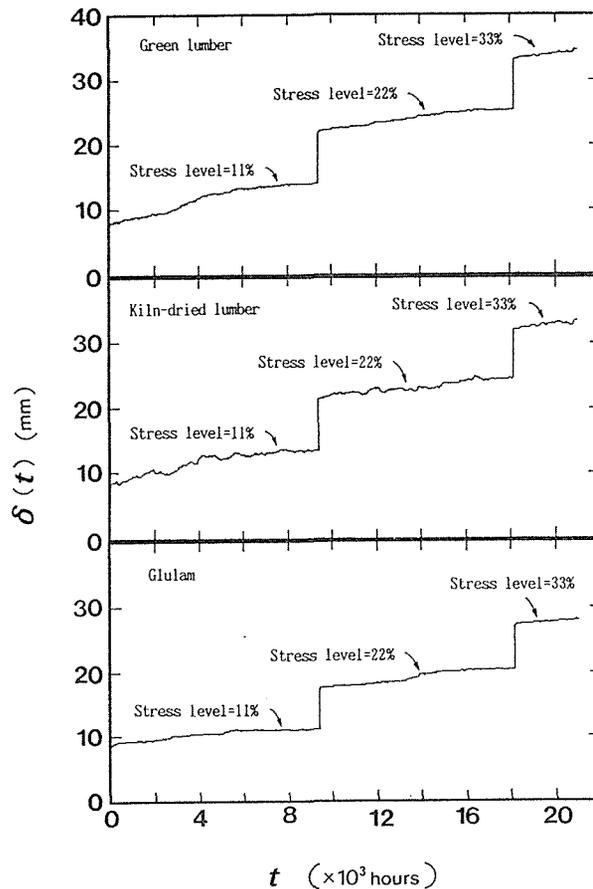


図2 全たわみ-時間曲線 ($\delta(t)$ - t 曲線)

図中の「Green lumber」(生材)は、載荷時の水分状態をいう(以下同じ)

3.2 応力比別の $\delta(t)$ - t 曲線と温度、相対湿度、収縮量、含水率、小試験片重量の経時変化

図3に応力比(Stress level)別の $\delta(t)$ - t 曲線と温度、相対湿度の経時変化を示す。この図における $\delta(t)$ - t 曲線の全体的な傾向は、いずれも前項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全たわみ $\delta(t)$ の挙動との関係を見ると、いず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⁾、この傾向は試験体間で差異が認められ、人工乾燥材で最も顕著であり、次いで生材、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、この実験では試験体数も少なく、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を評価する上で、今後可能な限りこの原因を明確にする必要がある。

応力比11%の場合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、生材では約2,000~4,000時間の範囲、人工乾燥材では載荷時点から4,000時間までの範囲で $\delta(t)$ の増加が顕著になっている。この原因は図4に示す応力比11%の場合における収縮量と含水率(高周波式含水率計による)の経時変化から推察可能である。すなわち、図4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いずれも載荷当初から4,000~5,000時間までは含水率が気乾状態よりも高かったことが読みとれる。従って、この期間における生材と人工乾

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の応力比11%の時ににおける $\delta(t)$ の挙動は容易に理解できる。また、脱湿時に起こるMechano-sorptive変形は一種の可塑変形に近い⁵⁾ことから、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。

応力比11%の時と22%の時ににおける $\delta(t)$ の挙動を見ると、それぞれ5,000時間、14,000時間付近(いずれも7月)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月を除いたある期間にクリープが安定状態に達していても、7、8月になるとたわみが進展するという既往の報告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敏感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。更に図3の相対湿度や図4の収縮量、含水率、小試験片重量の経時変化を見ると、特にこの時期の湿度変動が材の物性にか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いず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、製材では個体間に材質の違いがかなりあり、この原因を簡単に説明することはできないが、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(高周波式含水率計による)、小試験片重量と相対湿度の関係を示す。いずれも相対湿度との関係が明確に現れており、相対湿度は前述のように木材の物性にかかなりの影響を及ぼすことが示されている。

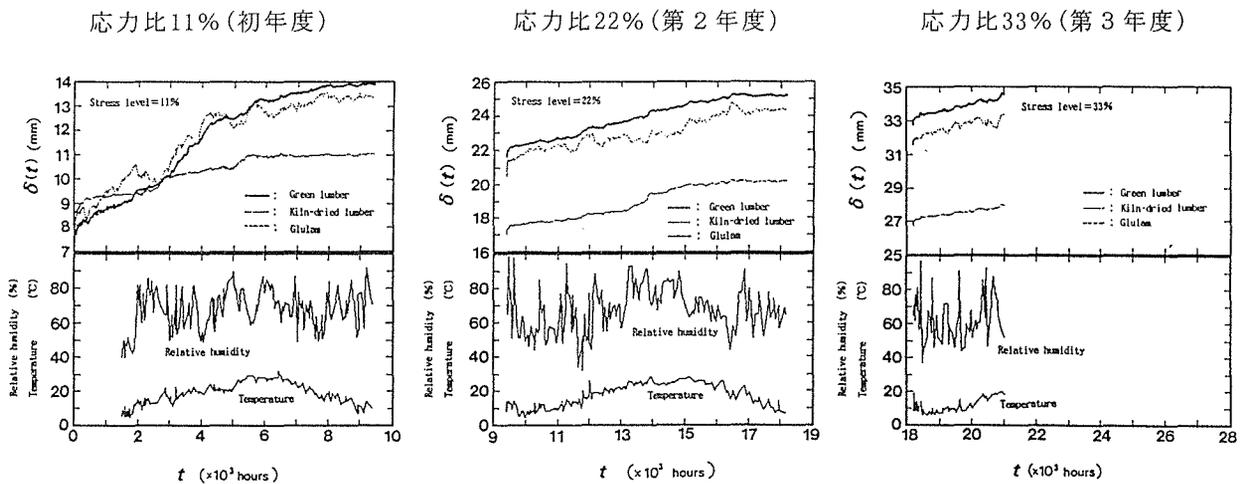


図3 応力比別の全たわみ-時間曲線と温度・湿度の経時変化

- : 生材 (Green lumber)
- : 人工乾燥材 (Kiln-dried lumber)
- : 集成材 (Glulam)
- 上 : 全たわみ (mm)
- 下 : 温度 (°C)、相対湿度 (%)
- 横軸 : 時間 (×10³ hour)

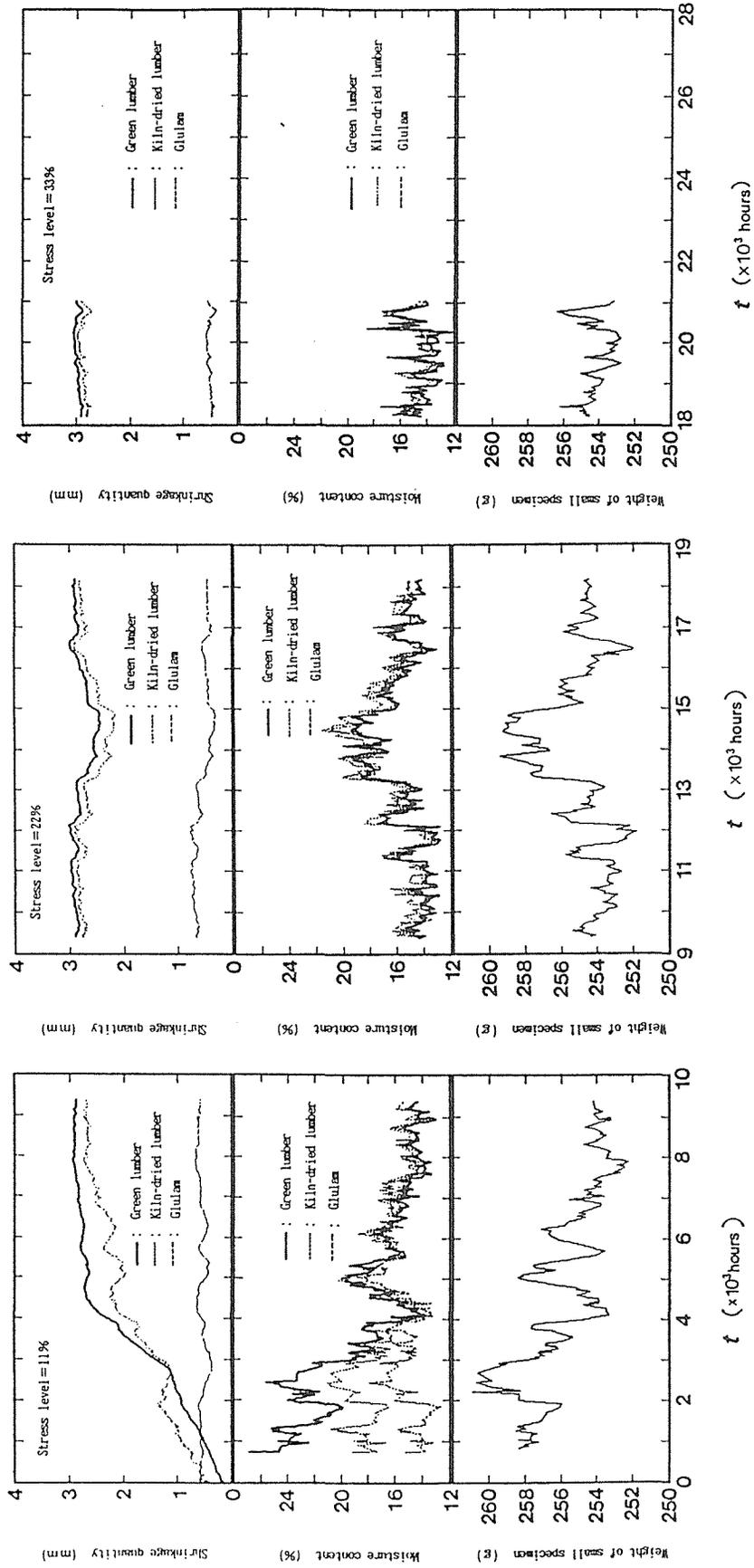


図4 収縮率(上)、含水率(中)、小試験片重量(下)の経時変化

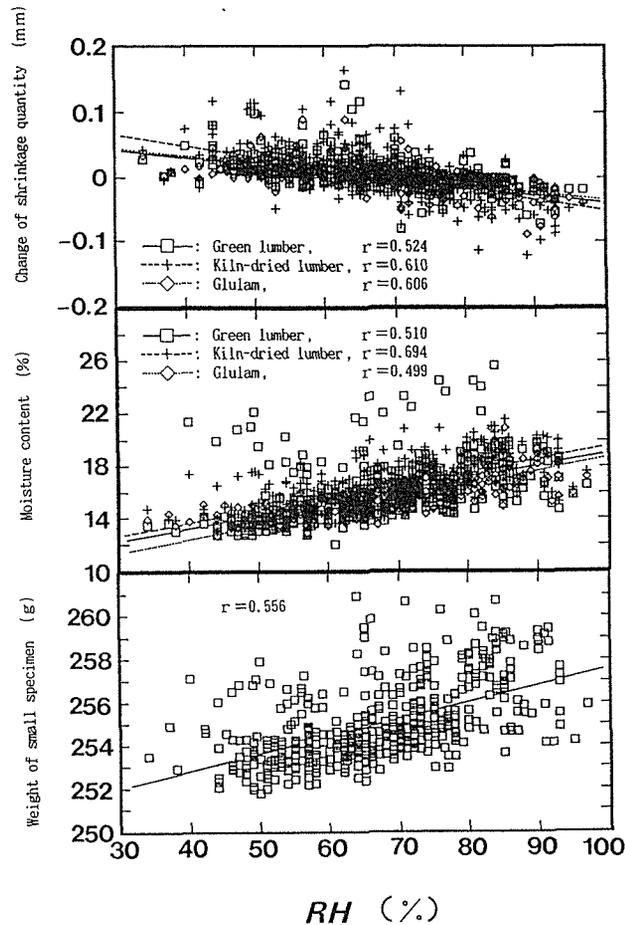


図5 収縮量変動幅、含水率、小試験片重量と相対湿度の関係

4. クリープ曲線の予測

4.1 実験値の t^N 則への当てはめ

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-時間曲線 [$\delta_c(t)-t$ 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)}。

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

ここで、 a 、 b は定数

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

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

ここで、 A 、 N は定数 (A をクリープ定数、 N を減速指数とも呼ぶこともある¹³⁾)

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

(2) 式の t^N 則の式を両対数で表示すれば (1) 式の形となり、両式は同じものといえることができる。

$\delta_c(t)-t$ 曲線に (1)、(2) 式を適用した場合を検討する。この実験では 1 年ごとに荷重を付加している (応力比 Stress level: 11% → 22% → 33%) 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 $\delta_e(t)-t$ 曲線の両対数表示を示す。この場合、 b は载荷後1時間、すなわち $\log(t)=0$ に外挿された縦軸の値で、定数である。応力比11%の場合と33%の場合には、木材や木質材料のクリープ初期に通常見られる1次クリープ^{2, 3)}が僅かに認められるが、応力比22%の場合にはほとんど認められない。また、応力比11%の場合と22%の場合にはいず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。この理由としては応力比11%の場合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、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う意味から、長時間側において定数を検討することが望ましいが、以上のように温度、水分の影響が大きいこと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 a と b を $a=N$ 、 $\exp(b)=A$ (すなわち $b=\log A$)と置いて(2)式に当てはめ、この式による推定曲線と実験による $\delta_e(t)-t$ 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。特に応力比11%の場合の生材と人工乾燥材、及び応力比22%の場合の全試験体において、測定の後半部では t^N 則による推定たわみが実測値をかなり下まわっている。この理由も図6に関して前述した内容と同様と考えられる。ところで、 N は材料特有の値を有する³⁾が、スギでは応力比20%の場合、0.23~0.26、応力比40%の場合0.30(ただし、長時間側から求めた値)との報告例がある^{1, 2)}。これらの値と図7における値を比較すると、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^{1, 4)})。また、 N は応力比に依存しない様子が伺われる^{2, 3, 15~17)}が、この実験では一般に言われるような集成材の方が製材より大きいという傾向^{2, 3)}を示していないのが特徴的である。

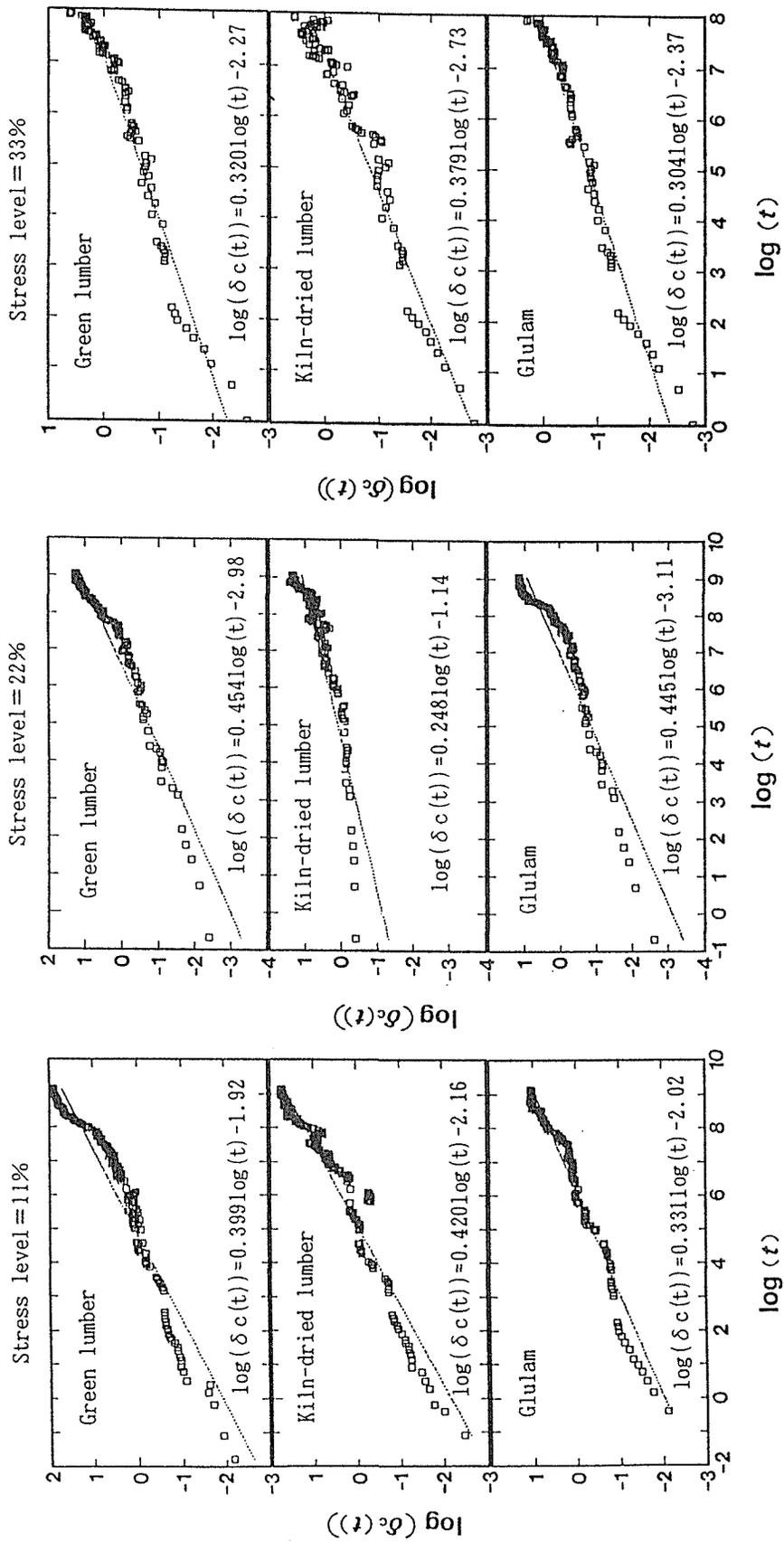


図6 クリープたわみ-時間関係の両対数値による表示

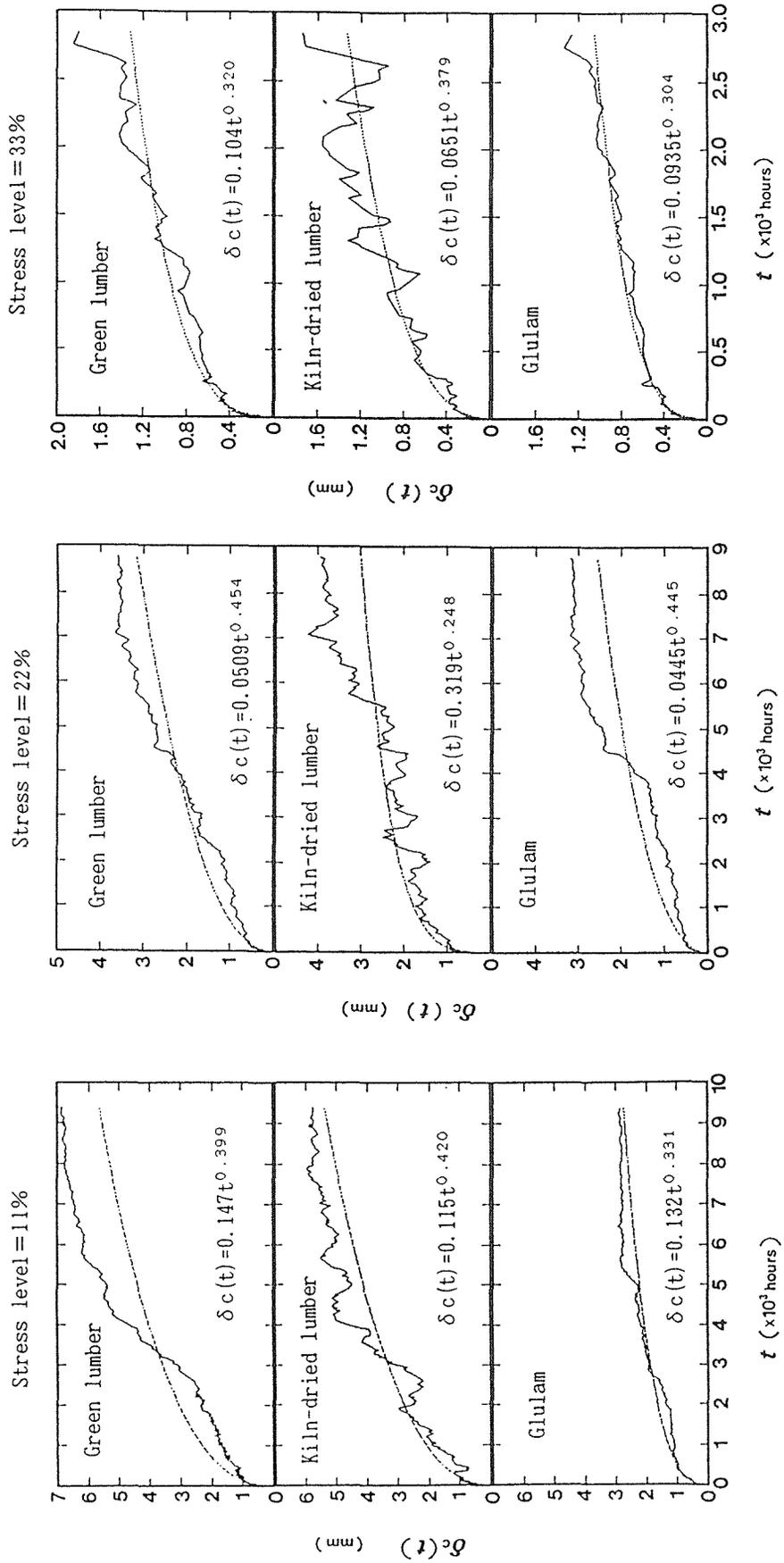


図7 クリープたわみ-時間曲線と t^n 則による推定たわみ曲線の比較

4.2 湿度変動に伴うたわみ挙動の把握

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

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

ここで、 r_0 ：初期弾性たわみ

r_1 及び β ：定数

$f(\Delta RH)$ ：湿度変動によって生じるたわみ

一方、比較的応力比の大きい場合で、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 t^N 則を基本にした次式の適合性が良い^{21, 22)}とされている。

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

ここで、 $h \cdot \Delta RH$ ：湿度変動によって生じるたわみで、

(4)式の $f(\Delta RH)$ を原点を通る直線式としたもの

この実験の条件では(5)式の適合性が比較的良いと考えられるので、この式に当てはめた場合を検討する。

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 $\Delta RH = RH - \text{平均RH}$ 、 $\Delta \delta_c(\Delta RH) = h \cdot \Delta RH$ 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)}、この実験でも検討したところ同様の結果が得られたので、応力比11%では負荷後5,000時間以降(初期の乾燥による脱湿を考慮した)、それ以外では1,000時間以降における両者の関係をプロットした。表2に各条件下における単回帰分析の結果を示す。

表2 湿度変動とクリープたわみ変動の関係の単回帰分析の結果

応力比	試験体	回帰式	相関係数
11%	生材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.000578 \cdot \Delta RH$	$r = 0.222$
	人工乾燥材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00601 \cdot \Delta RH$	$r = 0.576$
	集成材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.000427 \cdot \Delta RH$	$r = 0.174$
22%	生材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00146 \cdot \Delta RH$	$r = 0.315$
	人工乾燥材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00565 \cdot \Delta RH$	$r = 0.504$
	集成材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.000347 \cdot \Delta RH$	$r = 0.106$
33%	生材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00368 \cdot \Delta RH$	$r = 0.496$
	人工乾燥材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00879 \cdot \Delta RH$	$r = 0.694$
	集成材	$\Delta \delta_c(\Delta RH) = -0.00208 \cdot \Delta RH$	$r = 0.417$

図8と上記の結果から、 ΔRH に対する $\Delta \delta_c(\Delta RH)$ の関係は、応力比別では33%の場合に、試験体別では人工乾燥材の場合に、両者の相関が明確に現れている(相関係数が比較的大きい)。その一方で、応力比11%の生材と応力比11%、22%の集成材では ΔRH との対応が明確には現れていない。また、全体的に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の傾向は、木材(製材)では個々に異なるが²²⁾、集成材ではこれまで正の関係を示した例が多く^{18, 21, 22)}、ここで行った実験結果とは異なってい

る。従って、木質材料でも湿度に対するたわみ変動傾向は実験時の環境条件や材質、製造条件等によって異なった傾向を示すものと考えられる。

ここで算出した $\Delta\delta_c(\Delta RH)$ を、(5)式に適用した結果から得られた $\delta_c(t, \Delta RH)-t$ 曲線(クリープたわみ推定値-時間曲線)と実験による $\delta_c(t)-t$ 曲線(クリープたわみ-時間曲線)とを比較したものを図9に示す。この図は前述した負荷初期における湿度との対応を考慮し、応力比11%では負荷後5,000時間以後、それ以外では1,000時間以後について示したものである。この図では表2で相関係数の大きいものは湿度の変動に伴うクリープたわみの性状がよく現れている。従って、スギの実大材においても(5)式により湿度変動に伴う挙動を把握することは、ある程度可能であると考えられる。

5. まとめ

日本における代表的な造林樹種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急増する傾向を示した。この傾向は集成材で特に顕著であった。

3) 木材の収缩量、含水率、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、載荷後一定時間経過した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) 載荷後一定時間経過した後の段階に $t^{\frac{1}{2}}$ 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できることが示唆された。

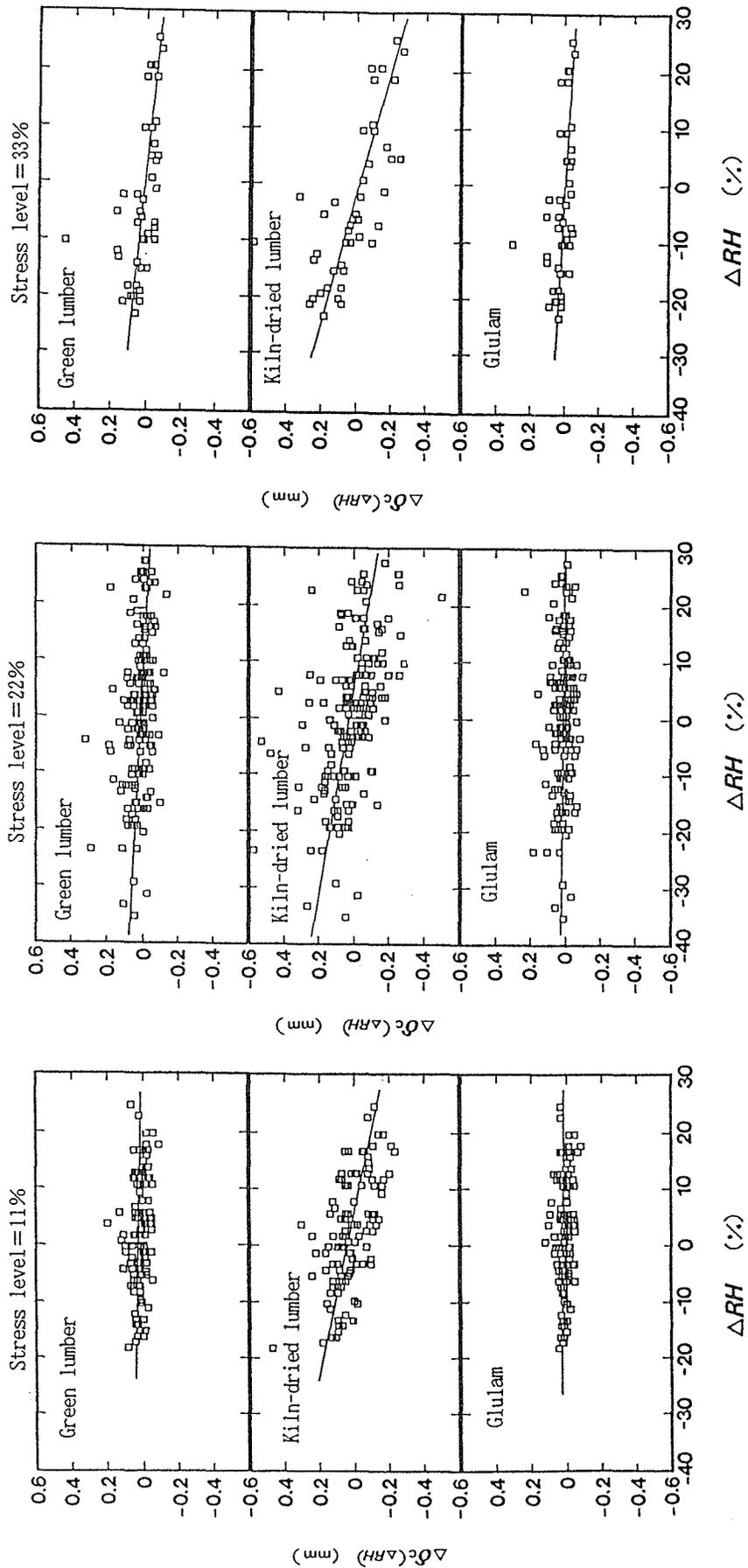


図8 クリープたわみ変動幅と相対湿度変動幅の関係

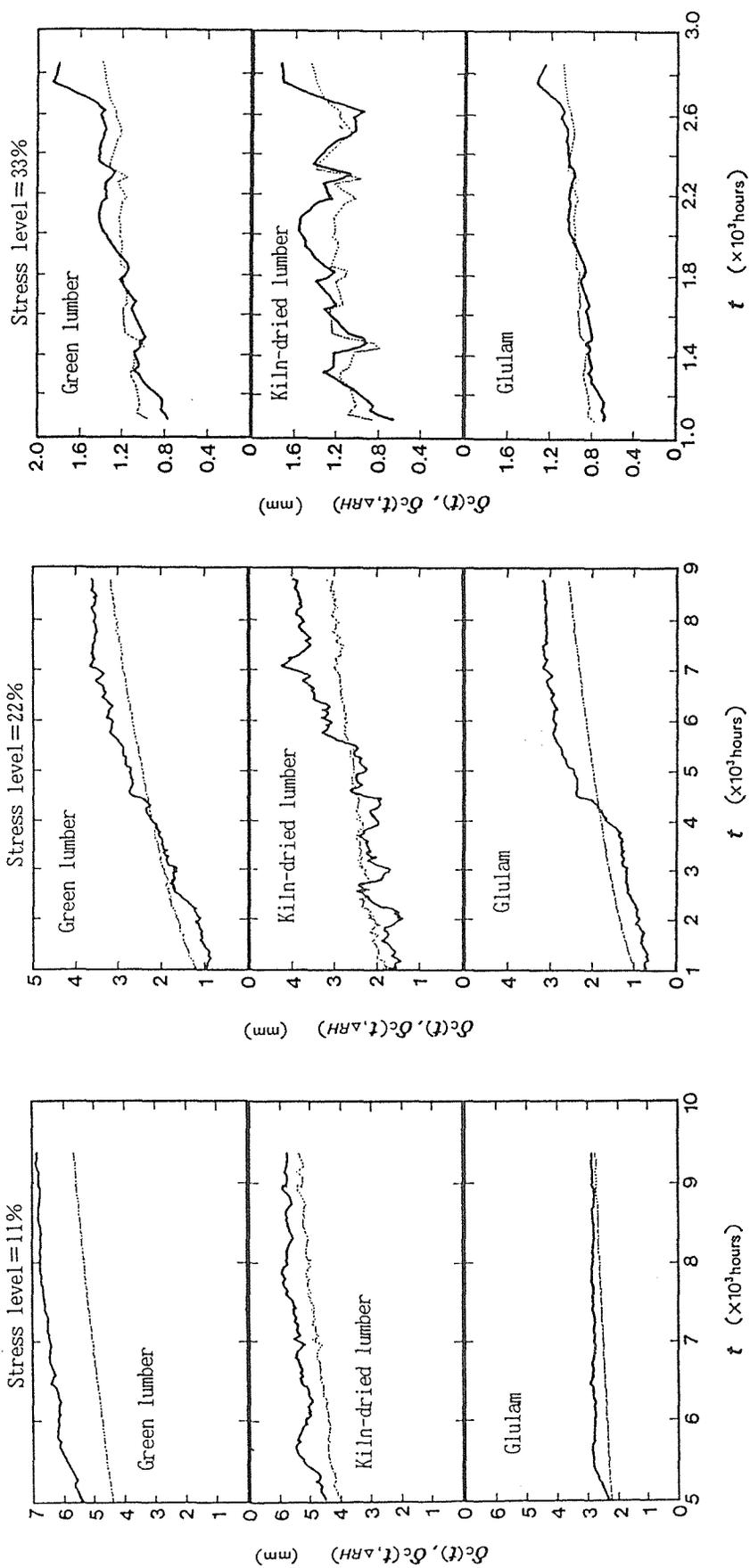


図9 クリープたわみ実測値と(5)式による推定値の比較
 — : 実測値 $\delta_c(t)$ - - - - : 推定値 $\delta_c(t, \Delta RH)$

文献

- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成4年3月)
43-49(1992)
- (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成5年3月)
71-80(1993)
- (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成6年3月)
65-78(1994)
- 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、1269-1270(1986)
- 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、325-328(1986)
- 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、349-352(1977)
- 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、101-109(1971)
- 7) 北原覚一：木材物理、森北出版、110(1976)
- 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、1401-1402(1987)
- 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、1267-1268(1986)
- 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、109-110(1973)
- 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、373-376(1980)
- 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. : 木材学会誌、39(9)、1020-1026(1993)
- 19) Hong, S. & Arima, T. : 第43回日本木材学会大会講演要旨集、27(1993)
- 20) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成5年3月)
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、23-24(1992)
- 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、123-124(1988)

第2章 梁用カラマツ集成材の曲げクリープ特性

1. はじめに

1.1 研究の背景

集成材の物理的特性は製材とほとんど変わらないが、強度的特性は製材よりも優れている。この性能の向上は、いわゆる集積集成効果、すなわち接着に必要な乾燥、製造過程で木材の欠点が除去されることによる。集成材は製材よりも部材の寸法を著しく大きくすることができるという利点もある。これらのことから、大規模建築の構造材として用いられることが多くなっている。

1986年、「集成材のJAS」に含まれていた構造用集成材の他に「構造用大断面集成材のJAS」が制定され(これらのJASは1996年、更に大改正が行われている)、1987年には建築基準法が改正された。これにより梁、柱などの主要構造部に大断面集成材を用いた場合、最高高さ13mを超える大規模建築物をつくることが可能になった。しかし、このような建物を欧米並みに普及させるには製造者、設計者、施工者の各技術の向上が不可欠であり、大断面集成材を用いた大規模建築物に関する基礎的な実験成果や技術の蓄積が求められている。

1.2 研究の目的

集成材を用いた大規模建築物の建設に当たり、木材の長期荷重に対する設計を合理的に行うためには、実大強度実験のほか、木材のクリープに関する研究が別途必要である。また、木材は樹種、断面形状、生育条件等により強度特性が異なり、様々なケースに対して、データを蓄積することが大切である。そこでこの実験では信州産カラマツの集成材を取り上げ、二つの応力下で長期の曲げ載荷実験を行い、そのクリープ特性を把握することとした。

2. 試験体の概要

2.1 試験体の形状・寸法

本実験で使用した試験体は、断面120mm×300mm、全長6.4mの集成材2体で、その外形を図1に示す。ラミナは信州産カラマツ、厚さ20mm、積層数15、接着剤はレゾルシノール樹脂系接着剤、斎藤木材工業㈱で製造した。本試験体は構造用大断面集成材のJAS(1986)の樹種区分/針葉樹A-2、1級同等と見なし、各許容値はそのレベルの値を用いた。載荷試験においては支点間距離を6,000mmとした。

日本建築学会「木構造計算規準・同解説」による材料特性は次のとおり。

曲げヤング係数	$E = 110 \times 10^3$	(kgf/cm ²) *
長期曲げ許容応力度	$f_b = 135$	(kgf/cm ²) *
長期引張許容応力度	$f_t = 90$	(kgf/cm ²) : 繊維方向
長期圧縮許容応力度	$f_c = 95$	(kgf/cm ²) : 繊維方向

長期せん断許容応力度 $f_s = 11$ (kgf/cm²) *

(注) *印は、荷重方向 または たわみ方向と積層面が直交する場合の値。

また、上記の断面形状より

断面積 : $A = 360$ cm²

断面 2 次モーメント : $I = 27,000$ cm⁴

断面係数 : $Z = 1,800$ cm³

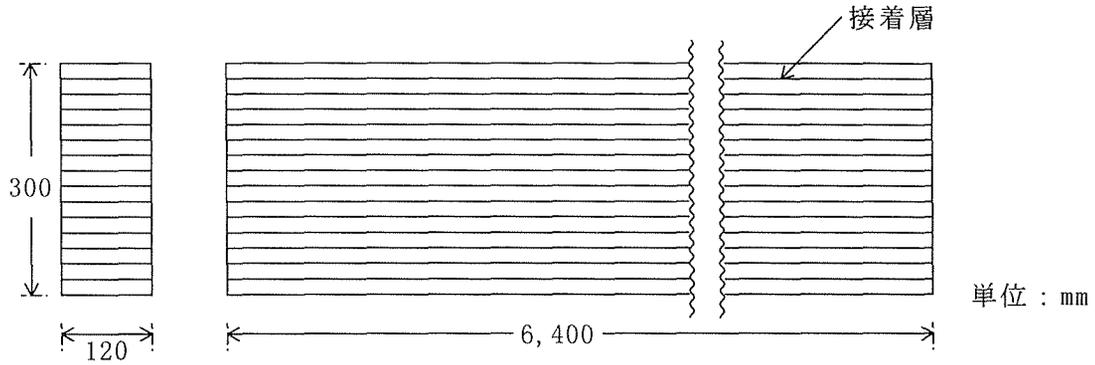


図 1 試験体外形

2.2 試験体の曲げヤング係数の算出

2.2.1 小荷重法によるラミナの曲げヤング係数

集成材の製造に先立ち、小荷重法によりラミナの曲げヤング係数(MOE)を測定した。ラミナは信州産カラマツ、厚さ約24mm、幅約140mm、長さ約6.5mで、フィンガージョイントが2～3箇所ある。これらは構造用大断面集成材のJAS(1986)の規準に基づいて目視による等級区分をしたひき板をフィンガージョイントによって縦継ぎしたものである。小荷重法はスパン2,700mmの支点間の中央に9kgの分銅を載荷し、この直下に設置した電気式変位計によりたわみを測定する方法である。断面サイズは供試体の4等分点3箇所幅、厚さを測定した。表1に測定結果及び測定値から算出されたラミナのヤング係数(E_s)を示す。ヤング係数の算出は次式による。

$$E_s = \frac{W_s \times \ell^3}{48 I_s \times \delta_s}$$

ここに、 W_s : 9 kg ℓ : 270cm

I_s : 3箇所での断面2次モーメントの平均値

2.2.2 グレーディングマシンによるラミナの曲げヤング係数

グレーディングマシンは曲げヤング係数を自動的に測定し、次の4種のヤング係数に換算する。

- ①表ヤング係数(E_{mf}) : 供試体の第1面から載荷し、n回測定した平均
- ②裏ヤング係数(E_{mr}) : 供試体の第2面から載荷し、n回測定した平均
- ③平均ヤング係数(E_{ms}) : ①、②の平均
- ④中央ヤング係数(E_{mc}) : ①、②におけるn/2回目の測定値の平均

断面2次モーメントの補正值とグレーディングマシンによる測定結果を表1に併せて示

す。

表1 ラミナの曲げヤング係数の測定結果

ラミナ No.	静的荷重測定値					グレーディングマシン測定値					
	平均値		G. M. I.	平均値	ヤング係数	G. M. I.	ヤング係数 ($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)				$\frac{E_s}{E_{m_a}}$
	幅 (mm)	厚さ (mm)	I_s (cm^4)	たわみ (mm)	E_s	I_m (cm^4)	E_{m_f}	E_{m_r}	E_{m_a}	E_{m_c}	
1	136.8	24.0	15.8	13.6	172.2	16.1	232.4	195.5	214.0	243.0	0.71
2	139.9	24.5	17.0	18.9	114.6	16.1	165.7	129.3	147.5	154.8	0.74
3	141.5	23.7	15.6	20.2	117.2	16.1	145.7	149.8	147.8	146.0	0.80
4	140.2	24.0	16.1	20.3	112.6	16.1	134.3	151.7	143.0	151.9	0.74
5	141.0	23.7	15.6	24.5	96.9	16.1	123.7	123.1	123.4	121.2	0.80
6	138.5	24.7	17.3	18.5	115.5	16.1	189.1	158.7	173.9	152.1	0.76
7	139.0	24.5	17.0	19.1	113.4	16.1	156.4	169.5	163.0	173.9	0.65
8	137.8	24.0	15.9	16.7	139.2	16.1	187.8	179.1	183.5	187.4	0.74
9	140.5	24.0	16.1	20.8	110.3	16.1	175.2	184.7	180.0	203.0	0.69
10	140.0	24.5	17.2	18.1	118.8	16.1	190.4	147.6	169.0	178.5	0.67
11	139.3	24.3	16.7	22.2	99.6	16.1	167.4	131.7	149.6	152.1	0.65
12	140.7	24.3	16.9	20.4	107.1	16.1	148.0	168.5	158.3	145.6	0.74
13	139.5	23.8	15.7	22.1	106.3	16.1	144.7	179.2	162.0	140.1	0.76
14	140.0	24.0	16.1	20.8	110.3	16.1	150.7	184.7	167.7	145.1	0.76
15	140.2	24.0	16.1	20.0	114.6	16.1	192.3	147.0	169.7	162.4	0.71
16	140.7	24.2	16.5	20.6	108.3	16.1	147.5	162.8	155.2	167.7	0.65
17	140.2	24.3	16.8	18.2	120.5	16.1	178.6	156.5	167.6	172.6	0.70
18	140.2	24.0	16.1	18.9	120.9	16.1	166.0	156.3	161.2	178.6	0.68
19	140.2	24.3	16.8	22.8	96.4	16.1	127.1	154.3	140.7	132.9	0.73
20	140.7	24.5	17.2	23.3	91.9	16.1	137.8	117.1	127.5	126.6	0.73
21	141.2	24.3	16.9	25.7	84.9	16.1	123.5	130.2	126.9	116.9	0.73
22	140.5	24.3	16.9	20.8	105.4	16.1	165.5	143.6	154.6	151.9	0.69
23	138.0	24.3	16.6	16.1	138.8	16.1	197.9	208.8	203.4	188.2	0.74
24	139.7	24.2	16.4	16.7	134.9	16.1	196.0	165.5	180.8	170.8	0.79
25	140.7	24.2	16.5	20.3	110.2	16.1	181.5	145.0	163.3	169.2	0.65
26	140.5	24.2	16.5	21.5	103.9	16.1	163.8	137.6	150.7	146.1	0.71
27	139.8	24.2	16.4	20.2	111.1	16.1	147.6	139.9	143.8	157.2	0.71
28	139.2	24.3	16.7	17.7	125.1	16.1	193.1	156.6	174.9	189.8	0.66
29	138.5	24.0	16.0	17.3	133.7	16.1	177.5	148.0	162.8	178.5	0.75
30	139.3	24.0	16.1	20.3	113.3	16.1	153.0	179.8	166.4	159.3	0.71

(注) G. M. I. : 断面2次モーメント

2.2.3 集成材の曲げヤング係数の算出

この結果を基に、ラミナを外層用、中間層用、内層用に仕分けて集成材を製造した。図2に2本の試験体のラミナ構成と各ラミナのフィンガージョイントの位置を示す。15層の場合のラミナ構成は、構造用大断面集成材 J A S (1986)では外層4層、中間層4層、内層7層である。日本建築学会「木構造計算規準・同解説」の算出法に基づき、2本の試験体のヤング係数の計算を行った。計算に用いたヤング係数は次の2種類である。

E_s (静的荷重によるもの)

E_{m_a} (グレーディングマシンによるもの)

計算結果を表 2 に示す。構造用大断面集成材の J A S (1986) の樹種区分 / 針葉樹 A-2、1 級のヤング係数規定値は前記のように 110 tf/cm^2 で、今回求められたヤング係数はどちらもそれを上回る値となった。特に E_{ma} を用いたものは $158 \sim 160 (\times 10^3 \text{ kgf/cm}^2)$ とかなり高い値となっている。本実験では試験体のヤング係数として E_s による値を取り扱う。

表 2 集成材の MOE 計算結果

ラミナの ヤング係数	集成材	
	試験体①	試験体②
E_s	116.1	117.1
E_{ma}	158.3	159.9

(単位 : $\text{tf/cm}^2 = 10^3 \text{ kgf/cm}^2$)

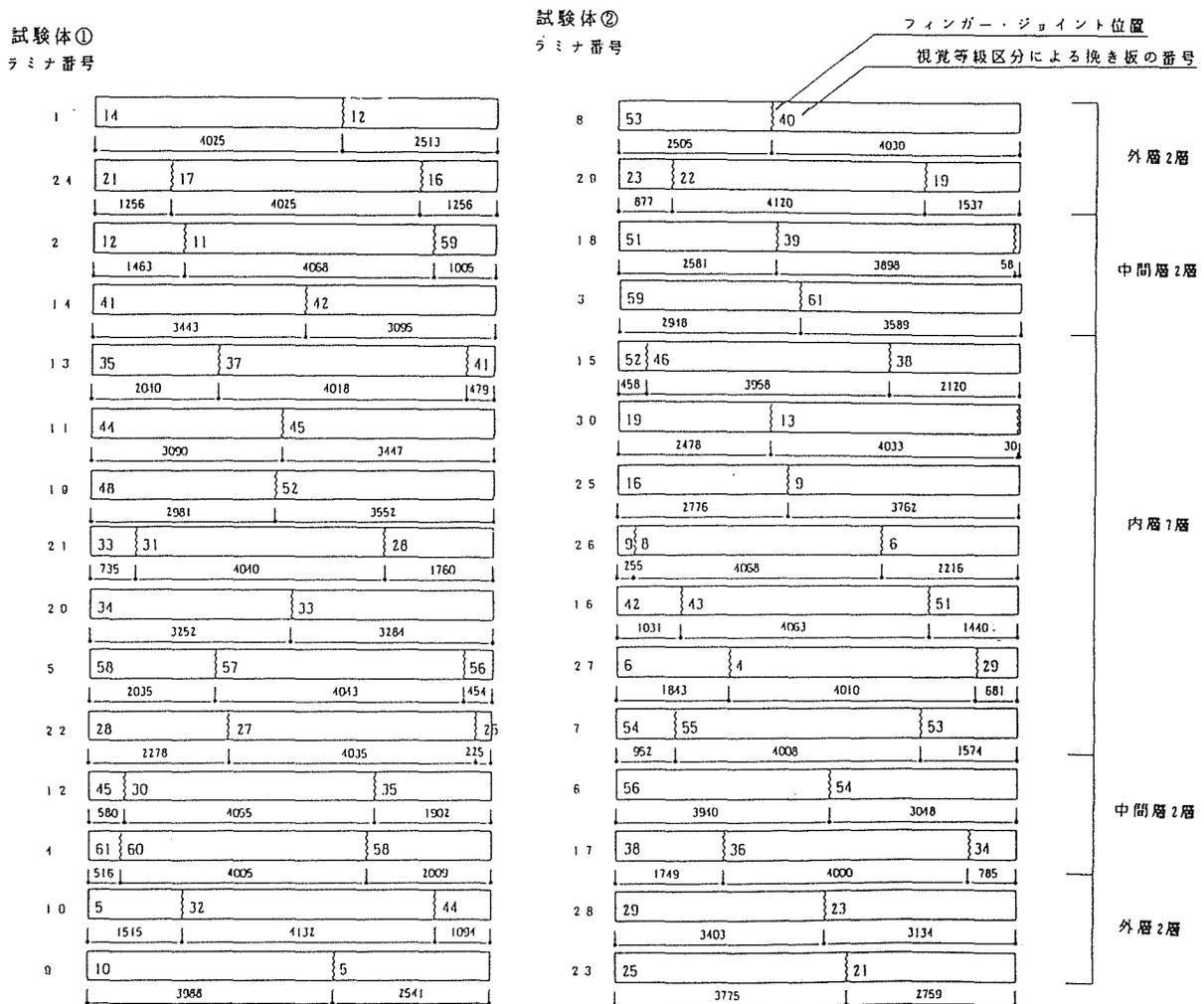


図 2 2本の試験体のラミナ配置と各ラミナのフィンガージョイント位置
左 : 試験体① 右 : 試験体②

3. 試験方法

3.1 実験装置

実験装置の概要を図3に示す。床から約1.5mの高さの所に試験体を置き、実荷重による載荷を行った。支点はピン、ローラーによる単純梁支持(付図1、付図2参照)で、加力は3等分点による4点曲げとした。

架台フレームは鉄骨を組んだものを試験体両端に1台ずつ、2台で1組とする(付図3参照)。これらの架台フレームはアンカーボルトで床と接合されており、支点のぐらつきを抑えた。また、支点の側部には試験体倒れ止め用の面外拘束治具を取り付けている(付図4、付図5参照)。

載荷荷重は鋼矢板(FSP-3型、長さ5m、重量300kg/枚)を使用した。鋼矢板の載荷及び除荷には鋼矢板の下、4箇所配置したるまジャッキを手動にて操作した。

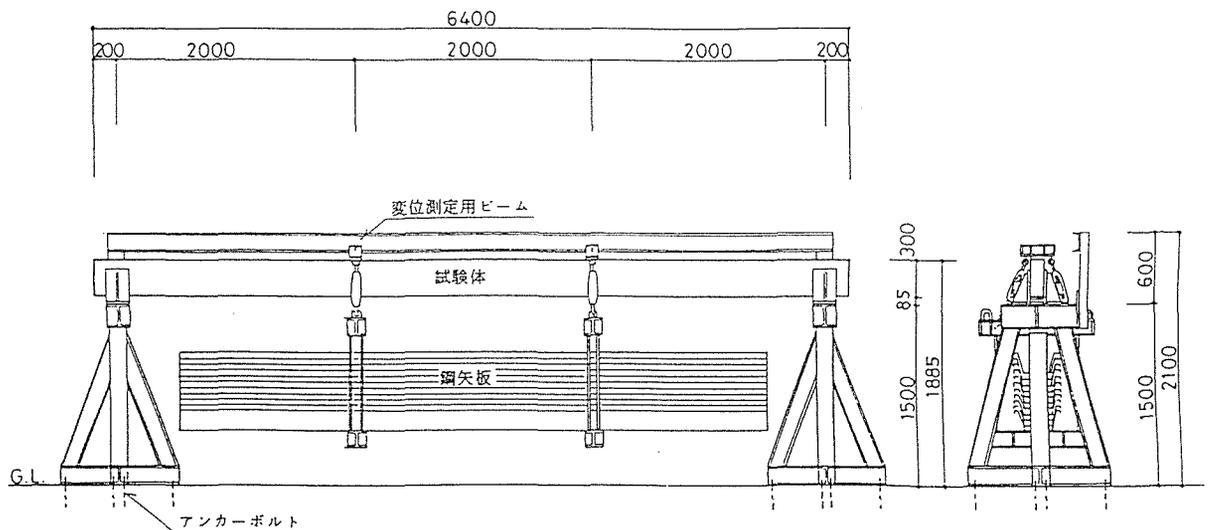


図3 試験装置の概要 (単位: mm)

3.2 載荷荷重の計算

試験体の比較因子である継続荷重は、①長期許容荷重、②長期と短期の許容荷重の中間点の2種類とした。木構造計算規準により試験体の強度を長期許容応力度の3倍としているので、前者は応力比(試験体の強度に対する継続荷重の比)0.33、後者は応力比0.50となる。今後、載荷した応力比に応じて試験体①をC-33、試験体②をC-50と呼称することとする。

$$\text{曲げ強度} : f_{b,u} = 135 \times 3 = 405 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{せん断強度} : f_{s,u} = 11 \times 3 = 33 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{曲げ耐力} : M_u = f_{b,u} \times Z = 405 \times 1,800 = 7.29 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$$

$$\text{せん断耐力} : Q_u = f_{s,u} \times A / 1.5 = 33 \times 360 / 1.5 = 7.92 \times 10^3 \text{ kgf}$$

実験荷重Pは

C-33のとき:

$$M/Z = 200 \times 0.5 \times P_1 / 1,800 = f_b = 135 \text{ kgf/cm}^2 \text{ より、}$$

$$P_1 = 2,430 \text{ kgf}$$

C-50のとき：

$$M/Z = 200 \times 0.5 \times P_2 / 1,800 = 1.5 \times f_b = 202.5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ より、}$$

$$P_2 = 3,645 \text{ kgf}$$

また、せん断破壊を起こさせないためには次式の条件を満足する必要がある。

$$M_u / L_Q < Q_u$$

M_u ：2点間における曲げモーメント差の最大値

L_Q ：せん断スパン

Q_u ：長期許容せん断耐力

L_Q は92.05cm以上必要であるが本試験体では $L_Q = 200\text{cm}$ であり、条件を満たしている。

3.3 治具の重量並びに錘の枚数と不足荷重の計算

治具の重量を表3に示す。

表3 治具重量

部品名称	重量/長さ (kg/m)	重量/個 (kg/個)	長さ (cm)	個数 (個)	重量 (kg)
H-100×100×6×8	17.2	—	30	2	10.32
H-150×150×7×10	31.5	—	80	4	100.80
M12-長ボルト	0.888	—	120	4	4.26
シャックル	—	1.0	—	8	8.00
ターンバックル	—	4.79	—	4	19.16
合計	—	—	—	—	142.54

鋼矢板枚数と不足荷重の計算は次のとおり。不足分は鋼棒で補う。

$$\text{C-33の場合：鋼矢板7枚(2,100kg) 不足荷重} = P_1 - (2,100 + 142.54) = 187.46 \text{ kg}$$

$$\text{C-50の場合：鋼矢板11枚(3,300kg) 不足荷重} = P_2 - (3,300 + 142.54) = 202.46 \text{ kg}$$

3.4 載荷方法

載荷の手順は次のとおり。載荷開始時刻を揃えるために、作業は2体平行して行った。

- ①支台フレームを設置し、レベル合わせを行う。
- ②枕を敷き、その上にH鋼、錘を載せ、吊り金物(下部のみ)を組み立てる。
- ③支点ローラー(ピン)を載せ、面外拘束を付け、試験体を載せる。
(加力点H鋼とターンバックルを取り付ける。)
- ④測定用フレームを組み立て、変位形を取り付ける。
- ⑤だるまジャッキで吊り金物(下部)、錘を吊り上げる。
- ⑥ターンバックルと吊り金物(下部)をつなぐ。
- ⑦変位計の初期値を読みとる。
- ⑧だるまジャッキを静かに下げ、荷重をかける。
- ⑨初期変位を測定し、クリープの測定を開始する。

3.5 計測方法

試験体の変形は、支台フレームの間に伸ばしたビームに取り付けたひずみゲージ式変位変換器(ストローク10cm、共和電業製 DT-100A)により次の各点の鉛直変位を計測した。

変位計の設置位置は図4に示した次の5箇所である。

- a) 試験体支持点 2箇所 変位計①、②
- b) 加力点 2箇所 変位計③、④
- c) 試験体中央 1箇所 変位計⑤

計測時期と計測時間間隔は次のとおり。

- a) 载荷直後 ~ 载荷後1時間 : 1分
- b) 载荷後1時間~载荷後6時間 : 15分
- c) 载荷後6時間~载荷後5日 : 1時間
- d) 载荷後5日 ~ : 1日 (測定時刻 正午)
- e) 6~7月(2週間) : 1時間 (夏期における温度・湿度の影響調査)
- f) 12月(2週間) : 1時間 (冬期における温度・湿度の影響調査)

試験室内の温度・湿度は自記温湿度計(中浅測器製E-14)により連続測定した。

表面含水率は各試験体に定めた側面上の点1箇所、高周波式含水率計(ドイツ製DELTA-5型)を用いて、1日1回測定した。

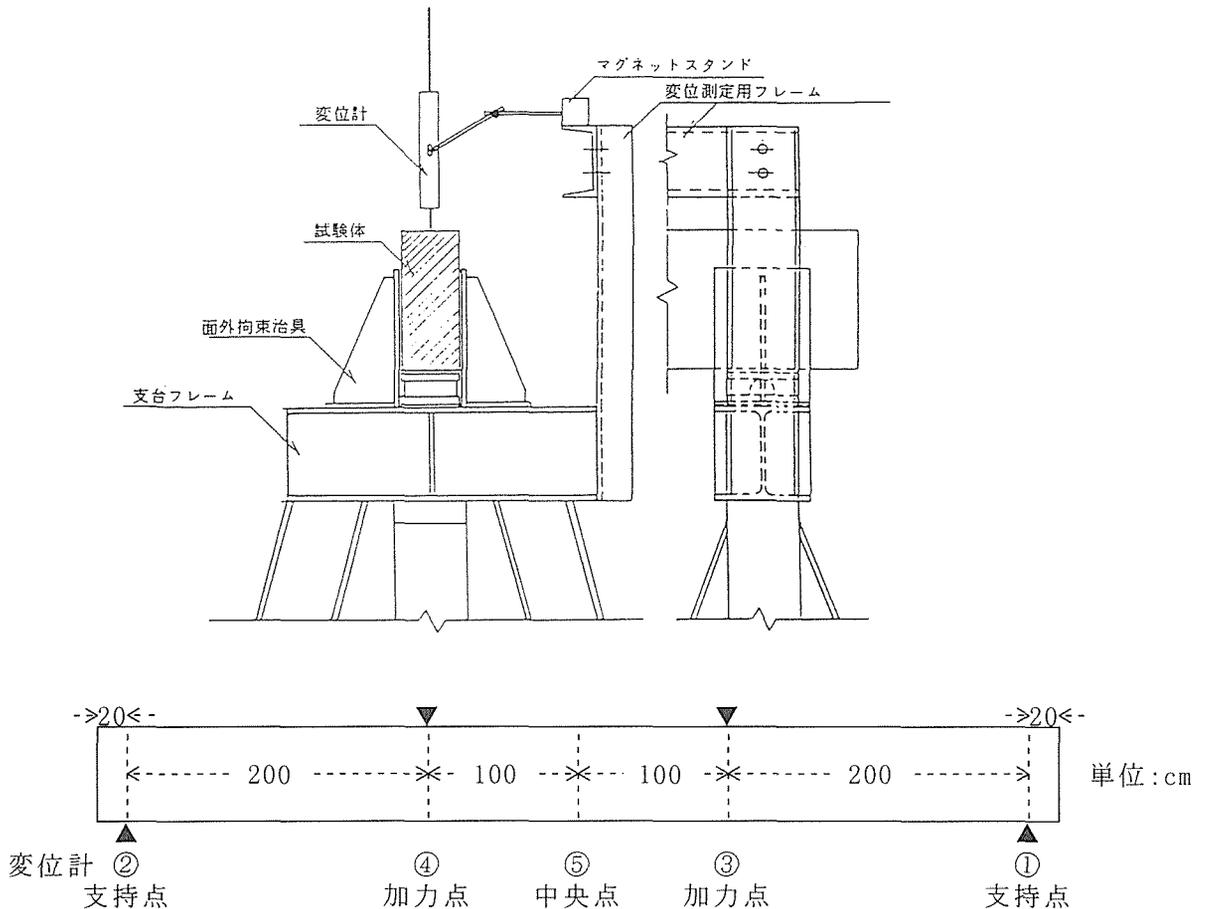


図4 変位測定方法と変位計の位置 (①~⑤は変位計番号)

4. 実験結果

この報告では実験結果の値を次のように定義する。

(1) 中央たわみ δ_c : 中央点と両端の支持点におけるたわみの差で、次式により算出

$$\delta_c = \text{変位計⑤} - (\text{変位計①} + \text{変位計②}) / 2$$

(2) 初期たわみ δ_0 : 載荷直後に生じた中央たわみ

(3) クリープたわみ $\delta_c(t)$: 載荷直後を0としたときの中央たわみ

(4) 全たわみ $\delta(t)$: 初期たわみに経過時間 t におけるクリープたわみを加えたもの

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_c(t)$$

この実験の載荷日は1992年3月10日、載荷時刻は試験体C-33は14:05、試験体C-50は15:08である。載荷後385日までの全たわみ、載荷後552日までのクリープたわみと時間経過との関係を図5、図6に、この間の温度・湿度を図7に示す。一般に継続荷重がクリープ限度(破壊に至らない最大の荷重)以下のときのクリープは、載荷直後急速にたわみが増加するが、やがて増加速度が緩慢になり、ついにはたわみの進行が止まる傾向がある³⁾。図からも同様な経過が読み取れるが、C-50は180日目位で変形が落ちつき、更にその後はやや減少した後、再び増加する傾向が見られる。C-33は160日目位からクリープの進行は徐々に緩やかになり、しばらく落ちついた後再び増加する傾向が見られる。

温度は載荷開始時の3月から夏を経て、再び下がっていく季節変動が分かるが湿度(相対湿度)は季節と関係なく30~80%の間で上下する。

高温多湿の時期に当たる夏期はクリープが進行しており、温度との対応が見られる。

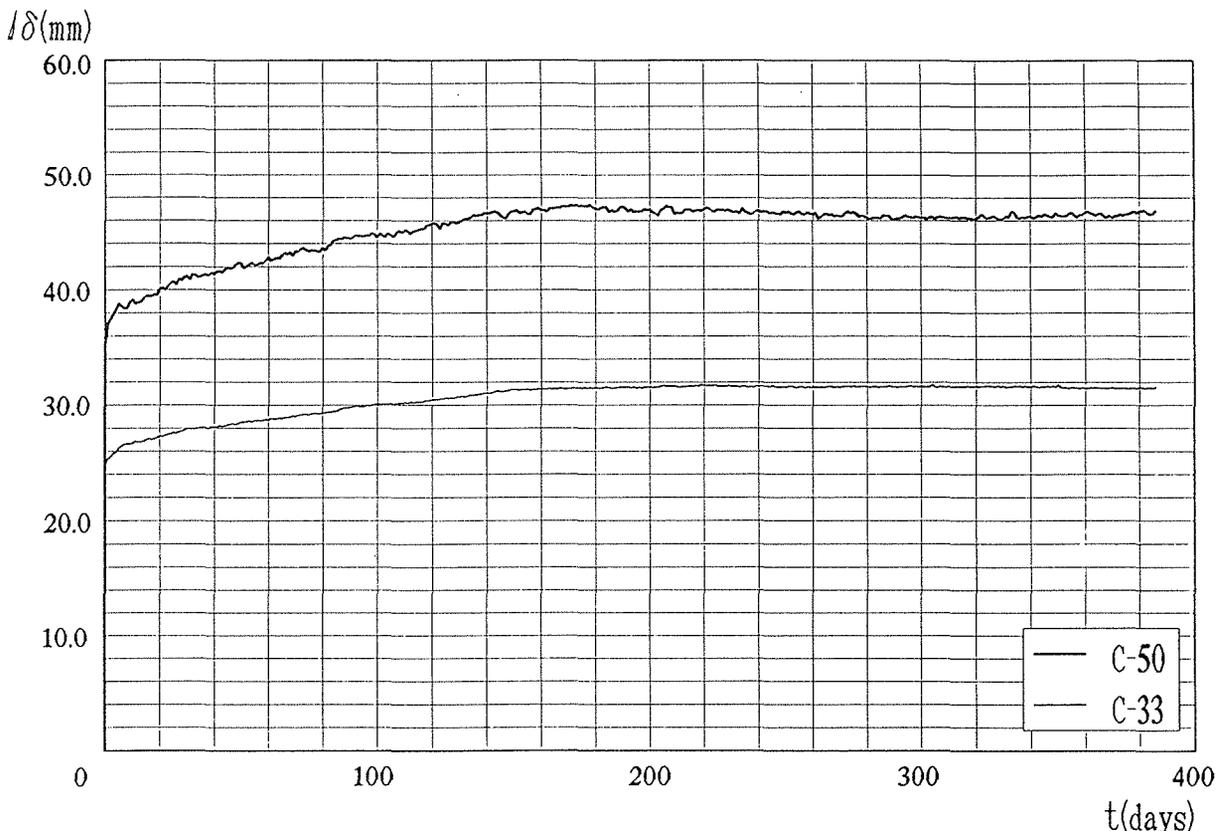


図5 全たわみ-時間曲線 (385日経過時まで)

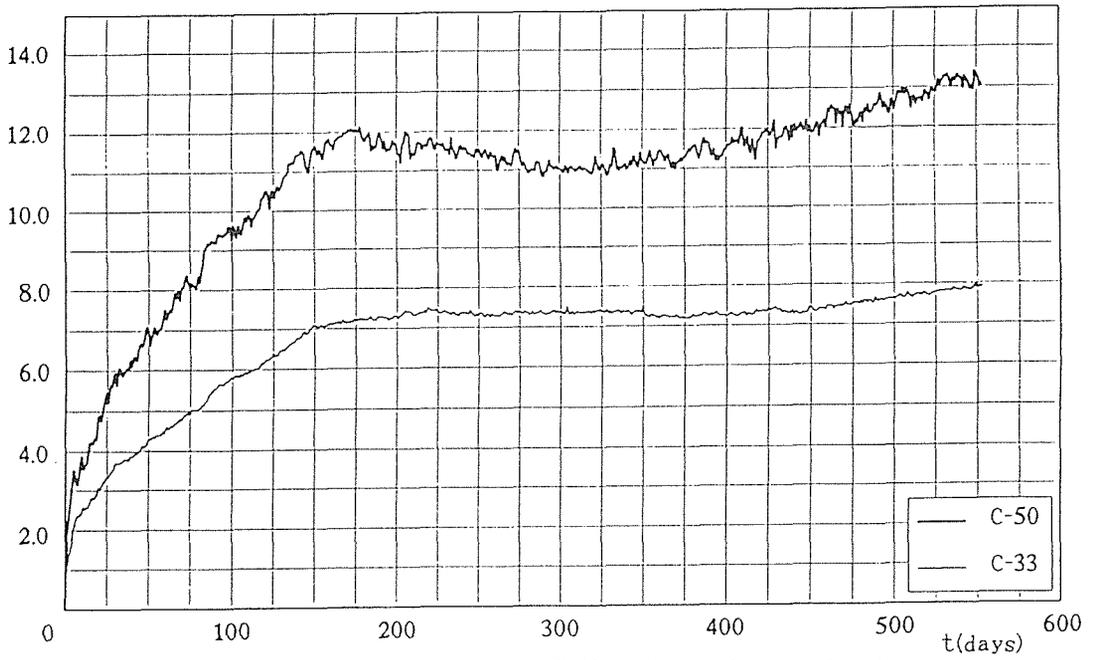


図6 クリープたわみ-時間曲線 (552日経過時まで)

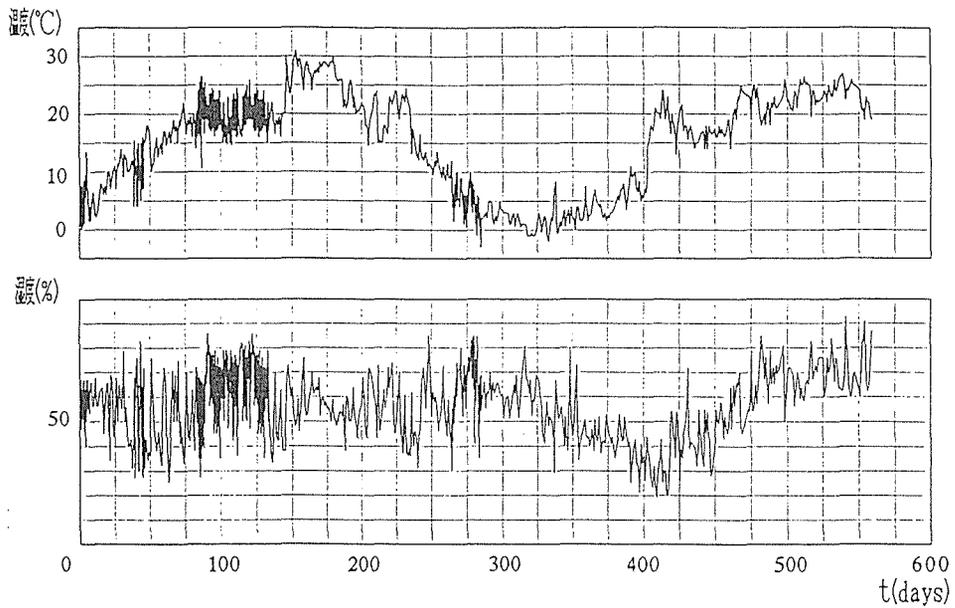


図7 温度・湿度の経過

5. 考察

5.1 ヤング係数の実測値とラミナ構成に基づく計算値との比較

実験による初期たわみは次のようであった。

$$C-33 : \delta_0 = 24.26 \text{ (mm)}$$

$$C-50 : \delta_0 = 35.26 \text{ (mm)}$$

この値から試験体のヤング係数実測値を計算すると次のようになる。

$$C-33 : E = 142.2 \text{ (tf/cm}^2\text{)}$$

$$C-50 : E = 146.8 \text{ (tf/cm}^2\text{)}$$

これらの値は、静的荷重によって測定した構成ラミナのヤング係数(E_s)から算出した集成材のヤング係数(表2)よりかなり高い値となった。また、グレーディングマシンによるラミナのヤング係数(E_{ms})から算出した値(表2)よりやや小さい値であった。

5.2 荷重初期のクリープたわみについて

荷重後1時間目まで1分間隔で計測したクリープたわみを図8に、その後6時間目まで15分間隔で計測したクリープたわみを図9に、その後5日目まで1時間間隔で計測したクリープたわみを図10-1、図10-2に示す。荷重後1時間、6時間、5日の時点でのクリープたわみは表4のとおりであった。

1時間後までは両試験体とも傾きは徐々に小さくなっているが、全体としては直線的である。

6時間後までのクリープ曲線の勾配は、2時間後位から徐々に緩やかになっている。

5日後までC-50は温湿度の影響を受けながら、時間とともにクリープたわみが進行していく様子がよく分かる。C-33、C-50ともに荷重直後の数時間で急激に変形が増大するが、その後はほぼ一定の割合で変形している。

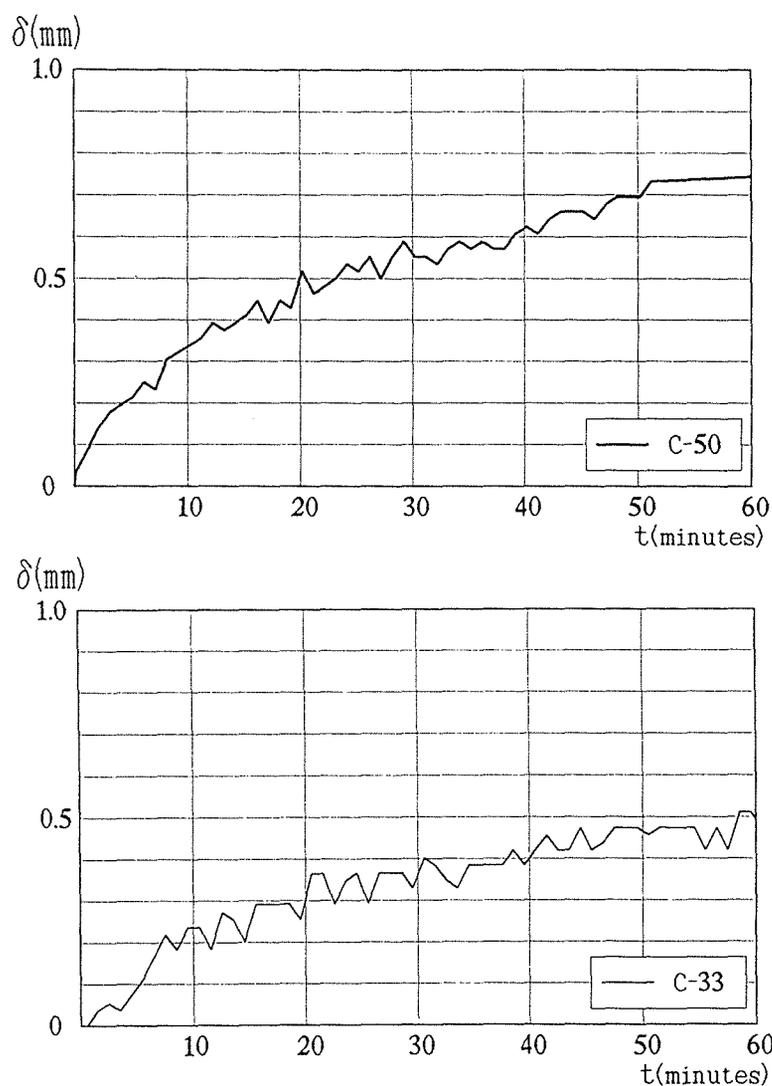


図8 荷重1時間後までのクリープたわみ(1分間隔計測)

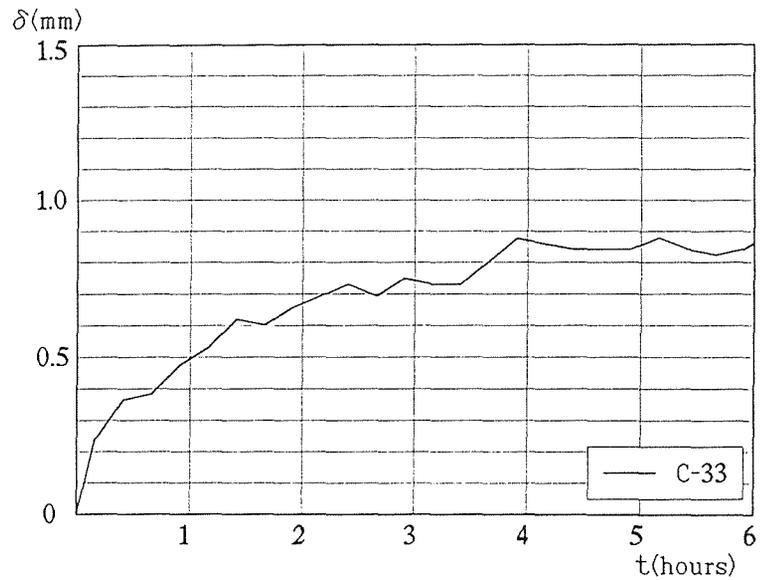
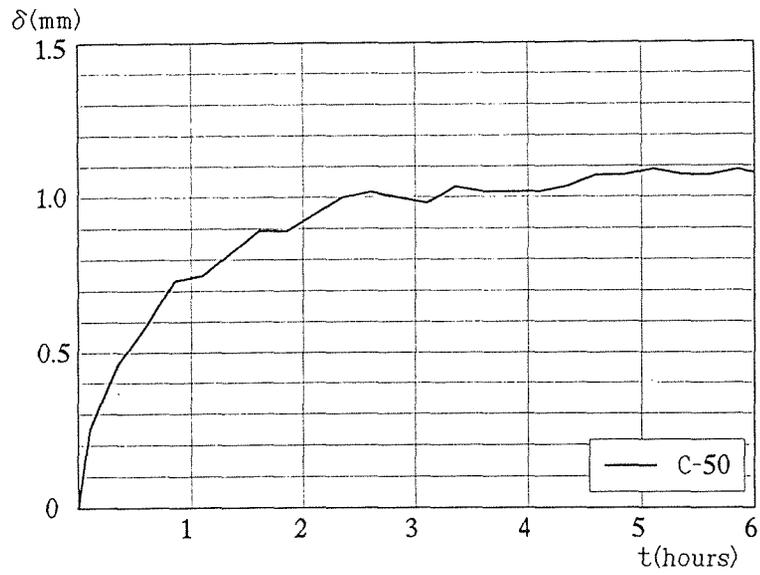


図9 荷重6時間後までのクリープたわみ(15分間隔計測)

表4 荷重初期のクリープたわみ

たわみの内容	試験体	
	C-33	C-50
初期たわみ	24.26 mm	35.26 mm
1時間後までのクリープたわみ	約 0.5 mm	約 0.75 mm
6時間後までのクリープたわみ	約 0.85 mm	約 1.1 mm
5日経過までのクリープたわみ	約 2.15 mm	約 3.6 mm

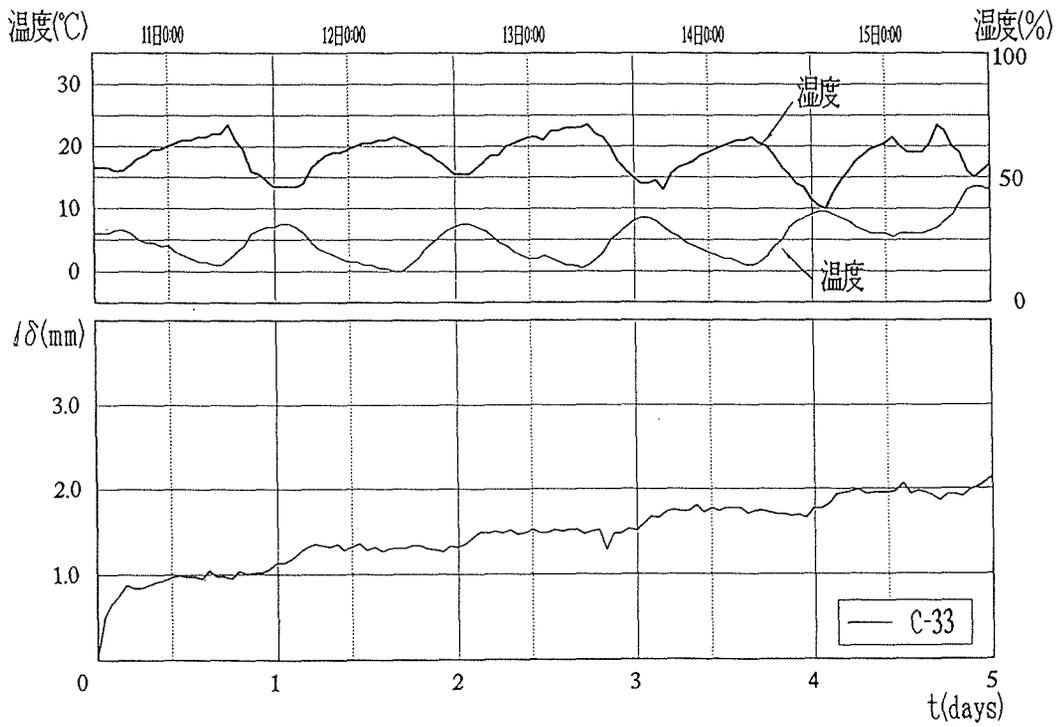


図10-1 載荷後5日までのクリープたわみ(1) 試験体C-33

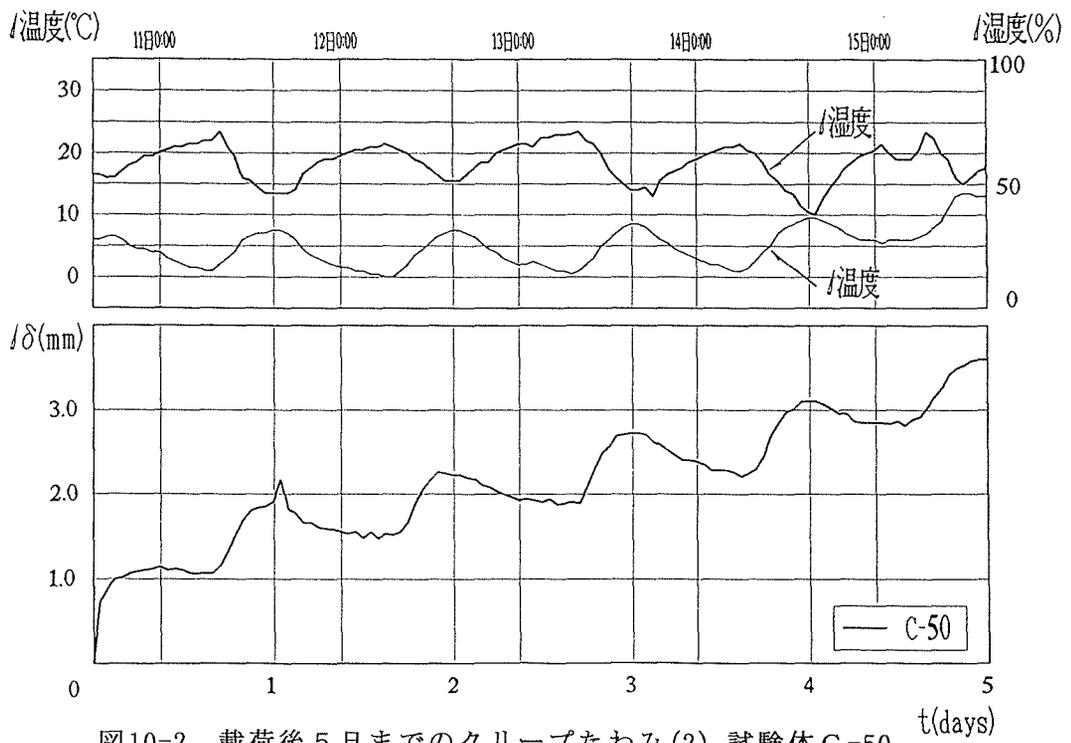


図10-2 載荷後5日までのクリープたわみ(2) 試験体C-50

5.3 温度・湿度の影響

木質材料は湿度の影響を極めて大きく受ける。一定荷重を与えてクリープを計測すると、湿度の変化にたわみに対応していることが認められる。一般的な傾向として、1日の中では湿度が下降する時にたわみが増加し、上昇する時には回復する⁴⁾。

本実験では、(1)高温多湿の時期にあたる7月と、(2)比較的湿度の低い12月に2週間ずつ、1時間間隔の計測を行った。また、(3)載荷直後5日間についても1時間間隔の計測を行った。この3期間におけるクリープたわみと温度・湿度との対応を考察する。

(1) 夏期(1992/7/1~7/14)について

この期間中の温度・湿度とたわみの変動を図11に示す。2週間にC-33は6.0~6.4mm、C-50は9.4~10.3mmたわみが進行している。C-33について見ると、微少な上下動はあるが、ほとんど温度・湿度の変化には対応していない。一方、C-50のクリープ曲線は温度の上昇に伴いたわみが進行し、正午過ぎにピークに達し、温度が下降する夕方から明け方にかけて徐々にたわみが戻ることが分かる。また、湿度との関係を見ると、湿度の低下に伴い、たわみが急激に増加している様子を読み取ることができる。このようにC-50はクリープたわみが温度、湿度両方の影響を受けていることは明らかである。しかし温度と湿度の間にも相関性があるので、どちらの影響を強く受けているかは一概には言えない。図の細かい部分に着目すると、温度に対応していても湿度に対応していない箇所がいくつか見られた。例えば7/8は、湿度の下降は見られないが、クリープたわみは温度の変化に従って上下している。つまり、湿度よりも温度の影響を受けやすいと言える。

この間の挙動は、応力比の大きいもの程、敏感に反応するという一般論に準じている⁵⁾。

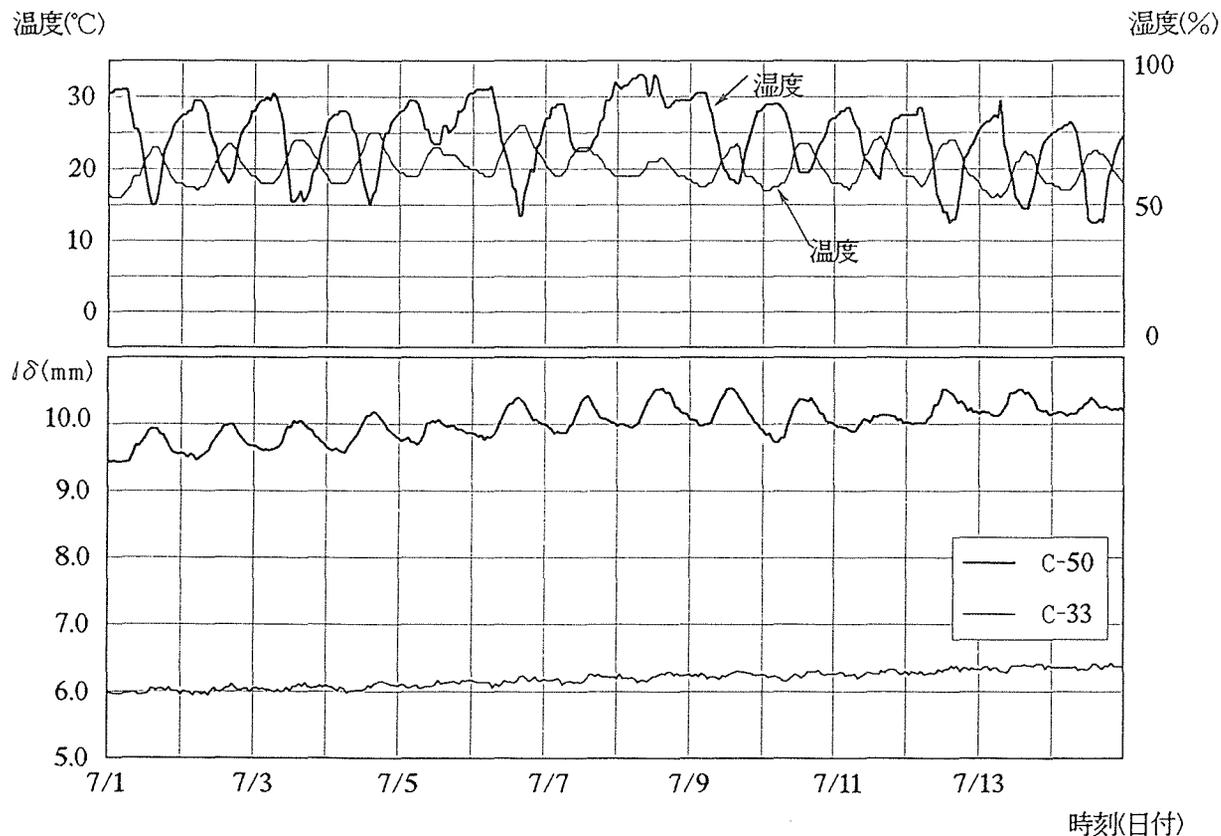


図11 夏期における温度・湿度の影響(1992/7/1~7/14)

(2) 冬期 (1992/12/1~12/14) について

この期間中の温度・湿度とたわみの変動を図12に示す。この期間中には両試験体ともクリープたわみの進行は見られず、C-33は7.4mm、C-50は11.2mm前後に落ちついている。夏期と比較すると、たわみの上下動の幅が少ない。この原因は一般に次の二つが考えられている⁶⁾。

①温度とクリープとの関係は、高温になるに従い増大する。

②時間の経過とともに、温度・湿度の影響は漸次減少する。

C-33に関しては、温度・湿度の影響をほとんど受けていないという点で、夏期と同じことが言える。

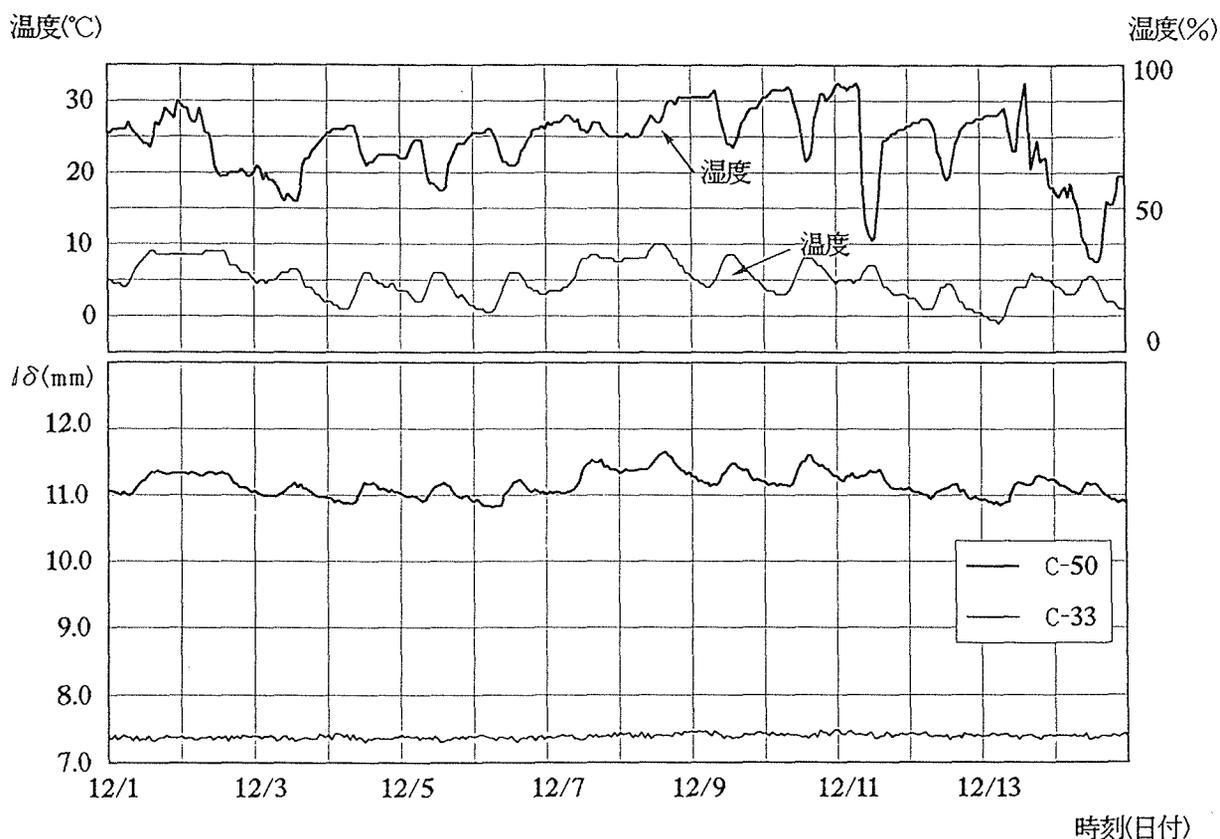


図12 冬期における温度・湿度の影響 (1992/12/1~12/14)

(3) 载荷 5 日後までについて

この期間中の温度・湿度とたわみの変動は図10-1、図10-2に示した。载荷 5 日間のクリープたわみはC-33では2.15mm、C-50では3.6mmとなっている。

C-50は温度の影響を受けているが、夏期、冬期のケースと比較すると、時間効果の因子が支配的である。昼間進行したたわみが夜間にあまり回復せず、ほぼ階段状にたわみが増加する傾向が看取できる。

一方、C-33は夏期、冬期の期間と同様、ほとんど温度・湿度の影響を受けていない。しかし温度上昇時に(湿度下降時に)僅かではあるが勾配が急になっている様子を読み取ることができる。

5.4 含水率の影響

2体の試験体の表面含水率を図13に示す。表面含水率は載荷開始時から2週間位までは両試験体とも10%前後を示していたが、その後C-50の方だけ上昇し、15~16%に落ち着いている。両試験体とも同じ実験室内(温湿度無調整)であるが、設置された場所によって表面含水率に違いが生じたのではないかと考えられる。

全体を通して、季節による変動はあまり見られず、含水率はほぼ一定している。湿度の経過(図7)と比較すると、多少の相関はあるようであるが、クリープ性状と含水率の相関を数値として表すには至らなかった。

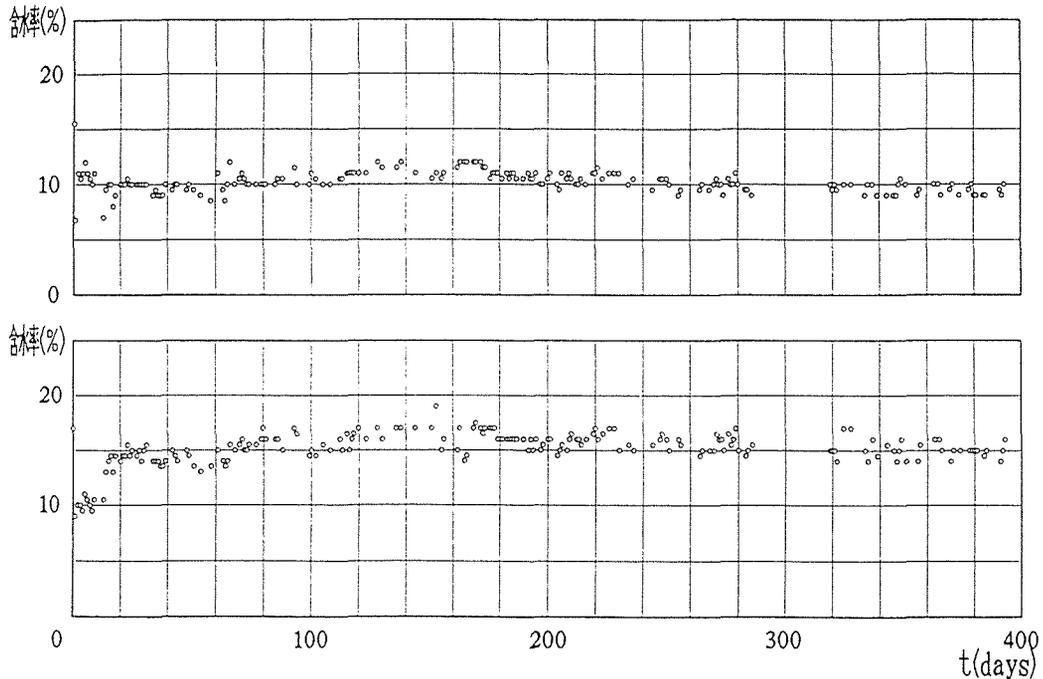


図13 試験体表面の含水率

上：試験体C-33

下：試験体C-50

5.5 クリープ式(t^N 則)との対応

クリープたわみ-時間曲線を両対数で表示すると、図14のように高い直線性が認められる⁷⁾。

クリープ曲線は、図15のように初期状態の1次クリープ、速度勾配が緩やかな2次クリープ、破壊に至る速度勾配の3次クリープの3領域に区別できる。応力比が増加すると1次クリープ、2次クリープは消滅し、3次クリープに移行するが、ここで見られるのは実用上、最も用いられる2次クリープ曲線である。

上記の両対数表示に対して最小二乗法により回帰関数を求めた。その結果を表5に示す。

$\log(\delta)$

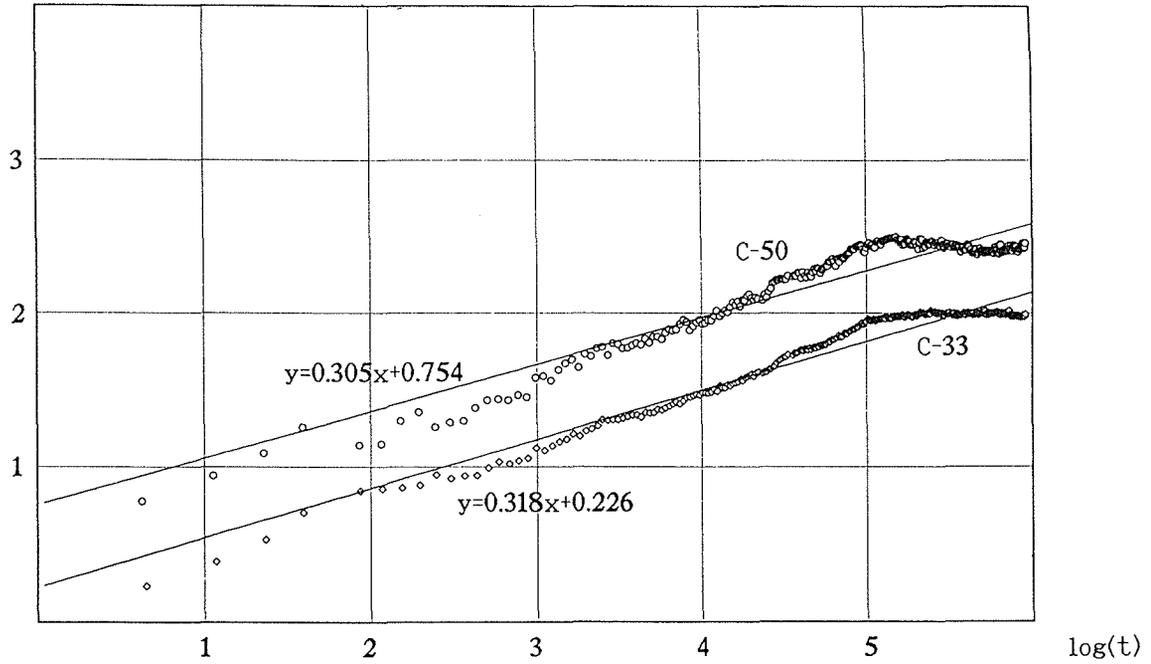


図14 クリープたわみ-時間関係の両対数表示

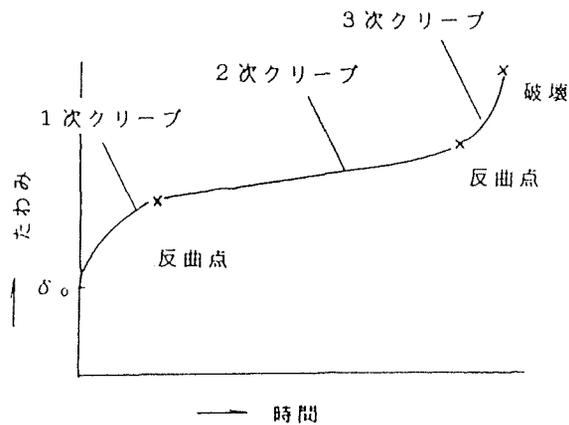


図15 クリープ曲線の模式図

表5 回帰関数と定数

回帰関数：

$$Y = b X + a$$

$$\log(\delta_c(t)) = b \cdot \log(t) + a$$

$$\delta_c(t) = e^a \cdot t^b$$

ここで、 $e^a = A$

$$b = N$$

とおくと、クリープ式は(3)式で表される(t^N 則、Power則)。

試験体	C-50	C-33
定数		
a	0.75402	0.22580
b	0.30471	0.31836

$$\delta_0(t) = A \cdot t^N \quad \dots\dots\dots (3)$$

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

$\delta(t)$: 経過時間 t における全たわみ

δ_0 : 初期たわみ(載荷直後のたわみ)

$\delta_0(t)$: クリープたわみ

A 及び N : 定数(クリープ係数)

この近似式(3)を実測のクリープ曲線に当てはめたものを図16に示す。これは初期に比較的よく当てはまり、図から分かるように最初の80日はほぼ一致している。そして、高温多湿期に当たる90~200日でC-50、C-33とも実測値が上回っている。その後実測値は落ちつくがクリープ式は更に増加するので、2本の曲線は次第に離れていく。全体を通してみると、両試験体は似た経過をたどってクリープ式に対応していると言える。

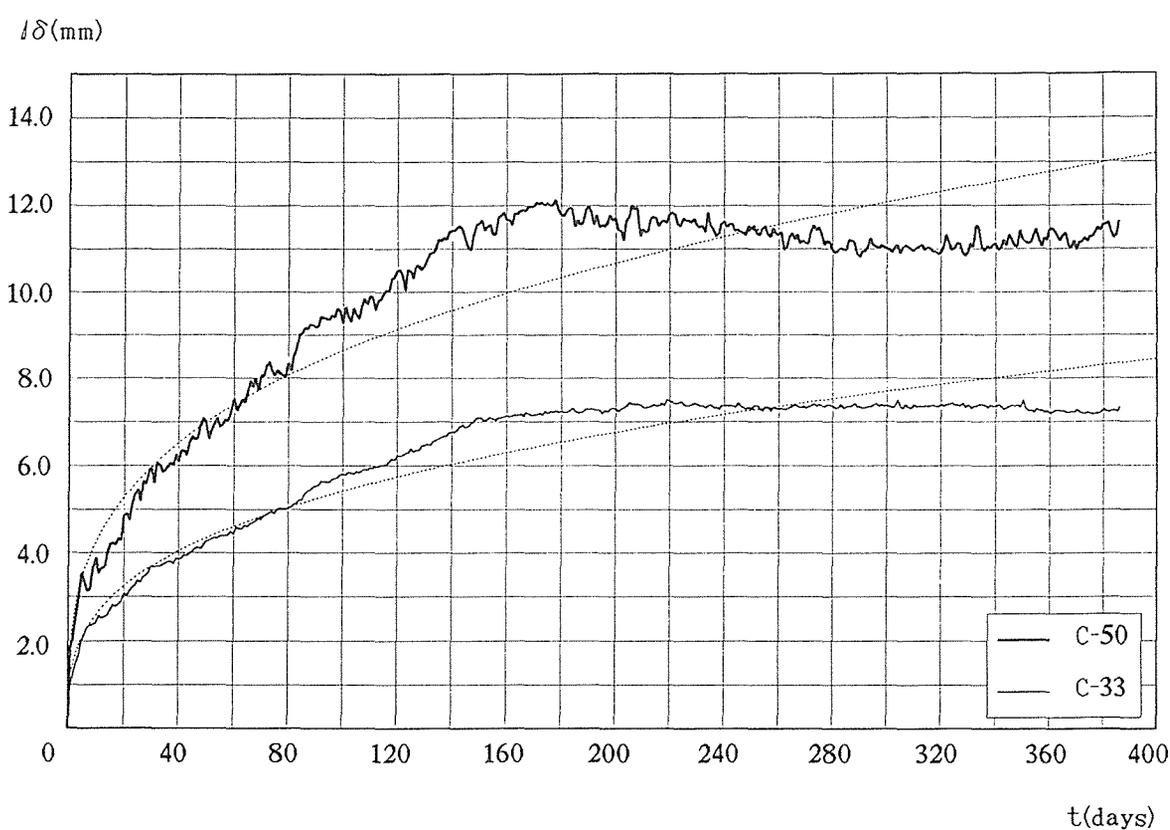


図16 クリープたわみ実測値とクリープ式との比較

6. むすび

信州産カラマツの大断面集成材を用いて曲げクリープ実験を行った結果、以下の所見を得た。

(1) クリープたわみは、試験体C-50(応力比0.50の試験体)は180日目辺り、試験体C-33(応力比0.33の試験体)は160日目辺りでいったん落ちつくが、夏期には再び増加する。

(2) クリープの実験式(t^N 則、Power則)は最小二乗法で比較的簡単に求められ、実測値と初期においてよく当てはまる。本実験では実測値が落ちついても実験式は上昇を続け、

2本の曲線は次第に離れていく傾向がある。

(3)一般に湿度の影響を受けるとされているが、本実験では温度に強く影響されている様子が読みとれた。この傾向は応力比の高いものほど顕著である。

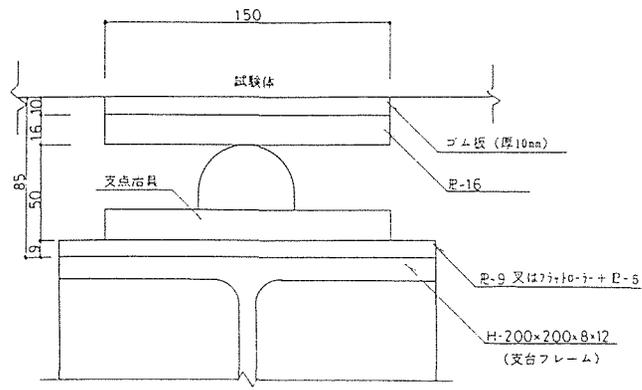
(4)集成材を構成するラミナのヤング係数から計算した集成材のMOEは、実測値よりも低くなる傾向がある。ラミナ構成から計算するMOEによって集成材の弾性係数を評価する方法にはまだ改善の余地がある。

(5)クリープ限度(破壊に至らない最大の荷重)は、40~50%とされているが、試験体C-50、C-33とも破壊に至る様子はなく、安全であると考ええる。

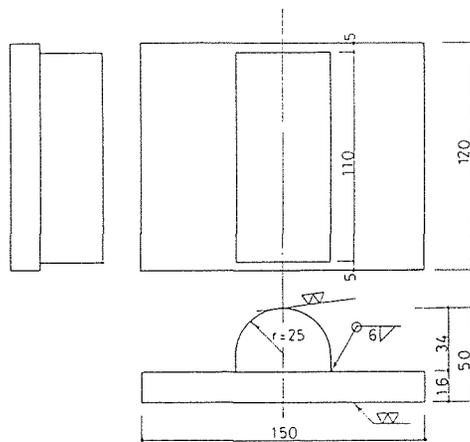
クリープ実験では多数の試験結果を得ることは難しいが、クリープの法則性を解明していく上で、今後もこのような基礎的な実験データの蓄積が望まれる。今後の課題としては違うパラメータ(荷重の載荷・除去の繰り返しの影響、恒温恒湿度下での実施、様々な応力比など)での実験を実施することがあげられる。

参考文献

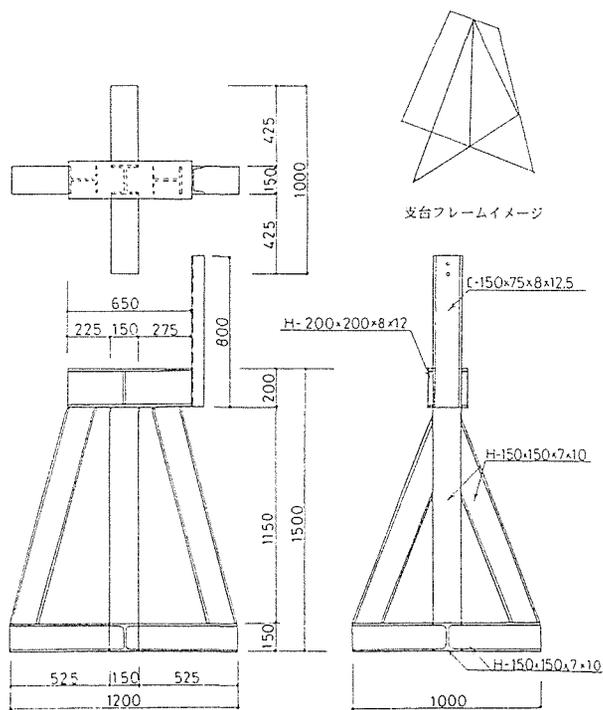
- 1) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成5年3月) 2-31(1993)
笹川 明：信州産からまつ集成材の曲げクリープ実験報告書(信州大学工学部社会開発工学科)
- 2) 日本建築学会：木構造計算規準・同解説
- 3) 有馬孝禮、丸山則義：木材及び木質材料のクリープ変形とクリープ破壊時間、
A I J 大会梗概(日本建築学会学術講演梗概集) 21291(1986)
- 4) 小松公平、川元紀雄：任意グレードのラミナで構成された大断面集成材の
曲げ破壊係数(MOR)の推定、A I J 大会梗概 2759(1988)
- 5) 飯塚五郎蔵、森尚治：集成材木材の曲げクリープに及ぼす温湿度の影響、
A I J 大会梗概 (1968)
- 6) 杉山英男：建築学大系 21 木構造
- 7) 丸山則義：長柱の座屈クリープ、A I J 大会梗概 21290(1986)
- 8) 有馬孝禮、丸山則義：節を含む木材のクリープ特性とクリープ破壊、
A I J 大会梗概 21443(1987)
- 9) 畑中公樹：集成材の曲げクリープ性状に関する実験的研究、A I J 大会梗概 2924(1992)
- 10) 日本農林規格協会：集成材及び構造用大断面集成材



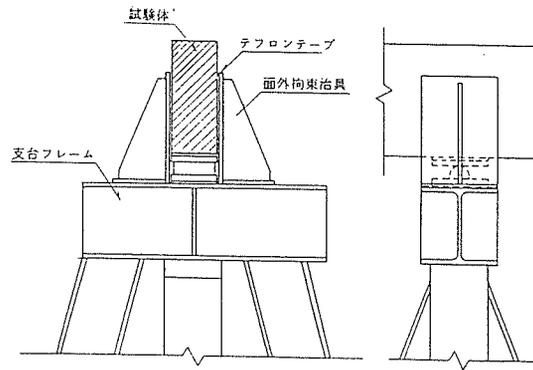
付図1 支点詳細 (単位: mm)



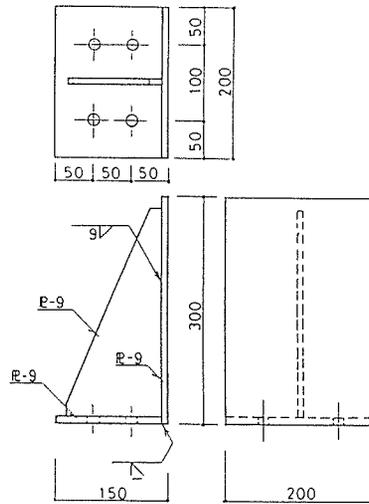
付図2 支点治具 (単位: mm)



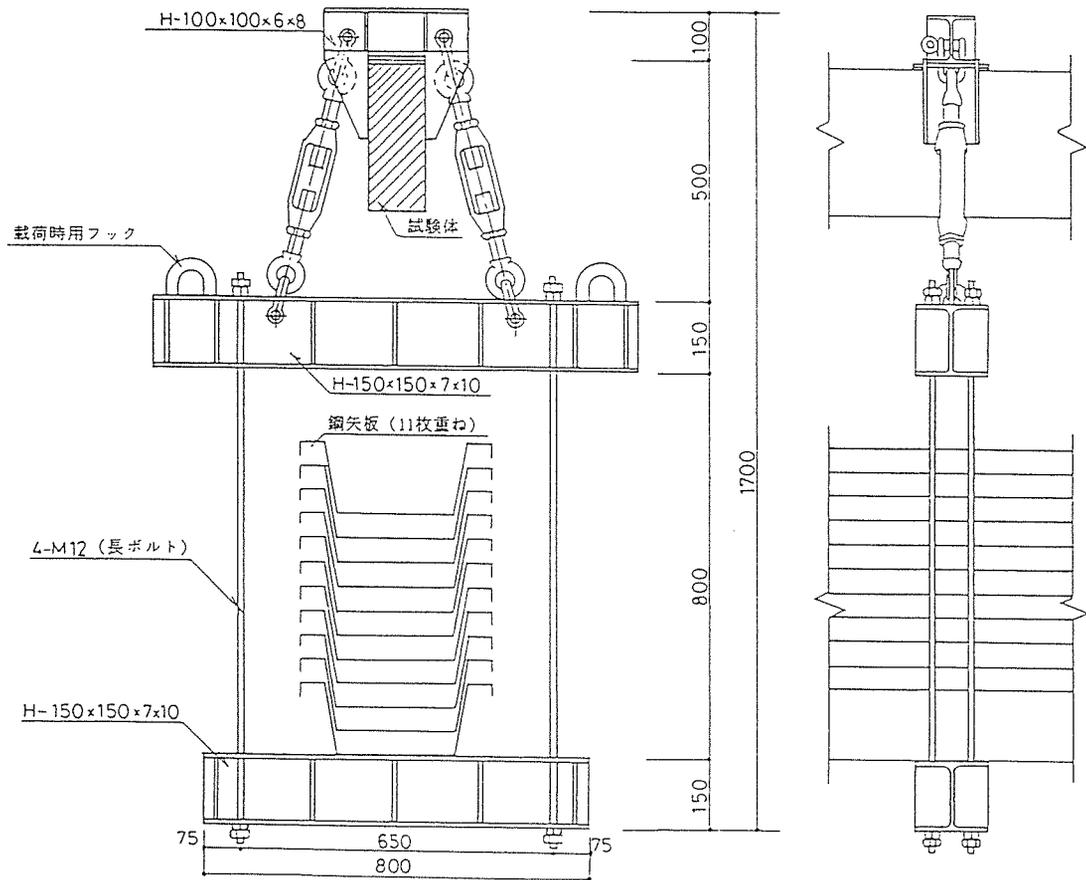
付図3 支台フレーム (単位: mm)



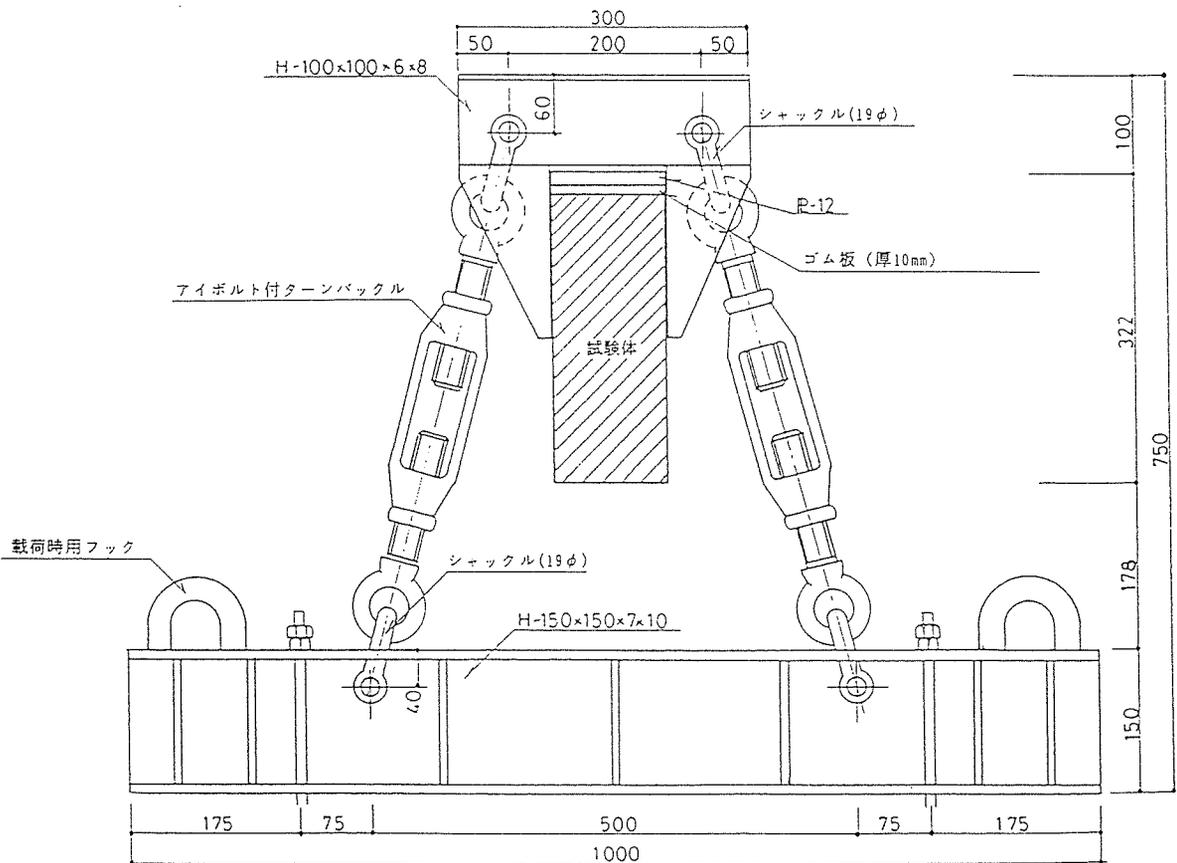
付図4 支点(面外拘束)詳細



付図5 面外拘束治具 (単位: mm)



付図6 錘吊り金物 (単位: mm)



付図7 加力点詳細 (単位: mm)

第3章 梁用ベイマツ集成材の曲げクリープ特性

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、集成材を試験体とした実験は世界的にも極めて少ない。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なことと考えられる。この観点から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)の曲げ載荷実験を実施した。試験体としてベイマツ集成材2体を使用し、パラメーターとして応力比を選んだ。

スギ材等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。本実験では、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、曲げ強度の50%のレベル(応力比0.5)の2ケースを対象とした。

本クリープ実験は(財)日本住宅・木材技術センター試験研究所(東京都江東区新砂3丁目)の銘木標本館内で実施した。

2. 試験体の概要

本実験で使用した試験体は、断面120mm×396mm、全長6mの集成材2体で、その外形を図1に示す。

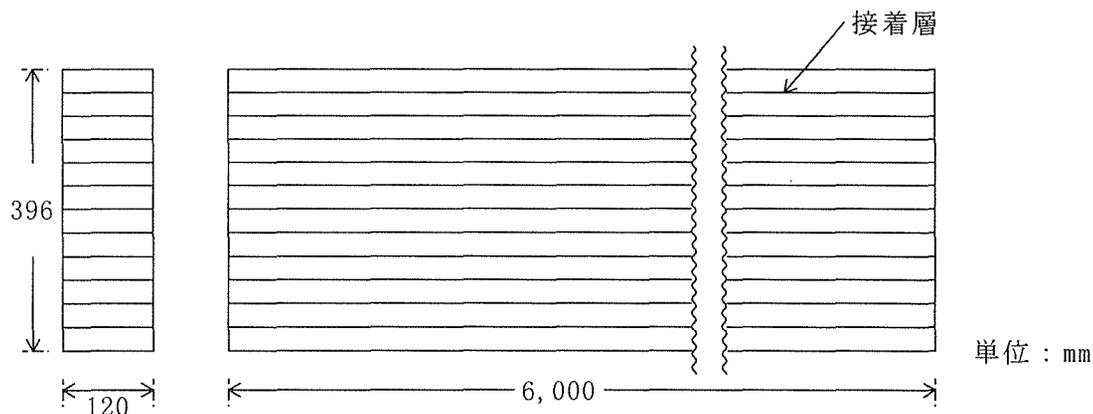


図1 試験体外形

ラミナはベイマツ、厚さ33mm、積層数12。集成材の強度等級は「構造用大断面集成材のJAS(1986)」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とおり。

ヤング係数 $E = 110 \times 10^3$ * (kgf/cm²)

長期圧縮許容応力度 $f_c = 105$ (kgf/cm²) : 繊維方向

長期曲げ許容応力度 $f_b = 145$ * (kgf/cm²)

長期せん断許容応力度 $f_s = 12$ * (kgf/cm²)

(注)*印は、荷重方向またはたわみ方向と積層面が直交する場合の値。

なお、荷重直前の試験体の平均表面含水率(高周波式含水率計による)は、応力比0.3のものが11.3%、応力比0.5のものが12.0%であった。

3. 試験装置概要

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1組とする。図2に架台外形を示す。

試験体は2体で、試験方法の項で述べるように、応力比すなわ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の幅は1,200mm(応力比0.5の場合)、または800mm(応力比0.3の場合)となった。袖壁部分は鋼矢板の振れ止めである。

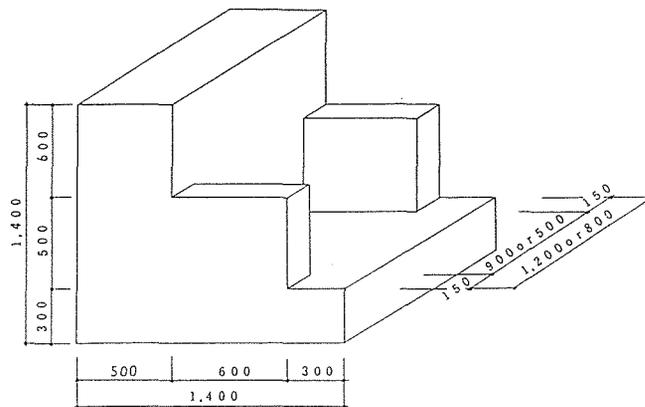


図2 RC架台外形 (単位:mm)

3.2 錘及び荷重・除荷

荷重としての錘には鋼矢板(FSP-3型、5m長)を使用した。この鋼矢板は幅40cm、1枚の重さは300kg、重ね厚さは1枚当たり5cmである。

荷重及び除荷の際は油圧ジャッキ(高さ27cm、揚重10ton、揚程10cm)を使用した。この油圧ジャッキを鋼矢板の下に4箇所配置し、手動にて操作した。

3.3 計測方法

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した。

- a) 試験体中央 1箇所
- b) 試験体支持点 2箇所
- c) 荷重点 2箇所 計5箇所

これらの変位計は、図3に示すような鉄骨製支持架構に取り付け、ひずみ測定には東京測器研究所製TDS-301を使用した。

また、試験体設置近傍の温度・湿度を連続記録方式の温湿度計により測定した。

含水率の測定には高周波式含水率計を使用した。

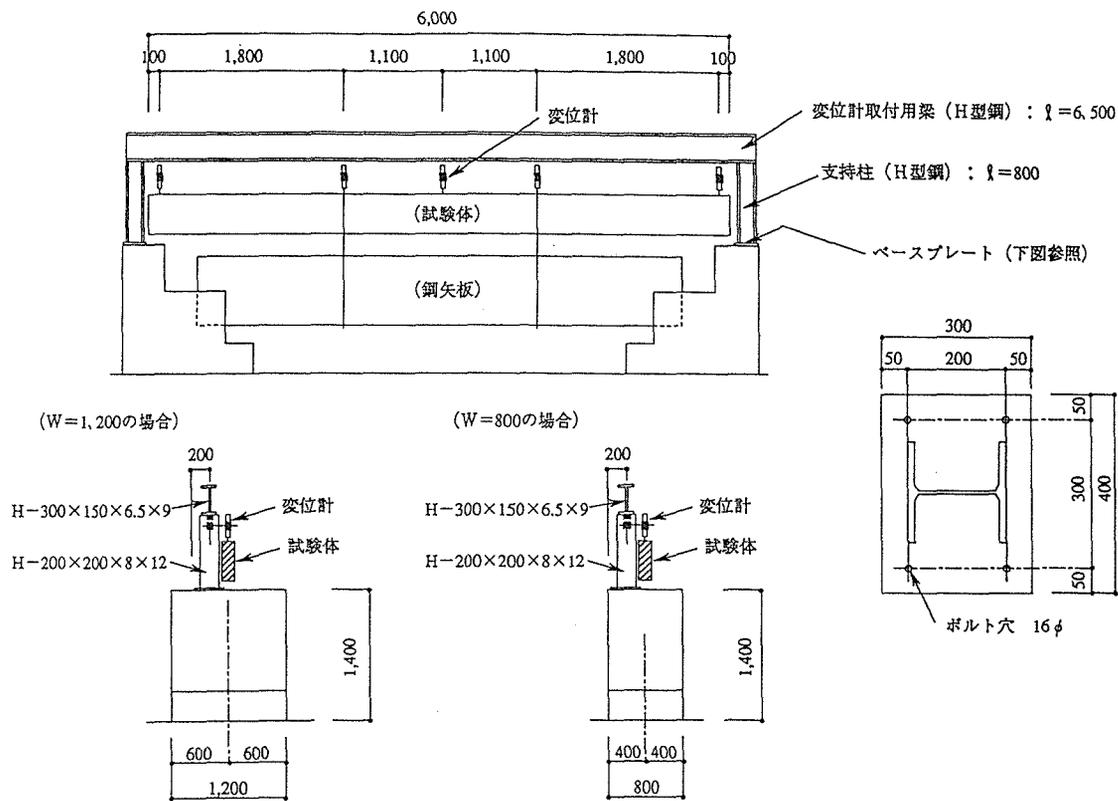


図3 変位計取り付け架構

4. 試験方法

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、実験期間は3年間とした。1体は長期許容応力度に対応させて応力比 α を0.3とし、他の1体は0.5とした。

いま、試験体の強度を長期許容応力度の3倍とすると、

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

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

$$\text{曲げ耐力} \quad M_u = f_{bu} \times Z = 435 \times 3,136.3 = 1,364 \times 10^3 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$$

$$\text{せん断耐力} \quad Q_u = f_{su} \times A / 1.5 = 36 \times 12.0 \times 39.6 / 1.5 = 11.40 \times 10^3 \text{ kgf}$$

せん断スパンを L_q とする(荷重は2点載荷とする)と、

$$M_u / L_q < Q_u \quad \text{から} \quad L_q > 119.6 \text{ cm}$$

曲げ破壊実験との対応を考慮し、 $L_q = 180 \text{ cm}$ とする。

- 荷重の大きさ W は、応力比 α が0.3のとき

$$M / Z = (180.0 \times 0.5 \times W) / 3,136.3 = 0.3 \times f_{bu} \quad \text{より}$$

$$W = 4,548 \text{ kg} \text{ (鋼矢板15枚: 4,500kg、不足分は他の錘により補う)}$$

この場合、鋼矢板は15枚積み1列とする。

- 応力比 α が0.5のときは、同様にして

$$W = 7,579 \text{ kg} \text{ (鋼矢板24枚: 7,200kg、不足分は他の錘により補う)}$$

この場合は、鋼矢板は12枚積み2列に並べる。

図4は $\alpha = 0.5$ 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にH型鋼と長ボルトからなる吊り金物により固定し、図5のように2列に並べた鋼矢板の積み重ねが崩れるのを防止する。

$\alpha = 0.3$ の場合の吊り金物構成を図6に示す。また、吊り金物の詳細を付図1及び付図2に示す。

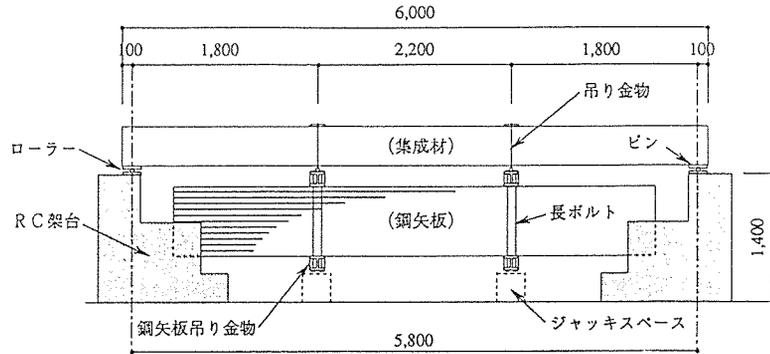


図4 実験装置構成

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型鋼または溝型鋼)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、安定化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個のジャッキは手で操作し(1個につき1人配置)、合図でジャッキを下げる。

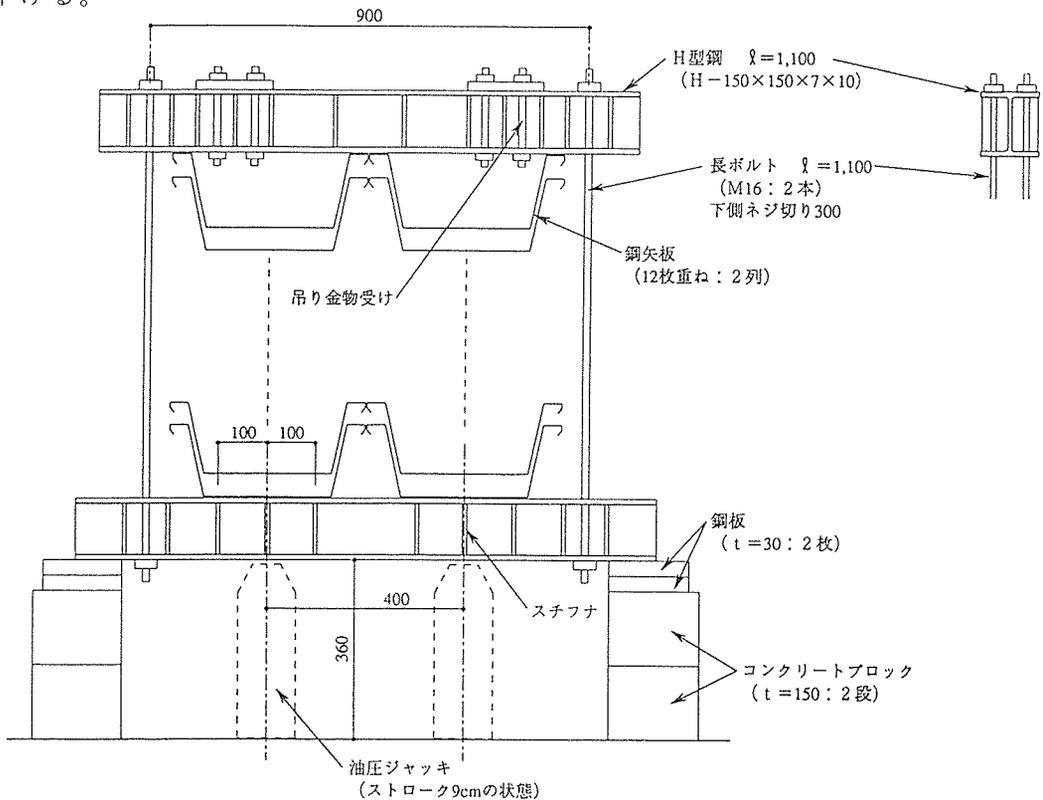


図5 鋼矢板吊り金物の構成(部分図)($\alpha = 0.5$ の場合)

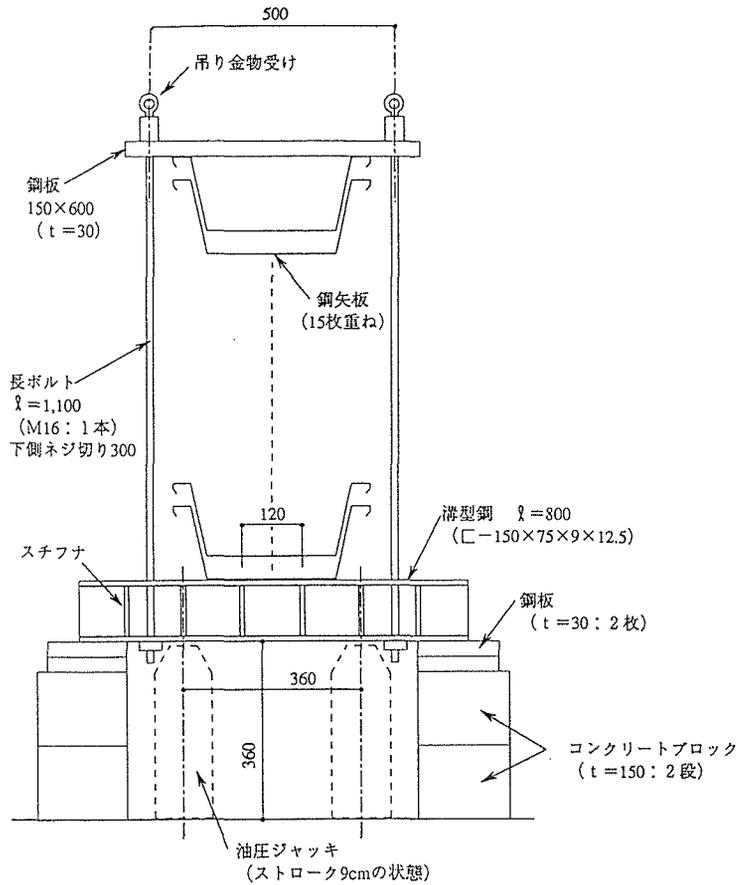


図6 鋼矢板吊り金物の構成(部分図) ($\alpha=0.3$ の場合)

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、実験場所の温度・湿度について行った。鉛直変位については3.3項で述べたように5箇所に変位計をセットし、一定時間ごとに計測した(図7参照)。計測時間間隔は次のとおり。

- a) 荷重直後 ~ 荷重後1時間 : 30分
- 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、荷重期間中、計測した。

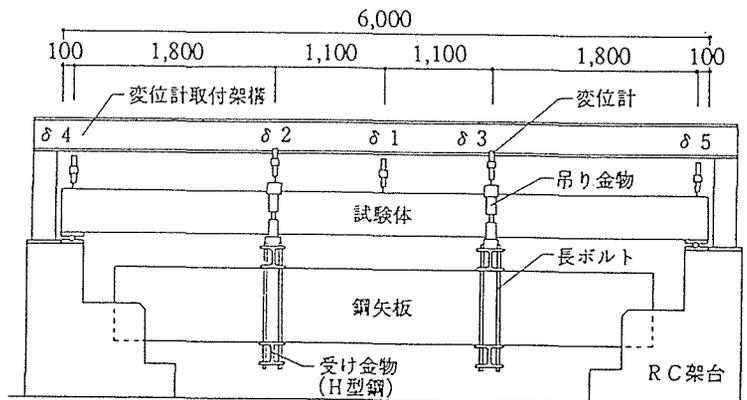


図7 変位計測位置($\delta 1 \sim \delta 5$ は変位計番号)

試験体の変形性状を調べるため、試験体中央の3箇所の片側にひずみゲージを貼付した(図8参照)。

ひずみ計測は変位計測と同時に行った。ただし、貼付した接着剤の信頼性(有効期間)を考慮して、計測期間を約3週間とした。

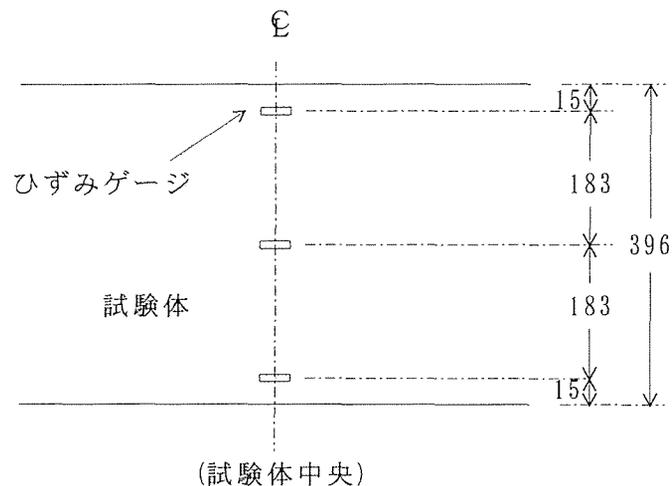


図8 ひずみ計測位置

5. 試験経過

・初年度(平成3年(1991))

1月上旬～3月中旬: RC架台、鉄骨架構製作。鋼矢板、試験体、計測機器セット。

3月26日: 載荷(2体とも)

4か月間の変位計測結果→6.1項

20日間のひずみ計測結果→6.2項

8月9日～8月23日(載荷後136日～150日): 夏期第1回連続計測実施

この間の変位計測結果→6.3項

・第2年度(平成4年(1992))

8月10日～8月24日(載荷後503日～517日): 夏期第2回連続計測実施

この間の変位計測結果→6.4項

・第2～3年度(平成4～5年(1992～1993))

(応力比0.5試験体にひび割れが発生したことに伴う動きを測定)

10月1日～1月4日(載荷後555日～650日): 変位連続計測実施(応力比0.5)

10月27日～1月4日: ひずみ連続計測実施(応力比0.5)

この間の変位計測結果→6.5項

・第3年度(平成5年(1993))

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)

1994年4月26日まで計測、3年間(正確には1,127日間)の実験終了

この間の変位計測結果→6.6項

6. 試験結果

6.1 荷重後4か月目までの変位

荷重した1991年3月26日から4か月目(正確には119日目)の7月24日までの変位を図9及び図10に示す。

図9は応力比 $\alpha = 0.3$ の場合の試験体中央($\delta 1$)及び荷重点($\delta 2$ 、 $\delta 3$)の計測結果である。 $\delta 1$ の荷重直後のたわみ(初期たわみ)は17.69mmであり、119日目のそれは22.93mmであった。この結果から4か月目の対初期たわみ比(相対クリープ)は1.30となる。文献1)によれば、4か月にわたるスギ材曲げクリープ試験の結果、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か月ではほぼ安定し、荷重直後の変位量の1.6~2.0倍程度になるとしている。本実験の結果では同じ4か月で1.6を下回っている。

図10は応力比 $\alpha = 0.5$ の場合の試験体中央($\delta 1$)及び荷重点($\delta 2$ 、 $\delta 3$)の計測結果である。 $\delta 1$ の荷重直後のたわみ(初期たわみ)は31.92mmであり、119日目のそれは42.68mmであった。この結果から4か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の場合は荷重後3000時間以内に破壊するが、応力比が0.5のものは荷重時間が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3000時間に近づいても変位の増加は続いている。

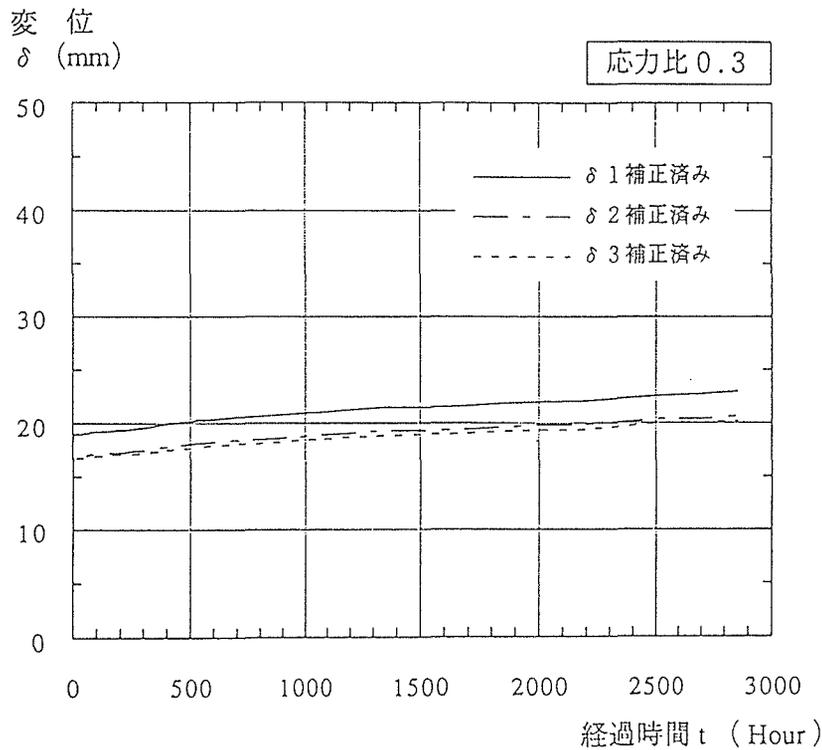


図9 荷重後4か月目までの変位状況(1)(応力比 $\alpha = 0.3$)

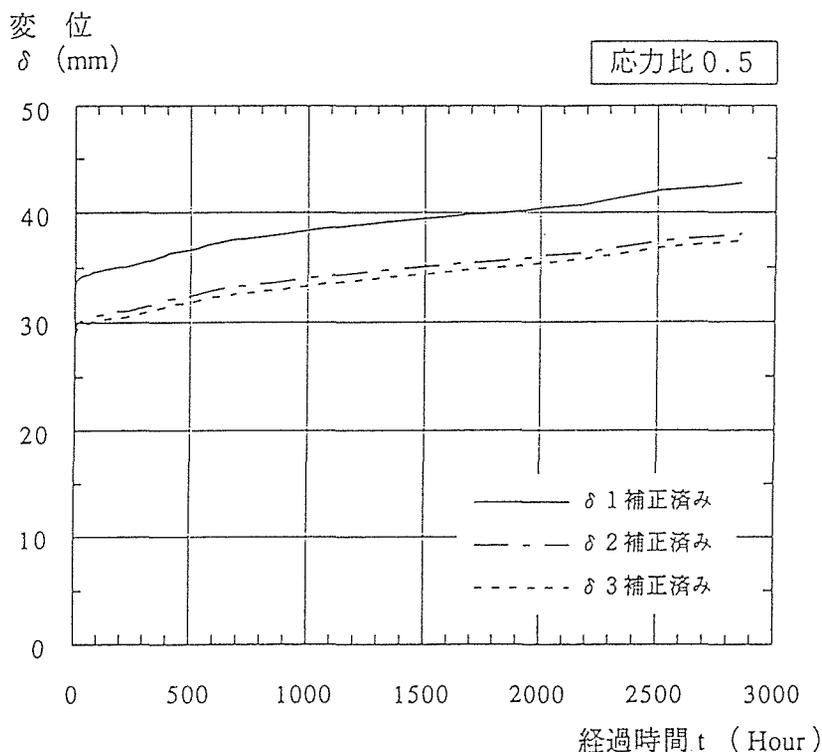


図10 荷重後4か月目までの変位状況(2)(応力比 $\alpha = 0.5$)

6.2 荷重後20日間のひずみ

ひずみ計測は応力比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4.2項に述べたとおり、試験体中央、片側3箇所であり、計測は荷重後24時間ごとに行った。

計測結果を図11に示す。計算では試験体のヤング係数を $110\text{tf}/\text{cm}^2$ としたとき、ひずみゲージ外側2枚の計測位置におけるひずみ値は $1,815\mu$ となる。本実験では荷重直後(初期たわみ時)のひずみ量(ε)は、引張側で $1,260\mu$ 、圧縮側で $1,536\mu$ であった。

この20日間の結果から、引張側、圧縮側ともにひずみが僅かずつではあるが増加していることが分かる。特に荷重後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ともに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。

6.3 初年度における2週間の連続変位測定(夏期第1回)

この測定は温湿度が比較的高い時期(夏期)の試験体の動きを調べることを目的として、1991年8月9日から同23日までの2週間、1時間ごとに計331時間、変位を連続測定した。この期間は荷重後136日目(約3,260時間)から150日目(約3,600時間)に相当する。

図12に応力比0.3の場合と応力比0.5の場合の測定結果(試験体中央の変位増分の経時変化)と、温度、湿度(試験体の傍らに置いた温湿度計の記録値)を併せて示した。実験場所は広い屋内で、通気性が比較的良好く、直射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。

この測定の結果から、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分かる。また、応力比0.3と0.5の両試験体は、変位増分は異なるが、変位

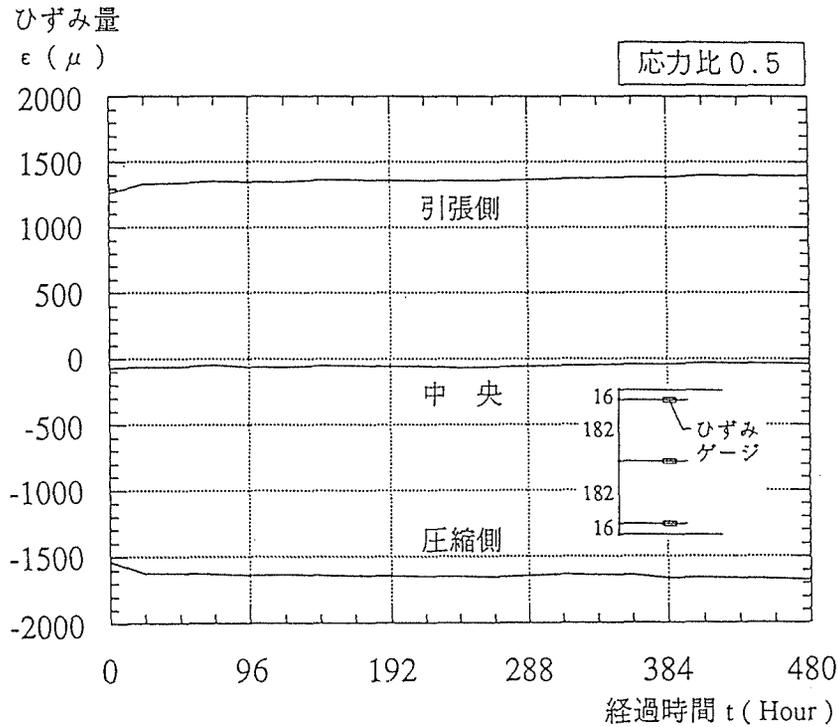


図11 荷重後20日までのひずみ計測結果(応力比0.5)

の増減はほぼ同時に起こっていることが分かる。両試験体に共通して、夕方から早朝にかけて僅かながら変位が減少する(戻る)傾向が認められる。このほか、240時間を過ぎて湿度がほぼ90%と高くなったところで、両試験体とも変位量が大きく伸びているのが確認できる。

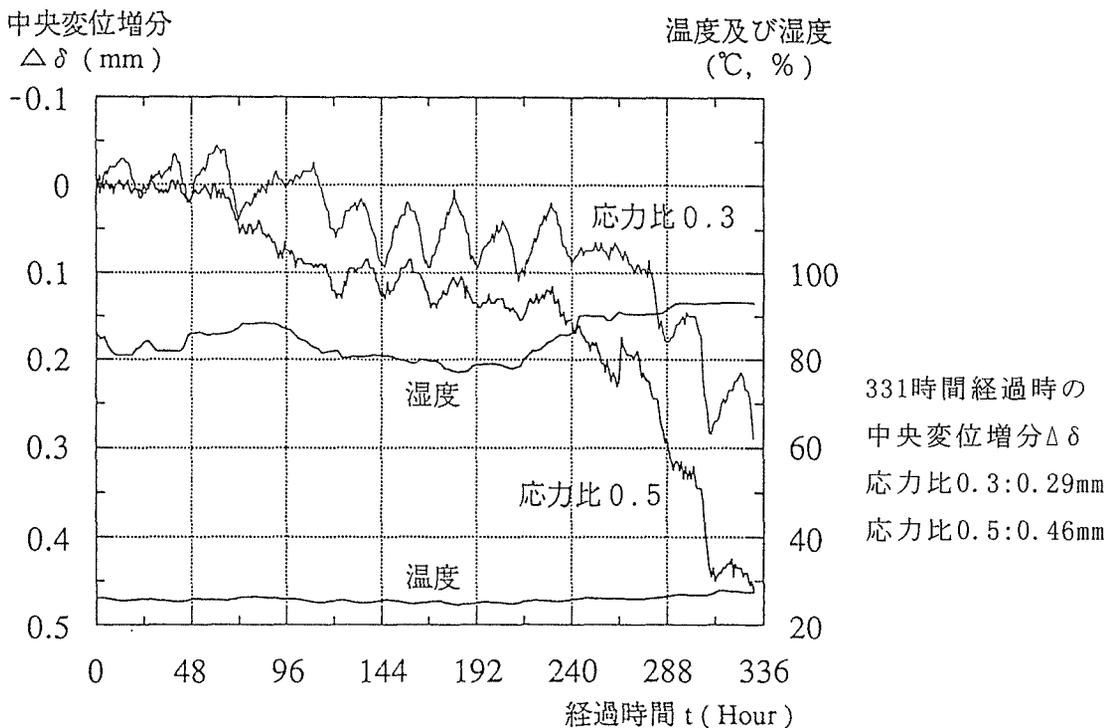


図12 初年度の2週間連続変位測定結果(夏期第1回)

6.4 第2年度における2週間の連続変位測定(夏期第2回)

この測定は初年度に行った測定と同様に、温湿度が比較的高い時期(夏期)の試験体の動きを調べることを目的として、1992年8月10日から同24日までの2週間、1時間ごとに計336時間、変位を連続測定した。この期間は載荷後503日目(約12,070時間)から517日目(約12,400時間)に相当する。

図13に応力比0.3の場合と応力比0.5の場合の測定結果(試験体中央の変位増分の経時変化)と、温度、湿度を併せて示した。実験場所は広い屋内で、通気性が比較的良好く、直射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。

1年前の測定(前項)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の両試験体は、変位増分は異なるが、変位の増減はほぼ同時に起こっていることも分かった。

今回の測定でも前年同様、応力比0.3と0.5の両試験体とも、小さな増減を繰り返しているが、2週間の変位増分は1年前よりも表1のように少なくなっている。

特に今回は湿度との対応が比較的に明瞭に認められる。70時間目から160時間目辺りまで湿度が90%以上という高い状態が続き、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がやや継続的に増加していることが分かる。160時間目以降、湿度が90%以下の状態で変動し始めたのに対応して、変位が比較的にはっきりと増減を繰り返すようになった。この時、前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。

表1 測定時期と2週間の中央変位増分($\Delta\delta$)の関係

測定期間 (載荷後の日数)	応力比	
	0.3	0.5
136日～150日	$\Delta\delta = 0.29 \text{ mm}$	$\Delta\delta = 0.46 \text{ mm}$
503日～517日	0.07	0.18

6.5 応力比0.5試験体において変位急増後の変位及びひずみの連続測定結果

載荷後約1.5年の時点で応力比0.5の試験体にひび割れを発見した。図14に2年経過時点でのひび割れの状況を示す。この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れている。このひび割れは計測日の1992年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。

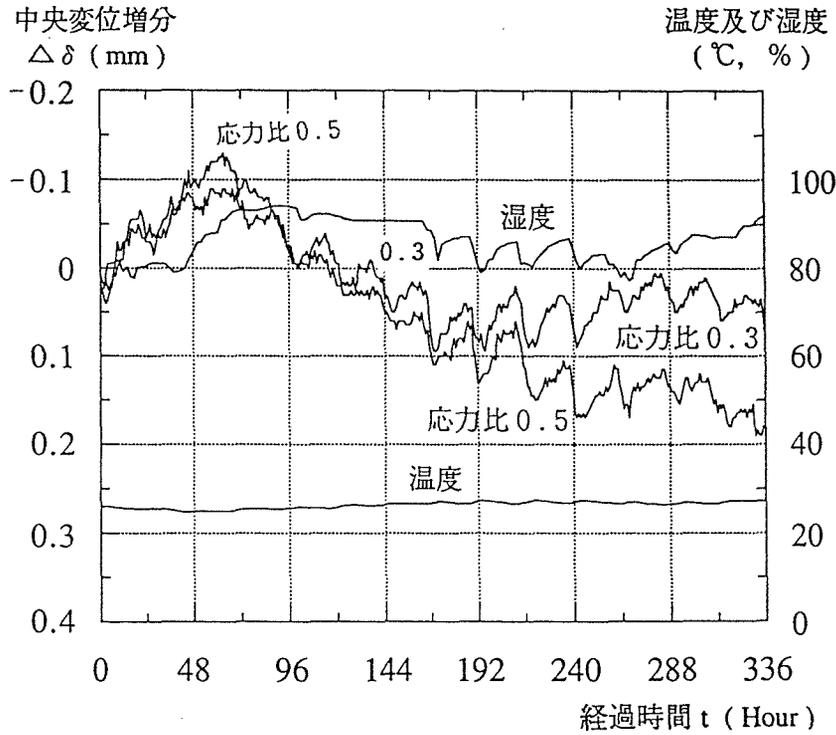


図13 第2年度の2週間連続変位測定結果(夏期第2回)

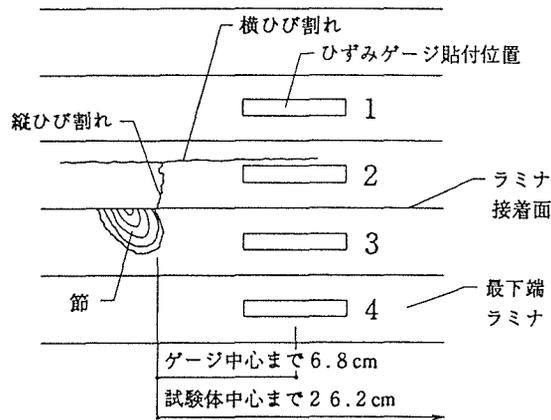


図14 ひび割れの状況(応力比0.5)

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、1992年10月初旬から自動計測器による連続変位計測を行うこととした。

期間：1992年10月1日 13:00より 1993年1月4日 12:00まで

計測：1時間ごと (合計2,280時間)

本計測はクリープ実験開始後、555日目(約13,320時間)から650日目(約15,600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の関係を知るため、最下端から4枚目までのラミナに図14に示すようにひずみゲージを貼付し、変位と同時に1時間ごとにひずみを計測することとした。ただし、ひずみの計測開始は変位の連続測定開始後624時間目の10月27日13:00である。

図15は応力比0.5の試験体について、連続測定開始時点(1992年10月1日13:00)の変位を

0として、2,280時間までの増減を示したものである。経過時間0は10月1日13:00を指し、また、中央変位増分の負値は変位が戻ること示している。温度、湿度も併せて示した。

経過時間1,852~2,038時間の間(8日間)は記録計不調のため欠測値となったため、図ではこの間は直線で結んである。

変位増分と湿度の関係を見ると、部分的には両者に対応があると思われる所もあるが、全期間を通じての一般性は認められない。

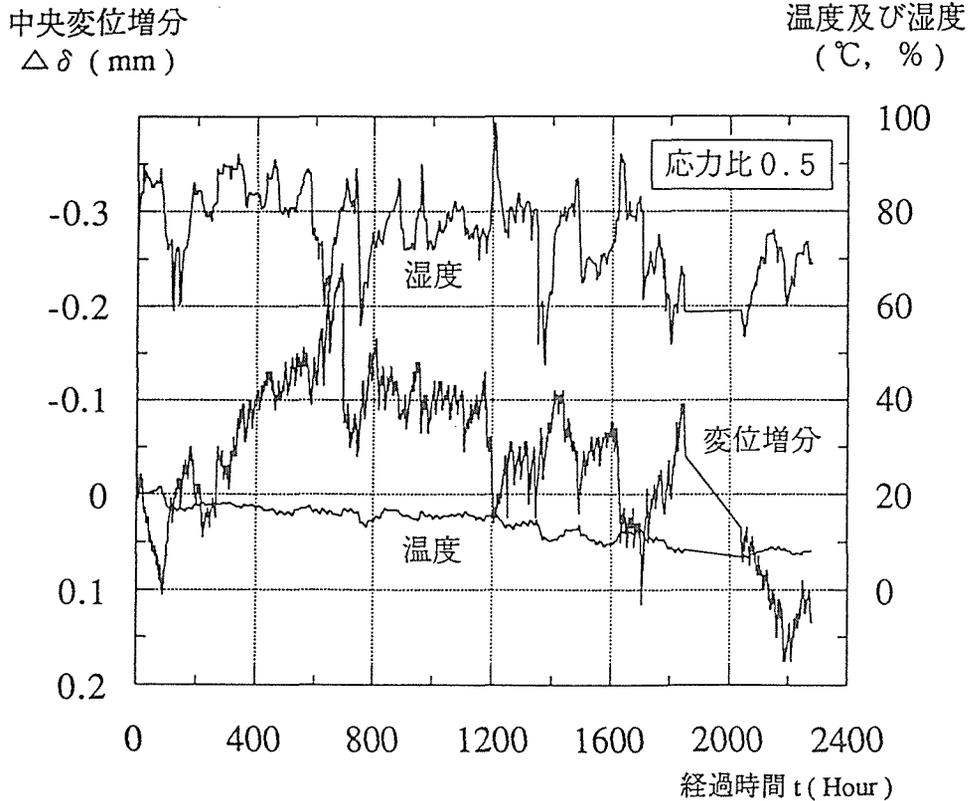


図15 応力比0.5試験体の連続変位測定結果
経過時間0は、載荷後555日(約13,320時間)の時点

図16-1、図16-2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、錯綜を避けるためにゲージ1、2とゲージ3、4の2枚の図に分け、温度、湿度を併せて示したものである。横軸の経過時間は変位連続計測の始期を0としたもので、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時間目時点を0として、その後の増減を表している。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大きい増減の波を示し、最大で250 μ もの動きをしている。逆に増減の波が最も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)であった。

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良好に対応していることが分かる。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17は変位増分とひずみ増分の対応を見るために、両者を併せて示したものである。両

者の関係は部分的にそれらの増減が対応していると思われる所もあるが、全期間通じての一般性は認められない。

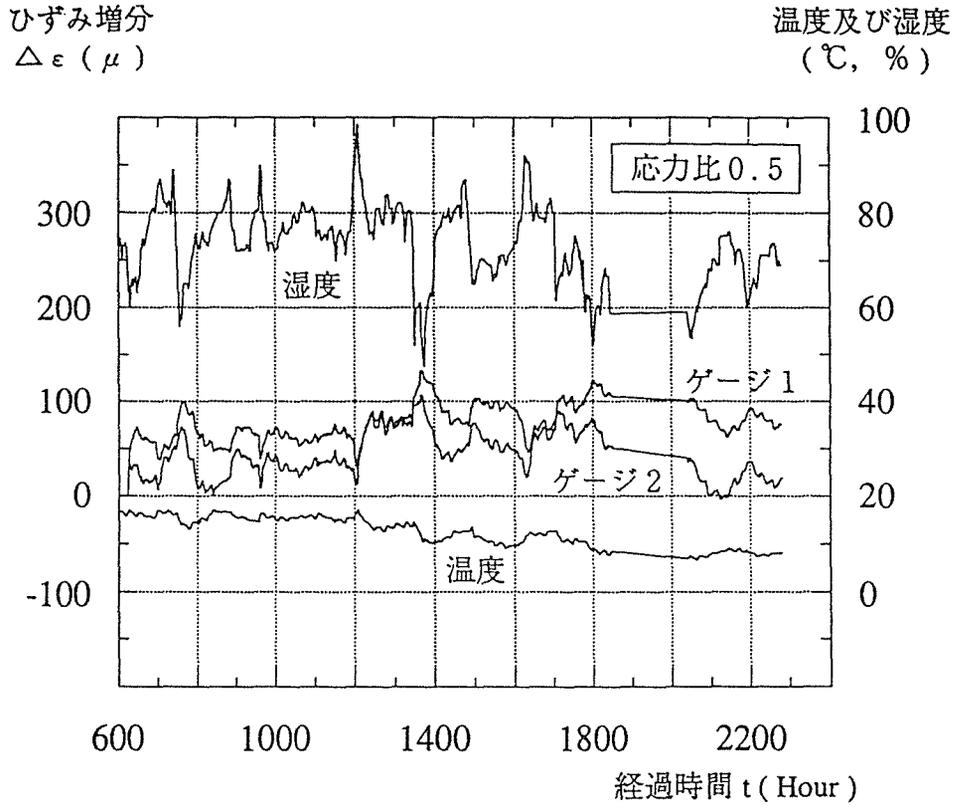


図16-1 応力比0.5試験体の連続ひずみ測定結果(その1)(ゲージ1、2)

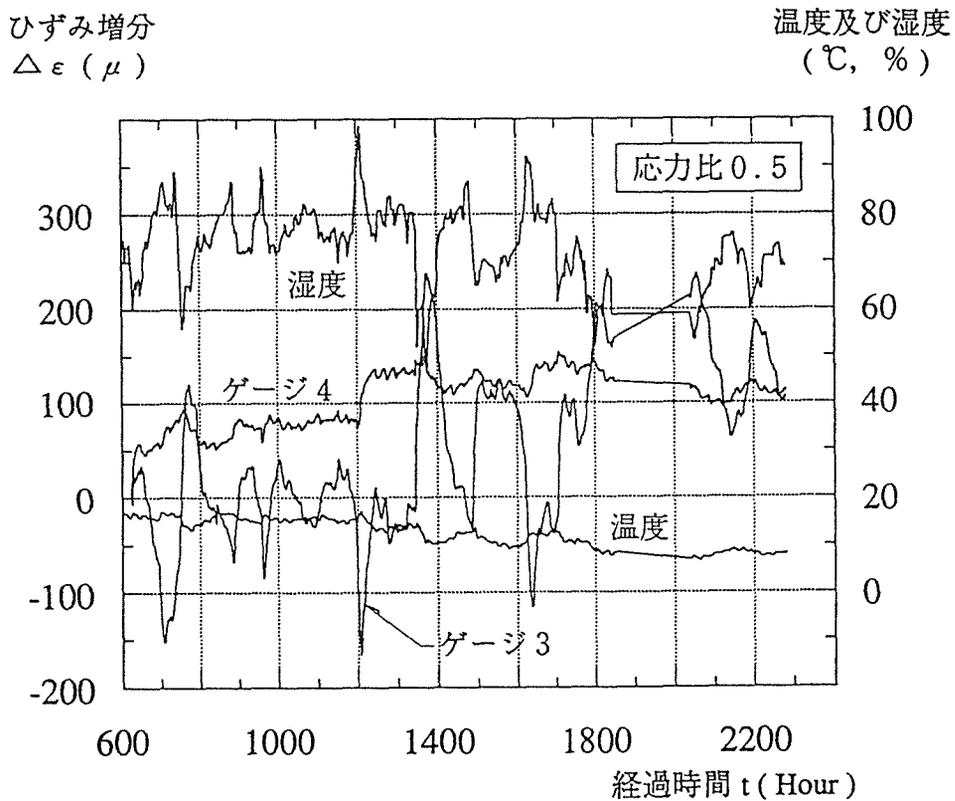


図16-2 応力比0.5試験体の連続ひずみ測定結果(その2)(ゲージ3、4)

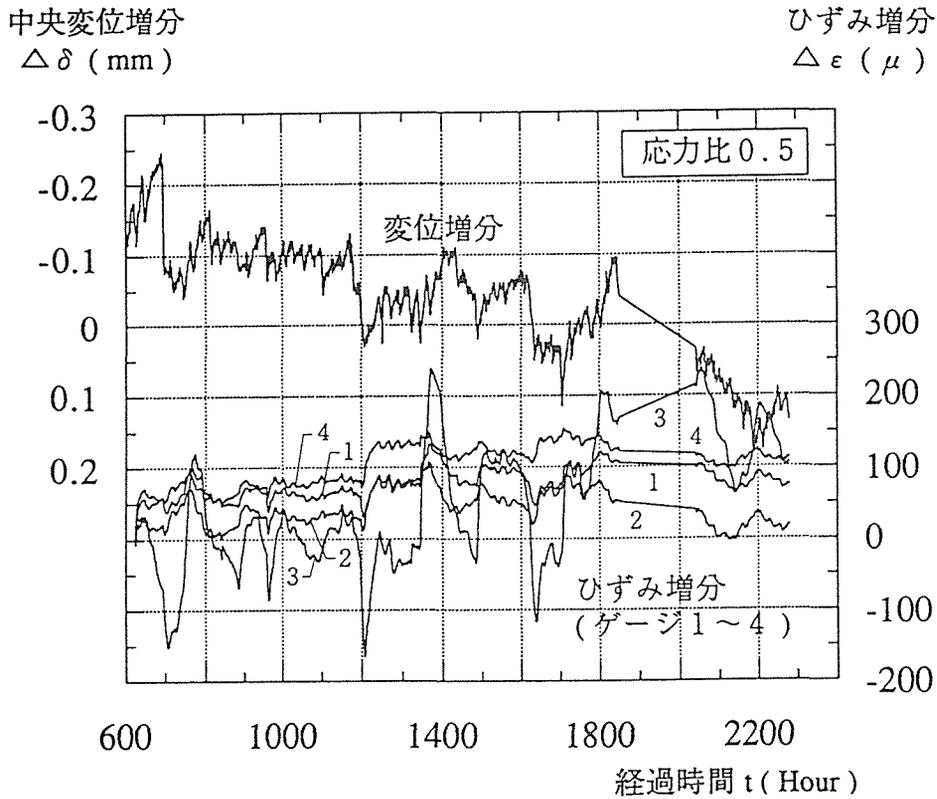


図17 応力比0.5試験体の変位とひずみの関係

6.6 載荷後3年間の変位

載荷実験期間、すなわち1991年3月26日から1994年4月26日までの3年間(正確には1,127日目まで)の試験体中央変位の計測結果と、併せてこの間の温度、湿度を図18に示す。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 $\delta 5$ の計測値の平均を差し引いて補正したものである。

1年経過ごとの試験体中央の変位量と相対クリープ(対初期たわみ比)は表2のようになる。

表2 1年ごとの中央変位と相対クリープ

測定時期	応力比 0.3		応力比 0.5	
	中央の変位量	相対クリープ	中央の変位量	相対クリープ
1年目	23.95 mm	1.35	46.61 mm	1.46
2年目	24.87	1.41	50.53	1.58
3年目	25.48	1.44	55.02	1.72

応力比0.5の試験体は、載荷後約12,000時間経過した1992年8月～9月頃、変位が約50日間で約1.8mm急増したが、その後13,000時間を過ぎてから変位の増加は急増する前のように緩やかになった。

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僅かであると言える。

両試験体の1年ごとの変位増分は表3のとおりである。

表3 1年ごとの変位増分

1年の期間	応力比 0.3	応力比 0.5
	1年間の変位増分	1年間の変位増分
載荷時～1年目	約 6.3mm	約 14.7mm
1年目～2年目	約 0.9mm	約 3.9mm
2年目～3年目	約 0.6mm	約 4.5mm

また、応力比0.3の試験体、0.5の試験体とも温度及び湿度が比較的高い時期、すなわち1991年夏:3,000～4,000時間、1992年夏:12,000～13,000時間、1993年夏:20,000～21,000時間に変位の増加割合が大きくなっていることが分かる。

図19は図18の両軸を対数目盛にしたもので、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分かる。

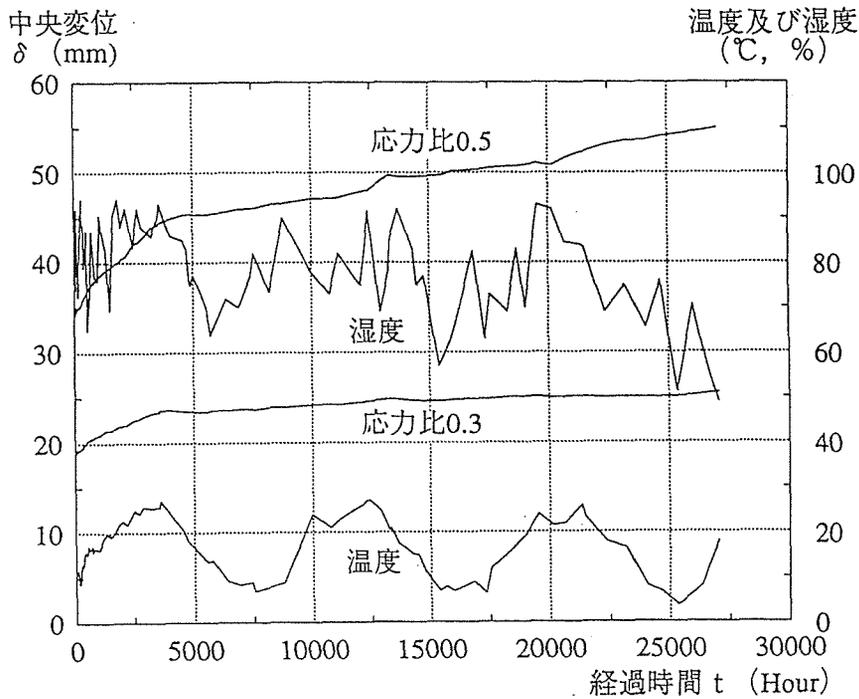


図18 載荷後3年間の変位と温度・湿度経過

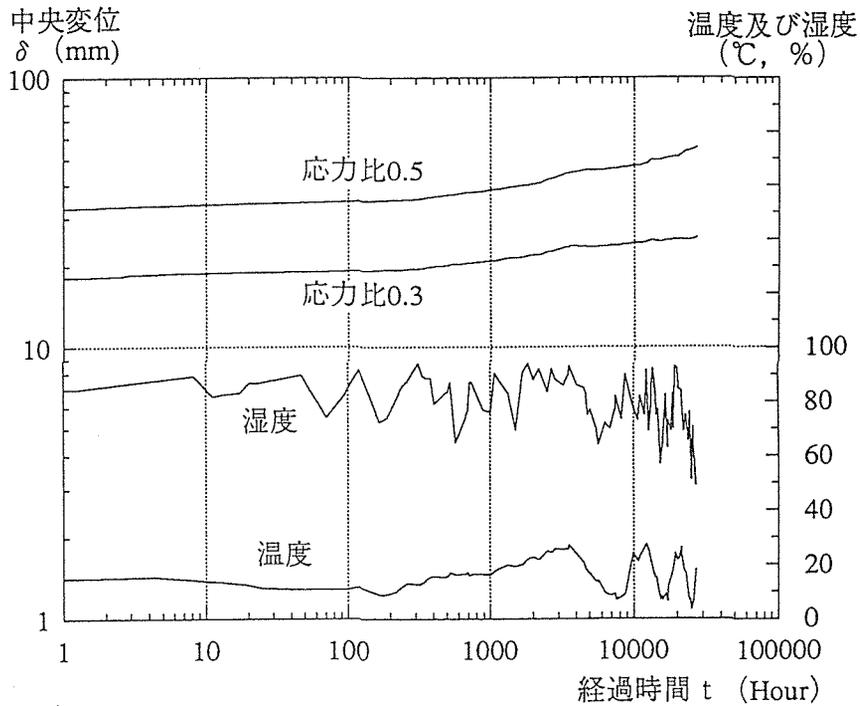


図19 両対数目盛による3年間の測定結果

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 t^N 則、すなわち次式²⁾に本実験の結果を当てはめることを試みた。

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

相対クリープは $\delta(t) / \delta_0 = 1 + (A / \delta_0) \cdot t^N$

$\delta(t)$: 経過時間 t における全たわみ

δ_0 : 载荷直後のたわみ(初期たわみ)

t : 経過時間

A 及び N : 定数

ここでは $A / \delta_0 = a$ とおき、時間 t の単位を日(Day)とする。応力比0.3及び0.5の試験体について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 : $a = 0.13$ $N = 0.17$

応力比0.5の試験体 : $a = 0.15$ $N = 0.19$

図20、図21に応力比0.3、応力比0.5の実験結果と、設定した a と N の値を適用したクリープ曲線を示した。一般的に载荷後しばらくは上式による曲線と実験値が一致しないとされているが、本実験においても120日~130日目までは実験値が計算値を下回っており、この間の実験値は a と N の値の設定の際には考慮しなかった。特に応力比0.5の試験体については、载荷後150日までの部分と変位が急増した時期の部分を見捨てる、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当てはめを行った。

図22、図23は応力比0.3と応力比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目盛による経過時間(日)、縦軸を初期たわみに対する変位増分の対数目盛とし、100日目以降のデータを示した。これらの図から実験結果と設定したクリープ曲線とが非常に良く一致していることが分かる。

7.2 推定相対クリープの算出

実験結果を基に設定したクリープ曲線から、50年、100年後の相対クリープ $[\delta(t)/\delta_0]$ を計算すると表4のようになる。

表4 実験式により算出した将来の相対クリープ

時期 \ 試験体	応力比 0.3	応力比 0.5
50年後	$\delta(t)/\delta_0 = 1.69$	$\delta(t)/\delta_0 = 1.97$
100年後	1.78	2.10

この結果から、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 曲げ破壊実験の結果と推定相対クリープとの関係

図24は本実験の試験体と全く同じ条件(樹種、ラミナ構成、寸法等)の集成材を2点集中荷重による曲げ破壊試験に供した結果である。載荷点はクリープ試験における錘の載荷点と同一である。

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年後の変位は67.0mmとなり、1992年8～9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区別なく、曲げ破壊実験による破壊時の変位点で集成材が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。

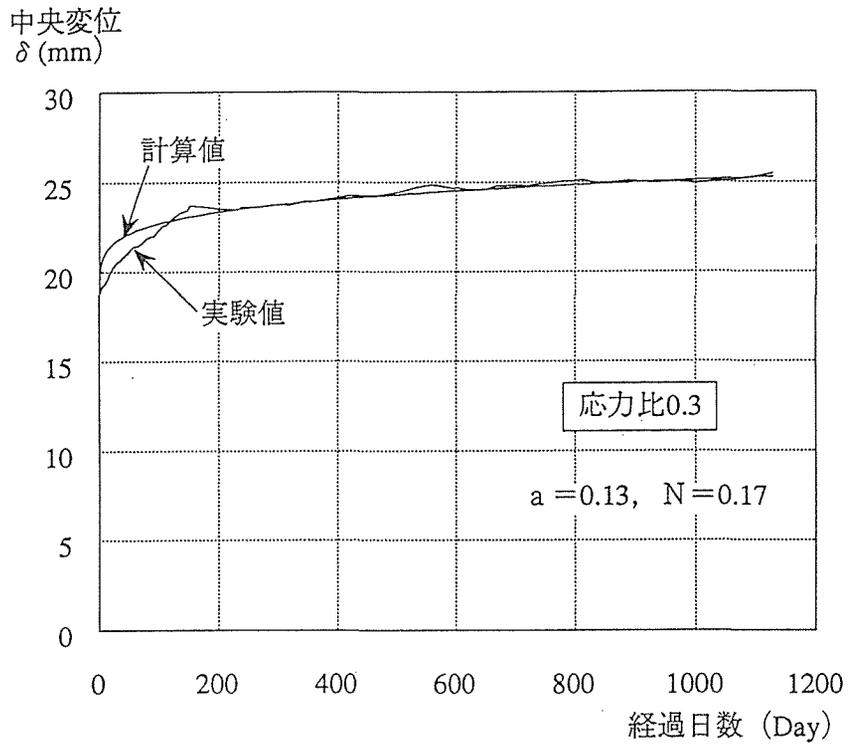


図20 クリープたわみの t^N 則実験式への当てはめ(1) (応力比0.3)
 当てはめ式: $\delta(t) = \delta_0 + A \cdot t^N = \delta_0(1 + a \cdot t^N)$

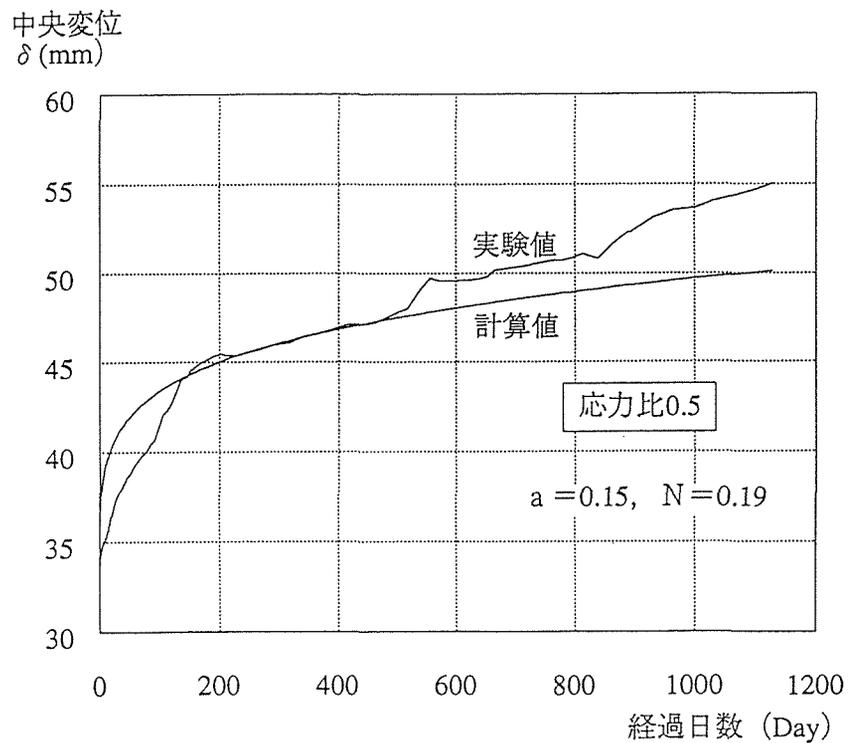


図21 クリープたわみの t^N 則実験式への当てはめ(2) (応力比0.5)
 当てはめ式: $\delta(t) = \delta_0 + A \cdot t^N = \delta_0(1 + a \cdot t^N)$

初期たわみに対する
変位増分 $\Delta \delta$ (mm)

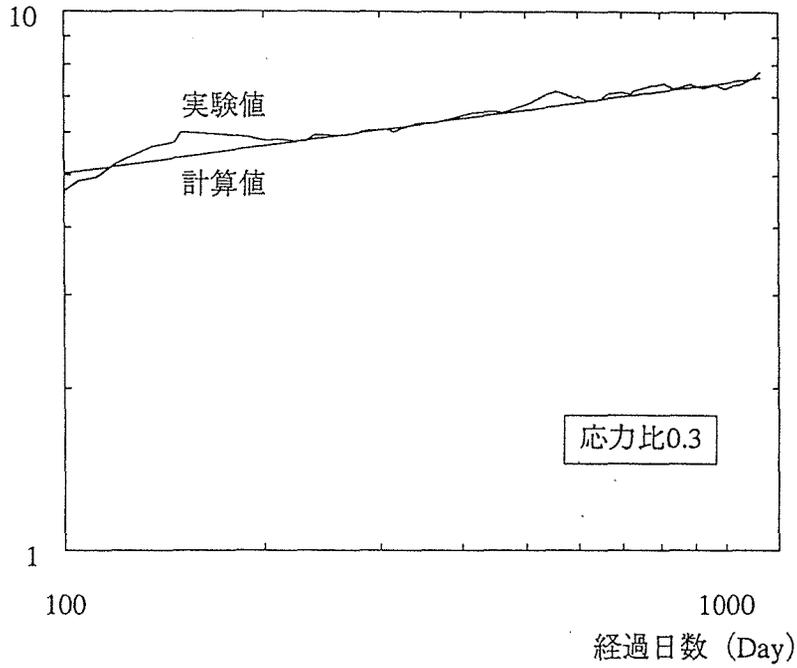


図22 両対数目盛によるクリープ経過と実験式(応力比0.3)

初期たわみに対する
変位増分 $\Delta \delta$ (mm)

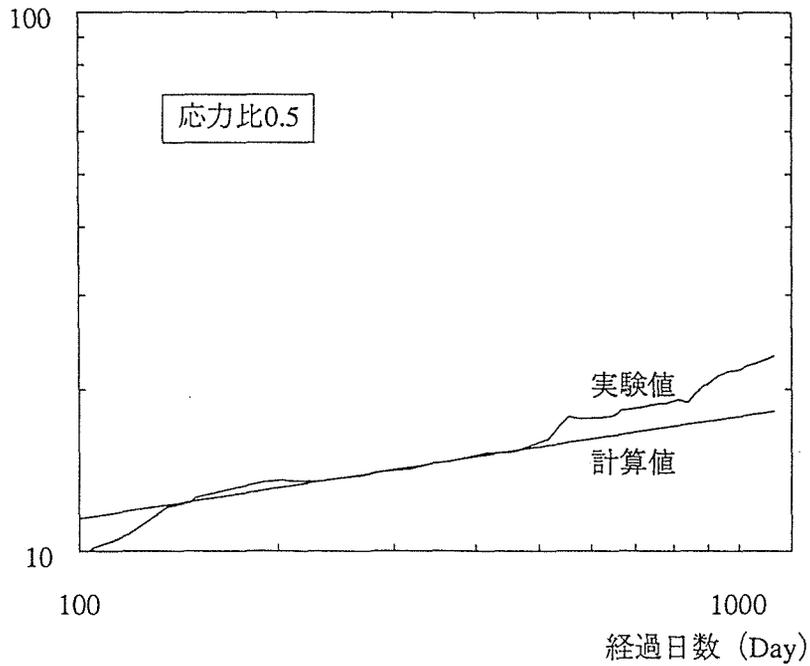


図23 両対数目盛によるクリープ経過と実験式(応力比0.5)

荷重 P (ton)

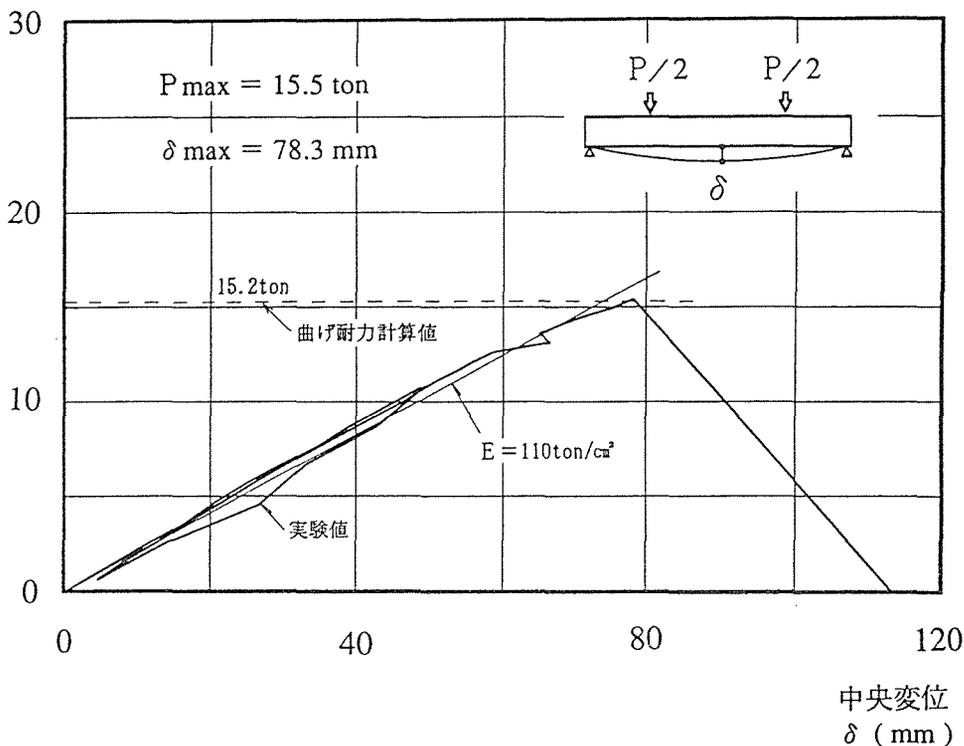


図24 曲げ破壊実験の結果

8. まとめ

実大集成材による曲げクリープ試験を3年間実施した。長期許容曲げ応力度レベルの応力比 $\alpha = 0.3$ 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はいたが、まだ増加傾向を示していた。結果として、1年経過時点の相対クリープ(対初期たわみ比)1.35が、2年経過時点:1.41、3年経過時点:1.44になった。しかし、2年目から3年目までの1年間の変位の増加は約0.6mm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は僅かずつ増加する傾向が続くものと予想される。

一方、応力比0.5の試験体は1年経過時点の相対クリープ1.35が、2年経過時点:1.58、3年経過時点:1.72になっている。2年目から3年目までの1年間の変位の増加は約4.5mm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及び応力比0.5の両試験体に共通して、夏期の温度、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年目の温湿度が高い時期(8~9月)に変位が急増した(50日間で約1.8mm)が、丁度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かった。

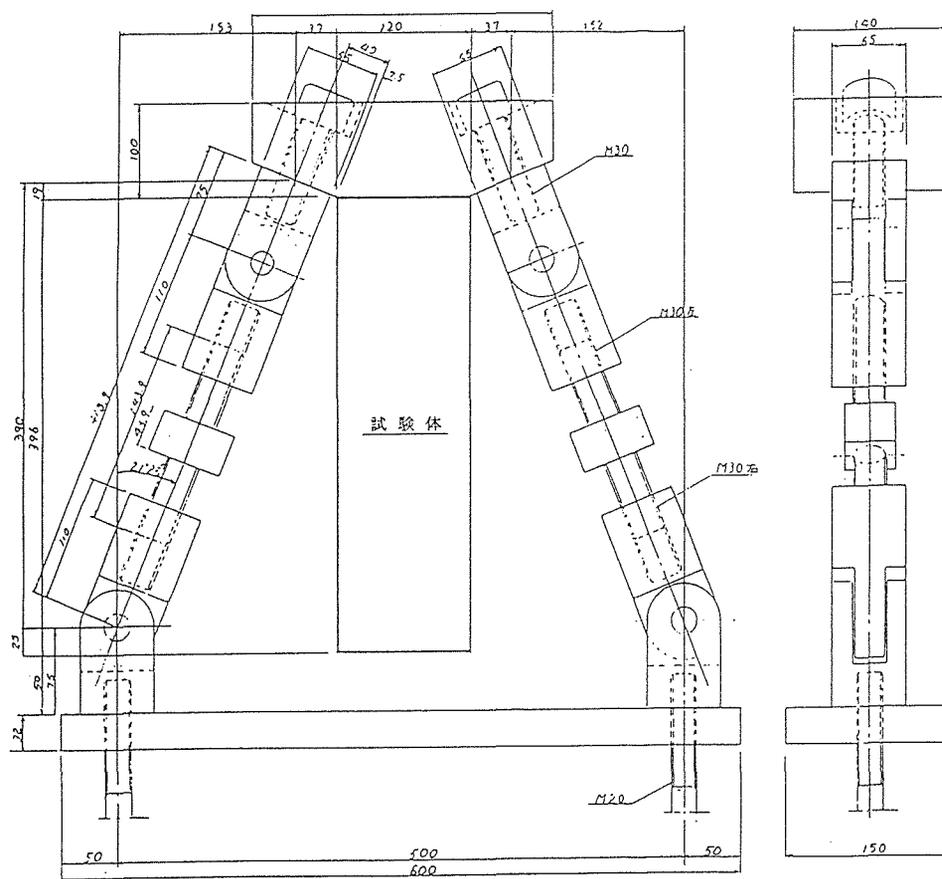
温度、湿度の影響については、実験環境が温度は1日を通じてほぼ一定という条件(1年を通じては当然変動するが)であるため、湿度の影響を抽出するには好都合であった。

連続計測により、微視的なレベルでのクリープ変位の動きを調べた結果、応力比0.3と0.5の両試験体とも小さな増減を繰り返しており、その増減が両試験体同時に起こっていること、そしてその変化が湿度変化と対応していることが比較的明瞭に認められた。すなわち、一定期間、湿度が高い状態(90%RH以上)が続いた時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ことが判明した。

3年間にわたる変位計測の結果を基に、応力比0.3と0.5のそれぞれの試験体の t^m 則によるクリープ曲線の実験定数を設定した。このクリープ曲線を用いて50年後の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(日本建築学会)では、長期荷重による集成材の気乾状態にお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。

参考文献

- 1) 例えば、久田俊彦：「木材の長期荷重に対する強度並びに断面欠損の影響」、
日本建築学会 研究報告 9号(1950)
- 2) 有馬孝禮、佐藤雅俊、益田恵吾：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)
- 3) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成4年3月)
15-42(1992)
- 4) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成5年3月)
32-56(1993)
- 5) (財)日本住宅・木材技術センター：技術開発推進事業報告書 集成材構造開発(平成6年3月)
14-64(1994)



付図1 吊り金物詳細(応力比 $\alpha = 0.3$ の場合)

