

第6章 木質材料・部材のクリープ特性

木質構造における木質材料の使用形態は、多岐に亘っており、構成部材として使われる場合は、他材料や接合部との組合わせで用いられている。しかし、このような使い方がなされる場合は、材料レベルでの一般的な評価法である小試験体による試験や評価だけでは、部材として建物に使用された場合の性能に関する適正な評価ができない場合もあり得る。一方、部材レベルでの試験は、部材をある程度モデル化をして実施するものの、かなり大型の試験体となり、静的な試験ですら多大なスペースと労力を費やす。ましてや、クリープのように長期耐力性能を扱う場合、これらに時間的な要素がさらに加わるため、データ数は制限されざるを得ない。しかし、部材レベルでの試験は、建物に使用された場合の部材の性能を評価するためには、適切な方法であると考えられる。

そこで、本章においては、木質部材の長期性能に関するデータの集積をはかることと、部材として使用された場合の定性的な傾向を把握し、長期耐力性能とその評価に関する基本的な考え方について検討した。

第1節 パーティクルボード下地材のクリープ特性

木質材料のうち代表的な面材料は合板であるが、パーティクルボード、ファイバーボードもその特性に応じた用途に供されるようになってきた。とくに比較的大きい曲げ応力が長期にわたって作用する部材は、床下地、屋根下地などであるが、それらの箇所に使用するには居住性等の面からある程度の厚さを必要とすることから、厚物が比較的容易に得られるパーティクルボードが合板と並んで重視されるようになってきた。また、木材資源や材料供給面からも、今後合板と並んでパーティクルボードは曲げを受ける平面材料として重要な位置を占めるものと考えられる。パーティクルボードは、面内剛性や釘接合等に関しては合板と同等以上の性能を示すが、水分に対する変化、クリープなど比較的長期にわたる耐力性能については十分明らかになっていない点があるため、使用条件を加味した試験を実施し、長期性能について検討した。

1-1 クリープ曲線と環境条件

試験体は、図-6-1-1に示すように、根太に下張材としてのパーティクルボード

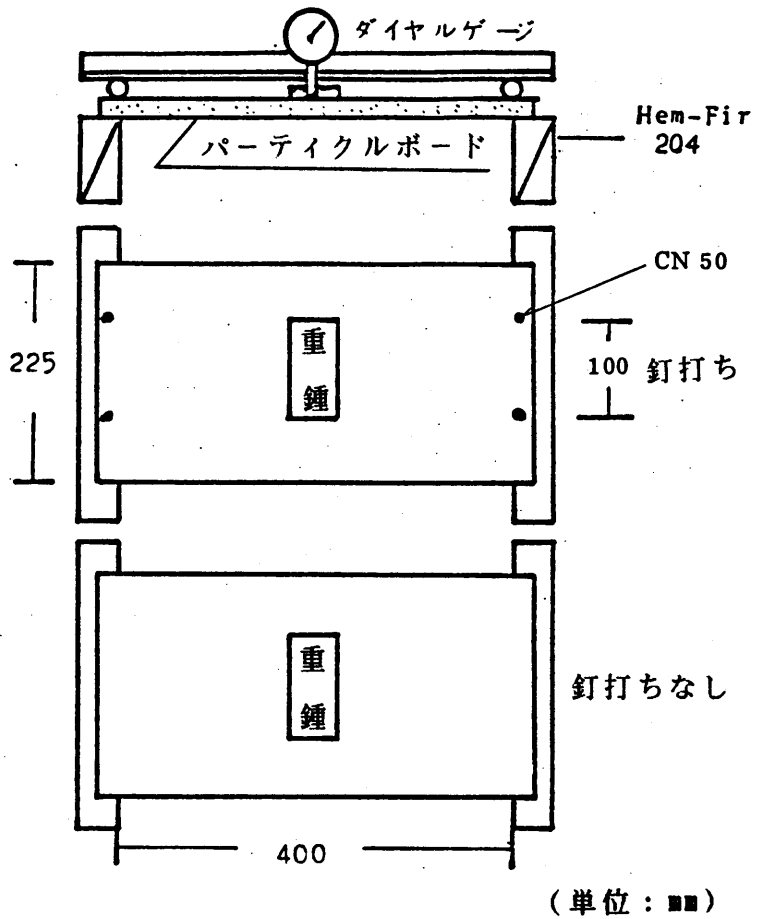


図-6-1-1 床下張クリーブ試験方法

表-6-1-1

静的試験における床下張り曲げ撓みに及ぼす釘打ち効果

(釘打ち試験体の撓み/釘打ちがない試験体の撓み)

厚さ \ 荷重	10kg	20kg	30kg	50kg
12 厚	0.93	0.91	0.91	—
15 厚	0.88	0.90	0.93	0.92
20 厚	0.76	0.79	0.85	0.85

を組合せたものである。根太材は、枠組壁工法用製材、呼称 204材の樹種区分 Hem-Fir である。パーティクルボードは市販品で厚さ 12、15、20mm の 3 種類で、タイプは P200 である。厚さ 15 と 20mm は同一メーカー製で厚さ 12mm は他メーカー製であり、チップ構成、接着剤添加量に若干差異があるものと考えられる。試験体は、ボードを根太に釘打ち（CN50 を使用）したものと根太にただのせたものを対にして用い、釘打ちによる端部拘束についても検討した。

試験の環境条件は、(a) 20°C、65% RH の恒温恒湿状態、(b) 10~18°C、50~80% RH の冬期における一般空調、(c) 10~18°C、76~90% RH の多湿状態の 3 条件とした。なお、多湿試験では試験体のボード下面側に水を満したバットを置き、ビニールシートで覆ったチャンバー中で行ったもので、その湿度条件は床下を想定したものである。(第 2 章における床下の湿度測定の結果から、床下は、高湿の場合は 80~90% RH になり、さらに湿気の高い場合は 90% 以上となることがある)。

クリープの変形量は、中央部のたわみを矢高量測定器（ダイヤルゲージ精度 1/100mm）で計測した。表-6-1-1 は静的な曲げ試験における各荷重段階で釘打ちした場合の中央部のたわみと釘打ちなしの場合のたわみに対する比率を示したものである。いずれの厚さのボードについても、釘打ちによるたわみの拘束効果がみられるが、ボード厚の大きいほど効果があり、かつ荷重の小さいほどその効果は大きい。なお、荷重-変位曲線は近似的には直線関係が成立つと考えられるが、初期荷重段階ほど釘打ちの拘束が発揮されるため、このような結果を生じたものと考えられる。

図-6-1-2 に恒温恒湿室におけるクリープ曲線の例を示した。

次にクリープ曲線の一般式であるが、通常木材や木質材料が建築用部材として用いられる場合のクリープに関する評価には、クリープ限度（永久に破壊することなく、継続荷重に耐え得る応力度、あるいは継続荷重を受けても最終的にクリープが休止するような応力度）とクリープ変形の長期推定とに大きく区分できる。この場合、前者は許容応力度、後者は許容変形量に関係する。ここでは、許容変形量を中心に検討することにした。

一般に木材のクリープ曲線の実験式は、 t^N 則や $\log t$ 則で近似される場合が多い。

$$\delta_c(t) = A t^N \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 1)$$

$$\delta_c(t) = a \log t + b \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 2)$$

ここに、 t は時間、 A 、 N 、 a 、 b は実験定数

130)

また、線型粘弾性力学モデルを用いて (6・1・3) のように表示される場合もある。

$$J(t) = J_0 + t / \eta + \psi(t) \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 3)$$

ここに、 $J(t)$: クリープコンプライアンス、 J_0 : 瞬間コンプライアンス、 η : 粘性係数、 $\psi(t)$: クリープ関数

クリープ関数 $\psi(t)$ は、さらに一般的Voightモデルによって

$$\psi(t) = \sum_{i=1}^n J_i (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i}}) \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 4)$$

ここに λ_i : 遅延時間、 J_i : コンプライアンス

と表わせるが、 $\psi(t)$ という遅延時間の分布関数または、遅延スペクトルの概念を導入すると、積分形で次式になる。

$$\psi(t) = \int_0^{\infty} \psi(\lambda) (1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}) d\lambda \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 5)$$

さらに、木材等については、粘弾性理論に基づく近似スペクトルの算出もなされているが、このような表示では、実用的な面からみると現象的な解釈にとどまっており、定量的な扱いには適用しがたい面もある。

また、本論文では、木材および木質部材のクリープ現象そのものを解析するのではなく、現象をもとにして構造材料としての長期耐力性能評価体系との関連を明らかにすることであり、現象の表示にあたっては、簡単で包括的かつ安全側のものを採用する必要がある。そこで、ここでは t^N 則 (Power law) をクリープ曲線の実験式として採用することにした。 t^N 則は、低荷重の場合短時間側で適合しない部分が見られ、高荷重になると長時間側で t^N 則をはずれてくることが認められている。しかし、高荷重域での問題は、クリープ曲線そのものが問題ではなく、クリープ限度あるいはクリープ破壊に関係してくるものであると考えられ、 t^N 則が木材や木質材料のクリープを比較するためには、妥当なように考えられる。しかし、実験の条件である寸法、荷重方式、計測期間、温湿度等の環境条件などが異なってくるので、クリープによるたわみの曲線を (6 · 1 · 6) のように表示することにした。

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_c(t) \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 6)$$

ここで、 $\delta_c(t)$ に (6 · 1 · 1) を代入して、

$$\delta(t) = \delta_0 + A t^N \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 7)$$

ここに、 δ_0 : 瞬間変形または弾性変形 (与えられた荷重に比例)

A, N : ある荷重範囲内で荷重に比例する実験定数

さらに (6 · 1 · 7) 式を書き直すと

$$\delta(t) / \delta_0 = 1 + a t^N \dots\dots\dots (6 \cdot 1 \cdot 8)$$

ただし $a = A / \delta_0$ (a は時間 t を日数とすれば、瞬間変形に対する1日後のクリープ変形の比率を意味する)

(6 · 1 · 8) 式において、 $\delta(t) / \delta_0$ は相対クリープと呼ばれ、瞬間変形に對

する比率を表わしている。日本建築学会編「木構造設計規準・同解説」において、長期のヤング係数を短期のヤング係数の1/2としているのは、この相対クリープが2であることを意味している。

したがって、本節では、クリープの表示として(6・1・8)式をもってクリープ特性を比較することにした。

本試験において各試験体のクリープたわみ曲線から求めた実験定数(A、N)と荷重との関係を図-6-1-2に示した。

本試験範囲内では、Aは荷重にほぼ比例しており、Nは荷重によらずほぼ一定値0.2~0.3の値を示している。さらに A/δ_0 を表-6-1-2に示した。

実験定数Nおよび A/δ_0 については、釘打ちの有無で大きな差異はなく、クリープ量についても静的加力試験でみられるような比率であると考えられる。

図-6-1-3は、温湿度の変動する一般空調室におけるクリープ曲線と湿度との関連を示したものである。たわみの変動は、湿度の変動とよく対応しており、湿度の上昇に伴いたわみが増加し、湿度の降下によって回復が生じており、パーティクルボードの単体でのクリープ試験の傾向と類似している。また、たわみの変動巾はボード厚が厚いほど少なく、さらに釘打ちした方が少なく、含水率分布、釘打ちによる拘束効果が認められた。このような比較的短周期における変動を除いて、時間軸における全体的な曲線の傾向を示すと図-6-1-4のようになり、湿度の上昇(60%RH前後であったものが降雨によって約15%湿度が上昇)による吸湿でクリープ曲線に段差ができるが、基本的には t^m 則を適用でき、表-6-1-2のように示される。

湿潤状態では、クリープの増加が著しく表-6-1-2のようにN、 A/δ_0 とも大きな値を示す。 δ_{10}/δ_0 、 δ_{50}/δ_0 は10年、50年後の相対クリープ(瞬間たわみに対する全たわみの比率)を示したものである。

とくに一般空調状態では、降雨のとき、夜間などに湿度の増加があるにもかかわらず、恒温恒湿室のクリープ量と大きな差異がない。このことは重要な点で、環境条件を区分する際に、常時高湿状態とは区分して考えてもよいことを示しているものと考えられる。

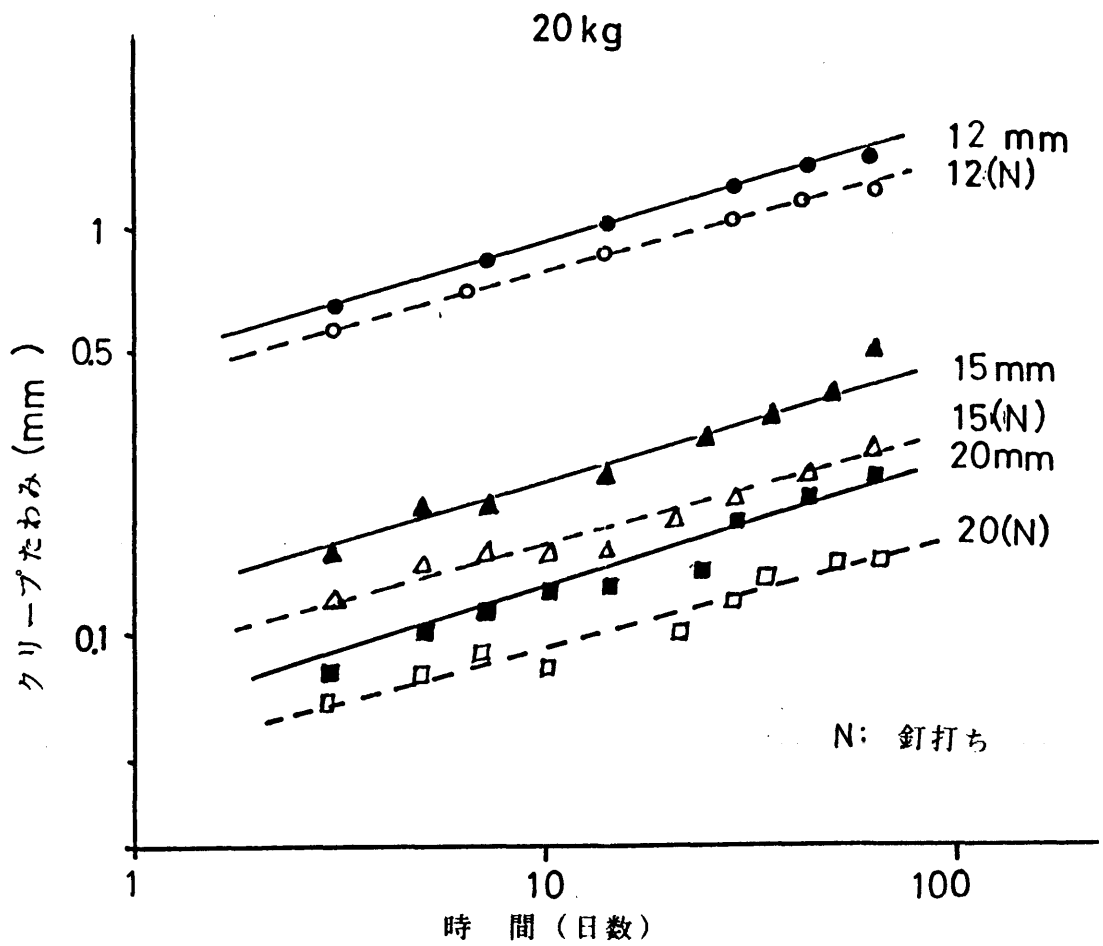


図-6-1-2 パーティクルボード下張材のクリープたわみ曲線

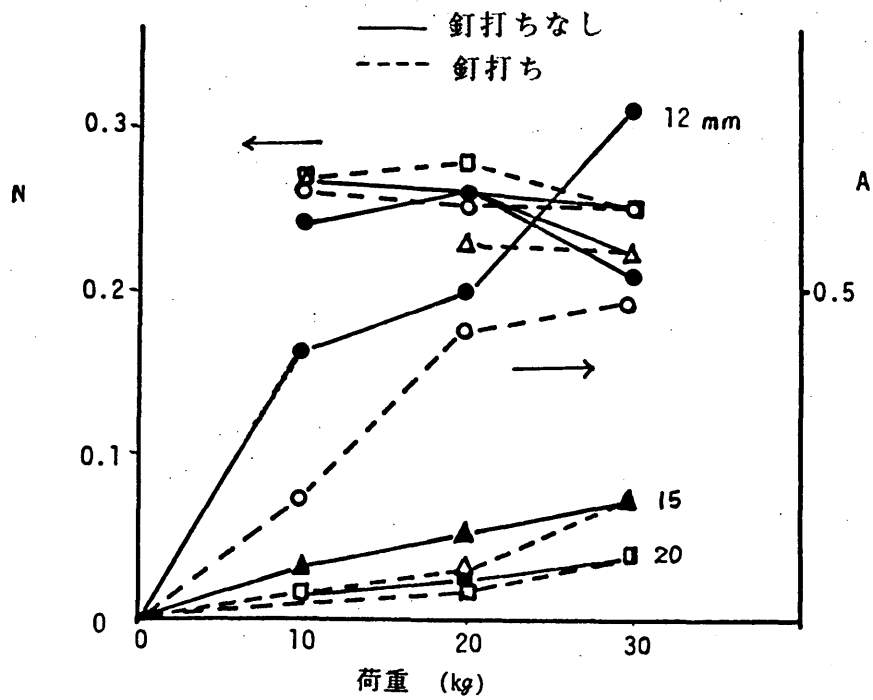


図-6-1-2 定数N, Aと荷重の関係

表-6-1-2 パーティクル下張材のクリープ特性

環境条件	ボード厚さ (mm)	N	A/δ_0	δ_{10}/δ_0	δ_{50}/δ_0
恒温恒湿	12	0.21~0.26	0.25~0.33	2.4~3.3	3.0~4.5
	12N*	0.16~0.26	0.16~0.38	2.4~2.8	3.1~3.7
	15	0.19~0.26	0.13~0.16	1.8~2.1	2.0~2.7
	15N*	0.22~0.23	0.13~0.16	1.9~2.0	2.2~2.4
	20	0.24~0.26	0.13~0.14	2.1	1.9~2.0
	20N*	0.25~0.28	0.10~0.12	2.6~2.7	2.4~2.6
一般空調	12	0.31~0.36	0.15~0.19	3.4~3.9	5.0~6.1
	12N*	0.31~0.34	0.15~0.17	3.2~3.4	4.6~5.2
	15	0.36	0.09	2.7	4.1
	15N*	0.24	0.13	1.9	2.4
	20	0.26	0.09	1.8	1.9
	20N*	0.24	0.13	2.2	2.4
湿潤 80~90%RH	12	0.36	0.65	13.5	23.2
	12N*	0.26	0.74	7.2	10.5
	15	0.53	0.43	34.2	79.0
	15N*	0.56	0.32	32.6	78.9
	20	0.40	0.77	21.5	40.0
	20N*	0.33	0.27	5.1	7.9

* N: 釘打ち

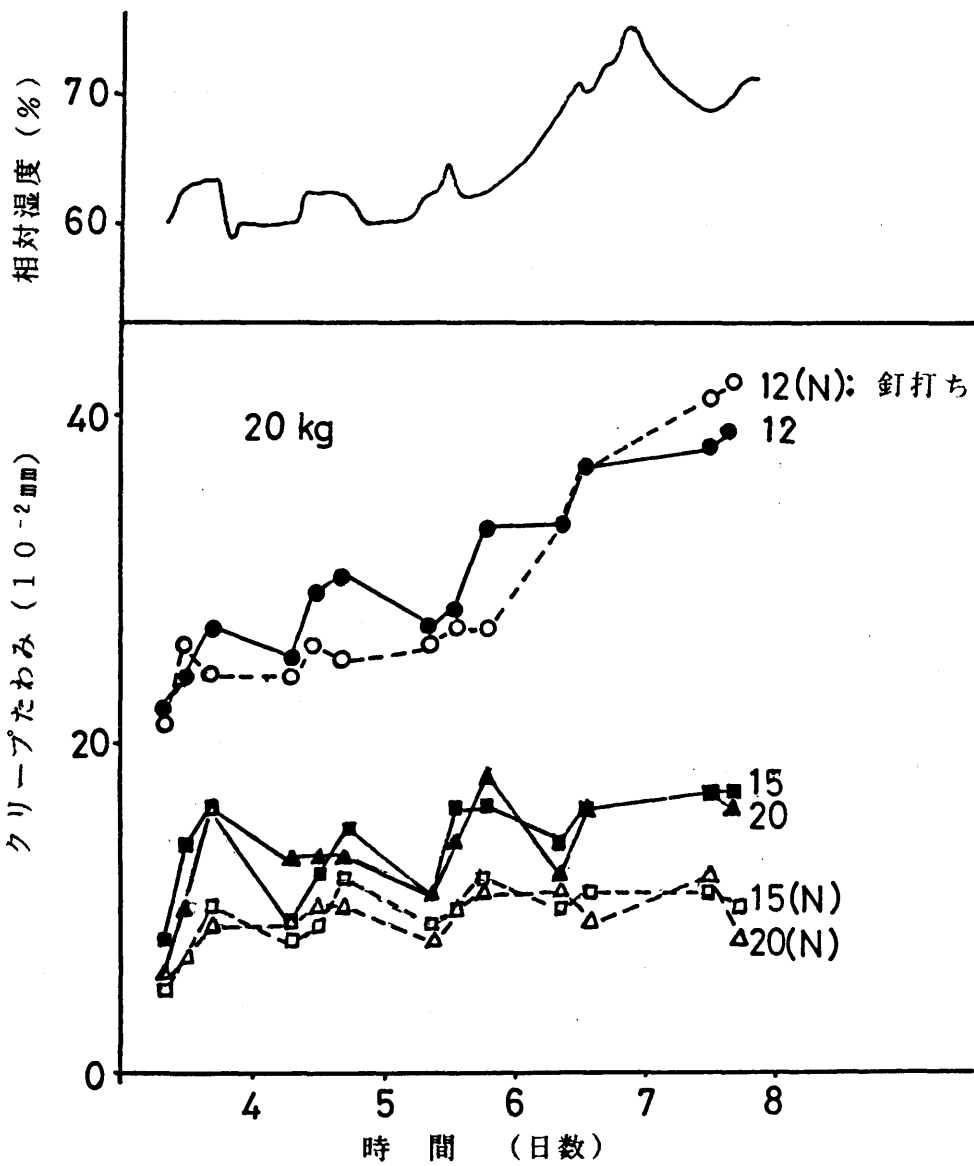


図-6-1-3 相対湿度の変動下のクリープ曲線

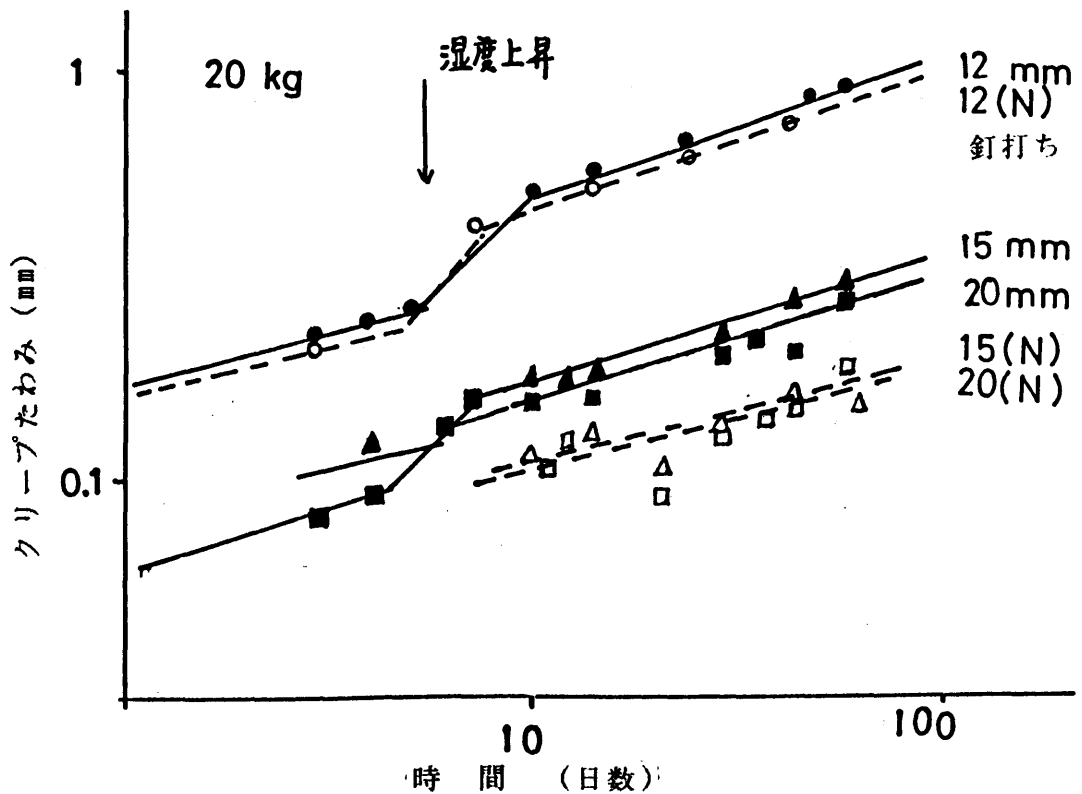


図-6-1-4 パーティクルボード下張材のクリープ曲線 (一般空調の状態)

1-2 荷重の増減によるクリープと変形モデル

下張材のうち、屋根下地などは屋根葺材の固定荷重のほかに積雪のような一時的な荷重が作用することがある。

図-6-1-5 (1) (2) は、荷重の増減下におけるクリープ曲線を示したものである。試験体は、前項と同じものである。

クリープ曲線の特色は、第5章釘接合部のクリープの荷重増減の場合と異なり、荷重の増減による変形の増加と回復が残存荷重下でも生じることである。瞬間変形に相当する部分は、増減によらずほぼ同じ値を示していた。

荷重の増減によるクリープ曲線は、その変形機構の差異によっていくつかのタイプが考えられるが、木質材料に適した荷重の増減による挙動を区分し、それによる推定曲線を検討してみる。本検討の目的は、単純化したモデルを考え、推定曲線による範囲をとらえ、実測値との相対関係を求めるもので、実測値に適合する正確な推定曲線を求めることではない。すなわち、ボードを使用する際に設計で考慮されるべき変形挙動のタイプの単純化をはかることを目的としている。

荷重の増減を図-6-1-6のように単純化して考え、その増減に対するクリープおよび回復のタイプを次のように区分する。

(1) 付加荷重存続型

荷重が $P_0 \rightarrow P_1$ ($P_0 < P_1$) になったとき、変形する量は荷重 P_0 と時間 t による変形量 $\delta(P_0, t)$ と新たに付加された荷重 ($P_1 - P_0$) とそれが経過した時間 $t - t_1$ による変形量 $\delta(P_1 - P_0, t - t_1)$ の和とすると変形は次のようになる。

$$[\delta(P_0, t) + \delta(P_1 - P_0, t - t_1)]$$

次に荷重が $P_1 \rightarrow P_0$ のとき、荷重 P_0 が継続して作用していると考え、荷重 ($P_1 - P_0$) の作用は消滅し、時間 t_1 から t_2 までに形成されたクリープ量のみが残存していると考えると次のようになる。

$$[\delta(P_0, t) + \delta(P_1 - P_0, t_2 - t_1) - \delta_0(P_1 - P_0)]$$

再び荷重が $P_0 \rightarrow P_1$ になったとき、荷重 ($P_1 - P_0$) が時間 $\{(t_2 - t_1) + (t - t_3)\}$ だけ作用したと考え、その和とすると変形は次のようになる。

$$[\delta(P_0, t) + \delta\{P_1 - P_0, (t_2 - t_1) + (t - t_3)\}]$$

以下同様に荷重存続時間分だけ累加を行う。

この型式は、各変形要素が荷重に対して各々独立した挙動をするような場合を想定

したものである。

(2) 最大荷重存続型

荷重が $P_0 \rightarrow P_1$ のとき、荷重 P_1 が時間 $(t - t_1)$ だけ作用したものととして、荷重 P_0 による変形はすべてこの中に含まれるとし、変形は $\delta(P_1, t - t_1)$ となる。

次に荷重が $P_1 \rightarrow P_0$ のとき、時間に依存しない変形 $\delta_0(P_1 - P_0)$ が瞬間的に回復し、荷重 P_0 による変形 $\delta(P_0, t)$ が荷重 P_1 による変形 $\delta(P_1, t_2 - t_1)$ を越えない限り、一定にとどまるとすると変形は、次のようになる。

$$[\delta(P_1, t_2 - t_1) - \delta_0(P_1 - P_0)]$$

荷重が $P_0 \rightarrow P_1$ では荷重 P_1 が時間 $\{(t_2 - t_1) + (t - t_3)\}$ だけ作用したとすると変形は $[\delta\{P_1, (t_2 - t_1) + (t - t_3)\}]$ となる。

以下同様に最大の荷重が存続した分だけ変形するとする。

この型式は、(1) の型式に類似しているが、荷重の大きいときに変形する要素が、それ以下の荷重で変形する要素より抵抗性が高く、変形は抵抗性の低いものから生じているため、高い荷重で変形するものは低い荷重で変形するものをほとんど含んでいる。したがって、最大荷重の存続する時間が変形の大半を支配するという考えに基づいており、塑性的要素の強いものに適用できるものと考えられる。

(3) 重ね合せの原理型¹³⁰⁾

1 回目の $P_0 \rightarrow P_1$ までは(1)と同じで変形は $[\delta(P_0, t) + \delta(P_1 - P_0, t - t_1)]$ となる。

荷重が $P_1 \rightarrow P_0$ になったときは、負の荷重 $(P_1 - P_0)$ が作用したと考え、変形 $[-\delta(P_1 - P_0, t - t_1)]$ 、さらに最初の P_0 および2回目の荷重 $(P_1 - P_0)$ による変形がそれぞれ独立して、履歴を記憶しているとして変形 $\delta(P_0, t)$ と $\delta(P_1 - P_0, t - t_1)$ を累加すると全変形は次のようになる。

$$[\delta(P_0, t) + \delta(P_1 - P_0, t - t_1) - \delta(P_1 - P_0, t - t_2)]$$

荷重が $P_0 \rightarrow P_1$ では新たに荷重 $(P_1 - P_0)$ が作用したとして、変形 $\delta(P_1 - P_0, t - t_1)$ を累加すると、全変形は $[\delta(P_0, t) + \delta(P_1 - P_0, t - t_1) - \delta(P_1 - P_0, t - t_2) + \delta(P_1 - P_0, t - t_3)]$

以下同様に作用した荷重が独立して変形を生じると考え累加する。この方法が、ボルツマンの重ね合せの原理(重畳の原理: Superposition principle)である。

この方法は、過去の履歴による変形が各々独立しているという仮定にもとづくもので、内部構造変化の少ないものに適用され、大きな永久変形の残るものには適用

しがたい。

パーティクルボード下張りの曲げクリープの荷重増減による曲線に上記3方法を次の仮定のもとに適用してみる。

(1) 基本となるクリープ曲線は、最初のクリープ曲線の実験式 $\delta(t) = \delta_0 + A t^N$ を用いる。

(2) δ_0 および A は、荷重に比例する。

図-6-1-7(1)(2)は、実測値と各々の方法によって算出した曲線の例である。クリープに関する定数によって各変形型式の推定曲線が敏感に影響を受けるが、実測値はこれらの変形型式の範囲の内におさまっており、クリープ変形を評価する方法として有効であることが認められた。なお、クリープ変形の評価においては、付加荷重連続型、もしくは重ね合せの原理型を適用すれば支障は少ないと推測される。

以上のような結果をもとに床張り材料としてのパーティクルボードのクリープ特性の評価、すなわち長期耐力性能についてまとめると次のようになる。

パーティクルボードのクリープ曲線は広範囲にわたって、上記したように t^N 則が成り立つ。したがってたわみの推定は可能となる。とくに時間の指数 N は同一材料ならば荷重によらず一定値を示し、気乾状態では $0.2 \sim 0.3$ に含まれ、 0.25 を代表値とみてよさそうである。湿度が高くなるとややこれより値が大きくなり、相対湿度 $80 \sim 90\%$ では 0.4 程度になる。定数 A については、本試験の結果からも応力比 30% 以下ではほぼ荷重に比例しているため、瞬間変形 δ_0 と一定の関係がある。

パーティクルボードのクリープに及ぼす湿度の影響はかなり大きく、そのクリープ特性の評価は、使用部位の環境条件に対応する必要がある。湿度変動下では湿度の増加によってクリープが進行し、減少によってクリープが停止または回復する。このたわみの変動幅を荷重に換算するとかなりの応力の増減に相当し、変動幅は定常時のクリープの進行速度よりはるかに大きい。釘打ちの効果は、ボードのクリープ曲線の傾向に直接的な影響は少ないが、湿度変動によるたわみを拘束する効果のあることが認められた。一般空調室の湿度条件は通常時は 60% 前後で、降雨などによって湿度が上昇したとき、 80% 以上になることがあった。しかし、湿度変動に対するクリープ量の変動については相対湿度 65% の標準状態でのクリープ量と比較しても大きな差異は認められず、常時多湿の場合と大きな差異がある。したがって、高湿度状態の作用時間とクリープ量との関係が、長期耐力性能評価上の重要な要素となる。しかし、湿度変動がクリープの緩和へ及ぼす影響やその他、床張りに要求される諸条件から考慮して厚物のボードの方が使用上問題は少ないと考えられる。

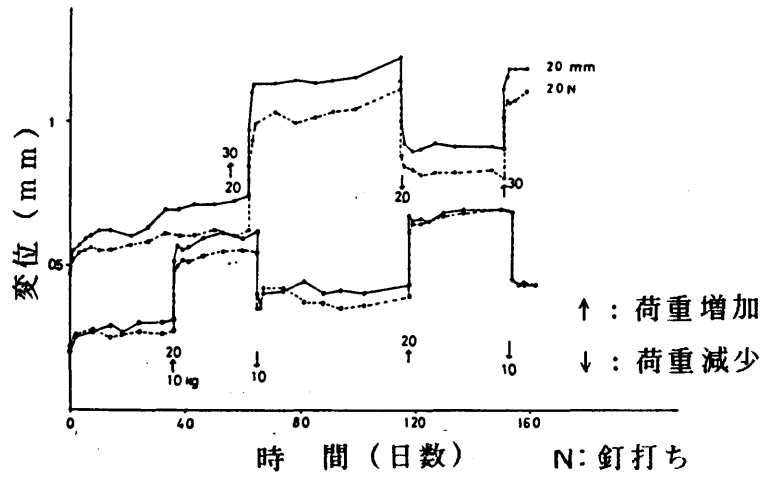


図-6-1-5 (1) 荷重変動下のクリープ撓み曲線

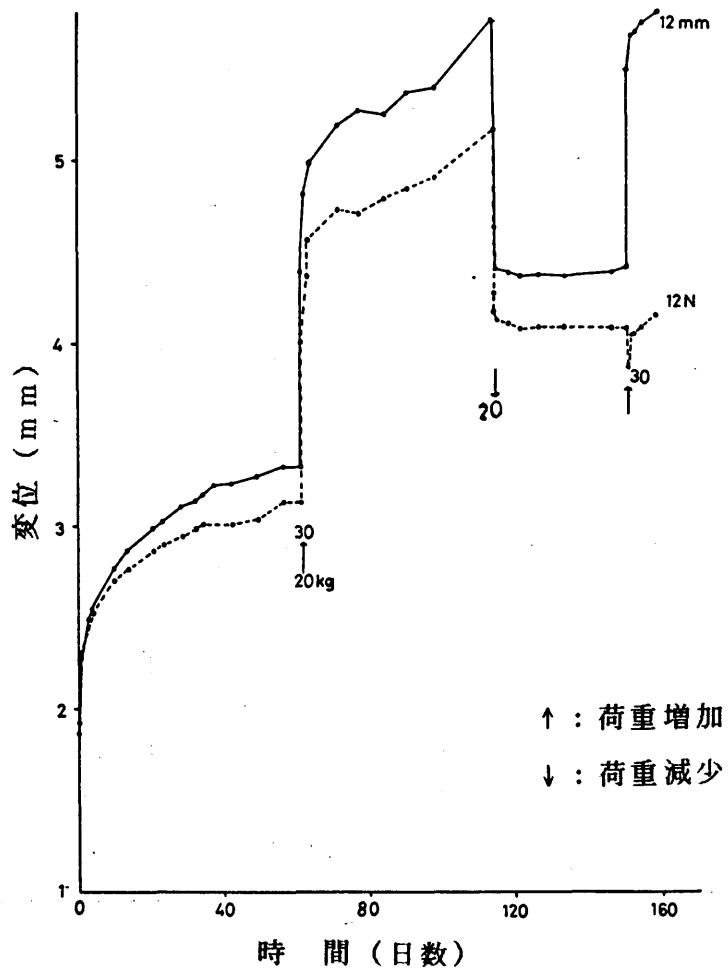


図-6-1-5 (2) 荷重変動下の撓み曲線

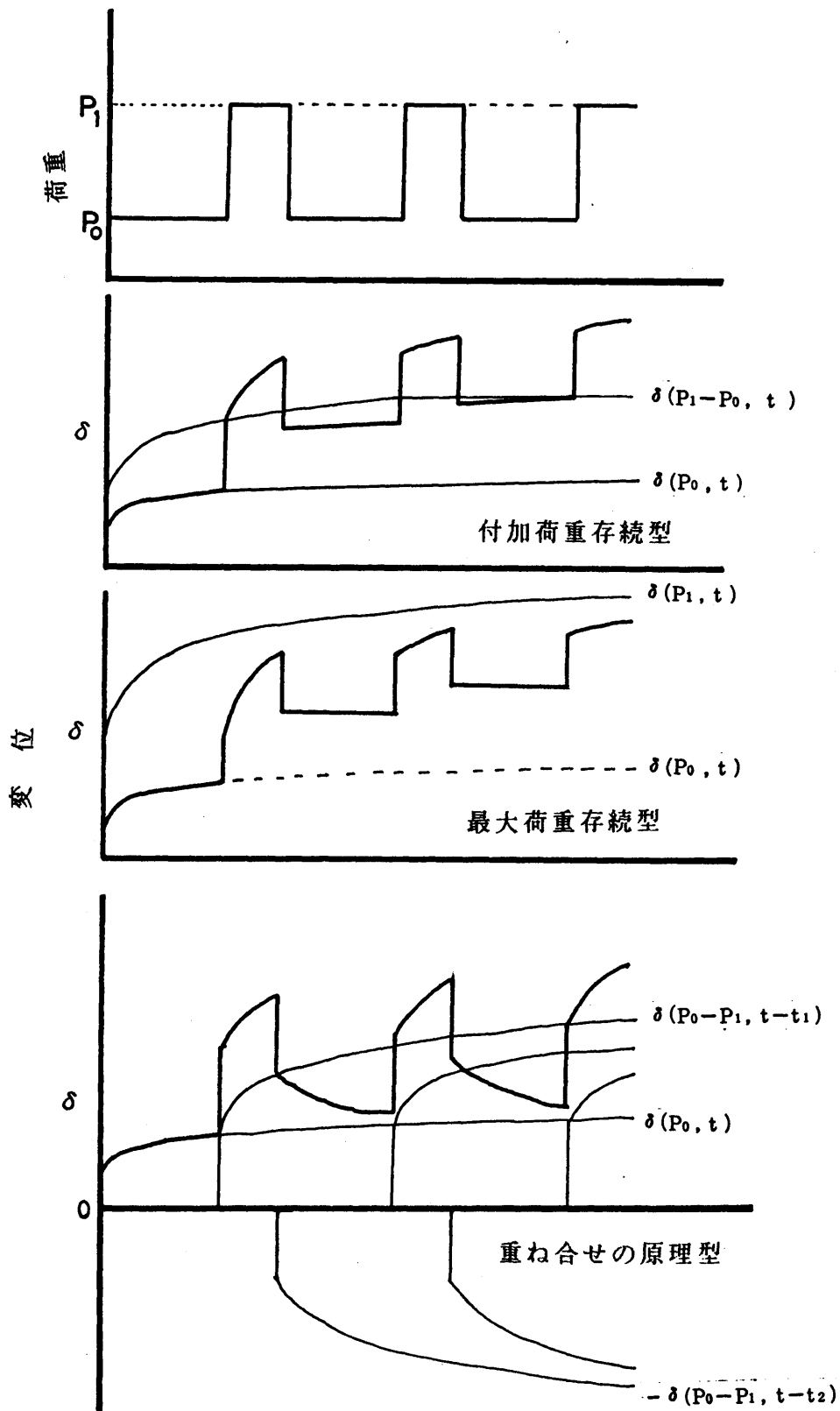


図-6-1-6 荷重増減下の変形モデル

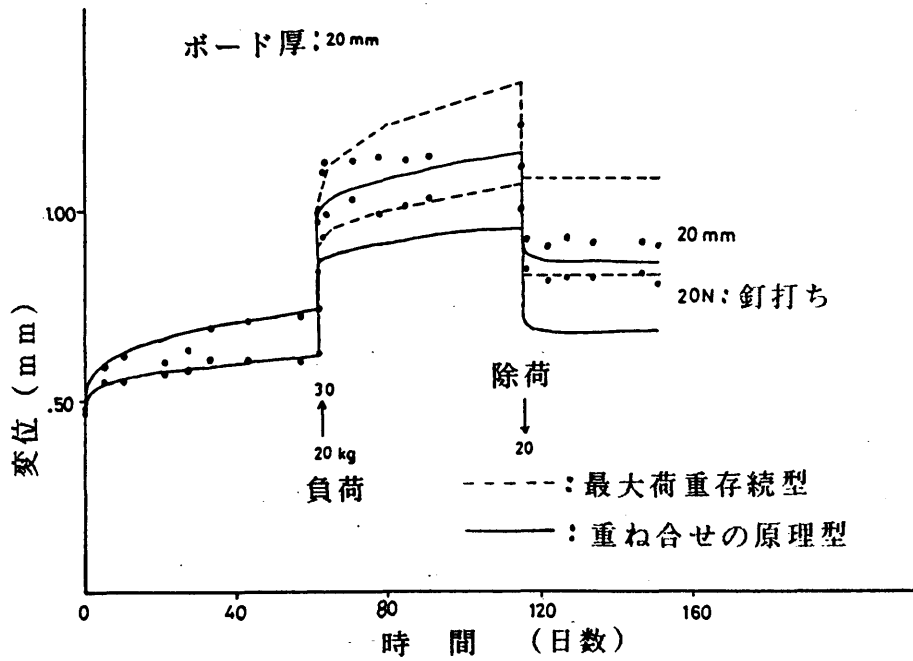


図-6-1-7 (1) 荷重変動下のクリープ撓み曲線と推定曲線

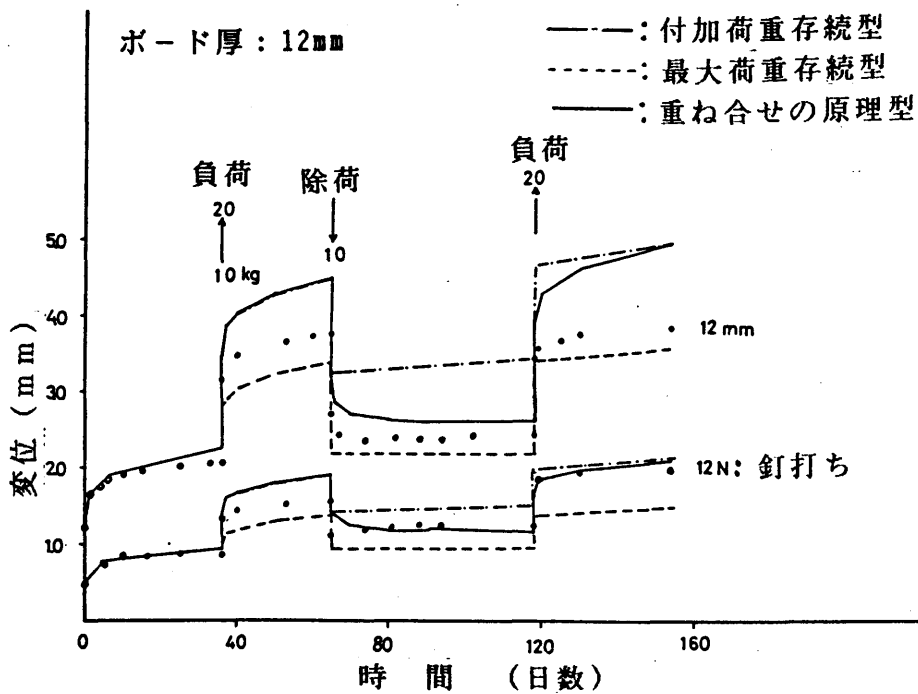


図-6-1-7 (2) 荷重変動下のクリープ撓み曲線と推定曲線

第2節 木質複合梁のクリープ特性

木質複合梁は、大断面あるいは長大で良質な素材の供給が厳しくなるに従い、それらの重要度はますます高くなるものと考えられる。一方、施工面からみても、軽量で安全性の高い部材が取り扱いやすい。一般に、木質複合梁にはボックスビームやI形ビームなど力学的な特性からそれらの材料構成が定められ、接合には釘や接着剤および釘と接着剤が併用されている場合が多い。

複合梁の強度性状については、古くから研究がなされているがクリープのような経時変化については、理論体系はもとより、その基本となるデータもほとんどないのが現状である。

そこで、本節では現状の複合梁（合板ボックスビーム、小径木を用いた7×7工法による複合梁（以下7×7複合梁と略す））について、それらのクリープ特性を把握し、長期耐力性能の評価に関する基本的な考え方について検討した。

2-1 試験方法

試験に供した複合梁は、図-6-2-1に示した合板ボックスビームと小径木（70×70mm）を束材とし、その両面と構造用合板を接着接合した7×7複合梁で、いずれも接合部は接着剤と釘とを併用することによって合板と木材を接合した複合梁である。これらの仕様を表-6-2-1に示した。

クリープ試験は、図-6-2-2に示したように加力点と試験体との接触部に、角材を配し、その上に鉄丸棒（7.7 kg/本、6.6kg/本）を積載することによって死荷重を与え、3等分点4点曲げによるクリープとした。支持点には実際の使用状態を想定して、上枠（204材：Fem-Fir）を配した。死荷重は、7×7複合梁（2A B）が582kg/本で、これ以外の合板ボックスビーム、7×7複合梁はともに390kg/本とした。また、梁は横だおれを防止するために、2体1組とした。死荷重とした荷重は、7×7接合梁では設計荷重（1160kg）の50%で582kg、34%で390kg、合板ボックスビーム（3A, B）では、設計荷重（1890kg）の約21%、合板ボックスビーム（2A, B）では、設計荷重（1570kg）の約25%に相当する。なお、変位の計測箇所は、図-6-2-2に示したように曲げモーメント区間である加力点間の中央部、全スパンに対する中央部および両支持点とした。変位の計測には、ダイヤルゲージ（精度1/100 mm）を用いた。試験環境は、20°C、65%RHの恒温恒湿室である。

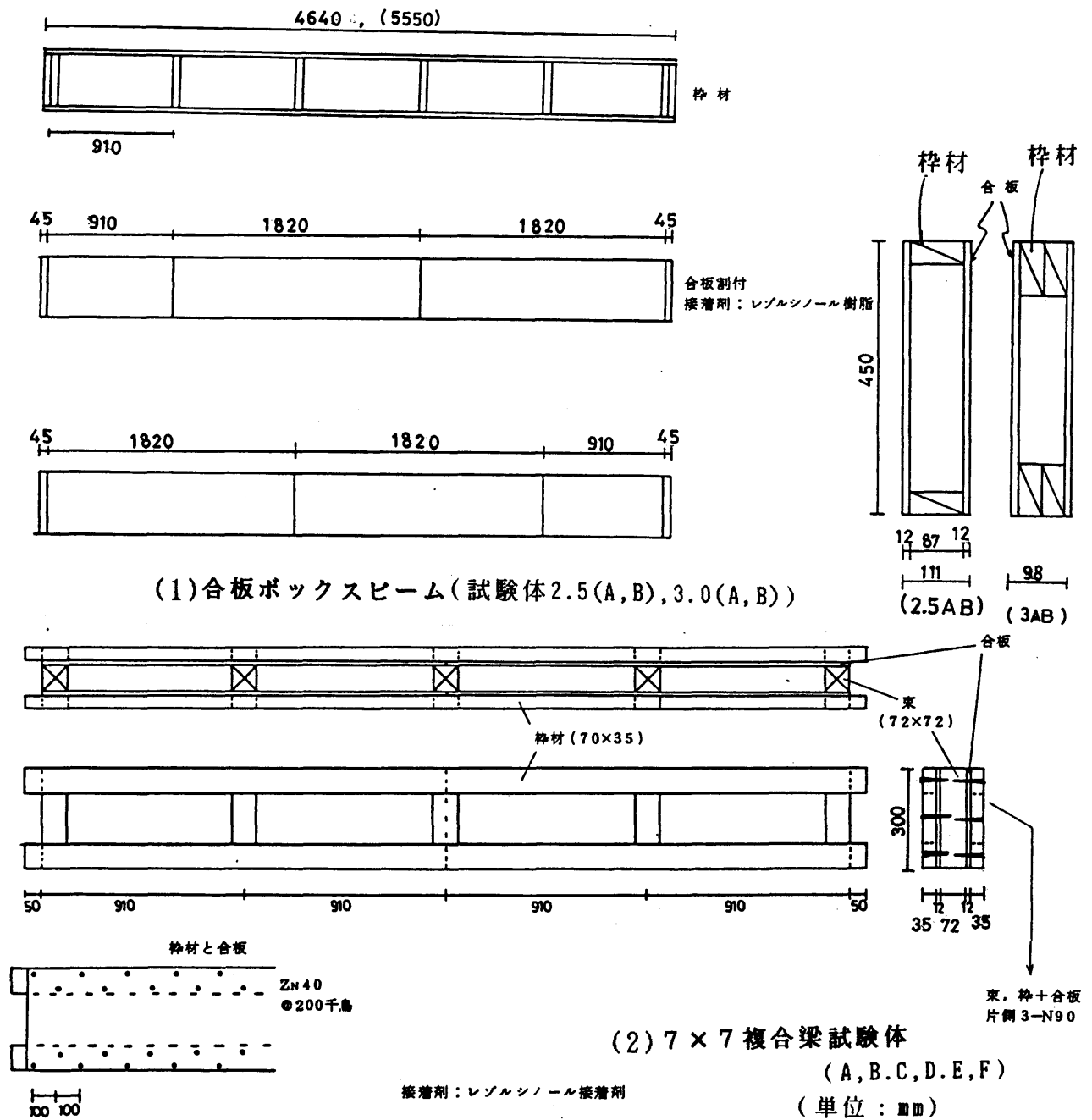


図-6-2-1 木質複合梁試験体

表-6-2-1 複合梁の仕様

複合梁の種類	スパン (mm)	梁背 (mm)	幅 (mm)	曲げ試験		本試験のたわみからの E-I (kg·cm ²)	接合条件
				最大荷重 (kg)	E-I (kg·cm ²)		
合板ボックスビーム							
2.5 (A,B)	4550	450	111	7710	3.45×10 ⁹	2.91×10 ⁹	レゾルシノール系接着材 釘CN50 @ 100
3.0 (A,B)	5640	450	98	9020	4.69×10 ⁹	3.37×10 ⁹	
2.5 (C,D)	4550	450	111	9492	3.80×10 ⁹	3.93×10 ⁹	水性高分子イソシアネート系接着剤 釘CN50 @ 200
7×7 複合梁							
2.0 (A,B)	3640	300	142	4640	8.39×10 ⁸	8.57×10 ⁸	レゾルシノール系接着材 釘ZN40 @ 200 千鳥
2.0 (C,D)						9.08×10 ⁸	
2.0 (E,F)						6.74×10 ⁸	

2-2 試験結果および考察

図-6-2-3~6に合板ボックスビームおよび7×7複合梁のクリープ曲線を示した。図において、経過日数100日近傍でたわみが急増しているが、これは恒温恒湿室の湿度調整が不良となり、一時的に室内が高湿度状態になったためであり、複合梁が湿度の変動を受けやすいことが認められた。

次に、合板ボックスビームおよび7×7複合梁クリープ曲線に前節で提案した実験式(6・1・8)を適用し、たわみの長期推定を試みる。表-6-2-2にその結果を示した。なお、本実験式は、初期クリープ(経過日数150日まで)から実験開始後約650日経過した場合のクリープ曲線との適合性をみたものであり、表-6-2-2の結果を実測値と比べると図-6-2-3~6の破線で示したようになる。図中、破線が2本あるが、これは恒温恒湿室の湿度変化でクリープ曲線が分離したため、湿度が上昇するまでの変形とそれ以後の変形から推定した場合とに定数を分けて算出したためである。

これらのことより、湿度変化によるたわみの急増がなければ、初期クリープから推定した実験式を用いて、算出したたわみの推定値と実測値とはよく一致することが認められ、たわみに関する長期推定が可能であると考えられる。

そこで、表-6-2-2に示した実験定数を用いて、10年および50年後の外挿法によるたわみの推定値を瞬間変形に対する比率(相対クリープ)で算出すると、表-6-2-2に示したような値となり、本試験で用いた複合梁の場合、長期ヤング係数を短期の¹⁾1/2とするとという日本建築学会編「木構造設計規準・同解説」に示された考え方を採用すれば、10年程度で許容値に達し、それ以上の年限使用する場合に対しては、さらにヤング係数の低減をみる必要のあることが認められた。

以上のような結果から、木質複合梁の長期耐力性能の評価法についてみると、複合梁が使用される場所は床梁や小屋梁等が主であり、これらの部位における環境条件は、屋内条件であることからとくにクリープの評価上それを考慮する必要はないと考えられる。しかし荷重条件については、一定荷重(屋根荷重、床荷重)が継続して作用する場合や一定荷重(屋根荷重)に加えてある期間荷重(積雪荷重)が作用すること等が考えられる。したがって、木質複合梁の長期耐力性能の評価に関しては、前節で述べた荷重の増減による変形式(最大荷重存続型、重ね合せの原理型)を考慮することが必要であると考えられる。

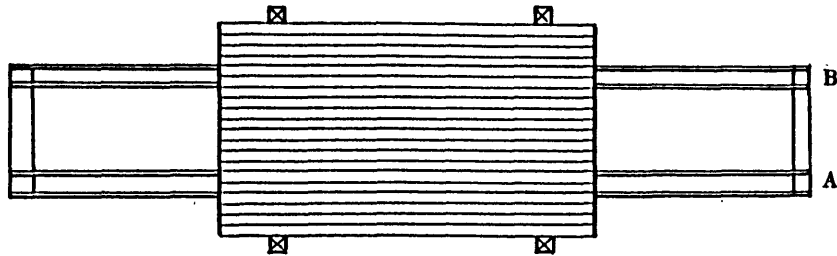
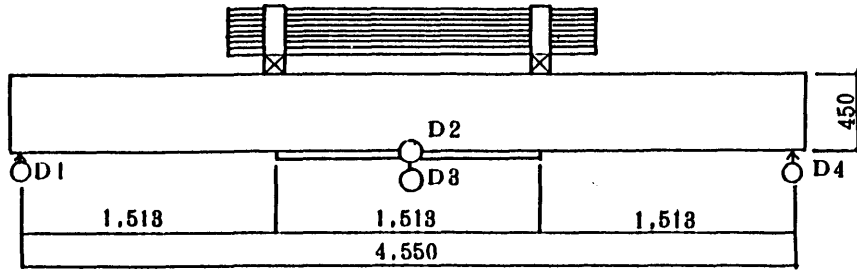


図-6-2-2 クリープ試験方法 (単位: mm)

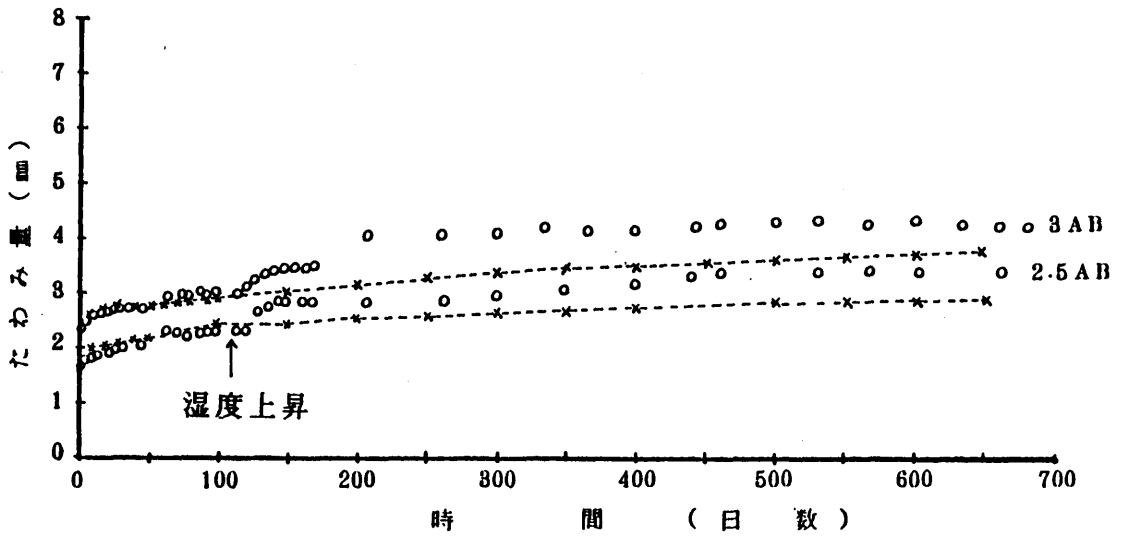


図-6-2-3 合板ボックスビームのクリープ曲線
(X---X: 計算値)

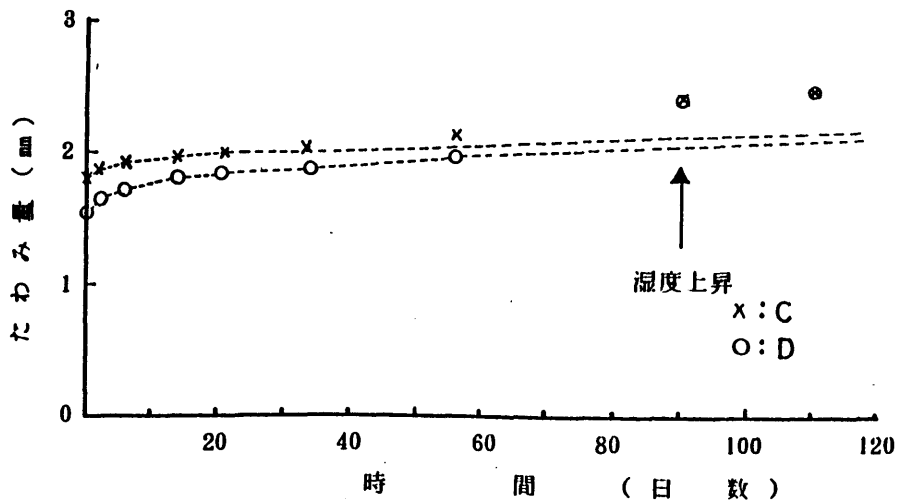


図-6-2-4 合板ボックスビームのクリープ曲線
(X---X: 計算値)

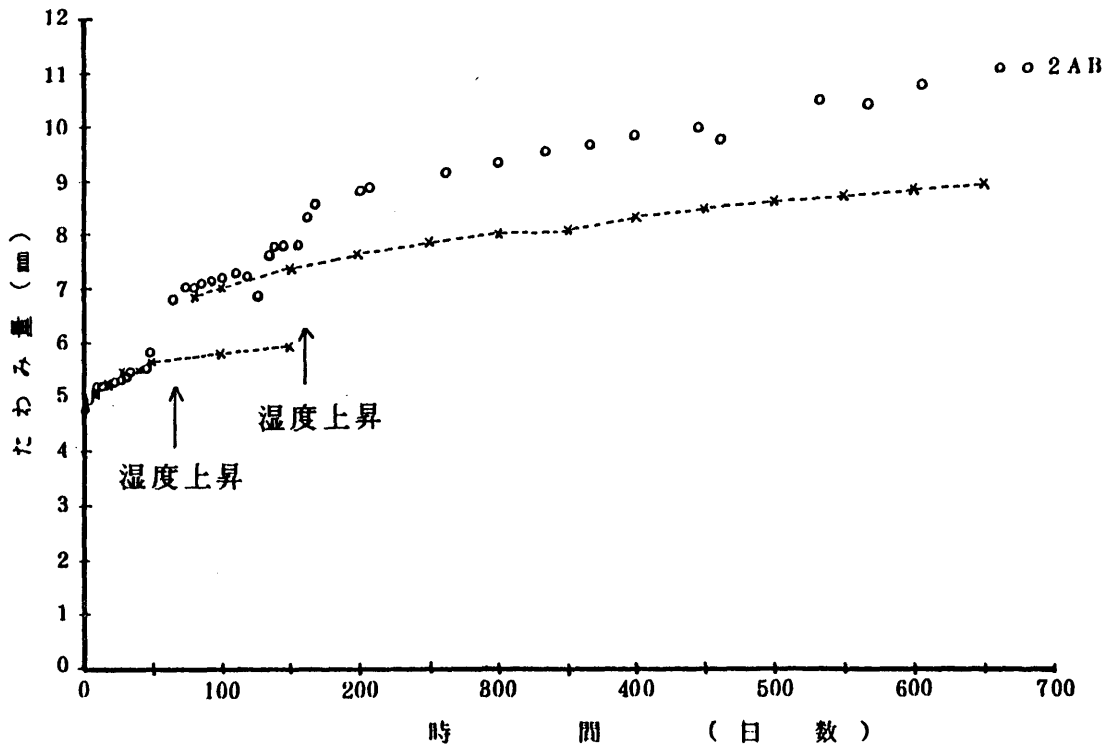


図-6-2-5 7×7梁のクリープ曲線 (X---X : 計算値)

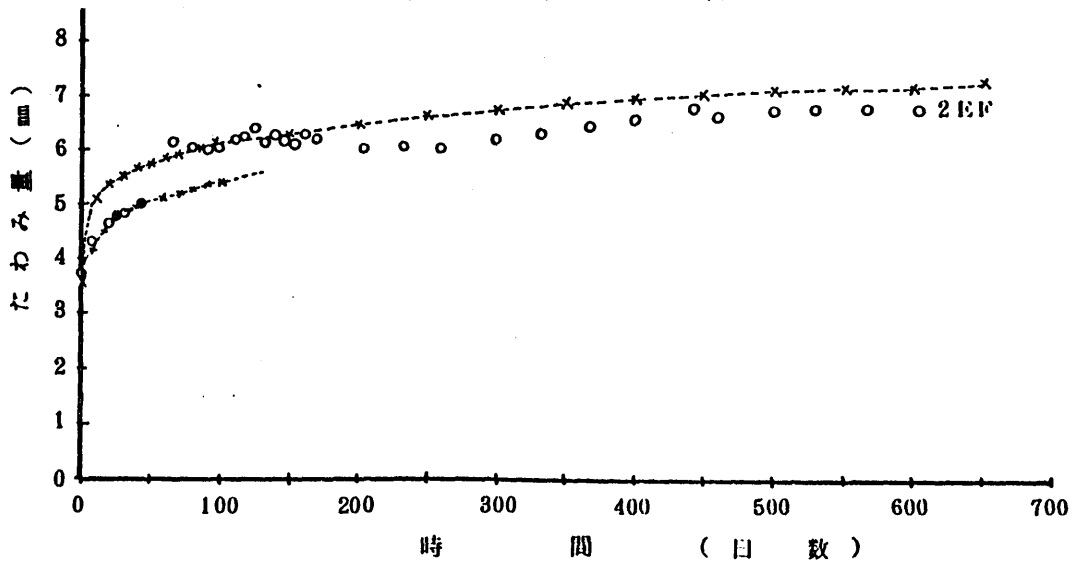
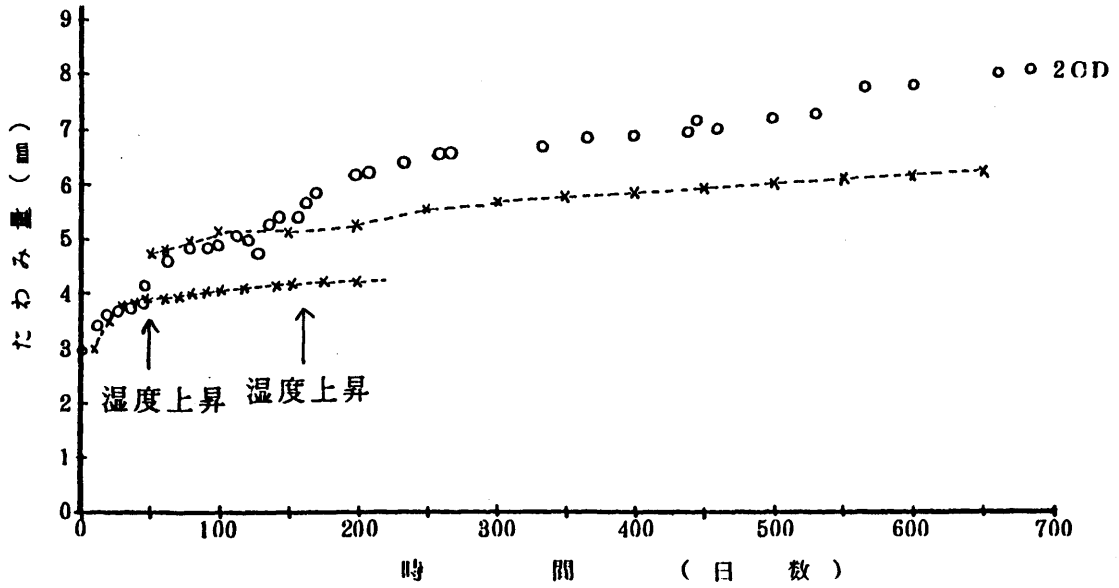


図-6-2-6 7×7複合梁のクリープ曲線 (X---X : 計算値)

表-6-2-2 複合梁のクリーブ特性

複合梁の種類	荷重 (kg)	N	A/ δ_0	δ_0 (mm)	$\delta_{10}^{*1}/\delta_0$	$\delta_{50}^{*2}/\delta_0$
合板ボックス ビーム 2.5 (A,B) 3.0 (A,B)	390	0.31	0.094	1.71	2.20	2.97
		0.41	0.043	2.31	2.18	3.40
		0.37	0.067	1.68	2.03	2.86
7×7複合梁 2.0 (A,B) 2.0 (C,D) 2.0 (E,F)	390	0.27 ^{*3} (0.30)	0.17 (0.076)	4.47	2.56 (1.89)	3.40 (2.44)
		0.26 (0.27)	0.20 (0.097)	3.01	2.69 (1.82)	3.56 (2.27)
		0.22 (0.39)	0.23 (0.075)	3.73	2.40 (2.84)	2.99 (4.44)

*1:10年後のたわみの計算値

*2:50年後のたわみの計算値

*3:湿度変動以降の変形から計算した値

第3節 集成材梁部材および接合部のクリープ特性

集成材は、大断面で良質な木材の入手が困難になりつつある状況の中で、断面や形状を自由に設計でき、長期的な視野に立てば、使用され得る集成材の断面も大きいことが多いことから、建物の解体後も、集成材を再利用することが可能である。このようなことから大断面の集成材を用いた建物は、それ自体資源の有効な備蓄になり得る。しかし、我が国においては、集成材構造の問題点に関する技術的な検討や開発の少ないことがあげられる。

そこで、構造上の検討項目の1つである構造用集成材の梁部材および接合部のクリープについて、その特性を明らかにし、集成材梁の長期耐力性能の評価に関する基本的な考え方について検討した。

3-1 試験方法

試験は、構造用集成材の梁部材およびそれらの接合部のクリープ試験を実施した。

(1) 集成材の梁部材

試験体は、図-6-3-1(a)に示したような集成材梁部材である。

集成材を構成している挽板(ラミナ)に使用した樹種は、エゾマツで比重0.36~(0.40)~0.45、曲げヤング係数 116~(131)~150×10kg/cm²である。

梁材は、厚さ22mmのラミナを11枚積層したもので、長手方向にスカーフ継手(傾斜比1/10)を設けてある。支持部の集成材は、厚さ23mmのラミナを20枚積層したものである。ラミナの接着には、フェノール・レゾルシノール共縮合樹脂接着剤を用いた。

接合金物は、図-6-3-1(b)に示したハンガー型接合金物(H型)を用いた。金物と集成材との接合にはM16ボルトを用い、ボルト締めの際には、角座金(3.3×52×52mm)を使用し、ナットの集成材へのめり込みを防止した。なお、ボルトの締め付けトルクは、3kgm一定とした。集成材および接合金物のボルトの穴径は、集成材の場合はボルトと同径、接合金物はボルトより1mm大きな径とし、ボルトを集成材に打ち込むように挿入した。

曲げクリープ試験は、図-6-3-1(c)に示したように、集成材の梁を2本一組とし、これらを試験環境条件として、20℃、約65%RH一定の恒温恒湿室(定常条件)および屋外で雨水がかからないように養生シートをかけた環境(屋外条件)に設置した。

なお屋外条件は、養生シートをかけることによって通気が悪くなり、温湿度が高くなったため、クリープ開始後55日目から養生シートの下部を開け通気を行った。また、屋外条件下に設置した梁部材は木材の劣化を防ぐために木口を防水処理し、さらに梁には防腐処理を施した。

積載荷重は、梁の上に重量約36.6kgの重鐘を等分布になるように、定常条件下の梁には、3660kg（1830kg/体）、屋外条件の梁には3460kg（1730kg/体）を積荷した。これらの荷重値は、集成材の長期許容応力度から算出される値の約56%および約53%に相当する。

変位は、1/100mm 精度のダイヤルゲージを用い図-6-3-1(a)に示した箇所で計測した。

(2) 接合部

試験体は、集成材構造における柱-梁接合部をモデル化した図-6-3-2に示したような形状・寸法のものである。なお輪形ジベル型接合においては、変形挙動を集成材と比較するために素材も用いた。集成材および素材の樹種はエゾマツである。

集成材の構成は、柱材（160mm角）がラミナ厚32mmの板を5枚、梁材（断面160×240mm）はラミナ厚30mmの板を8枚積層接着したものである。接着には、(1)と同様の接着剤を用いた。

接合に用いた金物は、図-6-3-3に示したような接合金物で、センターウェーブ型（C型）、ストライフ型（S型）、輪形ジベル型（D型）の3種類である。金物と集成材の接合には、C型ではM16ボルト、D型はM12ボルト、S型は径12mmの打ち込み鋼棒を用いた。ボルト締めの際には、角座金（M16ボルトは3.3×52×52mm、M12ボルトはW 4.5×40mm）を用い、ナットの集成材へのめり込みを防止した。ボルトの締め付けトルクや集成材および接合金物のボルトの穴径等については、(1)と同じ仕様とした。

クリープ試験は、図-6-3-4に示したように接合部のせん断クリープを実施した。積載荷重は、C型で1200kg/金物1個（設計荷重の約40%）、S型で814kg/金物1個（設計荷重の約50%）である。変位は1/100mm 精度のダイヤルゲージを用い、部材間の相対変位を計測した。試験環境は、20℃、約65%RH一定の恒温恒湿室とした。

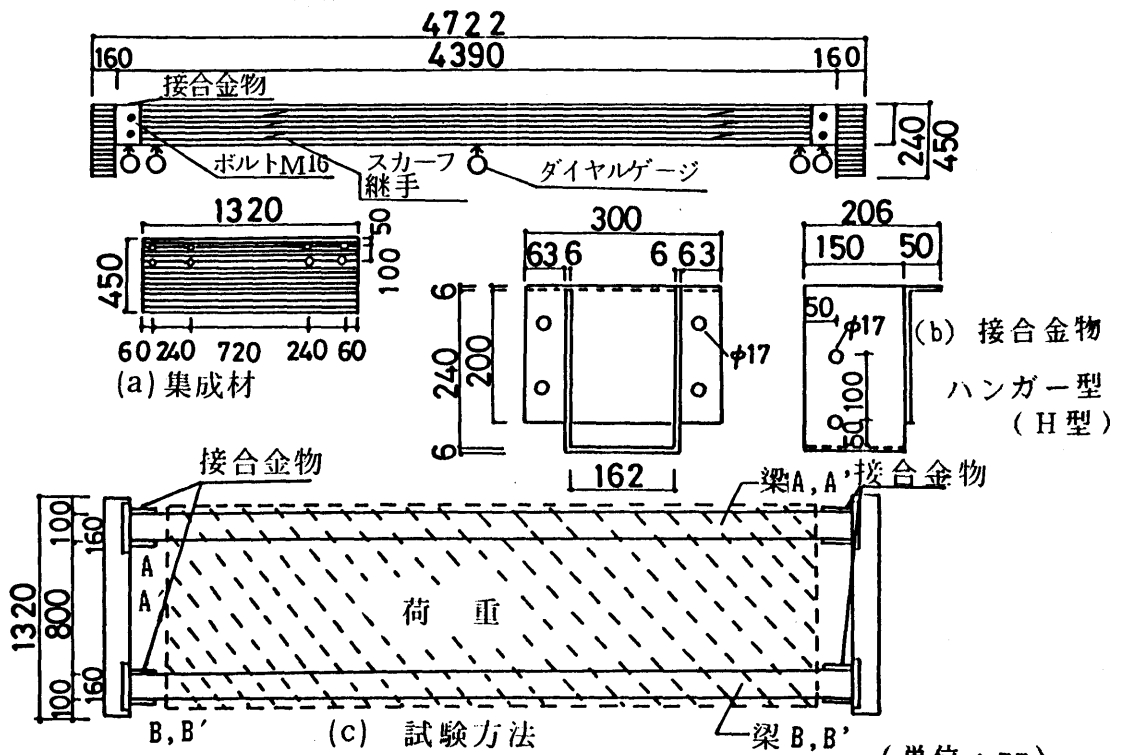


図-6-3-1 梁部材試験体およびクリープ試験方法

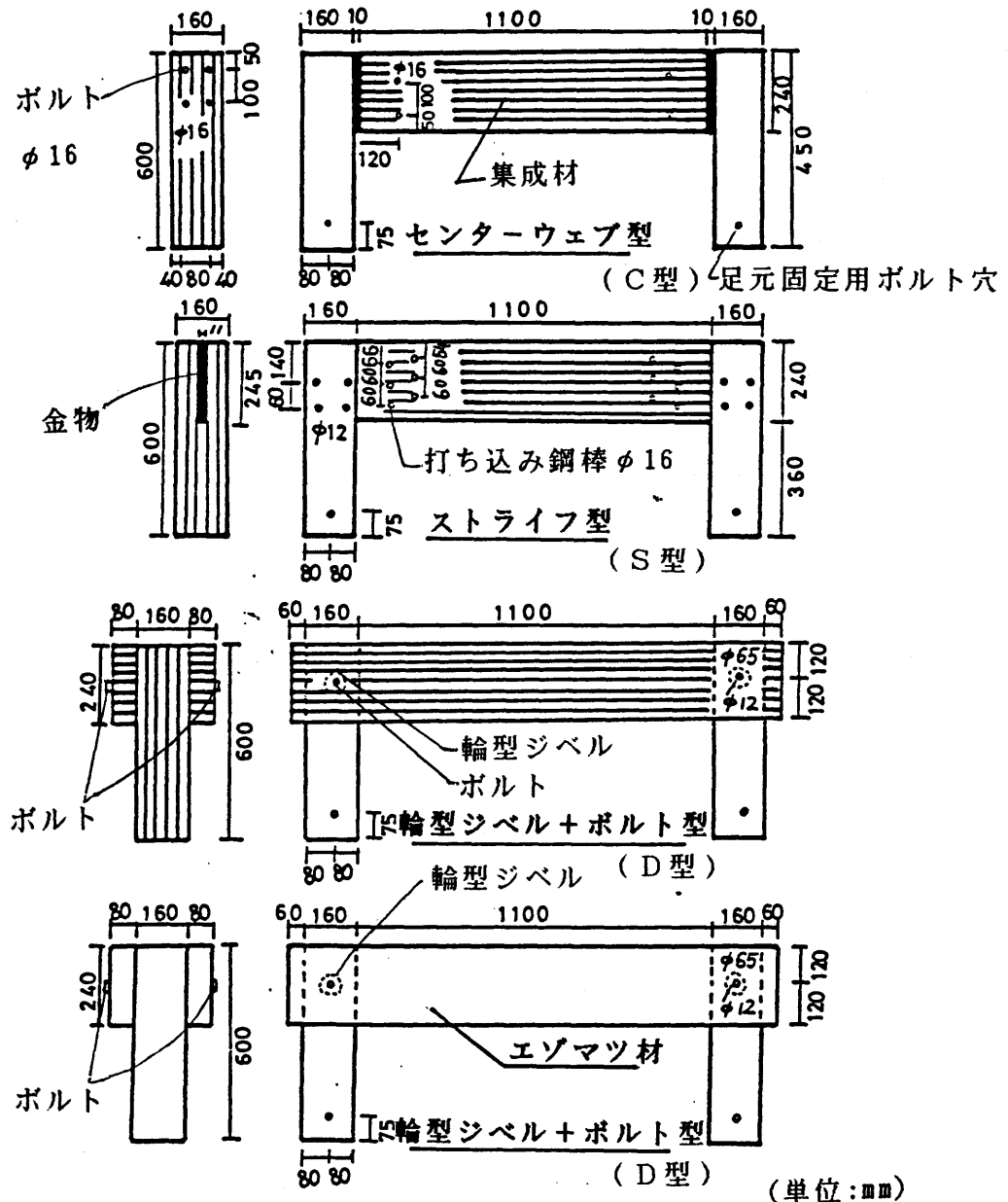


図-6-3-2 接合部試験体

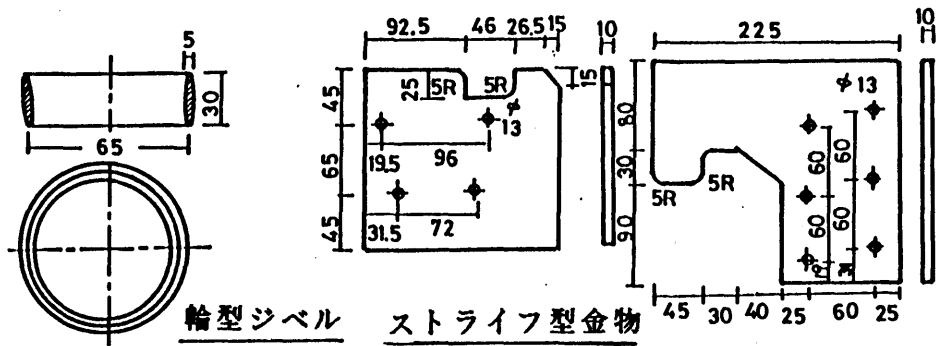
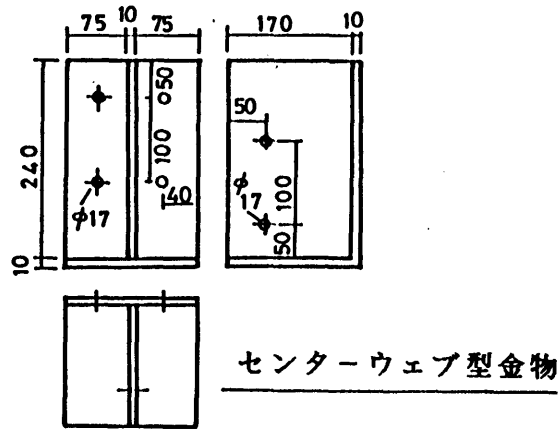


図-6-3-3 接合金物 (単位: mm)

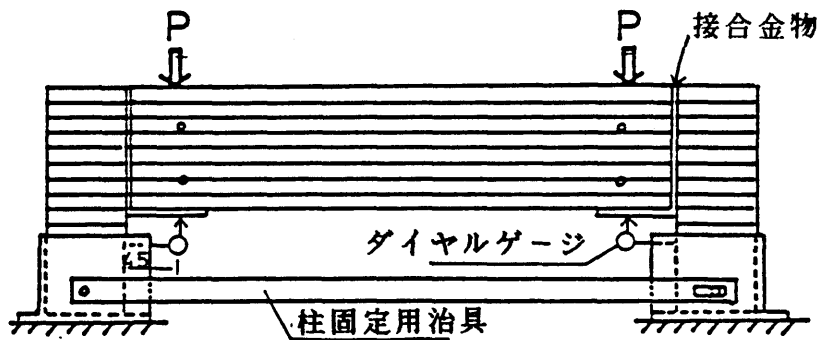


図-6-3-4 接合部クリープ試験方法

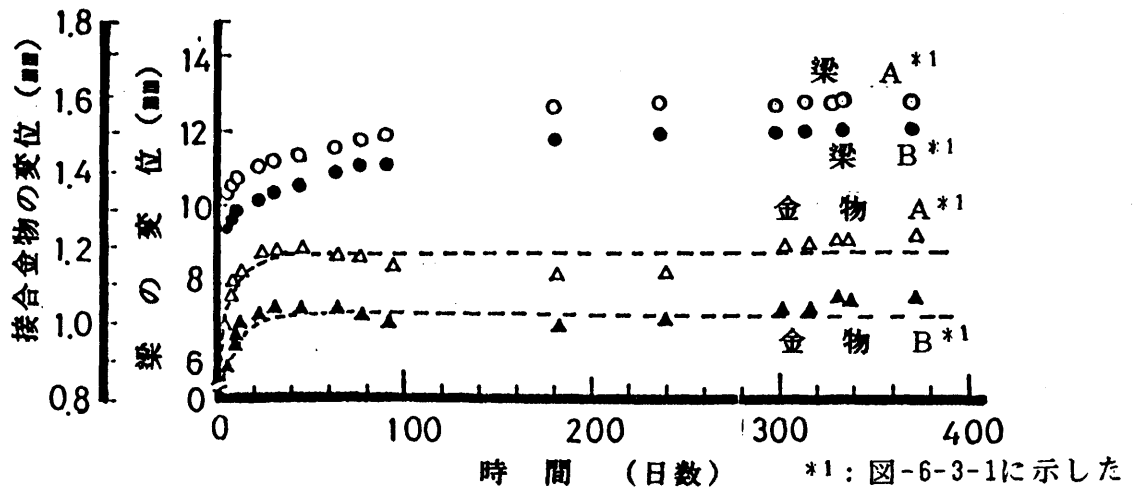


図-6-3-5 クリープ曲線 (定常条件) 梁部材と接合金物

3-2 試験結果および考察

(1) 集成材梁部材のクリープ特性

図-6-3-5、6に図-6-3-1に示した試験体の梁部材(A, BとA', B')および接合部(A, BとA', B')の定常条件および屋外条件下におけるクリープ曲線を各々示した。

定常化条件下における梁部材の変形は、日数の経過とともに定常的に増加する傾向を示した。接合金物の変形は、クリープ初期においては、日数の経過とともに増加しているが、日数がさらに進むと一定値に収束するような変形を示すことが認められた。

屋外条件下における梁部材の変形は、クリープ開始後55日迄の外周温湿度が図-6-3-7にみるように高かったため、定常条件下に比べ増加が著しい。しかし、通気を行った後は、外周温湿度の変動は大きいですが、養生シート内の湿度が相対的に低くなっているため、変形はさほど進んでいない。一方、接合金物の変形は、定常条件下に比べ変動が著しく、定常化条件下と同様に一定値に収束するような変形を示すことが認められた。

次に、梁部材のたわみの長期推定を試みることにする。そこでクリープたわみを前節の(6・1・1)式を用い算出した。図-6-3-8に、定常条件下における梁材および接合部を含んだ梁部材のクリープたわみの実験式を示した。

図-6-3-9に、屋外条件下における接合部を含んだ梁部材のクリープたわみで通気の無い期間までの実験式と、全試験期間中のクリープたわみの実験式を示した。これらの実験式および前節の(6・1・8)式を用い、梁材および接合部を含んだ梁部材としてのたわみの長期推定を行うと、50年後までのたわみの変化(相対クリープ)は、図-6-3-10に示したようになる。

この結果から、たわみの増加が著しいのは、屋外条件下で通気が悪く外周温湿度が高い期間から推定した場合であり、次に屋外条件下で全試験期間で推定した場合、さらに定常条件下で接合部をも含んだ梁部材から推定した場合であり、もっとも相対クリープの値が小さいのは、定常条件下で梁材から推定した場合であった。

ここで、長期と短期のヤング係数の関係についてみると、木構造設計規準・同解説で示された考え方では、長期のヤング係数を短期の $1/2$ としている。この関係を相対クリープで表すと、相対クリープの値が2であることを意味する。図-6-3-10において、相対クリープの値が2となる年数を、それぞれの推定式にあては

めてみると、屋外条件下（通気無し）の梁部材で約 2.9年、同条件下で通気のある場合の梁部材で約 6.4年、定常条件下で接合部を含んだ梁部材の場合は約13.1年、同条件下の梁材で約22.4年となった。

以上のことから屋外条件下でのクリープは、定常条件下に比べ厳しい条件であることが認められた。また、接合部を含んだ梁部材のクリープは、梁材だけの場合と比較してたわみが大きくなることが認められた。このことは、実際の使用条件を考慮すると長期において変形が重視される場合は、梁材だけのクリープ特性をもって梁部材のクリープを評価することは適切ではなく、たわみが増加することを考慮しておく必要のあることを示している。一方、長期のヤング係数を短期の1/2として梁部材を設計する際には、使用環境条件によってはさらに低減を考慮する必要のあることを示している。

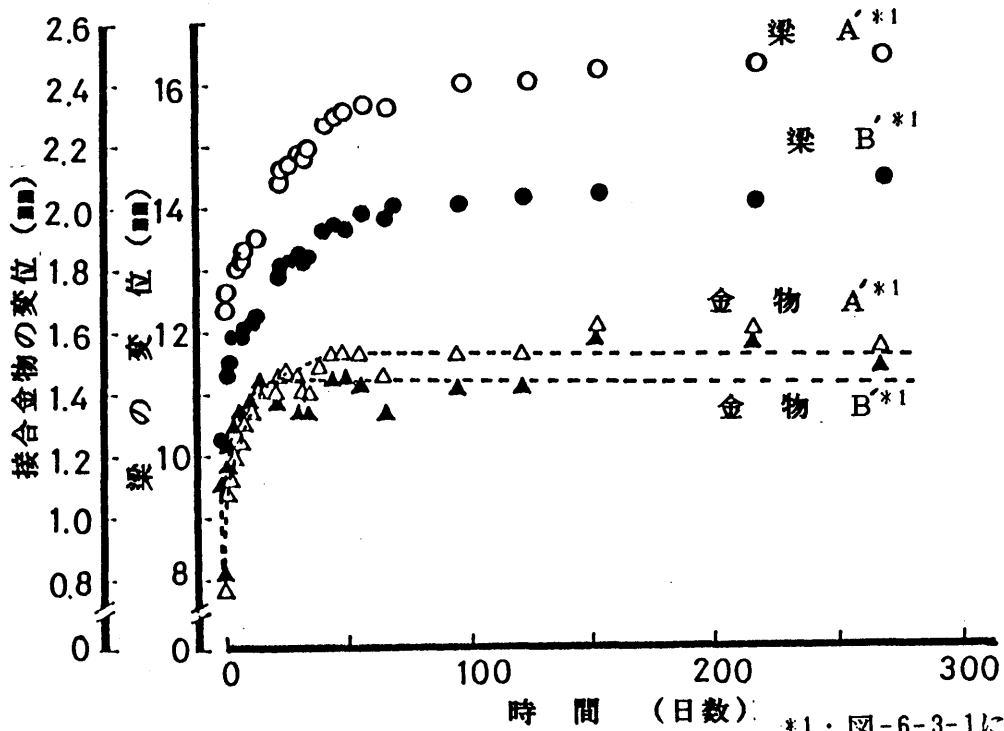


図-6-3-6 クリープ曲線 (屋外条件) 梁部材と接合金

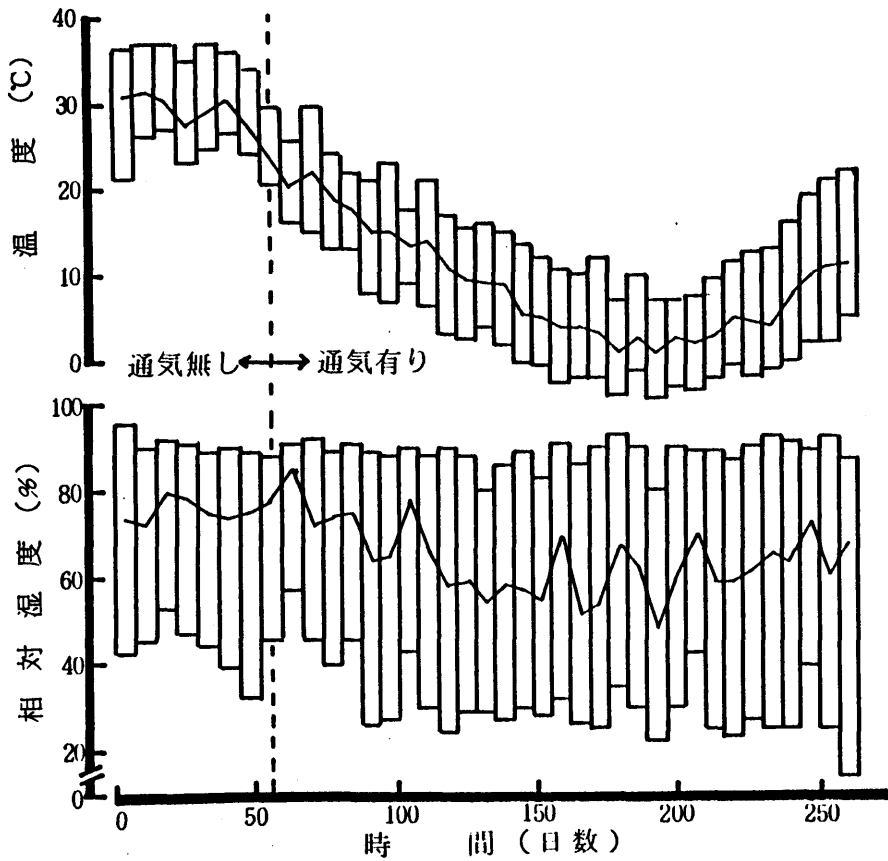


図-6-3-7 屋外条件の温湿度変化

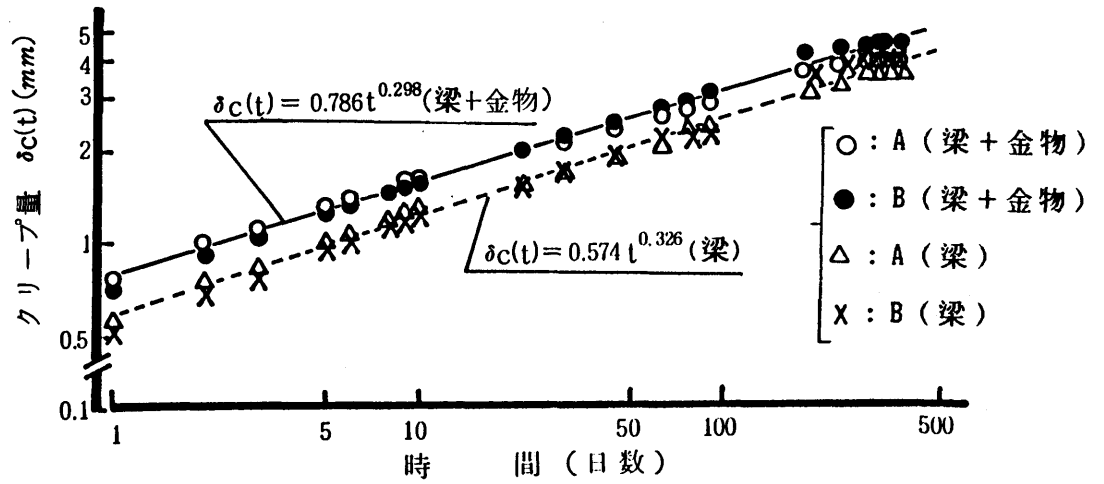


図-6-3-8 クリープ量 (定常条件)

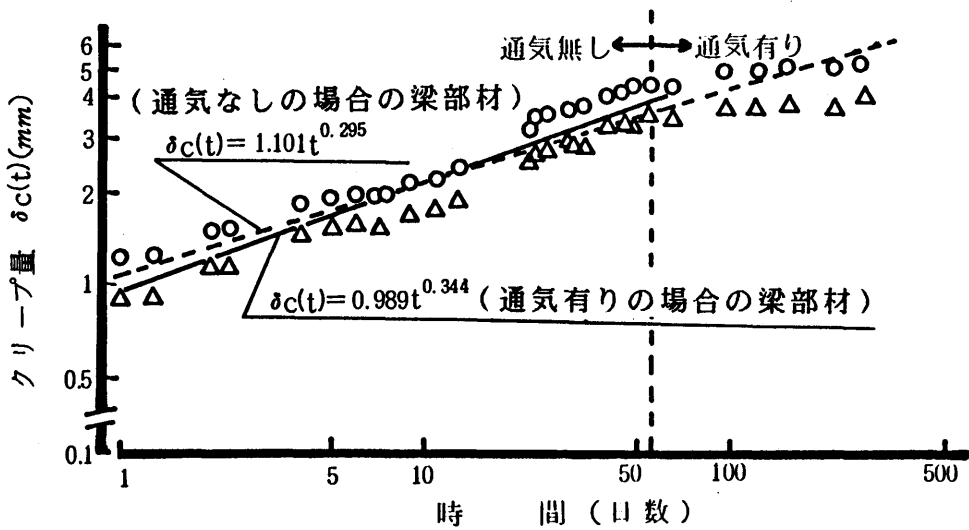
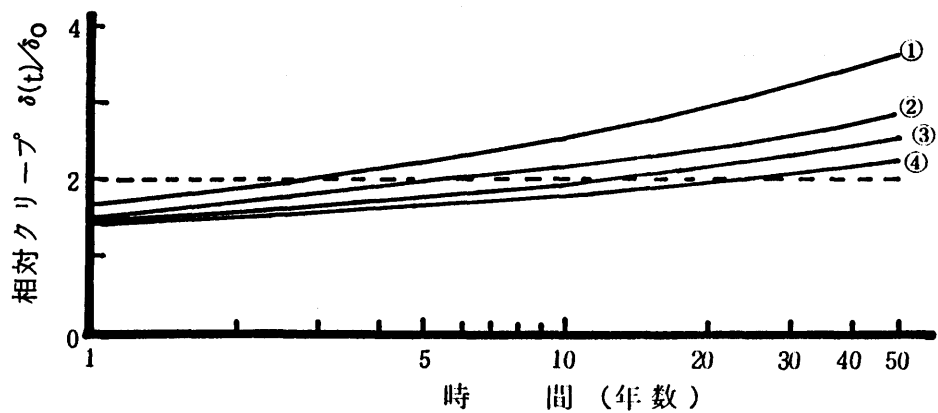


図-6-3-9 クリープ量 (屋外条件)



- ① : $\delta(t)/\delta_0 = 1 + 0.092t^{0.344}$ (屋外条件55日迄)
 ② : " $= 1 + 0.102t^{0.295}$ (屋外条件全クリープ)
 ③ : " $= 1 + 0.064t^{0.326}$ (定常状態, 梁 + 金物)
 ④ : " $= 1 + 0.069t^{0.298}$ (定常状態, 梁)

図-6-3-10 推定相対クリープ曲線

(2) 接合部のクリープ特性

図-6-3-11、12に接合部のクリープ曲線を示した。これらの曲線を見ると、接合金物の種類、被接合材料（素材、集成材）の種類によって差異が認められた。この結果から、クリープ変形は(1)の接合金物の変形と同様に、日数の経過とともに、一定値に収束するような変形を示すことが認められた。

このことから、ボルト接合金物のクリープ変形は、作用した荷重とその荷重が作用する時間に関係し、作用した荷重が小さい場合の変形要素は、さらに大きな荷重が作用した場合には、その変形要素に含まれ、さらに塑性的な要素が含まれて変形が安定していく変形を示すものと考えられる。

そこで、接合金物のクリープ特性を把握するために、接合金物のクリープ曲線に次の実験式をあてはめることにした。

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_m (1 - e^{-at}) \dots\dots\dots (6 \cdot 2 \cdot 1)$$

ここに、 $\delta(t)$ ：全変形量、 δ_0 ：瞬間変形量、 t ：日数

δ_m ：平衡に達した変形量、 a ：実験定数

図-6-3-11、12の図中破線で示してあるのは上式で求めた計算値を示したものであり、実測値と適合性のよいことが認められた。上式で用いた数値を、まとめて表-6-3-1に示した。表中 $(\delta_0 + \delta_m) / \delta_0$ は、変形が最終的に平衡に達した時の相対クリープを表わしている。この表より瞬間変形が大きい場合、平衡に達した時の値 δ_m も大きいことが認められた。また、相対クリープは、本試験で用いた接合金物の場合、瞬間変形の小さいものは、相対クリープも小さくなる傾向が認められた。一方、H型について、環境条件（屋外条件下と定常条件下）の違いによる変形を比較すると、相対クリープに差異がみられ、屋外条件下の方が、相対クリープの値が大きく厳しい条件であることが認められた。

以上のような集成材梁部材および接合部のクリープ特性をもとに、これらの長期耐力性能の評価に関する基本的な考え方を示すと次のようになる。

集成材梁部材および接合部のクリープは、環境条件（屋外条件、定常条件）の違いによって著しい差異が認められることから、環境条件の区分（湿度条件）が重要となり、環境条件によっては見掛け上の剛性の低下（低減）を考慮する必要がある。また、接合部を含んだ梁部材のクリープと、梁材だけの場合では変形量が異なることから、長期において変形が重要視される場合は、梁材だけのクリープ特性をもって梁部材のクリープを評価することは適切ではなく、たわみが増加することを考慮しておく必要がある。

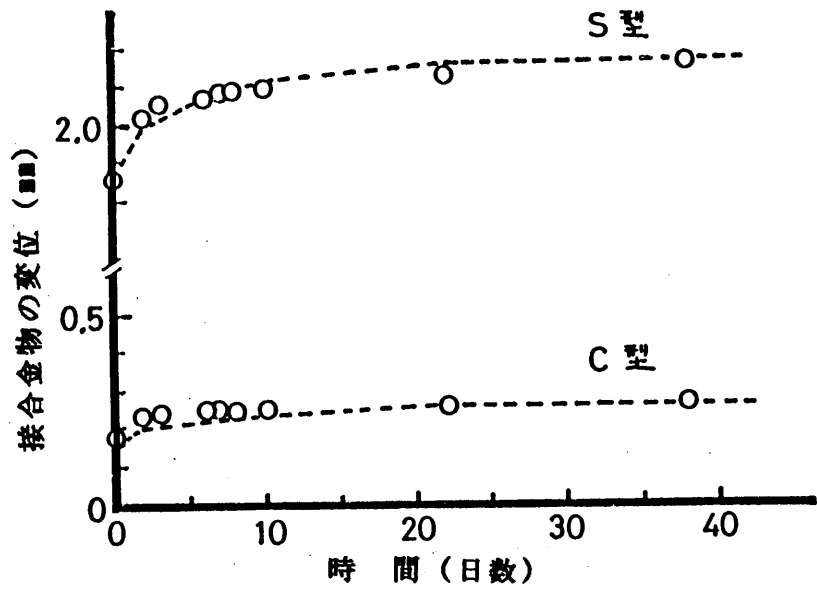


図-6-3-11 クリープ曲線

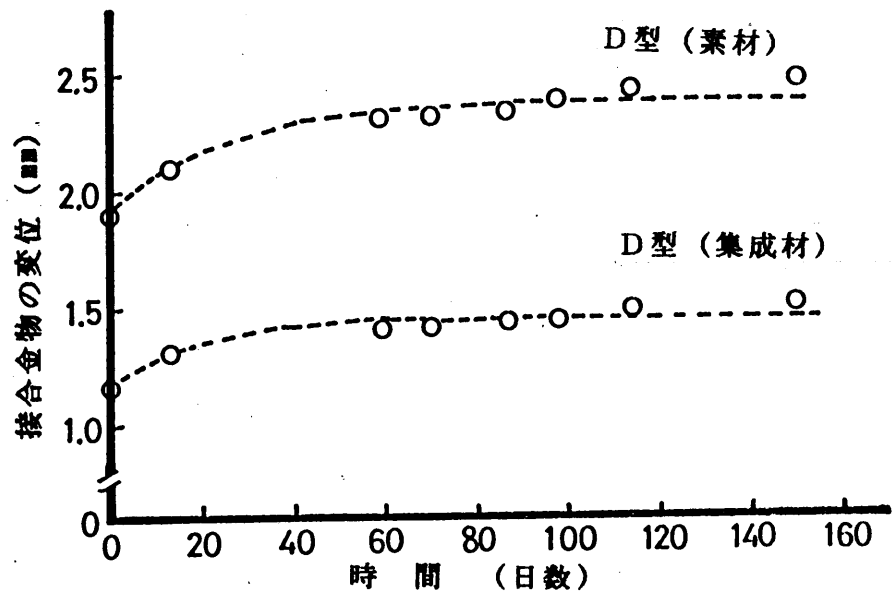


図-6-3-12 クリープ曲線

表-6-3-1 接合金物の実験定数および相対クリープ

接合金物の種類		項目	σ_0	σ_m	a	$(\sigma_0 + \sigma_m) / \sigma_0$
H型	*1 定常条件	A	0.87	0.33	0.13	1.38
		B	0.78	0.26	0.14	1.33
	屋外条件	A'	0.77	0.76	0.12	1.99
		B'	0.82	0.63	0.19	1.77
D型	*2 集成材		1.16	0.30	0.06	1.26
	素材		1.93	0.48	0.04	1.25
S ^{*2} 型			1.86	0.29	0.23	1.16
C ^{*2} 型			0.19	0.08	0.14	1.42

*1: 図-6-3-1の接合金物, *2: 図-6-3-2の接合金物

第4節 応力条件の区分

前節までに、木質材料・部材のクリープ特性に関して、荷重の増減によるクリープとその変形モデルについて述べた。ここでは、その考え方等をもとに材料・部材の長期性能を評価する際に考慮されなければならない応力（荷重）の作用条件の区分を行う。

4-1 作用応力区分

材料・部材の長期性能を評価する際に作用する応力の区分は、従来、作用応力の区分として、S IとS IIの区分が主であったが、この区分だけでは、材料や部材の長期性能を評価する際に厳しすぎたり、あるいは緩すぎるということが生じがちである。例えば、積雪地における小屋梁のたわみの算定等で現実的でない場合もある。ここでは、作用する応力の区分を、第5章および本章における検討から、① 短期間の荷重が作用する（S I）。② 一定の荷重が作用する（S II）。③ 一定の荷重が作用し、さらに新たな荷重が加わってある期間存続して作用する（S III）。④ 繰返し荷重が作用する（S IV）場合の4区分とした。これらの作用応力の区分は次のように考えられる。

(1) 作用応力区分S I

区分S Iは、短期間に荷重が作用する場合で、長期性能に与える影響は、他の区分より少ない。またこの区分は、区分S IVと材料等が弾性挙動を示す範囲内では、同じと考えてよい。しかし、釘接合部のように繰返し荷重に対して塑性的変形要素が強い場合は、区分S IとS IVは異なると考えられる。

(2) 作用応力区分S II

区分S IIは一定の荷重が長期にわたって作用するような条件で、建築物の外力条件としては固定荷重や家具等の積載荷重が代表的な例になる。この場合は区分そのものが評価の対象になる。その表示方法として比較的簡便なのが相対クリープ（瞬間変形 (δ_0) ）に対するある時間経過後の全変形 $\delta(t)$ の比率 $(\delta(t)/\delta_0)$ で、木質材料や部材は次のように表示でき、 a 、 N が特性値として与えられる。

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

a 、 N に前章までのデータの代表的な数値を代入して相対クリープをプロットして

みると図-6-4-1に示したようになる。これより想定耐用年数（使用期間）が設定されれば初期変形に対する $\delta(t)$ の比率が算定できることになる。しかし、この図をみると、例えば $(1+0.35t^{0.35})$ と $(1+0.2t^{0.2})$ では、20年経過後で、相対クリープに4倍以上の差異を生じ、材料の特性値（ a, N ）の区分がきわめて重要であることが認められる。

一方、釘接合部のクリープ変形も同じような扱いが可能で相対クリープは次式で表わせる。

$$\delta(t)/\delta_0 = 1 + \delta_{max}(1 - e^{-\lambda t})/\delta_0$$

ここに、 δ_{max} ：荷重、材料構成等に依存する定数

λ ：定数（本論文では0.05）

(3) 作用応力区分SⅢ

区分SⅢは一定の荷重が長時間にわたって作用する区分SⅡに加えて、ある期間荷重が存続して作用する条件であり、小屋組等にかかる屋根荷重と積雪荷重のような組合せに相当する。区分SⅢの条件で重要な外力条件は、区分SⅡで述べた想定耐用年数に加えて、一時的に作用する存続荷重の大きさとその存続時間である。また材料面からは、クリープに関する特性値とさらに本章第1節で述べた増減荷重に対する変形性状の型式である。

ここで、第1節で検討した増減荷重に対する単純化した変形式である付加荷重存続型（A型）、最大荷重存続型（B型）、重ね合せの原理型（C型）について、本論文で扱った部材等がどの変形式に相当するか定性的な傾向をみると、釘接合部はB型に近く、他のものはA型からC型の中間的な位置に在るものと考えられる。

4-2 材料の特性値と変形式

4-1で提案した作用応力区分の中で、材料等の長期性能を考えた場合に、その影響の程度が大きいと考えられる作用応力区分SⅡと区分SⅢ型について、材料の特性値（ a, N ）と本章第1節の図-6-1-6で示したような変形式下での材料・部材の変形挙動との関連について検討する。その際の仮定として、荷重 P_1 の作用存続時間内で、次のような条件をもとに作用応力区分SⅡとSⅢとのクリープ変形の比較を行う。

- (a) 相対クリープ曲線は $\delta(t)/\delta_0 = 1 + a t^N$ とし、 $\delta(t)$ 、 δ_0 は荷重に比例する。
- (b) P_1 の荷重存続期間を1年のうちのある期間(30, 60, 90, 120, 日等)とし、他の期間は P_0 とする。この場合 P_1 と P_0 の比率を変化させる。

(c)増減荷重に対する変形型式は、付加荷重存続型（A型）、最大荷重存続型（B型）、重ね合せの原理型（C型）とする。

(d)比較のための表示は、各年の P_1 の存続時間の終了時における相対クリープを求め、 P_1 が負荷後、全期間にわたって作用した時（S II型）の相対クリープに対する比率 $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$ で示す。

以下に具体的な計算例を示し、その傾向を述べる。

図-6-4-2(1), (2)は、 P_1 の存続時間を変えたとき($P_1 = 2P_0$)のA型とC型の傾向を示したものである。B型がC型より相対クリープが大きく、当然のことながら存続時間の長いほど相対クリープが大きい。またA型、C型とも比率は1より小さく、区分S IIとS IIIでは、かなり差異の出ることを示しており、とくに材料特性値(a, N)が大きいほど $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$ の比率が低くなってきている。これは区分S IIでは a, N が大きいほど不利になるが、区分S IIIではそれを相殺する方向に作用することを意味しているものと考えられる。

図-6-4-3(1)~(6)は P_1 と P_0 の比率を変えた場合である。一番下に示した(荷重0との繰返し)は $P_0 = 0$ の場合を想定している。

これらの結果より比率 P_1/P_0 が大きいほど $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$ の比率は小さくなり、その効果は前述したことと同じく材料特性値(a, N)の影響が大きく、C型では、 P_1 の存続期間が短いほどその傾向は著しい。すなわち、区分S IIとS IIIとの差異が大きくなることを示しているものと考えられる。

図-6-4-4(1), (2)はB型の場合である(なお、B型の場合にはその前提条件が P_0 の存在や P_1/P_0 の比率は関係がなくなる)。この場合も、特性値と P_1 の存続期間が重要な因子になることが認められる。

以上の結果をまとめると次のようなことが言える。

荷重増減のタイプA型、B型、C型のいずれの場合においても、荷重存続期間と材料の特性値(a, N)が大きな影響をもち、区分S IIIの相対クリープは、区分S IIの相対クリープよりかなり低下が見込まれる。とくに、区分S IIによる評価で、相対クリープが問題となるクリープの特性値(a, N)が大きい場合や P_1/P_0 が大きい場合には $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$ の比率の低下が大きくなり相殺することになる。したがって、時間に依存する要素の大きい木質材料および部材については、区分S IIのみの評価では不合理な点が多くなり、区分S IIIによる評価を考慮する必要があるものと考えられる。すなわち、材料面からは、クリープに関する特性値と荷重の増減による変形性状の型式を求めておくことが必要で、外力条件からは、荷重の存続期間とその大きさ、および想

定耐用年数（使用期間）を明らかにしておくことが重要であると考えられる。

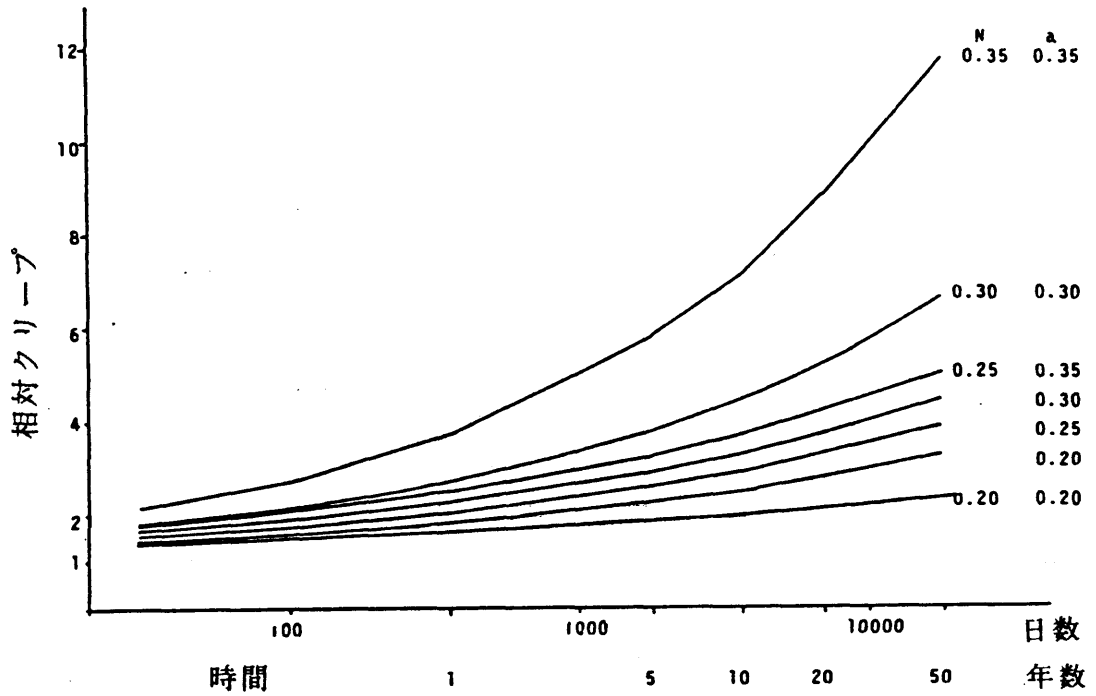


図-6-4-1 推定相対クリープ曲線

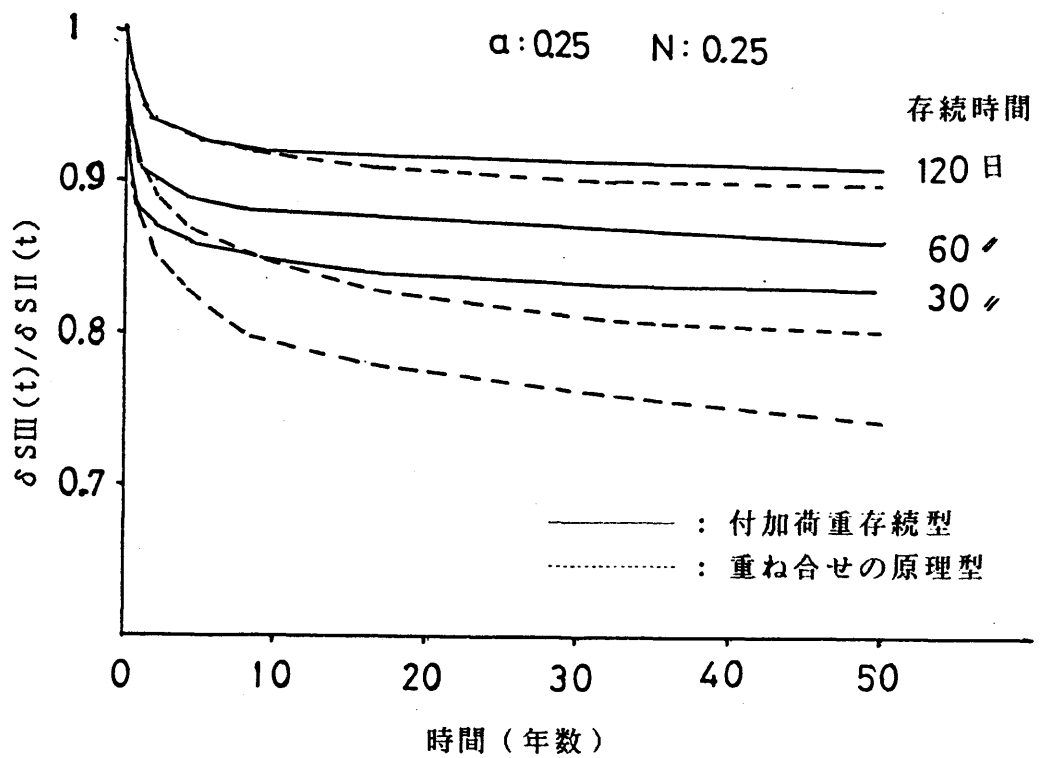
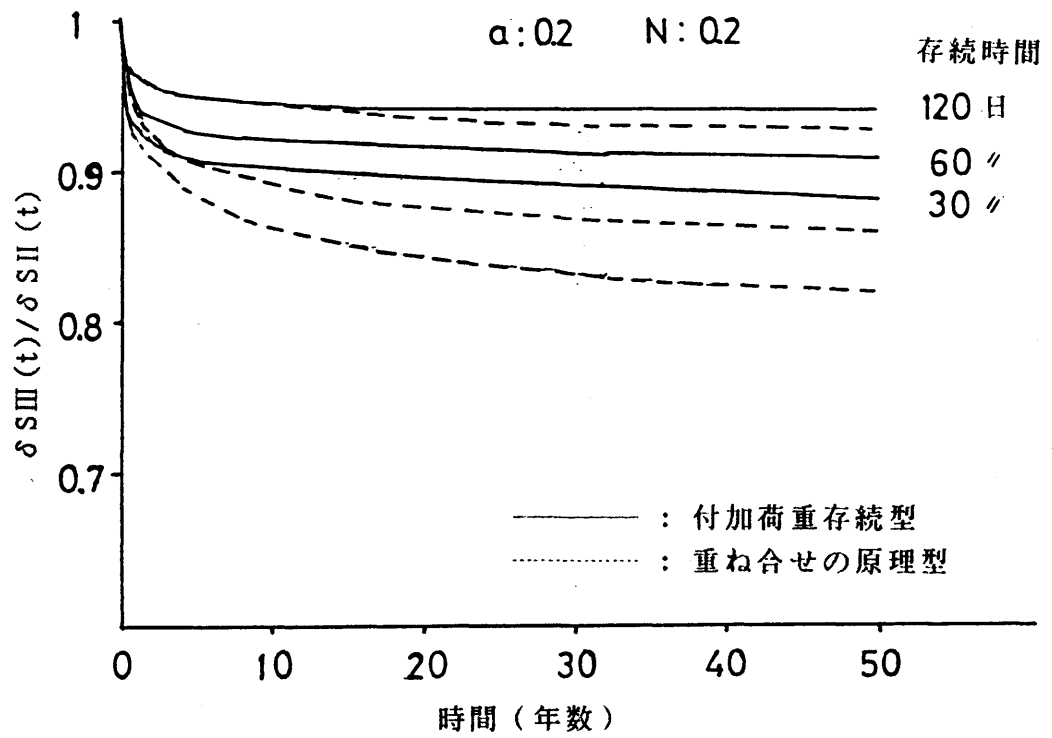


図-6-4-2(1) 荷重存続時間による $\delta S_{III}(t)/\delta S_{II}(t)$

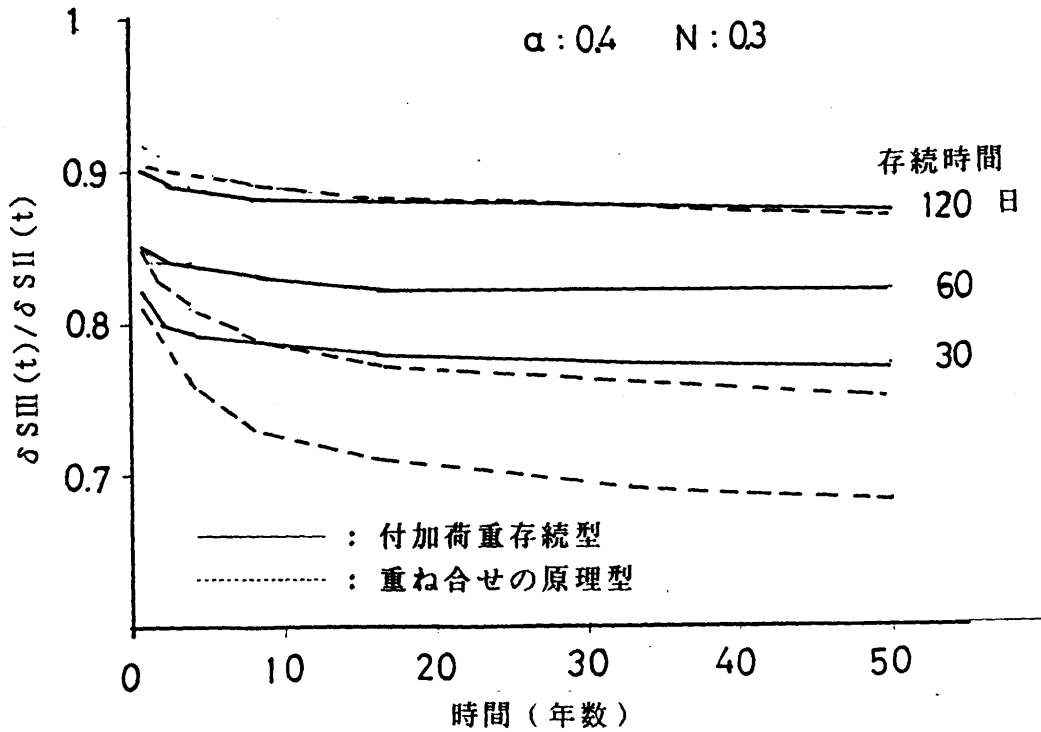
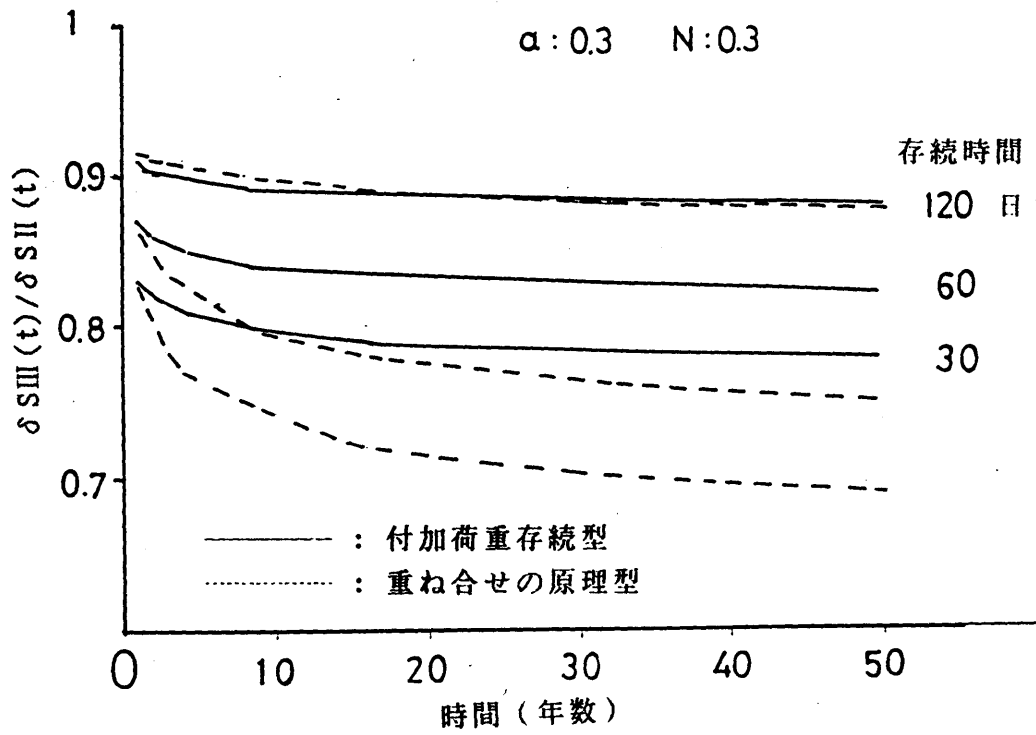


図-6-4-2(2) 荷重存続時間による $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$

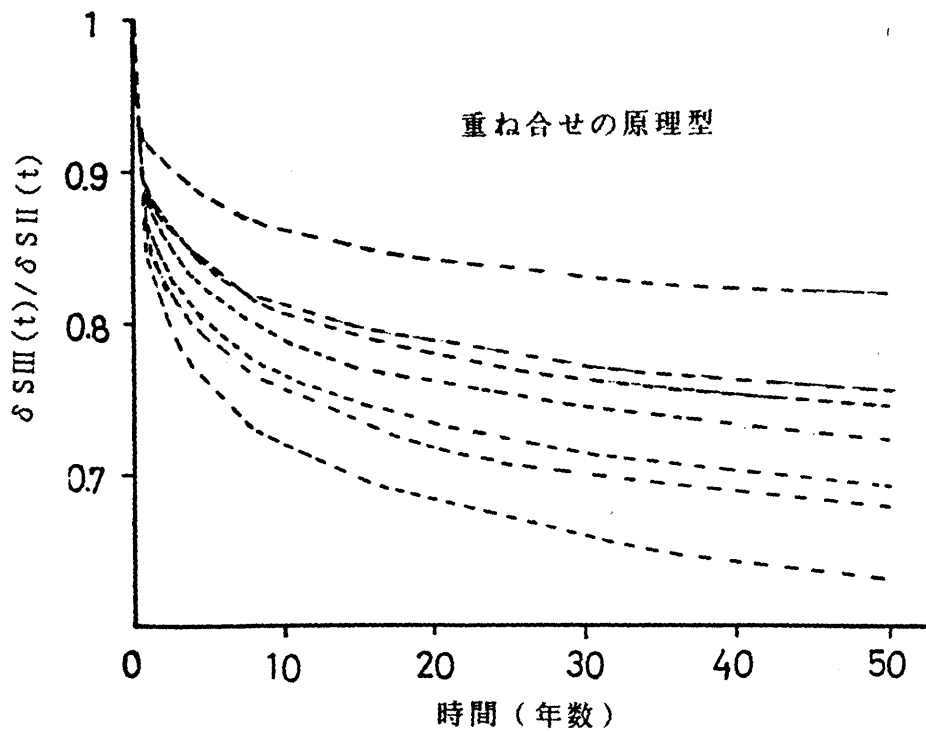
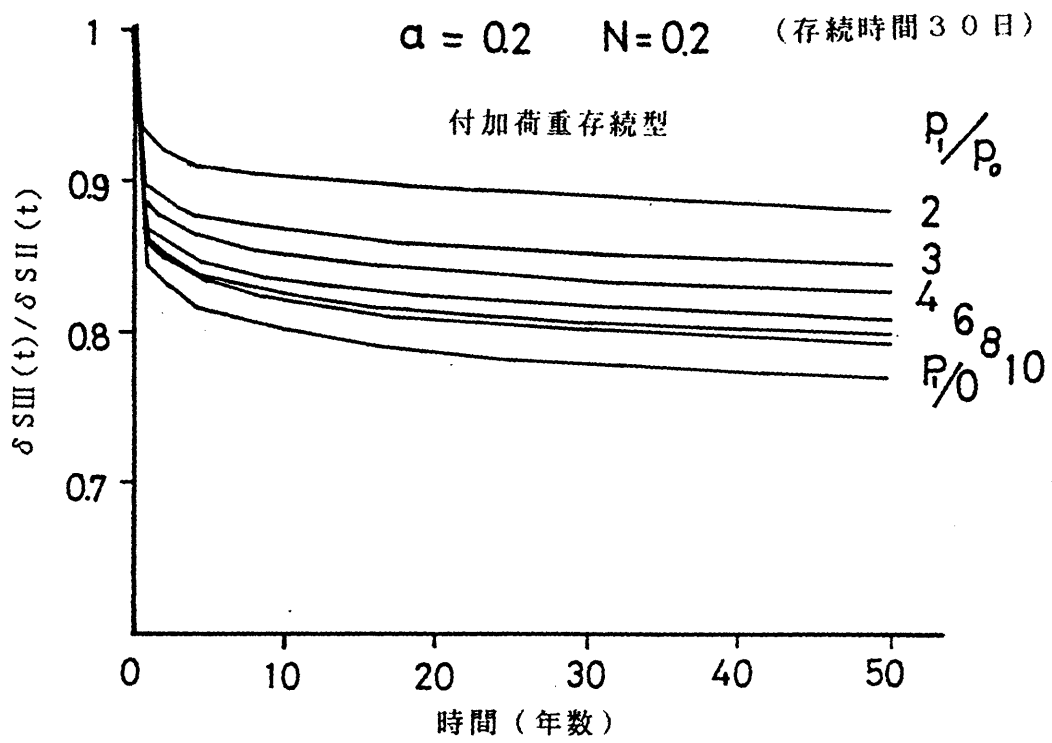


図-6-4-3(1) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$

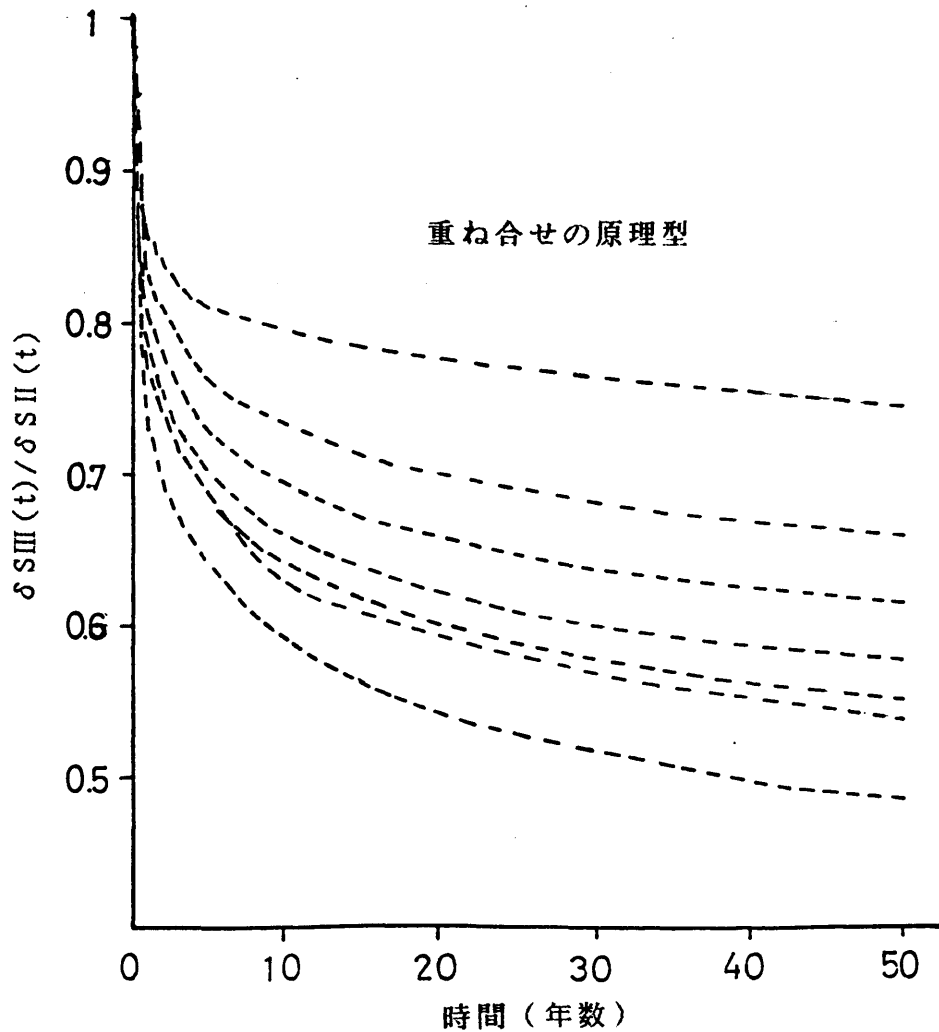
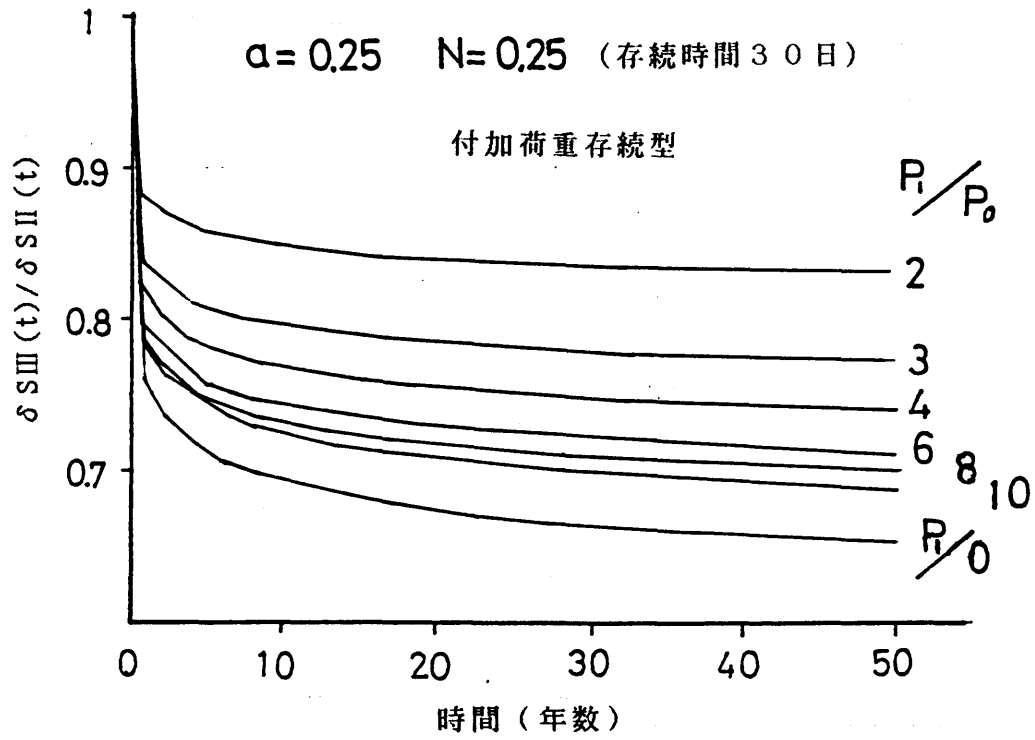


図-6-4-3(2) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t)/\delta S_{II}(t)$

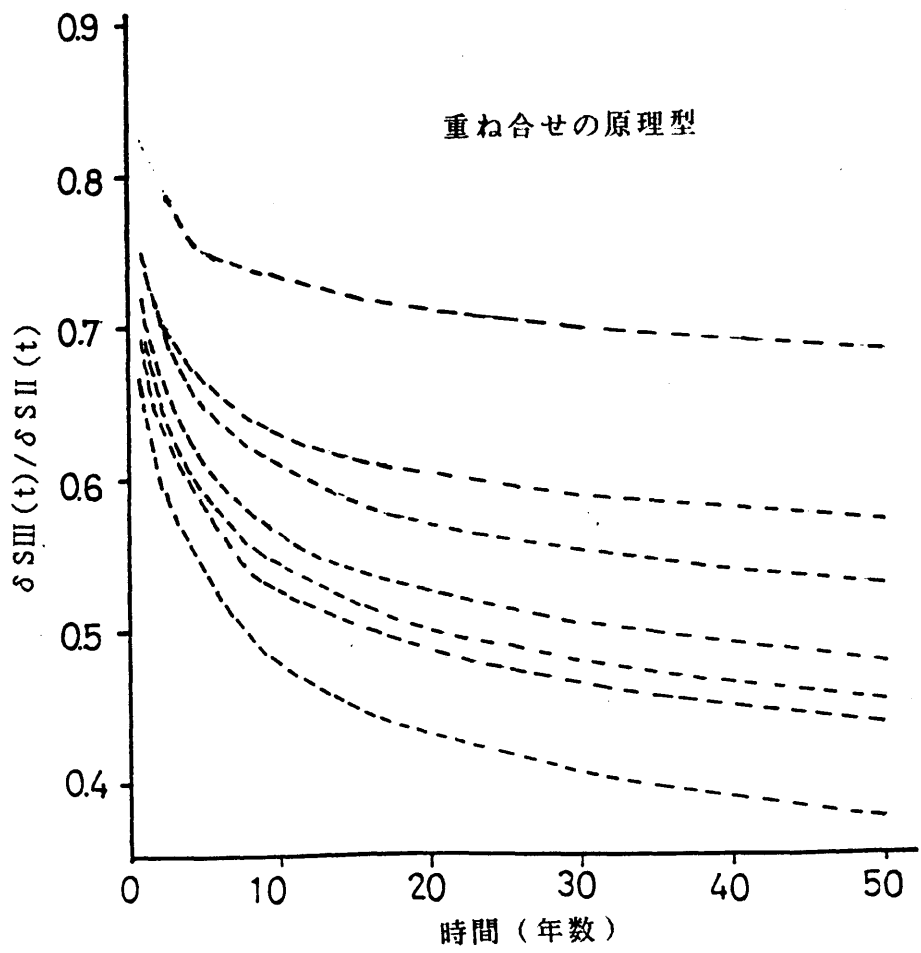
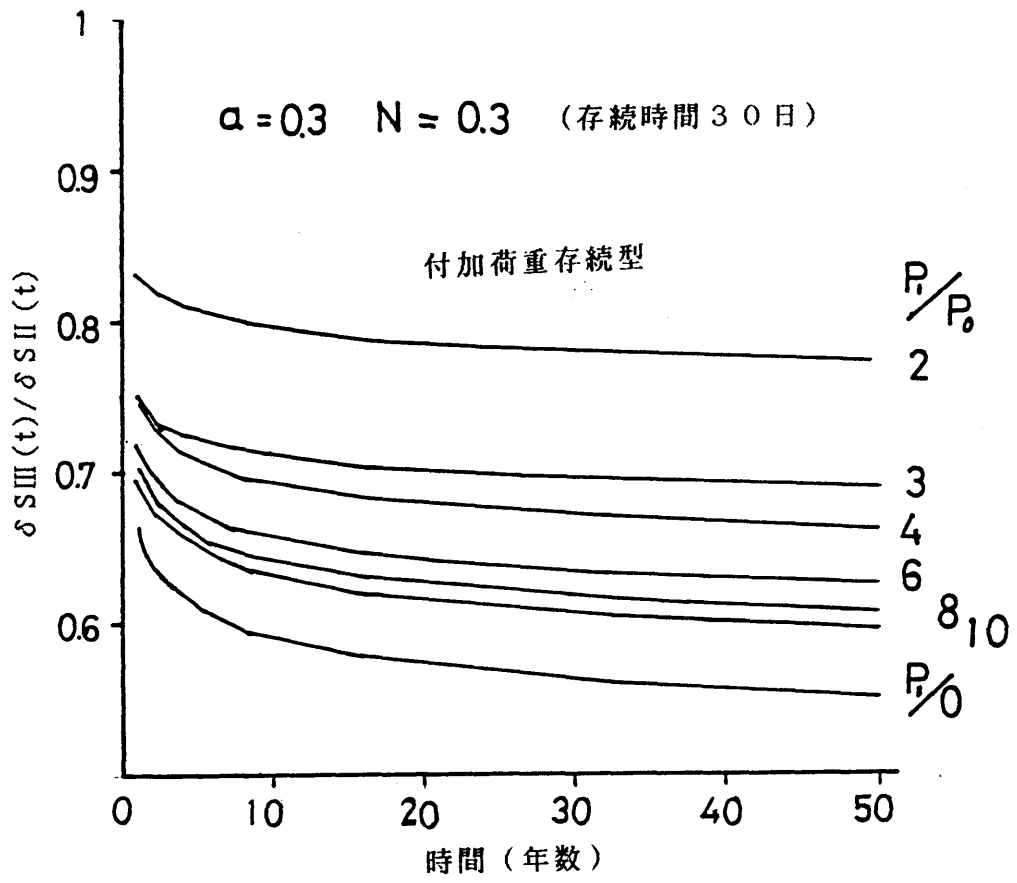


図 - 6 - 4 - 3 (3) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$

$\alpha = 0.2 \quad N = 0.2 \quad (\text{存続時間 } 120 \text{ 日})$

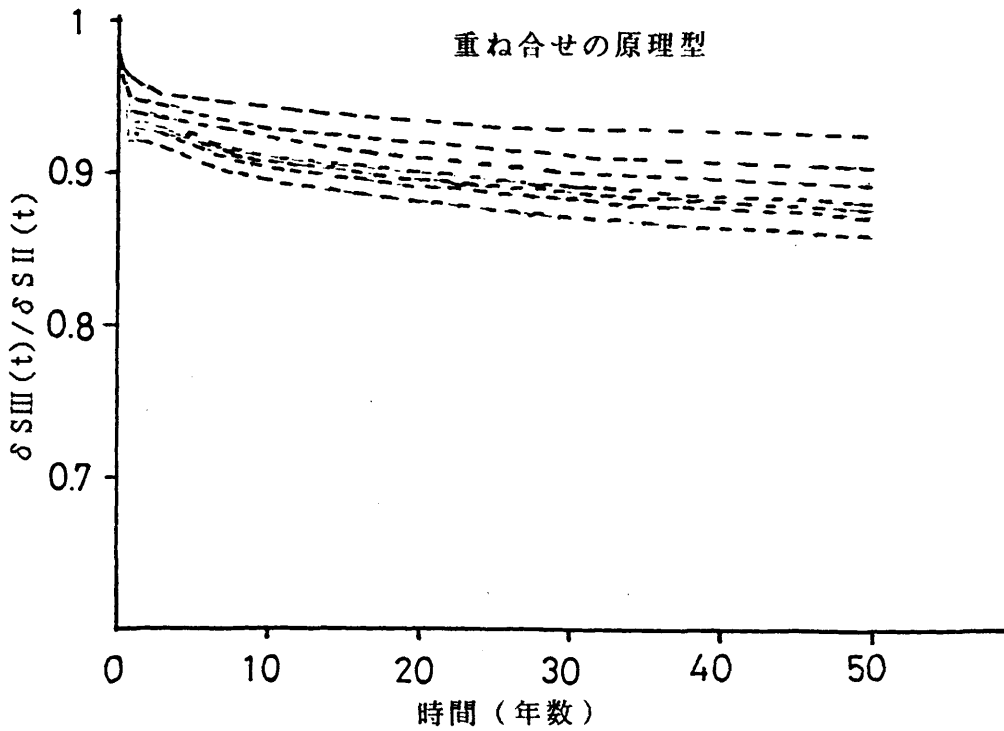
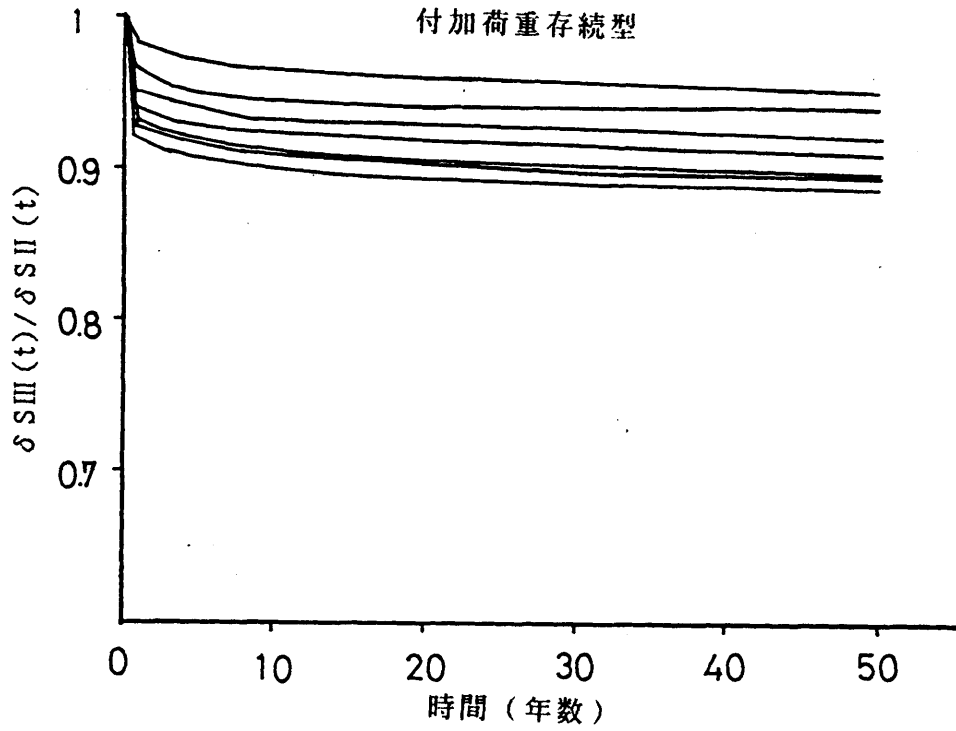


図 - 6 - 4 - 3 (4) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$

$\bar{a} = 0.25$, $N = 0.25$ (存続時間 120 日)

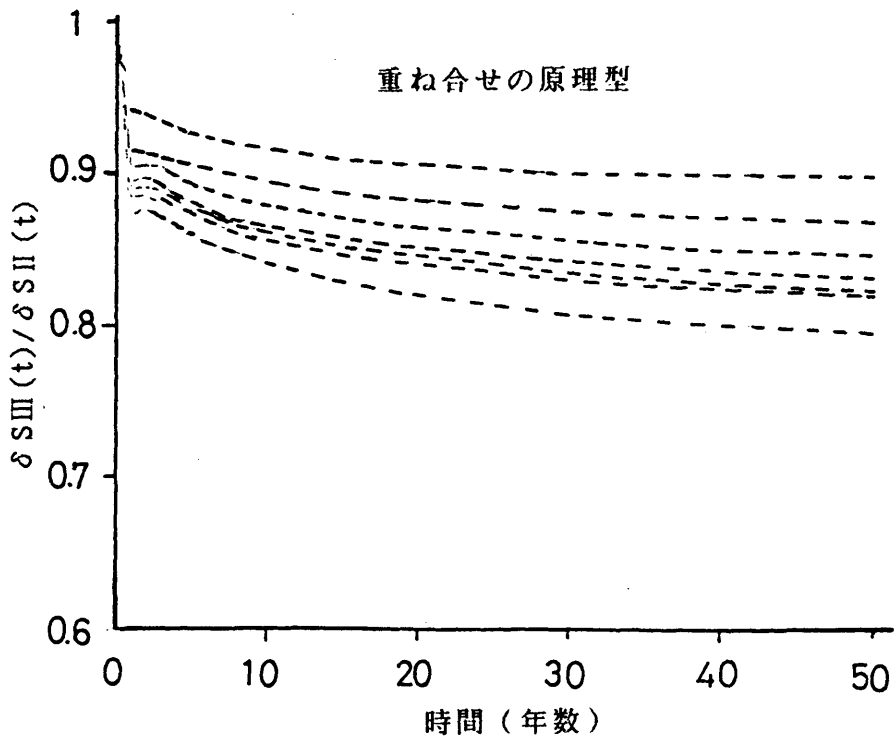
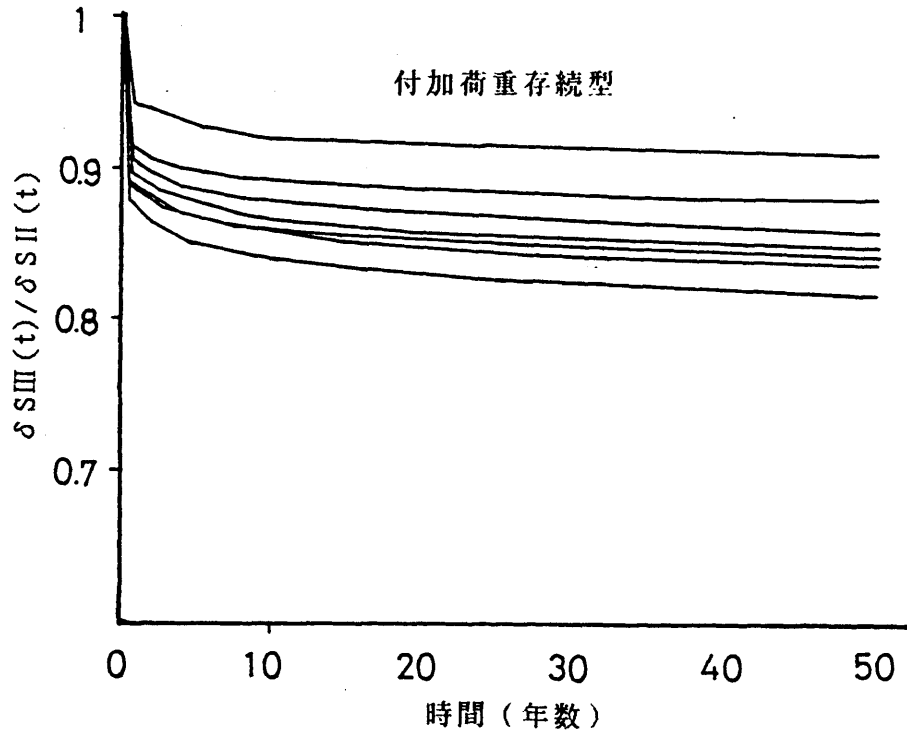


図-6-4-3(5) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$

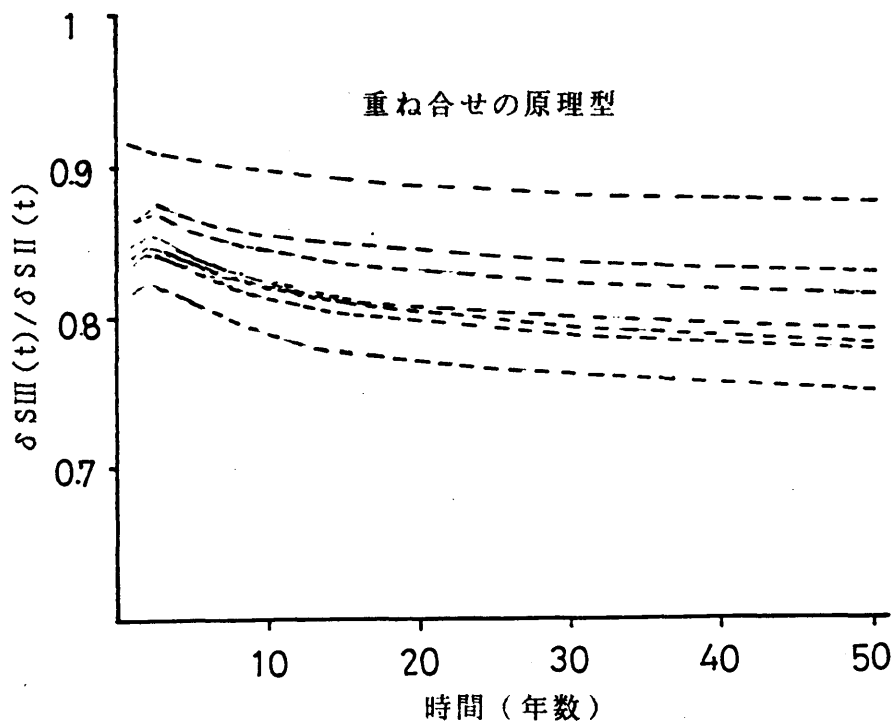
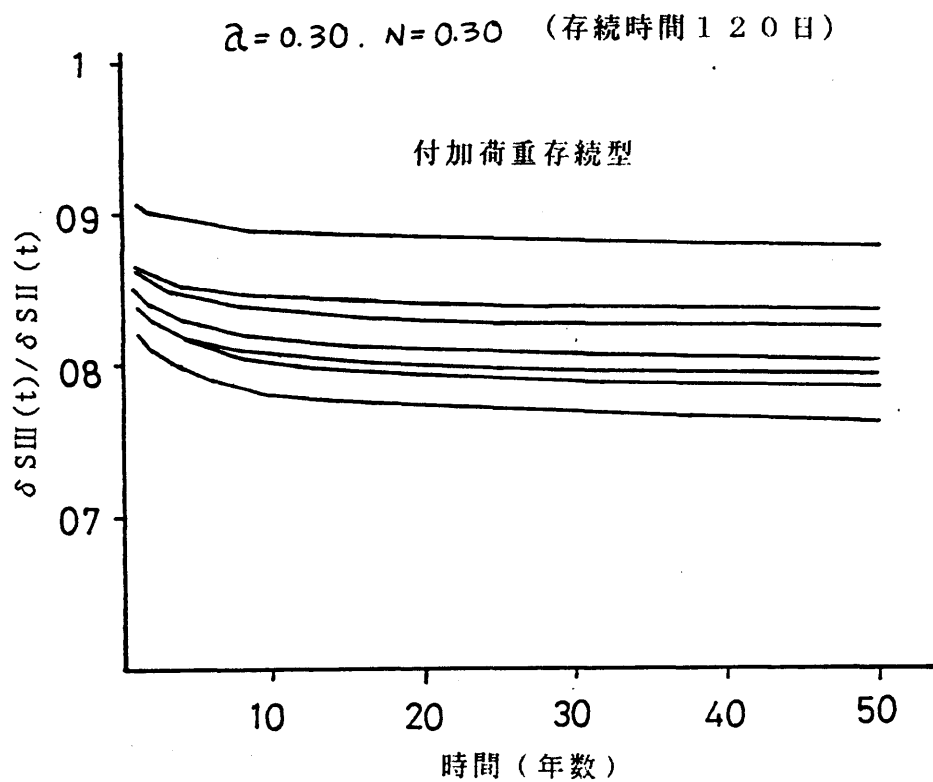


図-6-4-3(6) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t)/\delta S_{II}(t)$

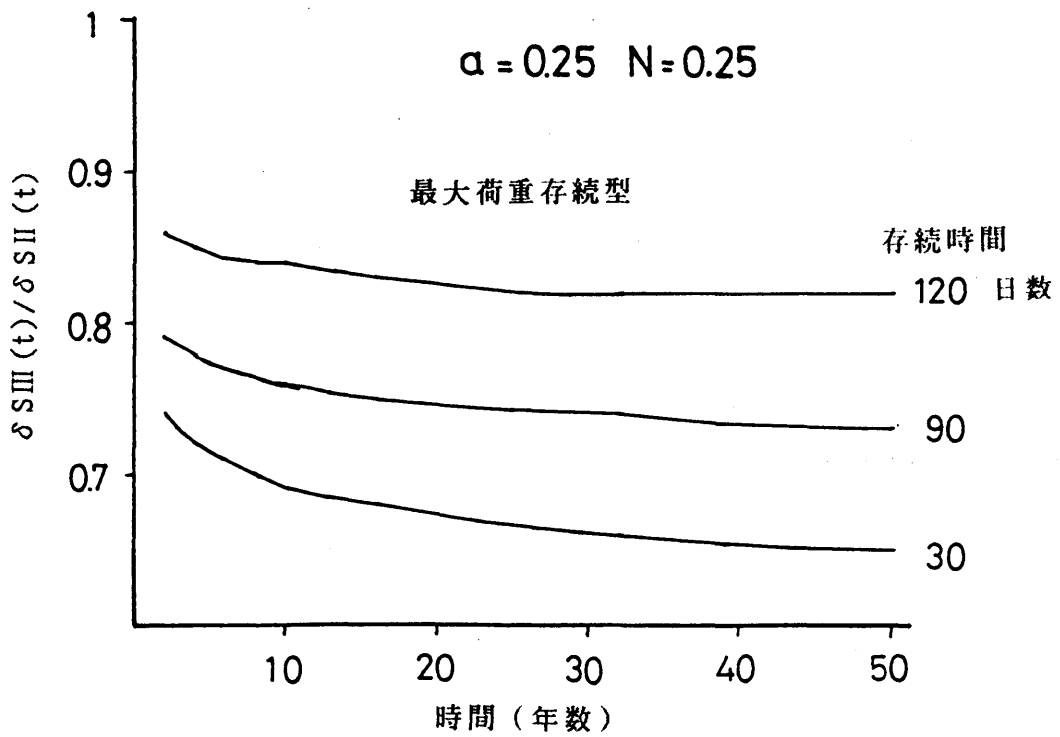
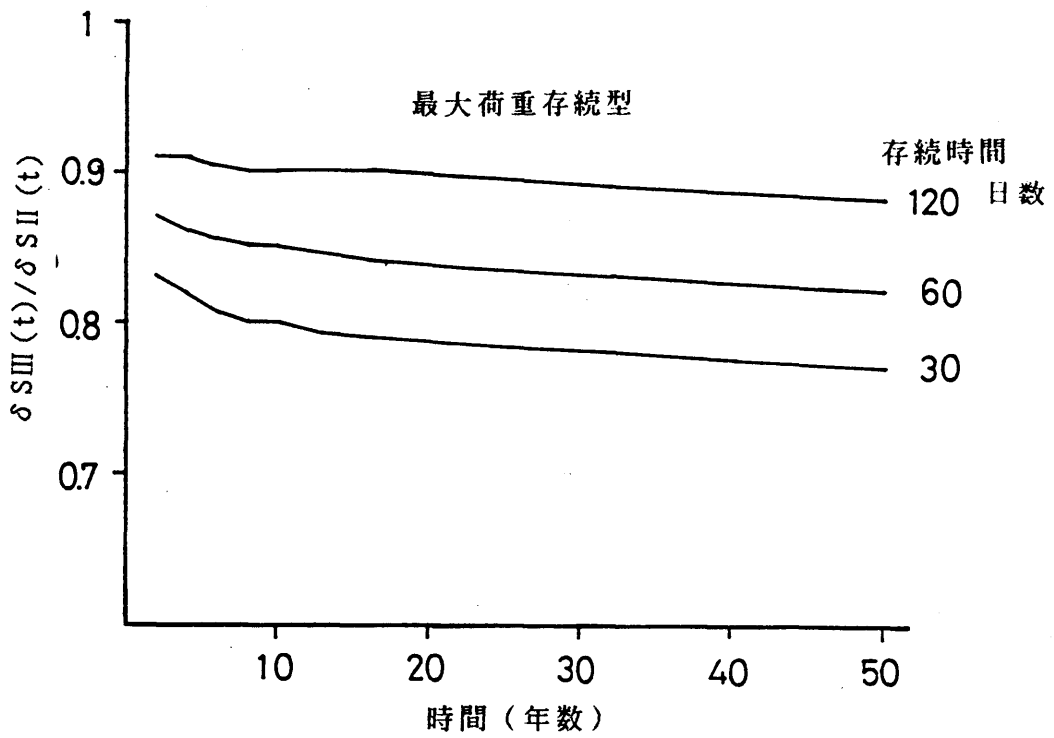


図-6-4-4(1) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$

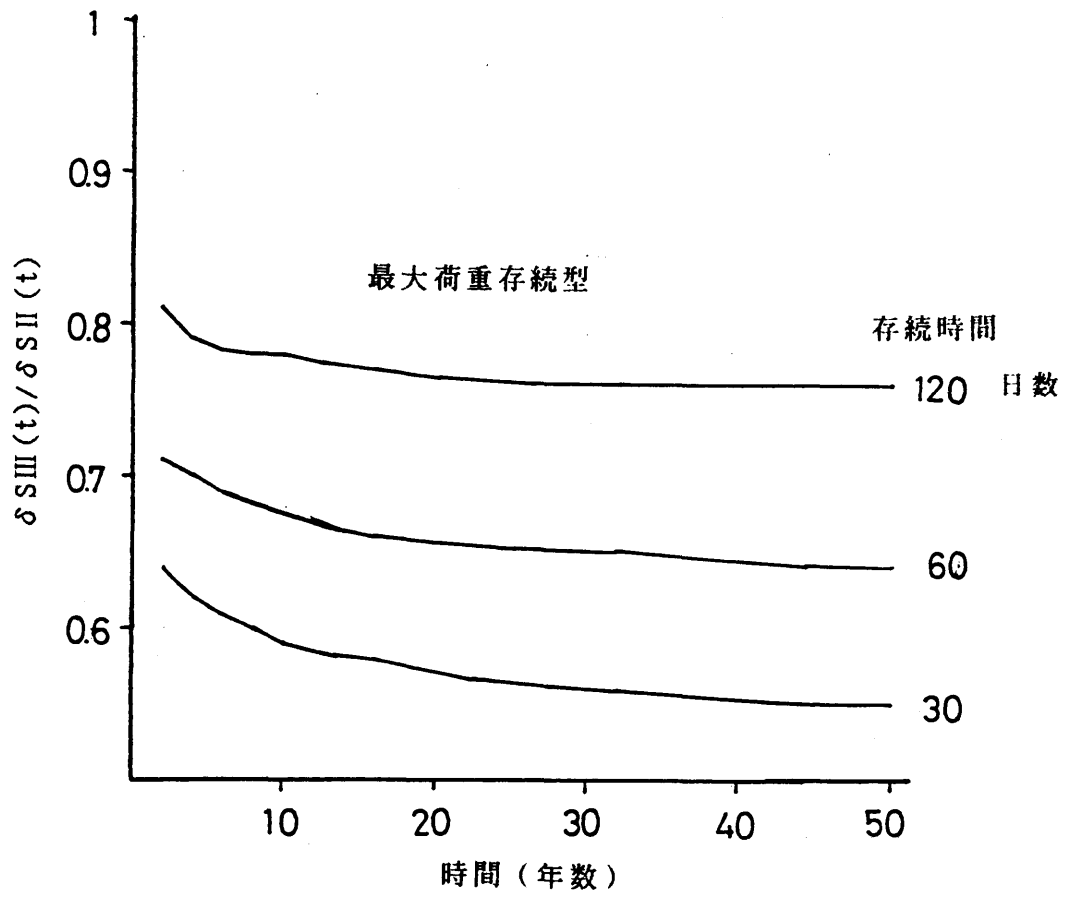


図-6-4-4(2) 荷重存続の大きさによる $\delta S_{III}(t) / \delta S_{II}(t)$

第5節 本章のまとめ

木質構造における木質材料の使用形態は、多岐に亘っており、構成部材として使われる場合は、他材料や接合部との組合わせで用いられている。しかし、このような使い方がなされる場合は、材料レベルでの一般的な評価法である小試験体による試験だけでは、部材として使用された場合の長期耐力性能に関する適正な評価ができない場合もあり得る。

そこで、本章においては、木質材料・部材であるパーティクルボード下地材、木質複合梁、集成材梁等のクリープ試験を実施し、それらクリープ特性をもとに部材として使用された場合の長期耐力性能の評価に関する基本的な考え方について検討した。

本章で得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) パーティクルボード下地材

パーティクルボードのクリープ曲線は広範囲にわたって、 t^m 則 (power law) が成り立ち、初期クリープ変形からたわみの長期推定が可能となる。とくに時間の指数 N は同一材料ならば荷重によらず一定値を示し、気乾状態では $0.2 \sim 0.3$ に含まれ、 0.25 を代表値とみてよい。環境条件である湿度が高くなるとややこれより値が大きくなり、相対湿度 $80 \sim 90\%$ では 0.4 程度になる。定数 A については、本研究の結果からも応力比 30% 以下ではほぼ荷重に比例しているので、瞬間変形 δ_0 と一定の関係がある。

パーティクルボードのクリープに及ぼす湿度の影響はかなり大きく、そのクリープ特性の評価は、使用部位の環境条件に対応する必要がある。湿度変動下では湿度の増加によってクリープが進行し、減少によってクリープが停止または回復する。この場合たわみの変動幅を荷重に換算するとかなりの応力の増減に相当し、変動幅は定常時のクリープの進行速度よりはるかに大きい。また、部材として使用された場合は釘打ちによって接合されるが、その効果はボードのクリープ曲線の傾向に直接的な影響は少ないが、湿度変動によるたわみを拘束する効果がある。一方、湿度変動に対するクリープ量の変動については、標準状態 (相対湿度 65%) でのクリープ量と比較しても大きな差異は認められないが、常時多湿の場合とは大きな差異がある。したがって、高湿度状態の作用時間とクリープ量との関係が、長期耐力性能評価上の重要な要素となる。しかし、湿度変動がクリープの緩和へ及ぼす影響やその他、床張りに要求される諸条件から考慮して厚物のボードの方が使用上問題は

少なくなると考えられる。

(2) 木質複合梁

木質複合梁である合板ボックスビームや7×7複合梁のクリープ曲線は、パーティクルボード下地材と同様に t^m 則が成り立ち、たわみの長期推定が可能である。また、木質複合梁のクリープは湿度の変動を受けやすいことが認められた。しかし、複合梁が使用される場所を考えると床梁(2階床)や小屋梁等が主であり、これらの部位における環境条件は、屋内条件であることからとくにクリープの評価上それに影響を及ぼす高湿度条件の場合については考慮する必要はないと考えられる。

一方、荷重条件については、使用される部位を考慮すると一定荷重(屋根荷重、床荷重)が継続して作用する場合や一定荷重(屋根荷重)に加えてある期間荷重(積雪荷重)が作用する場合等が考えられる。

したがって、木質複合梁の長期耐力性能の評価に関しては、第1節で述べた荷重の増減による変形式(最大荷重存続型、重ね合せの原理型)を考慮することが必要であると考えられる。

(3) 集成材梁部材および接合部のクリープ

構造用集成材の梁材および梁部材のクリープ曲線は、パーティクルボード下地材や木質複合梁と同様に t^m 則が成り立ち、たわみの長期推定が可能である。

集成材の梁材および梁部材のクリープは、環境条件(屋外条件、定常条件)の違いによって著しい差異が認められることから、環境条件の区分(湿度条件)が重要となり、環境条件によっては、見掛け上の剛性の低下(低減)を考慮する必要がある。また、接合部を含んだ梁部材としてのクリープと、梁材だけの場合では変形量が異なることから、長期において変形が重要視される場合は、梁材だけのクリープ特性をもって梁部材のクリープを評価することは適切ではなく、たわみが増加することを考慮しておく必要がある。

構造用集成材の接合部のクリープは、作用した荷重とその荷重が作用する時間に関係し、作用した荷重が小さい場合の変形要素はさらに大きな荷重が作用した場合には、その変形要素に含まれ、それにさらに塑性的な要素が含まれて変形が安定する変形であることが考えられる。したがって、変形曲線に(6・2・1)式をあてはめることによりたわみの長期推定が可能である。

一方、接合部のクリープも梁材同様に環境条件の影響を受けため、環境条件の区分(湿度条件)が必要となる。

(4) 応力条件の区分

木質材料・部材および接合部の長期性能を評価する際に考慮されるべき応力（荷重）の作用条件の区分について、前章および本章の検討結果をもとに区分を行った。その区分は、① 短期間の荷重が作用する（S I）。② 一定の荷重が作用する（S II）。③ 一定の荷重が作用し、さらに新たな荷重が加わってある期間存続して作用する（S III）。④ 繰返し荷重が作用する（S IV）場合の4区分とした。とくにこの区分において、S IIとS IIIの区分は、木質材料や部材等の長期変形性能（クリープ）を評価する上で重要であり、区分S IIによる評価だけでは、材料の設計等において不合理であり、区分S IIIによる評価も考慮する必要があることが認められた。なお、長期における変形の評価に関しては、材料面からは、クリープに関する材料や部材の特性値（ a , N ）と荷重の増減による変形性状の型式（付加荷重存続型、最大荷重存続型、重ね合せの原理型）、さらに外力条件については、作用する荷重の存続期間とその大きさおよび材料等の想定耐用年数（使用期間）を明らかにしておくことが必要であることが認められた。

第7章 小型加振機による木質構造住宅の劣化度の評価

木質構造による建築物の耐久性は、実態調査等によればそのほとんどが腐朽菌やシロアリによる生物劣化が主である。生物劣化の状況をみると、北面の基礎天端より1 m以内での構造部材の劣化が著しい傾向にある。

従来より劣化度判定に関しては、被害部分の目視観察や機器等を用いた材料レベルの評価はなされているが、¹²⁰⁾ 確立した方法はないのが現状である。さらに、これらの方法によって構成材料の劣化状況が評価できたとしても、それが建物全体の構造耐力にどのように影響するかを判定するには困難さがある。したがって、被害箇所を含め直接建物の耐力評価を行うことが必要と思われる。一方、このような方法は、建物全体として劣化の程度を評価するため、他材料や部材の影響があり評価しにくい面もある。しかし、劣化した部材に作用する外力を想定したモデル試験を行い、それらと目視観察や機器等を用いた材料レベルでの判定法とを対応させることによって、耐力の低下を推定することは可能と考えられる。ここでは、建物の劣化度を評価するための方法として、小型起振機によって、建物の耐力の低下を評価することを考え、モデル試験および既存の建物において、その有効性を確認した。

第1節 モデル建物における劣化度評価法に関するモデル試験

1-1 試験方法

試験体は、図-7-1-1に示したような在来軸組構法による実大寸法のものである。試験体の軸組材は、ベイツガ材で、土台、柱は105×105mm、間柱は105×27mm、胴差は108×105mmとした。2階床を想定した部分は、梁材(180×105mm)を十字に配し、その上に根太105×45mmを間隔455mmで加力方向に対して平行に配置した。火打土台および火打梁は、90mm角を使用した。その他試験体の組み立てに際しては、住宅金融公庫共事共通仕様書に準拠した。試験体の種類は、表-7-1-1に示したように同一の軸組に耐力要素である筋かい(35×105mm)、厚さ7.5mmの構造用合板およびそれらを止めつけるための釘の本数および壁の配置等を変化させたものである。

試験方法の概略を図-7-1-1に示した。試験は、2階床上に設置した小型起振機(起振モーメント4kgfcm)を用い試験体の固有振動数近傍で強制加振させ、振幅が定常化した後、起振機を停止し、試験体に自由振動を起こさせ、その揺れを胴差の側面中

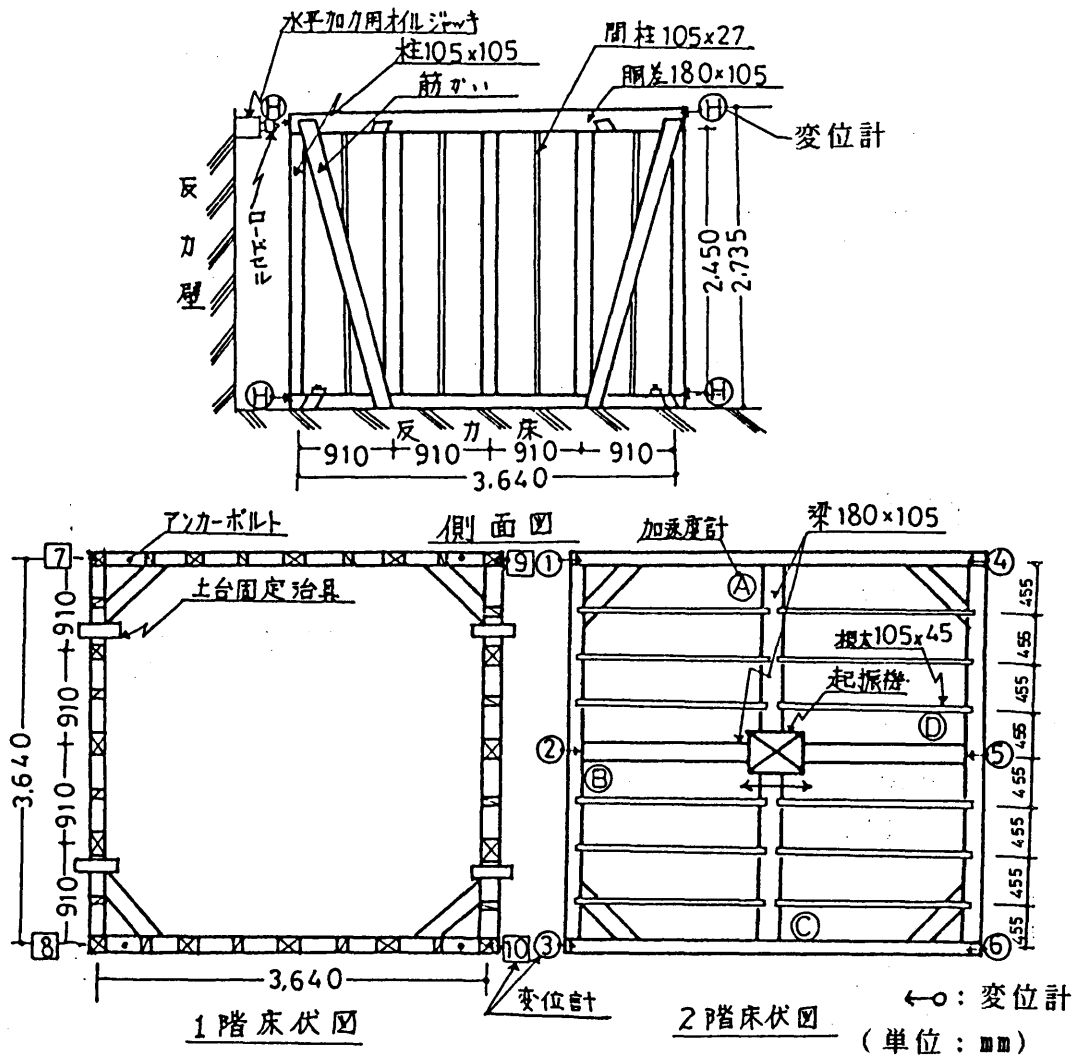


図-7-1-1 試験体および試験方法

表-7-1-1 試験体の種類

耐力要素	試験体の種類			
筋かい (横架材にだけ N.75F)				
				CV9Tについては筋かい脚部の釘本数を変化させた。
構造用合板 (厚さ7.5mm N.50F クギ打間隔 @150...P @450...P')				

- ・ⓐ: 2階床構面を12mm合板で釘打ち, 釘打ち間隔@150
- ・V6.7.8 は火打梁を取りはずしたものの。
- ・表中, C.T.は, 加力方向に対して 圧縮および引張筋かいを表わす。
- ・表中—は、筋かいや構造用合板の挿入箇所を示す。

中央部に取り付けた加速度変換器により計測し、固有振動数を求めた。この際加振方向は、加力方向と同方向とした。起振後、一方向静的加力試験を行った。なお、加力試験においては、同一軸組を繰返し使用するため、軸組等の損傷を考慮し、最大水平加力の大きさを頂部のせん断変形角 $1/300\text{rad}$ を上限とするように加力した。変位の測定位置は、図-7-1-1 に示す通りである。

1-3 試験結果および考察

表-7-1-1 に示した各々の試験体について、強制加振より求めた固有振動数とその後の静的加力試験より得られた耐力 ($1/300\text{rad}$ 時) との関係を図-7-1-2 に示した。

筋かいを配した場合についてみると、軸組に順次筋かいを挿入することにより、固有振動数および耐力は増加する傾向を示している。V2とV3を比較すると、V2は加力方向に対して平行、V3は加力方向に対して向かい合うように筋かいが挿入されている場合であるが、両者の間には差異はほとんど認められない。V6、7、8は、胴差に取り付けた火打梁を取り除いた場合を示したもので、火打梁が挿入されているものより相対的に耐力が小さくなる傾向を示している。

構造用合板についてみると、筋かいに比べ壁量の増加に伴う固有振動数および耐力の増加の傾向は著しい。また、釘打ち間隔による差も明らかである。P5～P9は、直交壁の存在する場合について傾向を示したものである。P6とP7より、直交壁の箇所は同じでも、配置によって効果の異なることが認められる。また、直交壁が3隅および4隅に配してある場合は、両者に差は認められない。

図-7-1-3は、図-7-1-1および表-7-1-1に示したような位置に筋かいを挿入したV9について、筋かいの脚部が劣化によって損傷を受けた場合を想定し、土台と筋かいの接合部の釘を順次引抜き、固有振動数の変化を調べた結果である。脚部の釘本数が3本までは、5本の場合と比べ著しい差は認められないが、3本以下になると釘本数の減少とともに固有振動数は低下する傾向を示した。また脚部の釘がない場合、軸組だけの固有振動数 (1.4 Hz) よりも高い値を示した。このことは、本試験で採用した筋かいが横架材に対して大入れになっているため、間柱、土台、胴差への挿入箇所における摩擦、局部圧縮等が影響し、著しい振動数の低下が認められなかったものと考えられる。しかし、実際の建物では、腐朽等によって構造部材が損傷していることが予想されるため、小変形時には余力として外力に耐えられるが、大変形が生じた場

合には高い抵抗力や変形性能は期待できないものと考えられる。

以上のようなモデル試験の結果から木質構造住宅の劣化度を評価するための方法として、小型起振機を用いた劣化度評価方法が建物の構造耐力性能上の低下を推定するのに有効な方法であることが認められた。

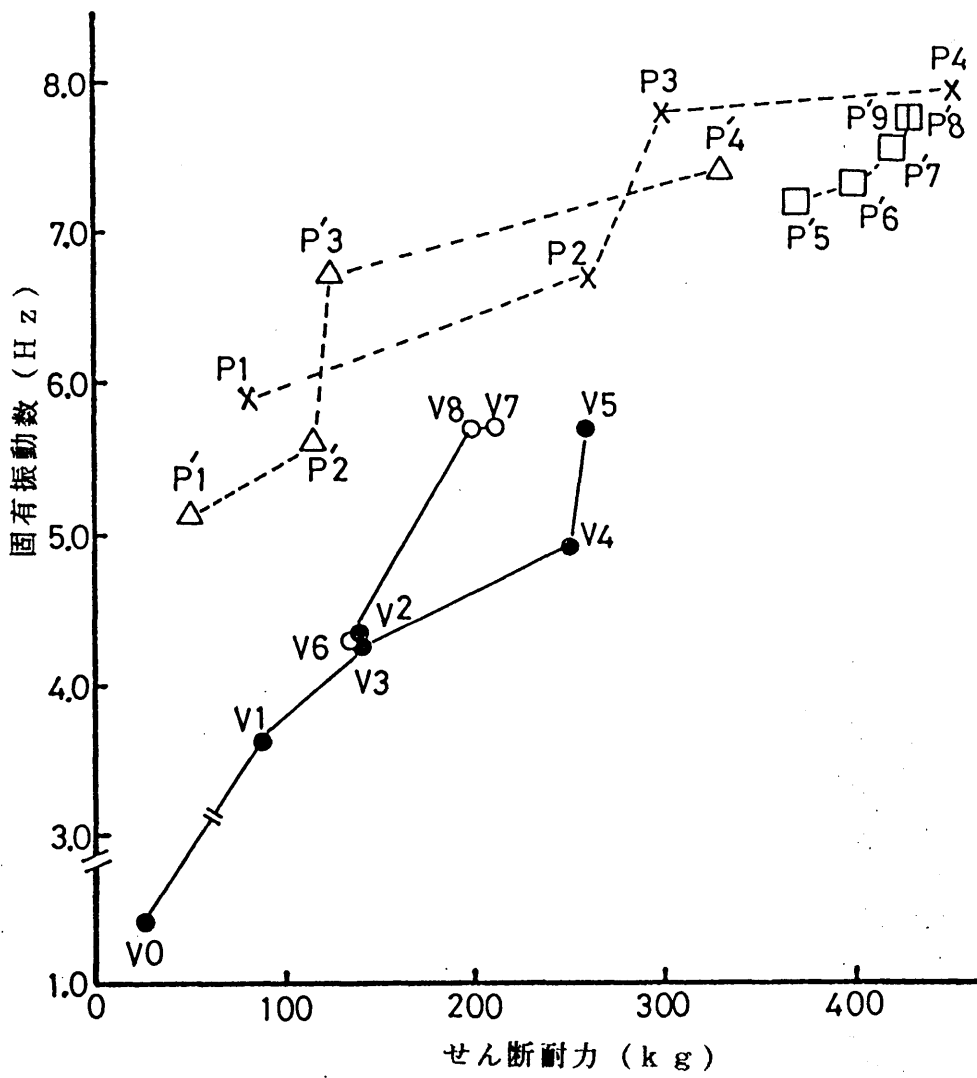
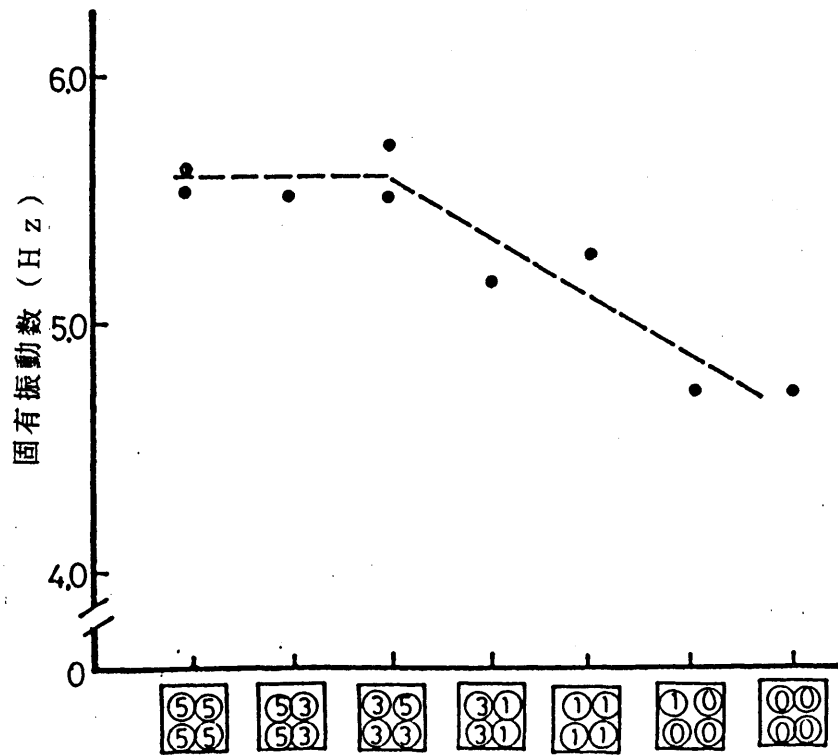


図-7-1-2 せん断耐力と固有振動数との関係



筋違い脚部の釘本数 (○印の中の数字は釘本数)

図-7-1-3 筋違い脚部の釘本数と固有振動数との関係

第2節 劣化度評価法の既存建築物への適用

第1節では、構造的に単純なモデルにおいて、小型起振機を用いることにより、建物の耐力低下を推定することが有効な方法であることが認められたが、本節では、この方法が建物そのものの劣化度評価すなわち長期耐力性能評価法として、有効な方法に成り得るかどうか既存の建物に適用し検討を行った。

2-1 試験対象家屋の概要

試験対象家屋は、昭和22年3月に建設された旧立川米軍宿舎で、構法的には枠組壁工法に近い戸建てのA棟および昭和27年、29年に横浜の瀬谷区に建設された在来軸組構法による二戸連棟建ての建物B、C、D棟である。以下に建物の概要を述べる。

(1) A棟について

構法は、枠組壁工法の枠組を主体としているが、床組は、床束を配した床根太に斜板張りである。なお、浴室の床については、土間コンクリート型式で、他の部屋の床面のレベルまで土間コンクリートを立上げ、タイルで仕上げている。

壁は枠組壁工法にみられるような間柱(105mm×45mm)を枠組材とし、要所には正角(105mm×105mm)を配していた。内壁は、石膏ボード(厚さ15mm)を釘打ち、外壁には製材板(厚さ12mm)を釘打ちしていた。製材板の配置は四隅部分は斜張りで筋違い効果を期待していた。なお、外装仕上げは、ラスモルタル塗り(厚さ12mm)であった。台所は、木摺下地にプラスター塗りによる他は石綿スレート張りであり、浴室・洗面所は、ラスモルタル塗りの上にタイルを配していた。

小屋組は、いわゆるラフター構造の切妻型であった。合掌尻部分の接合はボルト締め、垂木のつなぎ部分は釘打ちになっていた。屋根下地は、製材板(厚さ12mm)張りにアスファルトルーフィング、スギのこけら板(厚さ12mm)の上に石綿スレート瓦葺きであった。天井は、釣天井型式で石膏ボードが張ってあった。

A棟の平面図を図-7-2-1に示した。

(2) B・C・D棟について

試験した建物は、三棟であるがすべて同一のプランであった。建物は、在来軸組構法による平屋建てで、中央で分割された二戸連棟建てであった。

戸境の間仕切壁には石膏ボードが張られていた。外壁はスギ板を用いた南京下見板張り(厚さ12mm)で、内壁には石膏ボード(厚さ7mm)および豎羽目が使われてい

た。

内壁の垂壁には、石膏ボードが使われており、天井は、棹縁天井で合板（厚さ3mm）が張られていた。

耐力要素としては、筋違い（30mm × 90mm）が挿入されており、柱との接合はげんぞうと呼ばれる突きつけ（2-N60T）で施工されていた。

屋根は5寸勾配で垂木の上に野地板（厚さ9mm）を張り、その上にこけら板（厚さ75mm）、厚型石綿スレート瓦葺であった。なお、試験建物には、建築後に浴室・居間等が増築されていた。また戸境部にはその南面に控壁（脚元長さ450mm）が設けられていた。

建物の平面図を、図-7-2-2に示した。

2-2 試験方法

試験は、第1節で用いたと同じ小型起振機を用い強制振動による自由振動試験を実施した。起振機の取り付け位置は、A棟の場合は建物中央の陸梁上、B・C・D棟については、戸境間仕切壁の上の小屋梁に固定した。また、加速度変換器の取り付け位置は、A棟は垂木つなぎ上に、B・C・D棟は小屋梁上とした。

試験はまず健全な状態のまま建物固有振動数を計測し順次、壁や筋違い等を除去してゆき、各状態での固有振動数の変化を計測した。

試験に採用した起振モーメントは4kgfcmを採用し、建物の固有振動数近傍で0.1～0.2Hz間隔で共振曲線を求め、つぎに固有振動数で起振機をしばらく回転させ、振幅が定常化した後、起振機を停止させ、建物を自由振動させた。なお、加振方向は各々の建物ともに張り間方向とした。

2-3 試験結果および考察

建物の固有振動数は、起振機を停止させて自由振幅状態にしたときの振動数とした。減衰定数（h）は、自由振動波形の頂部を滑らかな曲線で結び自由振動を始めてからはじめの3サイクルまでの振幅を用いて次式から計算した。

$$h = \frac{1}{\pi} \log_e (x_i / x_{i+1}) \dots \dots \dots (7.2.1)$$

ここに、 x_i :自由振動波形における*i*番目の振幅

(1) A棟について

表-7-2-1に試験順序と構成要素の除去に伴い変化していく固有振動数を示した。

この表において、試験No. 2では固有振動数が上昇しているが、これはポーチ上の瓦を取り除いたために質量が減少したことに原因していると考えられる。次に、振動試験の結果をもとに、建物の構成要素がなんらかの劣化を受けた場合に、その程度が小型起振機による振動試験で適格に把握できるかどうかを検討する。

そこで、まず試験結果をもとに建物構成要素のバネ定数を求めることにする。自由振動をしている一質点系では次のよく知られた関係が存在する。

$$k/m = (2\pi f)^2 \dots\dots\dots (7 \cdot 2 \cdot 2)$$

ここに、k：バネ定数、m：質量、f：固有振動数

上式は、単位質量当たりのバネ定数をあらわし、この値はmが一定のときにはkに比例する。すなわち、本試験においては、除去した壁の有効壁長（壁長×壁倍率）に比例することになる。したがって、各試験における除去した壁長とこのk/mとの関係から以下に示したバネ定数に関する連立方程式が得られる。

2.51G = 71	ここに、石膏ボード：G
2.51G = 41	内壁のモルタル：Mi
2.04G = 17	合板：P
2.44Mi = 126	板張り：S
2.44Mi = 73	外壁モルタル：Mo
4.88S = 93	
6.28(G + P) = 344	
4 G = 110	
4.8G = 110	
14.9Mo = 1008	

上記した方程式を最も満足する値を求めると、G：8.3～20.1～27.5、Mi：29.9～40.8～51.6、S：19.1、P：34.7、Mo：67.7等の値が得られる。この値をみると石膏ボード・モルタルは建物の位置等により大きく値がばらついていることが認められる。そこで、ここではそれらの値の平均値をもって代表値とした。

バネ定数（k/m：sec⁻²）は、石膏ボード：20.1、内壁モルタル：40.8、合板：34.7、板張り：19.1、外壁モルタル：67.7となる。このk/mに建物の質量を乗ずればバネ定数kが得られるわけであるが、本試験では建物の質量が正しく捉ら

えられていない。そこで建物の構成要素が建物全体の剛性にどの程度の割合を占めているかを検討した。

建物の構成要素が建物全体の剛性に占めている割合(%)は、外壁モルタル：45、石膏ボード：22、内壁モルタル：9、合板：8、板張り：4、小壁・ラス下地板等：12のようになり外壁モルタルが極めて大きな働きをしていることが認められた。

(2) B・C・D棟について

表-7-2-2に試験順序と構成要素の除去に伴い変化していく固有振動数を示した。B・C棟については、構成要素の除去に伴い変化していく固有振動数を計測したが、D棟は、表に示したように柱脚を切断し、柱が劣化した場合を想定した試験を実施した。

ここでA棟と同様に、建物構成要素のバネ定数(k/m)を求めることにする。

まずB棟における建物構成要素のバネ定数を求める方程式は、次のようになる。 $4G = 59$ 、 $4G = 36$ 、 $8K = 18$ 、 $2S = 103$ 、 $4G = 118$ 、 $12K = 104$ 、 $2G + 2N = 18$ 、 $2S = 44$ 、 $2N + 2T = 36$ 、 $2G + 4S + 2N = 282$ 、 $4G = 49$ となる。

次にD棟における建物構成要素のバネ定数を求める方程式は、次のようになる。 $2S + 2N + 2T = 138$ 、 $2G = 54$ 、 $2S + 2N = 126$ 、 $42K = 265$ 、 $10G + 6T = 189$ 、 $2G + 2S + 2N = 170$ 、 $8G = 38$ 、 $2S = 145$ 、 $F = 122$ 、 $22G + 8S + 6N + 8T + 42K + J = 1267$

ここに、石膏ボード：G、筋違い：S、小壁：K、下見板：N、縦羽目：T、軸組：Jである。

上記した方程式を満足するバネ定数($k/m : \text{sec}^{-2}$)は、石膏ボード：16.2、筋違い：48.7、小壁：5.8、下見板：20.6、縦羽目：4.5、軸組：80.2となる。

さらに、表-7-2-2から火打ち梁(8本)：42.0、増築部：12.0、直交壁：0となる。

これらのことから建物の構成要素が建物全体の剛性に占めている割合(%)をみると、増築部は0.9%、直交壁の影響は認められない。張り間方向の壁および筋違いをすべて除去した軸組だけの状態の割合は10%、このうち火打ち梁の割合は3%、小壁は19%となる。

さらに試験対象とした建物の耐力部材を筋違い入り軸組、石膏ボード張り壁、下見板張り壁とし、残りの部材は非耐力部材と考えると、この非耐力部材が建物全体の剛性に占める割合は32%になる。そこで、耐力要素と固有振動数との関係をみると図-7-2-3に示したようになる。これより上述したように石膏ボード等の除

去により固有振動数の減少がみられ、周期の増大や剛性が低下する傾向が認められる。

次に、D棟において柱が劣化し断面欠損を生じた場合を想定したときの固有振動数の変化を図-7-2-4に示した。この場合の変化は図-7-2-3と比較すると固有振動数の変化は少なく、面材や下見板などがあれば、柱が劣化し断面欠損を生じたとしても水平力に対する振動性状には著しい影響はみられず、それよりむしろ鉛直荷重による変形や水平力に対する土台や基礎と上部構造との一体化がなくなることによって問題があると考えた方がよいように考えられる。したがって、柱が劣化した場合に従来より実施されてきた柱の根継ぎという方法は、本試験結果からも妥当な方法であることが認められた。

以上のように、小型起振機によって極めて微小な振動（建物振動巾約0.06～0.23mmp）を建物に加えたにも関わらず建物は一体となって振動し、加振方向にある内外装材料等の建物構成要素の除去（部材の劣化を想定）に対応した固有振動数を示し、その際、加振方向と直交した壁等の影響は認められなかった。また、各試験状態における固有振動数から求められる建物構成要素間の剛性の比率も実際のものによく一致していた。

このようなことから、小型起振機によって、建物の劣化による保有耐力の程度を推定することは可能であると考えられる。しかし、小型起振機によって建物の劣化の程度を評価する場合には、柱や土台の断面欠損による鉛直方向の耐力低下あるいは上部構造と基礎との緊結状態等については評価できないことも予測されるため、従来から行なわれている木材等の劣化診断方法（例えば、目視、穿孔、打音等）と併用する必要があると考えられる。

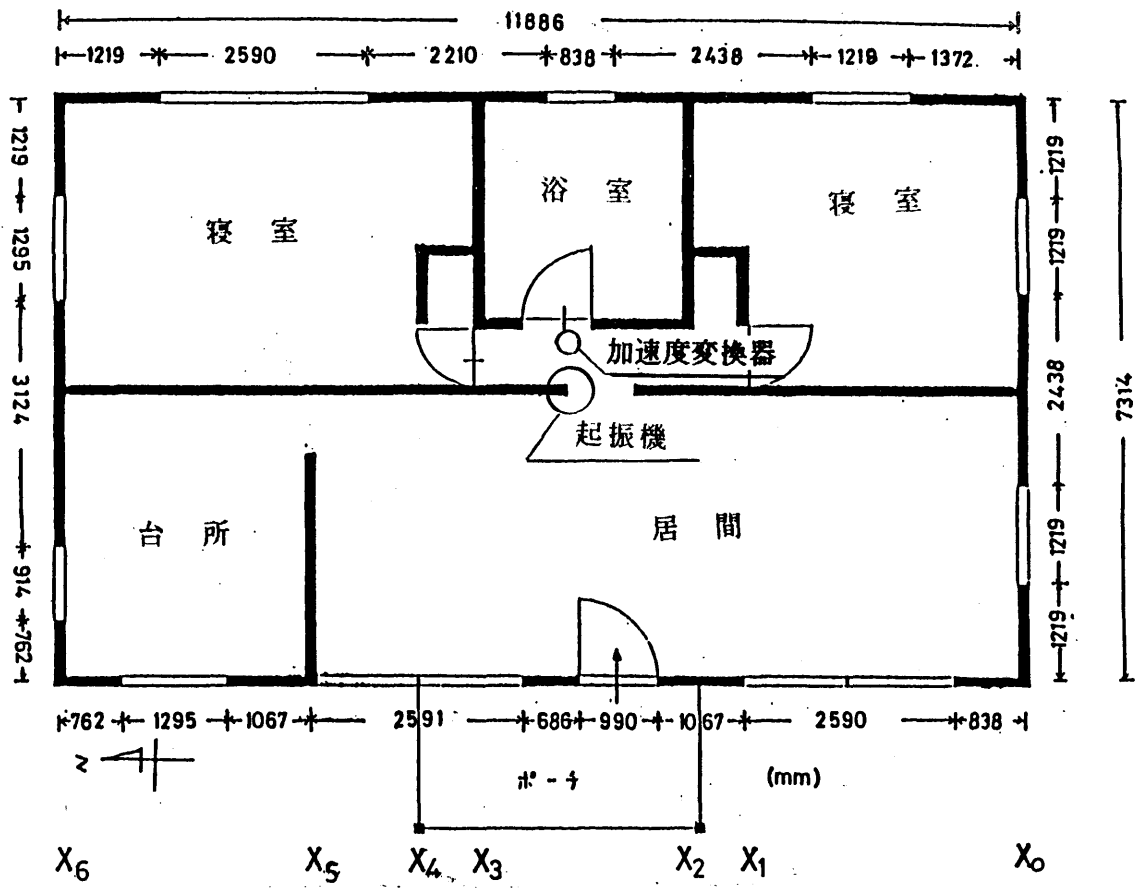


図 - 7 - 2 - 1 試験建物平面図 (A棟)

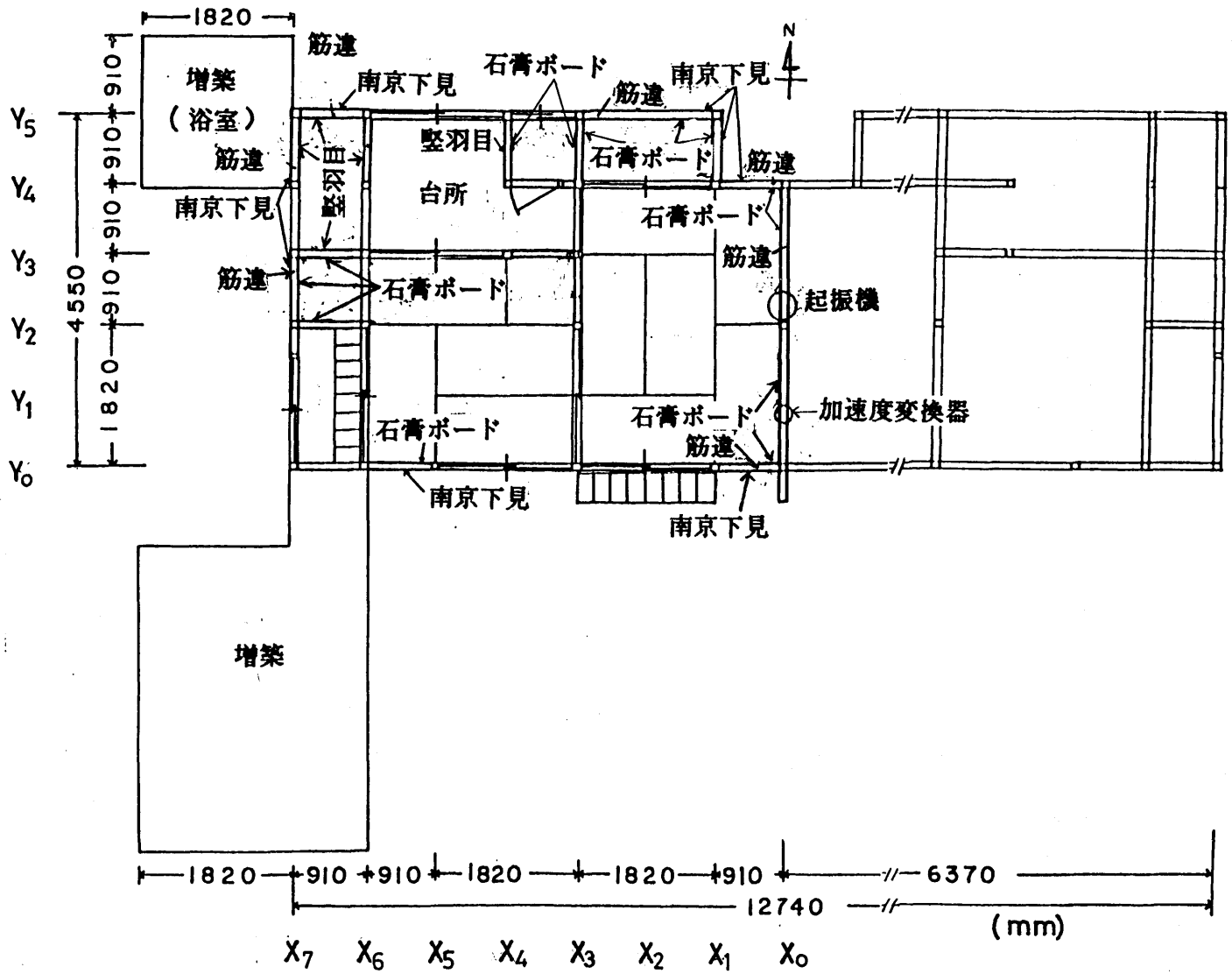


図 - 7 - 2 - 2 試験建物平面図 (B・C・D棟)

表一 7-2-1 振動試験結果 (A棟)

試験 No.	内 容	除去壁長 (m m)	振 幅 (m m p p)	固有振動数 (H z)	減衰定数	パネ定数 (k/m) (s e c ⁻²)	パネ定数 の差
1	既存のまま		0.090	7.35	0.025	2133	
2	ボーチを除去		0.075	7.58	0.022	2268	135
3	石膏ボード除去 (X ₅)	2510	0.078	7.46	0.027	2197	71
4	台所石膏ボード・漆喰壁除去 (X ₅)	2510	0.085	7.39	0.023	2156	41
5	石膏ボード除去 (X ₁)	2040	0.086	7.36	0.040	2139	17
6	モルタル・漆喰除去 (X ₃)	2440	0.095	7.14	0.029	2013	126
7	モルタル・漆喰除去 (X ₂)	2440	0.102	7.01	0.032	1940	73
8	モルタル下地板・木摺除去 (X ₂ , X ₃)	4880	0.100	6.84	0.033	1847	93
9	合板・石膏ボード除去 (X ₁ , X ₂ , X ₃ , X ₄)	6280	0.112	6.17	0.030	1503	344
10	石膏ボード除去 (X ₀ , X ₆)	4000	0.110	5.94	0.030	1393	110
11	石膏ボード除去 (X ₀ , X ₆)	4800	0.112	5.70	0.027	1283	110
12	外壁モルタル除去 (X ₀ , X ₆)	14900	0.105	2.64	0.023	275	1008

表-7-2-2 振動試験結果 (B棟)

試験 No.	内容 (除去壁長: P)				振幅 (mmPP)	固有振動数 (Hz)	減衰定数	パネ定数 (k/m) (sec ⁻²)	パネ定数 の差
	石膏ボード	筋違い	南京下見板	堅羽目 小壁					
1			既存のまま		0.075	5.81	0.039	1333	
2	4 (X ₀)				0.111	5.68	0.038	1274	59
3	4 (X ₀)				0.122	6.60	0.057	1238	36
4				8 (X ₀)	0.145	5.56	0.042	1220	18
5		2 (X ₀)			0.179	5.32	0.044	1117	103
6	4 (X ₃)				0.178	5.03	0.054	999	118
7			増築部除去		0.172	5.01	0.038	991	8
8			増築部除去		0.145	5.00	0.052	987	4
9			直交壁の内装ボード (Y ₀ , Y ₄ , X ₀ , X ₁)		0.145	5.00	0.065	987	0
10				1 2 (X ₃ , X ₆)	0.148	4.73	0.058	883	104
11	2 (X ₁)		2 (X ₁)		0.152	4.68	0.024	865	18
12		2 (X ₁)			0.133	4.56	0.070	821	44
13			2 (X ₇) 2 (X ₇)		0.117	4.46	0.030	785	36
14	2 (X ₇)	4 (X ₇)	2 (X ₇)		0.148	3.57	0.039	503	282
15	4 (X ₃)				0.128	3.39	0.062	454	49
16			小屋火打ち梁除去		0.141	3.23	0.030	412	42

表-7-2-2 振動試験結果 (C・D棟)

試験 No.	内容 (除去壁長: P)				振幅 (mmp)	固有振動数 (Hz)	減衰定数	パネ定数 (k/m) (sec ⁻²)	パネ定数 の差
	石膏ボード	筋違い	南京下見板	堅羽目 小 壁					
1			既存のまま						
2	2 (X ₇)		2 (X ₇)	2 (X ₇)	0.066	5.62	0.053	1247	
3	2 (X ₇)				0.061	5.30	0.034	1109	138
4		2 (X ₇)	2 (X ₇)		0.058	5.17	0.047	1055	54
5				4 2	0.066	4.85	0.046	929	126
6	1 0 (X ₃ , X ₄)			(X ₀ , X ₃ , X ₄ , X ₆ , X ₇)	0.081	4.10	0.057	664	265
7	2	2	2 (X ₁)	6 (X ₄ , X ₆)	0.083	3.47	0.033	475	189
8	8 (X ₀)				0.083	2.78	0.044	305	170
9		2 (X ₀)			0.166	2.60	0.037	267	38
1			既存のまま		0.228	1.76	0.028	122	145
2			柱脚切断 (X ₇)		0.095	5.60	0.023	1238	
3			柱脚切断 (X ₁)		0.110	5.55	0.039	1216	22
4			柱脚切断 (X ₀)		0.107	5.48	0.049	1186	30
						5.41	0.046	1155	31

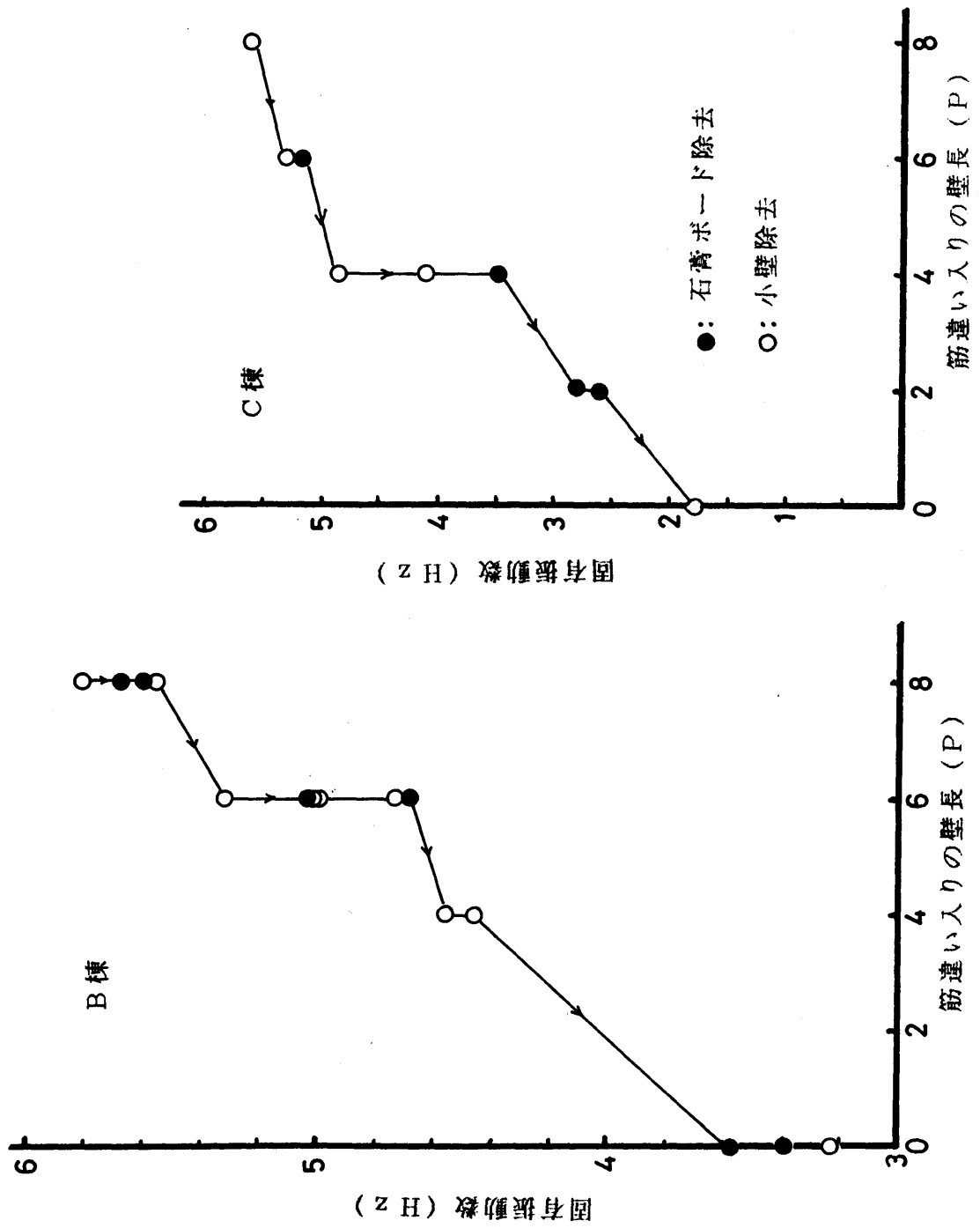


図-7-2-3 耐力要素(石膏ボードや小壁)の除去と固有振動数の変化

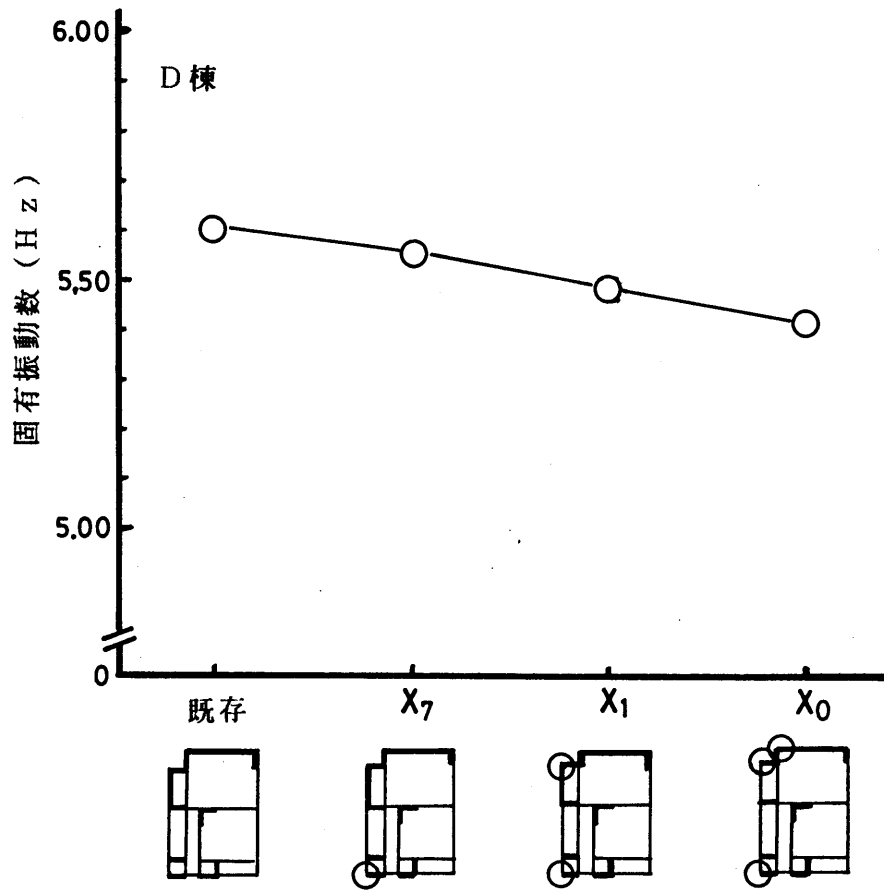


図 - 7 - 2 - 4 柱脚切断による固有振動数の変化

第3節 本章のまとめ

木質構造による住宅の建物としての劣化度を評価する方法として、従来から、被害部分の目視観察や機器等を用いた材料レベルでの評価がなされているが、劣化が建物全体の構造耐力にどのような影響をもつものか評価する確立した方法はないのが現状である。一方、木質構造は、外力に対して非線形的な変形を示すことから正確に保有耐力を求めるには、建物に作用すると予測される地震力や風力あるいはそれらに相当する変形を与えなければならない。しかし、この方法では建物に損傷等を与える可能性が高いことまた装置が大掛かりになるなど現実的ではない。

そこで、小型起振機によって建物に損傷を与えない程度の小振動を建物に加えることによって、建物の構造耐力の低下を評価することを考え、劣化を想定したモデル試験および既存の建物における試験を実施しその有効性を検討した。

その結果、小型起振機の加振方向における建物の各構成要素（内外装材料、垂壁、腰壁等）が、建物全体の剛性に占める割合が明らかとなった。例えば、外装がラスモルタル塗りの場合、建物全体の剛性に占める割合は、建物の剛性の約 $1/2$ であり非常に効果が高く、また、内装に張られた石膏ボードの効果は、軸組だけの場合よりもかなり高いことが認められた。

一方、加振方向と直交した壁等の影響は認められず、小型起振機を用いて保有耐力の評価を行う場合は、加振方向を変化させ、各々の方向において保有耐力を評価する必要があることが認められた。

さらに、柱が劣化した場合を想定し、柱を切断した試験では、内装に張られた石膏ボードを除去した場合より固有振動数の変化が少なく、面材等が健全であれば、水平力（小振動程度）に対する著しい影響は認められないことが明らかとなった。

以上のようなことから、部材の劣化等を含めた建物全体としての保有耐力、すなわち建物そのものの長期耐力性能を、小型起振機を用いることによって評価できることが認められた。しかしながら、本方法では建物全体の水平方向の保有耐力の評価は可能であるが、鉛直方向の耐力低下や建物のどの部位が劣化したかを判定することには、現状ではデータ等が不足しており評価できないことも予測される。したがって、建物の長期耐力性能評価に際しては、目視観察等を併用することが必要と考えられる。

第8章 木質構造における部材および接合部の長期耐力性能とその評価法の提案

前章までに木質構造における部材および接合部の長期使用における耐力性能の低下に関する定性、定量的な傾向を、水分（湿度）、熱（温度）、応力（荷重）の各作用因子別に明らかにした。それらの結果をみると、作用条件によって材料や接合部の性能低下の状況が異なることから、建築材料、部材としての合理的な材料の選択や設計を行うためには、材料や部材の使用区分を明確に行い作用する条件を分類することが重要であることが認められた。とくに、この作用条件は長期間における性能の確保あるいは耐力低下等の評価を行う場合の基本であり、重要度が極めて高いことが明らかとなった。

本章では、本研究で得られた木質部材および接合部の特性を基礎とした長期耐力性能評価体系についての基本的な考え方をまとめてみることにする。

長期耐力性能に関しては建築基準法施行令および関連告示に示されている木材および集成材の長期許容応力度があるが、他の木質材料や複合化された部材にそのまま適用することには無理があり、独自の許容応力度あるいは許容耐力が必要である。一般に、それらの許容応力度の算定には安全率が含まれているため、それによる設計は、最低限の安全性の確保を基本にしている。したがって通常の場合、材料や部材の選択で許容応力度や耐力が臨界点となるのは稀で、またそれは好ましい形ではなく、むしろ居住性や施工、維持管理に関連する変形や耐力の低下の方が問題になると考えた方が適切である。

本研究の長期耐力性能の評価はすでに述べたようにクリープ変形や耐力の低下を使用条件との関連からみており、長期許容応力度そのものの算定を意図したものではないが、その基本的な考え方は許容応力度にも適用が可能であると考えられる。

第1節 劣化環境条件の区分

木質材料・部材の長期使用における特性に及ぼす主要な条件を温度・湿度（水分）、応力に分類し、これらの因子の作用レベル（条件）を建物の各部位の環境条件との関連をもとに次のように区分を行う。

1-1 温度・湿度条件の区分

温度・湿度条件の区分を表-8-1-1に示した。この区分は第2章で提案した区分にもとずいている。

湿度（水分）は5区分になっているが、区分H Iは、関係湿度が90%以上であり、このような常時湿潤密閉状態ではわずかな温度降下でも結露を生じることがあり、それによって吸水を伴うことが一般的であることから、H Iには水分に満たされ、材料等が吸水状態になる場合も含めている。区分H IIは、比較的湿度の変動があり、材料等は湿気の吸着が主体であり、容易には区分Iのような吸水状態にはならない条件を想定している。区分H Vは過乾燥状態との繰返しを想定しているが、温度の区分T Iの区分の条件下で実現される場合が多いと考えられる。

温度区分は、T I、T II、T IIIの3区分であり、前述した湿度区分との関連でみるならば区分T Iは関係湿度が高い（部材等の含水率が高い）湿度区分H III以上の場合には、木材の軟化や、Mechano-sorptive変形の回復等に関係する区分である。一方、関係湿度が低い場合には、区分T Iは、湿度区分H Vに示した過乾燥状態を想定したものであり、区分T II、T IIIは温度の作用条件としては同一と見てよい。なお、100℃以上の高温の場合は熱分解の問題として考える。また、超低温あるいは部材等の含水率が高い場合の凍結による組織の破壊等については別途検討すべきものとする。

提案した温度・湿度条件区分は各種の木質材料・部材の共通的な特性をもとに定めたもので、それに対応する低減比は各々の材料や部材等によって固有なものが存在し得ると考えられる。すなわち、これらの条件下で、さらに1-2で後述する応力条件の区分も考慮した性能評価試験を実施することにより、性能の低減比を求めておけば、木質材料や部材の使用条件を考慮したそれらの材質的な位置づけが示されることになる。

性能を評価するための試験で環境条件以外に重要なもう一つの因子は、諸条件が作用する時間もしくは繰返しの回数である。これらは変数として与えておく必要があり、この時間や回数は使用環境や要求条件から最終的に決定されるものと考えた方が妥当である。

内容を補足するために具体例を示せば、材料等が吸水状態の区分H Iで使用される場合には、性能評価試験の温度条件は使用される環境条件と対応させて温度区分T I、T II、T IIIの中から選択すればよいことになる。また、湿度区分においては、区分H I～IIIまでは、温度との関連を考慮し、湿度区分H IVでは温度は考慮しなくてもよい。さらに区分H Vは区分T Iの処理温度100℃と湿度区分H IV 80%以下の繰返しで対応させればよいことになる。

1 - 2 応力条件の区分

応力条件の区分を表-8-1-1に示した。この区分は第6章で提案した区分にもとづいている。これらの区分はそれが作用する時間との組合せによる型式で区分されている。また、荷重の大きさは材料等が使用される条件によって適宜設定されるものであり、ここでは、作用条件のみを区分した。現在の長期および短期に対する許容応力度は時間区分が必ずしも明確ではなく、外力に対する割切った対応となっているが、クリープ変形を対照とした場合には時間が軸となるため、不明確な扱いは妥当ではないことになる。とくに区分SⅢ（SⅣもこれに含まれる場合もある）は重要で、SⅠとSⅡの区分のみでは、ある場合は厳しすぎ、あるいは緩すぎるということが生じがちで、現実とその不合理性は多く指摘されてきたところである。また区分SⅡと区分SⅢとの関係においても第6章で検討したように変形状が異なる。このことは、例えば、積雪地における小屋梁のたわみの算定等で現実的でないことなどに現われている。

提案した作用応力区分のうち区分SⅠとSⅣの繰返し応力は弾性挙動を示す範囲内では本質的には同じであると考えてよい。しかし釘接合部の繰返し試験で示したように塑性的要素の強いものには両者は根本的に異なるため区分してある。

区分SⅢとSⅣは応力の増減する点では同じであるが、区分SⅢは付加応力の作用する時間（荷重存続期間）が比較的長く、一定の荷重が常に作用している状態であることから区分SⅡから派生したものと考えてよい。一方、区分SⅣは応力の作用する間隔が比較的短く、応力が正負の交番となる場合も含めるものとする。

提案した作用応力区分に対する材料等の性能の評価値を定めるに当たって重要な因子は応力が作用する時間あるいは回数である。これは先の温度・湿度条件と同様に作用時間、回数を変数として捉え、最終的には材料等が使用され得る部位における外力条件との対応で決定すべきものである。すなわち、作用応力区分SⅡ、SⅢ、SⅣ等の作用条件下で材料等の性能を評価する場合には、適切な外力条件とくに材料等がある外力条件の作用する部位で使用されるであろう年数（想定耐用年数）と対応をなすことにより合理的な評価を行うことができる。

表-8-1-1 劣化環境条件の区分

劣化因子の分類	作用条件の区分	
湿度 (水分)	H I	水分 (液状) に満たされ, 吸水状態になる。 (相対湿度90%以上)
	H II	吸水状態と乾燥 (80%以下) が繰返される。
	H III	相対湿度: 80~90%
	H IV	相対湿度: 80%以下 (通常の大気の状態)
	H V	乾燥状態 (40%以下) が繰返される。
温度	T I	65℃以上 (乾燥状態)
	T II	40~65℃
	T III	-10~40℃
応力 (荷重*)	S I	短期間の荷重が作用する。
	S II	一定の荷重が存続して作用する。
	S III	一定の荷重が存続して作用し、さらに新たな荷重 が加わってある期間存続して作用する。
	S IV	繰返し荷重が作用する。

*: 荷重の大きさは、対象となる材料等の使用条件で異なる。

第2節 長期耐力性能の評価

第1節において、長期耐力性能を評価する際に必要な劣化環境条件の区分を行ったが、それらは、建築物を構成する材料・部材の長期耐力性能の評価において、評価試験等を行う際の前提となるものである。ここでは、劣化環境条件の区分を、部位毎の環境区分にわけ提案を行う。さらに、これらの環境区分を受けて、部位毎に実施されるべき性能評価試験方法等についても提案を行う。

2-1 部位別環境区分

部位別環境区分は、性能試験の条件設定に関係するもので、人為によらない劣化要因のほかに、設計・施工上あるいは、使用者の維持管理状況によって生じる劣化要因も含めるが、木質材料・部材の長期耐力性能評価上の基本となる湿度（水分）、温度を中心として区分した。したがって、この環境区分に基づいて性能試験等を実施した場合は、各部位中に存在する材料や部材の性能値が環境区分下で、使用期間内にどの程度性能が低下（低減）するのかあるいは支障がないものかどうかを評価することになる。

表-8-2-1（1）、（2）に部位別環境区分を示した。

対象とした部位は、木質構造の長期耐力性能評価上重要であると思われる外壁、内壁、床組、小屋組（屋根も含む）とした。

環境の区分は、前節における温度・湿度条件の区分をもとに行った。

表に示した各部位における環境区分が、実際の使用環境と照して、各部位毎にどのような原因によって生ずる可能性があるのかを第2章の結果と照し合せてみると次のようになる。

（1）外壁、内壁

内外壁の湿度（水分）の区分をみると、区分HⅠは、吸水状態や関係湿度が90%以上の場合であるが、これは a. 水まわり等から漏水がある、b. 壁内で結露のおそれがある、c. 壁内の通気が悪い、d. 土壌面に近い場合に部材等が吸水を行う条件のときが考えられる。

区分HⅡは、吸水と乾燥状態（80%以下）が繰返される場合で、a. 開口部まわりからの雨水の浸入、b. 外装壁面の亀裂からの雨水の浸入などの場合が考えられる。

区分HⅢは、関係湿度が80%～90%の範囲になる場合で、a. 内部が密閉した部屋、b. 吸水性の高い外装材料が使用されている、c. 湿度発生が多い部屋などがある場

合が考えられる。

区分HⅣは関係湿度80%以下で通常の大気の状態であり、この状態は前述したような原因となる要因がなくともなりうる条件である。

区分HⅤは過乾燥状態（40%以下）になる場合で、特殊な建築物や外装仕上げの場合である。

一方、温度区分についてみると、外壁の場合は区分TⅠ、TⅡは日照の影響を受ける仕上げ材料の場合を想定したものである。したがって、内壁においては、区分TⅢの区分だけとなる。また内装においては、区分TⅠやTⅡは特殊な場合と考えられるため温度区分からは除外した。

（2）床組

床組の場合の湿度区分は4区分になるが、区分HⅠは a. 水まわりからの漏水 b. 床組の結露 c. 床下通気の不良 d. 床下土壌が湿潤状態等の時に水分（湿気）が滞留する場合である。

区分HⅡは、a. 水まわりからの漏水 b. 床組の軽度な結露の場合などにより、部材等が吸水と乾燥を繰り返す場合である。

区分HⅢは、床下換気が一応満たされている状態の場合である。

区分HⅣは、床下換気は十分であり床下の防湿もなされている状態の場合で、床下の湿度状態より通常の大気の状態に相当すると考えられる場合である。

一方、床組の温度区分は、外壁と異なり日照等の影響もないことから区分TⅢで十分と考えられる。

（3）小屋組（屋根）

小屋組の場合の湿度区分は5区分になるが、区分HⅠは a. 小屋組における結露 b. 小屋裏換気不良 c. 屋根面からの雨もりなどの場合が考えられる。

区分HⅡは、 a. 屋根面からの雨もり b. 小屋組における結露などによって生じた水分によって部材が吸水や乾燥を繰り返す場合である。

区分HⅢは、a. 小屋組内における換気がなく密閉されている b. 湿度発生の多い室が階下にある場合などが考えられる。

区分HⅣは、通常の大気の状態であり、小屋組内の換気が十分な場合はこの状態になると考えられる。

区分Vは、屋根下地材の直下においては、既往の文献から温度が高温（区分TⅠ）になる可能性もあることから、過乾燥状態になることも考えられる。

一方、小屋組みの温度区分についてみると、屋根下地材や、屋根葺材の種類によ

表 - 8 - 2 - 1 (1) 部 位 別 環 境 区 分

部位	環 境 区 分		
	湿 分	水 分	
外壁	H I	水分に満たされ吸水状態になる。 (関係湿度 90%以上で常時湿潤も含む)	T I 65℃以上
	H II	吸水状態と乾燥状態 (80% 以下) が繰り返される。	T II 40~65℃
	H III	関係湿度 80~90%	T III -10~40℃
	H IV	関係湿度 80% 以下 (通常の大気状態)	
	H V	過乾燥状態 (40% 以下) が繰り返される。	
内壁	H I	外壁に同じ。	T III (T I, T II は特殊な場合)
	H V		

表 - 8 - 2 - 1 (2) 部 位 別 環 境 区 分

部位	環 境 区 分		
	湿 分	水 分	
床組	H I	吸水	T III -10~40℃
	H II	吸水-乾燥	
	H III	80% ~90%	
	H IV	80% 以下	
屋根 小屋組	H I	吸水	T I 65℃以上
	H II	吸水-乾燥	T II 40~65℃
	H III	80% ~90%	T III -10~40℃
	H IV	80% 以下	
	H V	過乾燥	

って異なる場合が考えられるためT IとT IIに区分した。既往の文献によると屋根下地材の表面における最高温度は屋根が日本瓦の場合、50℃、コロニアル瓦（石綿スレート）で65℃、亜鉛鉄板で下面に断熱材（厚さ12mmのインシュレーション）がある場合で55℃という測定結果が得られている。

以上のように、部位別の劣化環境区分が実際に想定される劣化要因との対応で考えることができる。

2-2 部位別長期耐力性能の評価

長期耐力性能の評価に関しては、使用環境条件を想定した性能試験やばくろ試験等を実施し、材料や部材の長期耐力性能を評価する方法と実際に対象とする建物において性能試験や劣化外力の計測を直接行う方法等が考えられる。

前者は、前項で提案した環境区分に対応した性能試験等を実施することにより評価する方法（例えば、第4、5、6章）であり、後者は、建物の構造耐力性能等を直接判定する方法（例えば、第7章）や部位別の環境条件である温度や湿度を直接計測する方法（第2章）等が考えられる。

2-1項で提案した部位ごとの環境区分に対応した長期耐力性能の評価法は、表-8-2-2(1)(2)に示したようになる。この表は、環境区分と応力条件の組合せからなっており、各々の性能試験において、環境や応力を対応させることによって性能試験を実施し、評価する方法である。なお、環境や応力条件の作用時間は、材料や部材の想定耐用年数(t)あるいは応力（風圧力や地震力、人間による歩行、固定荷重・積載荷重）の作用時間や回数等となる。また、作用時間に関しては、長期になるため、外挿法によって推定することが前提となる。

例えば、床部材のクリープ性能を評価する場合、その部材が使用される環境区分に対応させて、湿度・温度を設定する。通常の床組を想定した場合、湿度区分HⅢ、温度区分TⅢとなろう。また、作用する応力条件は、使用状態等を考慮して一定荷重とする。しかし、実際に数十年もクリープを実施することは不可能であることから、外挿法（例えば、第1節で扱った応力条件の区分）によって評価することになる。

具体的には、木質材料・部材の使用環境条件下における長期の変形を考慮した材質を設定することになる。例えば、パーティクルボードを床下張材として用いる場合と複合梁（合板ボックスビーム）を床梁として用いる場合について以下に示す。

(1) パーティクルボードの場合

パーティクルボードを床下張材として、使用する際の長期使用におけるクリープ変形を考慮した材料の選定について検討する。

床下張材に作用する長期外力は、積載荷重（180kg/m²）と固定荷重（パーティクルボードの自重：20kg/m²）を採用し、長期設計荷重として200kg/m²とする。次にこれらの荷重が厚さ t cm、幅 b cm、スパン l cmの下張材に加わるとすればその荷重は、 $w = 0.02b \text{ kg/cm}$ となる。一方、床根太間隔 l cmに荷重 w が作用したときに最大たわみを $l/150$ 以下に保つ条件でボードが保持すべきヤング係数 (E) を計算する（単純支持）と、次式のようになる。

$$\delta_0 = \frac{5 w l^4}{384 E I} \leq \frac{l}{150} \quad \text{----- (1)}$$

$$E \geq \frac{0.47 l^3}{t^3} \quad \text{----- (2)}$$

次に、長期におけるパーティクルボードのクリープ変形 $\delta(t)$ は、第6章第1節の結果から、初期たわみ δ_0 に対して $\delta(t) / \delta_0 = (1 + a t^N)$ 倍進行することが認められたことから、長期におけるクリープたわみを考慮したパーティクルボードの変形に関する関係式は、次式のようになる。

$$E \geq \frac{0.47 (1 + a t^N) l^3}{t^3} \quad \text{----- (3)}$$

したがって、(3)式を用いることで、使用環境、使用年数およびボード厚さやスパン、さらに使用環境条件を想定したクリープ試験から求まる材料の特性値 (a, N) が明らかになっていれば、長期におけるクリープたわみを考慮した床下張材に必要なパーティクルボードのヤング係数が求まる。

例えば、第6章第1節の表-6-2-1で示したボードで厚さ15mm、環境条件は、一般空調の条件（環境区分では、湿度区分HⅢ、温度区分TⅢ）における材料特性値 (a = 0.09, N = 0.36) を使い、スパン l = 45cmで、20年間 (7300日) 使用することを想定した場合に床下張材として必要なパーティクルボードのヤング係数は、(4)式を用いて、 $E \geq 41 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ となる。

ここにおいて、材料の特性値を求めることが必要となり、これを求めるためには、第2節の表-8-2-(2)に示した環境条件区分下での各種木質材料の特性値を予め把握しておくことが重要となる。

(2) 木質複合梁（合板ボックスビーム）の場合

合板ボックスビームを、床梁に使用する時の長期使用におけるクリープ変形を考慮した材料の選定について検討する。

床梁の長期外力は、積載荷重130kg/m²と固定荷重 (105kg/m²) で235kg/m²となり、建物の幅を L m とすると、長期設計荷重 (w) は、次のようになる。

$$w = 235 \times (L/2) + \text{床梁自重} (10.9) = (117.5L + 10.9) \times 10^{-2} \text{kg/cm}$$

このような長期外力 (w) が作用したときに最大たわみを $l/300$ 以下に保つ条件で、床梁が保持すべき $E I$ を計算 (単純支持) すると次式のようなになる。

$$\delta_0 = \frac{5 w l^4}{384 E I} \leq \frac{l}{300} \text{----- (4)}$$

$$E I \geq 3.91 \times 10^{-2} (117.5L + 10.9) l^3 \text{----- (5)}$$

次に、長期における床梁のクリープ変形 $\delta(t)$ は、第6章第2節の結果から初期たわみ δ_0 に対して $\delta(t) / \delta_0 = (1 + a t^N)$ 倍進行することが認められたことから長期におけるクリープたわみを考慮した床梁の変形に関する関係式は、

$$E I \geq 3.91 \times 10^{-2} \cdot (117.5L + 10.9) \cdot (1 + a t^N) \text{----- (6)}$$

となり、ここで建物の幅、使用年数および梁のスパン、さらに使用環境条件 (表-8-2-(2)) を想定したクリープ試験から求まる材料の特性値 (a, N) が明らかになっていれば、床梁として必要な曲げ剛性については、長期におけるクリープたわみを考慮した値が求まることになる。

例えば、第6章第2節で示した合板ボックスビーム ($l = 4.55\text{m}$) について使用環境条件 (湿度区分 H III、温度区分 T III) を考慮した材料の特性値 ($a = 0.094, N = 0.31$) を用い、建物の幅 ($L = 4.55\text{m}$)、梁のスパン ($l = 4.55\text{m}$) で20年間 ($t = 7300$ 日) 使用するとした場合の長期におけるクリープたわみを考慮した合板ボックスビームの $E I$ は、前記の各々の値を (3) 式に代入することによって、
 $E I \geq 4.97 \times 10^9 \text{kg/cm}^2$ が求まる。

以上のように、木質材料や部材の長期使用における変形を考慮した部材の設計や選択を行う場合には、使用される材料や部材の使用環境 (表-8-2-(1), (2)) を想定した性能、とくに変形に関しては、材料の特性値 (a, N) を予め把握しておくことが必要となる。

表-8-2-2 (1) 長期使用における部位別劣化作用因子とその組合せ

部位	性能	環境区分		応力		性能試験における各因子の扱い方 (換算方法)
		湿度	温度	作用時間 (頻度)	大きさ	
外壁	面内せん断 面外曲げ	HI	TI S TIII	T (耐用年数)	P 風圧力 地震力	NP
		HIII HIV	TI (耐用年数)	P	NP	
						同上
内壁	面内せん断	上記に準じる				
		(外壁に準じるが温度条件異なる) TIII				

表-8-2-2 (2) 長期使用における部位別劣化作用因子とその組み合わせ

部位	性能	環境区分		応力		性能試験における各因子の扱い方 (換算方法)
		湿度	温度	作用時間 (頻度)	大きさ	
床	鉛直曲げ (繰返し)	H I H III H IV H II	T III	T Nw, Nd	P (人間歩行等)	Np
		H I H III, IV H II	T III	T Nw, Nd	Pp (一定荷重)	Te
	面内剛性	上記に準じる				
	構成材料	上記に準じる				
屋根 小屋組	床に準じる	H III, H IV T I ~ T III (H I, H II は特準)				

2-3 建物全体としての長期耐力性能の評価

2-2においては、部位別の長期耐力性能の評価方法の例を述べたが、長期耐力性能を評価するもう一つの方法として、直接対象とする建物において、性能の低下を評価することが考えられる。この方法は、本論文の第2章で述べた建物各部位の温度・湿度条件の計測や第7章で述べた建物全体の構造耐力を評価する方法に対応する。

前者については、第3章で述べた成果である腐朽菌の成育条件（温度15℃かつ部材含水率20%以上）と地域区分を、計測した温度・湿度条件に対応させ、その環境において、腐朽菌が繁殖し部材等の劣化を生ずるかどうかを判定する。

後者は、建物の各部の状態がどのようであれ、建物全体として必要な耐震性（保有耐力）の判定を行うもので、小型起振機を用い、これを対象とする建物中央の小屋梁等に固定し、建物の固有周期（固有振動数）を求め、これから保有耐力を評価する方法である。なお、この方法に関する基礎的な研究は第7章において検討し、その適用性については認められている。

保有耐力の評価方法であるが、建物の固有周期とせん断耐力との関係が現状においては、データ等の蓄積が少なく明確なものはないが、既往の研究において、建物の水平震度（ P/W ）と固有周期（ T ）との関係が導かれている文献があり、これによると建物¹¹⁹にラスモルタル塗り等（しっくい等の土塗り壁も含める）がほどこされている場合は、 $P/W = 0.0813/T^2$ 、ラスモルタル塗り以外の内外装仕上材が施されている場合は、 $P/W = 0.0187/T^2$ という関係が示されている。この関係を用い、計測した固有周期から水平震度を求め、さらに、この値を地震地域係数（ Z ）で除すことにより保有耐力の評価を行う。この際の評価としては、除した値が、0.45以上の場合は健全、0.45～0.3の場合は、建物のどこかに劣化した部分の存在する可能性がある。したがって建物の総合点検が必要となる。0.3以下の場合は、劣化した部分を補修・交換する必要があるということになる。

以上のように、木質材料や部材さらに建物の長期耐力性能を評価するには、温度、湿度、応力、時間等の作用条件を区分することが重要であり、それらの作用条件の区分は、建物各部位の環境条件や要求条件と対応させることによって、より適切な評価が可能になるものと考えられる。

第3節 本章のまとめ

前章までの研究成果から木質構造における部材および接合部の長期間における性能の確保あるいは耐力低下等の長期耐力性能の評価には、水分（湿度）、熱（温度）、応力（荷重）等の作用条件が重要であることが明らかとなった。

そこで本章においては、長期耐力性能評価の基本的な体系を提案することを目的に、材料・部材および接合部の特性に影響を及ぼす劣化環境条件である温度、湿度、応力の区分を提案した。さらに、これら環境区分をもとに、木質構造の長期耐力性能上重要であると考えられる部位（内外壁、床組、小屋組・屋根）毎の環境区分を提案した。次に、部位別環境区分をもとに、材料等が、ある部位に使用される場合に要求される性能を満足するか否かを評価するための部位別の劣化作用因子の組合せに関する提案を行った。

劣化環境条件は、表-8-1-1に示したように湿度（水分）が5区分、温度が3区分、応力（荷重）が4区分となっている。これらの区分は、木質材料や部材の共通的な特性をもとに定めたものであり、それらを建築材料や部材として使用する際に実施されるであろう性能試験等の環境条件を示したものである。

部位別環境区分は、表-8-2-1に示したように、木質材料や部材を建築材料や部材として使用する場合に実施されるであろう性能試験等を行う際の部位別の環境条件を示したもので、劣化環境条件の中でも温度、湿度（水分）を中心とした区分である。

部位別の劣化作用因子の組合せは、表-8-2-2に示したように部位毎に実施されるであろう材料や部材の長期耐力性能を評価する際の環境区分および応力条件さらに性能試験の際の各因子の扱い方を示したもので、条件の設定に当たっては、対象となる部位に作用する環境条件の作用時間（頻度）および応力条件の大きさ・種類やそれらの作用時間（頻度）を考慮する必要があることを示した。また、試験や評価に際しては、可能なかぎり作用因子である温度・湿度の時間への換算、荷重の時間や繰返し回数への換算等を行うことが必要であることも示した。なお、これらの評価法の基本となるものは、木質材料や部材および接合部の長期耐力性能に著しい影響を与える湿度や温度および応力等の作用条件の区分である。

第9章 結 論

木造建築物の主要構造部を構成する材料や部材さらに構造形式は、著しく変化してきており、従来の製材品を主にした木構造とは異なり木質構造といった名称が一般化してきている。それらを材料面からみると、合板、パーティクルボード、集成材などの木質材料の使用が多くなり、構法面においても、木質系の工業化構法や枠組壁工法などが材料の変化とともに出現してきている。このような状況にあつて、主要構造部を構成する材料や部材および接合部の構造性能の評価は、流動的で複雑化してきている。一方、それらの評価をとりまく外的条件も著しく変化してきており、設計や施工面を合理化すると評価との間に矛盾を生ずることも多くなってきている。

このような背景をもとに木質構造の合理的な設計に対応し、かつ天然資源である木材等の将来に亘つての適正な使用法の裏づけとなる新たな評価体系とくに長期耐力性能の評価に関する体系の確立が強く望まれるようになってきている。

本論文は、木質構造において重要視されている木質材料や部材および接合部の構造面での合理的な使用法を明らかにすることを目的としたものであり、その基本的な考え方はそれらが使用される環境条件を明らかにし、その環境条件と木質材料や部材および接合部のクリープや耐力の低下（低減）など長期耐力性能に関連する特性にもとずいた劣化環境区分および長期耐力性能の評価に関する考え方を提案したものである。

以下に、本論文で得られた成果を総括して示す。

第2章では、木質構造による住宅における湿気（水蒸気・水分）の建物の各部位における状態を、温度・湿度条件として建物が建設されている地域の気象条件との関連から整理し、さらに、建物を構成している材料や部材が、環境条件下でどのような含水率状態にあるかを把握することにより、環境条件との関連から含水率の増加に影響を及ぼす要因について整理を行い、建物を構成している材料や部材の長期耐力性能を評価する際の劣化環境条件の区分を試みた。

提案した温度区分は3区分で①65℃以上。②65～40℃。③-10～40℃である。また、湿度（水分）の区分は5区分で①吸水状態（相対湿度90%以上）。②吸水状態と乾燥（相対湿度80%以下）が繰返される。③相対湿度が80～90%。④大気の状態（相対湿度80%以下）。⑤乾燥状態（相対湿度40%以下）である。

これらの区分は木質材料や部材および釘接合部のクリープ特性や耐力の低下などとの関連をふまえ第8章において劣化環境条件の区分として提案した。

第3章では、木質構造の長期耐力性能に関する要因の中でも、建物の構造耐力上の問題を生じやすい生物(的)劣化である腐朽をとりあげ、生育条件の中でも、個々の建物に共通な条件である建物の環境条件と腐朽との関連をモデル試験によって明らかにし、その結果をもとに腐朽の可能性に関する地域区分について検討した。

モデル試験の結果、建物内の環境における温度が15℃以上になる時間数の合計と腐朽量との間には高い相関があることが明らかとなった。さらに、この結果をもとに気温が15℃以上になる年間の時間数の合計と腐朽量との関係を用いて我が国における腐朽の可能性に関する地域区分図を作成した。この地域区分図は、北米で実施されている気象指数(クライメイトインデックス)の考え方を用いて求めた区分図と、その分布傾向においてさほど差がなく、本研究で検討した地域区分図が、我が国における木質構造の腐朽に関する地域別可能性を予測する上で有効であることが明らかとなった。

一方、第2章で実施した建物の各部位の温度・湿度の計測と本章で得られた結果(各部位の温度が15℃以上また木材の含水率が20%以上になる環境条件であるか否か)とを対応させることにより、実際に建設された建物の各部位における腐朽の発生を予測することが可能であり、第2章で実施した建物の各部位の環境条件の計測が、建物の長期耐力性能を評価する上で有効な手法であることが明らかとなった。

第4章では、木質構造の長期耐力性能に及ぼす影響が大きい壁部材について、その構造耐力の低下を生ずる生物劣化および釘接合部の耐力低下等を誘発する要因の中で、発生原因が構法(材料構成、気密性、施工性)や住い方の差異(室内の水蒸気を多発させる場合がある)、さらに建物が建設されている地域の気象条件などとも関連する壁内結露を取り上げ、それと壁体の仕様との関係について、モデル環境条件下での壁内結露試験を実施し検討した。

その結果、次のことが結論として得られた。

- (1) 中空パネルにおける試験結果から、壁内結露を誘発する壁内の湿度上昇を防ぐためには、防湿層を設けることまた外装下張材料には吸湿性の高い材料を用い、さらに外装仕上げには透湿性の高い材料を用いることが有効であることが明らかとなった。
- (2) 壁体の材料構成の違いによる結露性状について検討した結果から、防湿層の有無、断熱材の施工性の違い、外装仕上げ材料の種類と厚さおよび工法などが、壁内結露の発生に及ぼす影響の大きいことが明らかとなった。とくに、外装仕上げ材料については、ラスモルタル塗りのような湿式工法とサイディング張りのような乾式

工法における結露の発生状況の差異は明らかであり、サイディング張りのような乾式工法の場合は、湿式工法に比べ下張材の種類に関係なく、壁内結露の発生はほとんど認められず、結露に対しては有効な工法であることが明らかとなった。

- (3) 壁体内通気による結露性状について検討した結果、壁体内に冷気流(外気)を直接通気することは、外装仕上げや断熱材が施されていない中空パネルでは効果があるが、実際の壁体の仕様に近い状態では、壁体内での湿気の滞留を防ぐ効果は認められず、逆に壁体内の結露の発生を誘発する可能性のあることが明らかとなった。

以上のような結果から壁部材の長期耐力性能評価と壁内結露との関係をみると、壁体の材料構成とくに室内からの水蒸気を遮断する防湿層と外部へ水蒸気を排出するための外装下張り材や外装仕上げ材料などの透湿性や壁体の工法および通気性、施工性さらに屋外温度条件(建物の建設地域の環境条件)等の組合せが適切でない場合は壁内結露を生じ、それによって壁部材を構成している材料の含水率を増加させ、生物(的)劣化や釘接合部の耐力低下を誘発する可能性のあることが明らかとなった。したがって、壁部材の長期耐力性能を評価する際には、壁体仕様の違いによる壁内結露発生の可能性について検討する必要があるものと考えられる。

第5章では、木質構造による建物の長期耐力性能をみた場合に、構成材料である木材や木質材料・部材などとともに評価上重要である釘接合部の長期耐力性能について、釘の腐食、釘接合部のせん断クリープ特性や繰返し荷重下における特性などを明らかにし、それをもとに釘接合部の長期耐力性能評価に関する基本的な考え方について検討した。その結果、次のことが結論として得られた。

- (1) 釘の腐食の実態調査から、接合部に用いられていた釘の腐食による釘径や重量の減少量は、釘そのものが単体で釘接合部と同一環境条件下におかれていた場合よりも著しく、被接合材料である木材等の含水率変化(床下環境条件による部材の高含水率化)が、釘の腐食に影響を与える大きな要因であることが明らかとなった。
- (2) 釘の腐食と耐力について検討した結果、釘の腐食に影響を与える要因は、釘接合部を構成している被接合材料の吸湿性や初期における含水率(生材等のような高含水率状態)であり、それに変化を生じさせる要因は釘接合部の置かれている環境条件(高湿度状態)であることが明らかとなった。

一方、高湿度環境条件下に置かれた釘接合部の引抜きやせん断耐力は、釘の腐食や被接合材料の種類(材質の差異)およびそれらの劣化の程度によってその傾向が異なり、引抜き耐力については、釘の腐食によって本試験の範囲内においては初期

値より大きくなる傾向が認められた。しかし長期間の使用においては、さらに釘の腐食が進行すると予測されるため耐力の低下を考慮する必要のあることが明らかとなった。また、せん断耐力は、主材と側材の相対変位が 0.4mm や 1.0mm 時の場合は、養生の初期において耐力は増加するがその後減少する傾向が認められた。最大耐力は、側材が吸湿性の高いパーティクルボードの場合は日数の経過とともに初期値より低下し、構造用合板の場合は初期値の近傍を推移するように変化することが認められた。このことは、釘の腐食や被接合材料の劣化を誘発する環境条件（とくに湿度条件）が、釘接合部の長期耐力性能を評価する上において重要であることを示すものである。

- (3) 釘接合部のクリープ特性について検討した結果、クリープ変形量は、釘や被接合材料の種類および荷重の大きさに依存するが、とくに荷重の大きさとの関係は直線関係ではなく最大耐力に対する比率が 30～40% で急激に変形が進行することが明らかとなった。

変形の時間的経緯をみると、負荷直後に瞬間変形に相当する変形が生じ、以後時間の経過とともにクリープが進行するが、その割合は荷重の大きいほど平衡値に達する時間が長い。また、クリープ変形後荷重を除荷した場合は、その除荷した荷重が 0 に近いと、かなりの量が回復するが、残存荷重がある場合には回復が少ない。さらに再負荷した場合は、その変形曲線は前に負荷した荷重による曲線をほぼ外挿した位置にくることが明らかとなった。

クリープ変形は環境条件のうち、とくに湿度の影響を受けやすく乾燥時（湿度低下時）には変形が進行し、吸湿時には変形が停止もしくは回復を生じる。その吸脱湿による変動幅はその時の湿度変動幅に依存し、荷重による変動よりも大きいこともある。したがって、被接合材料の含水率状態は極めて影響が大きく、生材と気乾材とではクリープ変形に大きな差異があることが明らかとなった。

- (4) 釘接合部の繰返し荷重下の特性について検討した結果、相対変位と繰返し回数および荷重比との関係は、荷重比が大きくなれば変位も大きくなり、クリープ変形と同様に荷重比 30% 付近で変位が急増する。また、釘接合部は、一度大きな変形を受けると、それ以後小さな荷重が作用しても、変形は回復しない。さらに釘の種類と側材の厚さとの関係では、釘径が大きいほどまた側材の厚さが厚くなるほど変位量は、小さくなる傾向を示すこと等が明らかとなった。

変位量と残留変位量との差である弾性域量と荷重比との関係から、側材の材質の違いが繰返し荷重を受ける釘接合部の変形に与える影響の大きいことが明らかとな

った。さらに繰返し試験後の残存耐力は、繰返し荷重を受ける前の静的加力試験の耐力とほとんど変わらず、本試験程度の繰返し回数では、耐力低下のないことが明らかとなった。

繰返し荷重下での変形の傾向は、クリープ変形の傾向と類似しているが、側材の材質の違いによって変形性状が異なっていることから、クリープ変形とは分けて考えた方がよい。

以上のような結果から、釘接合部の長期耐力性能評価に関する基本的な考え方についてみると次のようになる。

- a) ボード類の釘接合部のせん断変形を考えた場合、接合部としての挙動は許容耐力よりも許容変位を基本とした耐力評価にした方がよく、その場合許容変位の時間的な評価には、荷重作用時間との対応を基本にするのが合理的である。ただし、変位が重要ではなく、長時間経ても著しい破損に到らない耐力として許容耐力を定めるとすると δ_0 、 δ_{max} が急激に増加しはじめる点（最大耐力の30～40%）を一様の目安と考えてよく、その場合長期間経過した後の変位は初期変位の約2～3倍となる。
- b) 釘接合部が、それを構成している材料の水分変動（含水率）が著しくなるような環境条件（例えば、高湿度環境）にある場合には、釘の腐食やそれによる耐力の低減、さらに相対クリープの増加等を考慮する必要がある。
- c) 釘接合部のクリープ変形は釘の種類と側材の種類、厚さ等の影響を受けるが、本研究の範囲からは側材の厚さの2.5倍以上の釘長さの組合せにすると、安定した挙動を示し、その傾向は釘径が太い釘ほど安定性が高くなる。
- d) 釘接合部に繰返し荷重が作用する時は、その作用した最大荷重とその作用時間（回数・頻度）が変形を左右するため適正な外力設定が必要となる。

第6章では、木質構造においてその使用頻度が増加している他材料や接合部との組合せで用いられている木質材料や部材について、それらのクリープ特性をもとに部材として使用された場合の長期耐力性能の評価に関する基本的な考え方について検討し、さらに第5章および本章の結果をもとに、応力条件の区分を提案した。

その結果、次のことが結論として得られた。

- (1) パーティクルボード下地材について検討した結果、パーティクルボードのクリープ曲線は広範囲にわたって、 t^N 則が成り立ち、たわみの長期推定が可能となる。とくに時間の指数Nは同一材料ならば荷重によらず一定値を示し、気乾状態では0。

2~0.3に含まれ、0.25を代表値とみてよい。環境条件である湿度が高くなるとややこれより値が大きくなり、相対湿度80~90%では0.4程度になる。定数Aについては、本研究の結果からも応力比30%以下ではほぼ荷重に比例しているため、瞬間変形 δ と一定の関係がある。

パーティクルボードのクリープに及ぼす湿度の影響はかなり大きく、そのクリープ特性の評価は、使用部位の環境条件に対応する必要がある。湿度変動下では湿度の増加によってクリープが進行し、減少によってクリープが停止または回復する。この場合たわみの変動幅を荷重に換算するとかなりの応力の増減に相当し、変動幅は定常時のクリープの進行速度よりはるかに大きい。また、部材として使用された場合は釘打ちによって接合されるが、その効果はボードのクリープ曲線の傾向に直接的な影響は少ないが、湿度変動によるたわみを拘束する効果がある。一方、湿度変動にたいするクリープ量の変動については、標準状態（相対湿度65%）でのクリープ量と比較しても大きな差異は認められず、常時多湿の場合と大きな差異がある。したがって、高湿度状態の作用時間とクリープ量との関係が、長期耐力性能評価上の重要な要素となる。しかし、湿度変動がクリープの緩和へ及ぼす影響やその他、床張りなどに要求される諸条件から考慮して厚物のボードの方が使用上問題は少なくなると考えられる。

- (2) 木質複合梁について検討した結果、合板ボックスビームや7×7複合梁のクリープ曲線は、パーティクルボード下地材と同様に t^m 則が成り立ち、たわみの長期推定が可能である。また、木質複合梁のクリープは湿度の変動を受けやすいことが認められた。しかし、複合梁が使用される場所を考えると床梁（2階床）や小屋梁等が主であり、これらの部位における環境条件は、屋内条件であることからとくにクリープの評価上それを考慮する必要はないと考えられる。

一方、荷重条件については、使用される部位を考慮すると一定荷重（屋根荷重、床荷重）が継続して作用する場合や一定荷重（屋根荷重）に加えてある期間荷重（積雪荷重）が作用する場合等が考えられる。

木質複合梁の長期耐力性能の評価に関しては、第1節で述べた荷重の増減による変形型式（最大荷重存続型、重ね合せの原理型）を考慮することが必要であると考えられる。

- (3) 集成材梁部材および接合部のクリープについて検討した結果、これらのクリープ曲線は、パーティクルボード下地材や木質複合梁と同様に t^m 則が成り立ち、たわみの長期推定が可能である。

集成材の梁材および梁部材のクリープは、環境条件（屋外条件、定常条件）の違いによって著しい差異が認められることから、環境条件の区分（湿度条件）が重要となり、環境条件によっては、見掛け上の剛性の低下（低減）を考慮する必要がある。また、接合部を含んだ梁部材としてのクリープと、梁材だけの場合では変形量が異なることから、長期において変形が重要視される場合は、梁材だけのクリープ特性をもって梁部材のクリープを評価することは適切ではなく、たわみが増加することを考慮しておく必要がある。

（４）応力条件の区分

木質材料・部材および接合部の長期性能を評価する際に考慮されるべき応力（荷重）の作用条件の区分について、第５章および本章の検討結果をもとに区分を行った。その区分は、① 短期間の荷重が作用する（S I）。② 一定の荷重が作用する（S II）。③ 一定の荷重が作用し、さらに新たな荷重が加わってある期間存続して作用する（S III）。④ 繰返し荷重が作用する（S IV）場合の４区分とした。

とくにこの区分において、S IIとS IIIの区分は、木質材料や部材等の長期変形性能（クリープ）を評価する上で重要であり、区分S IIによる評価だけでは、材料の設計等において不合理であり、区分S IIIによる評価も考慮する必要があることが認められた。なお、長期における変形の評価に関しては、材料面からは、クリープに関する材料や部材の特性値（ a 、 N ）と荷重の増減による変形性状の型式（付加荷重存続型、最大荷重存続型、重ね合せの原理型）、さらに外力条件については、作用する荷重の存続期間とその大きさおよび材料等の想定耐用年数（使用期間）を明らかにしておくことが必要であることが認められた。

第７章では、材料や部材の劣化を建物全体としてみた場合に構造耐力（保有耐力）にどのような影響を及ぼすかを評価する方法として、小型起振機によって建物に損傷を与えない程度の小振動を建物に加え、建物の構造耐力の低下を評価することを考え、劣化を想定したモデル試験および既存の建物における試験を実施しその有効性を検討した。その結果、小型起振機の加振方向における建物の各構成要素（内外装材料、垂壁、腰壁等）が、建物全体の剛性に占める割合が明らかとなった。例えば、外装がラスモルタル塗りの場合、建物全体の剛性に占める割合は、建物の剛性の約 $1/2$ であり非常に効果が高く、また、内装に張られた石膏ボードの効果は、軸組だけの場合よりもかなり高いことが認められた。

一方、加振方向と直交した壁等の影響は認められず、小型起振機を用いて保有耐力の

評価を行う場合は、加振方向を変化させ、各々の方向において保有耐力を評価する必要があることが明らかとなった。

さらに、柱が劣化した場合を想定し、柱を切断した試験では、内装に張られた石膏ボードを除去した場合より固有振動数の変化が少なく、面材等が健全であれば、水平力（小振動程度）に対する著しい影響は認められないことが明らかとなった。

以上のようなことから、部材の劣化等を含めた建物全体としての保有耐力、すなわち建物そのものの長期耐力性能を、小型起振機を用いることによって評価できることが認められた。しかしながら、本方法では建物全体の水平方向の保有耐力の評価は可能であるが、鉛直方向の耐力低下や建物のどの部位が劣化したかを判定することには、現状ではデータ等が不足しており評価できないことも予測される。したがって、建物の長期耐力性能評価に際しては、目視観察等を併用することが必要と考えられる。

第8章では、前章までの研究成果をもとに、木質構造における部材および接合部の長期耐力性能の評価法を提案した。その基本的な考え方は、材料・部材および接合部の長期使用時の特性に影響を及ぼす劣化環境条件である温度、湿度、応力を区分し、さらに、これら環境区分をもとに、木質構造の長期耐力性能上重要であると考えられる部位（内外壁、床組、小屋組・屋根）毎の環境区分を提案した。次に、部位別環境区分をもとに、部位に要求される性能を評価するための部位別長期耐力性能の評価に関する提案を行った。

劣化環境条件は、湿度（水分）が5区分、温度が3区分、応力（荷重）が4区分となっている。これらの区分は、木質材料や部材の共通的な特性をもとに定めたものであり、それらを建築材料や部材として使用する際に実施されるであろう性能試験等の環境条件を示したものである。

部位別環境区分は、木質材料や部材を建築材料や部材として使用する場合に実施されるであろう性能試験等を行う際の部位別の環境条件を示したもので、劣化環境条件の中でも温度、湿度（水分）を中心とした区分である。

部位別長期耐力性能の評価は、部位毎に実施されるであろう材料や部材の長期耐力性能を評価する際の環境区分および応力条件さらに性能試験の際の各因子の扱い方等を示したもので、条件の設定に当たっては、対象となる部位に作用する環境条件の作用時間（頻度）および応力条件の大きさ・種類やそれらの作用時間（頻度）を考慮する必要があることを示した。また、試験や評価に際しては、可能なかぎり作用因子である温度・湿度の時間への換算、荷重の時間や繰返し回数への換算等を行うことが必要であることも示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：木構造設計・同解説、 1973年版
- 2) 木質構造研究会編：ティンバーエンジニアリング読本、オーム社 1985. 4
- 3) 日本建築学会材料施工委員会耐久性分科会：建築物に関する耐久性関連用語（案）
1981
- 4) 材料設計委員会：材料設計に関する研究、建設省建築研究所 1965. 3
- 5) 同上：材料設計に関する研究（第2報）、建設省建築研究所
1968. 3
- 6) 同上：材料設計に関する研究（第3報）、材料試験方法
建設省建築研究所 1970. 1
- 7) 同上：材料設計に関する研究（第4報）、物理的居住水準よりみた住宅
構成部材の要求性能に関する研究、建設省建築研究所 1970. 11
- 8) 同上：材料設計に関する研究（第5報）、
要求条件の選定とグレード決定システム、建設省建築研究所 1973. 3
- 9) 建設省総合技術開発プロジェクト：住宅性能総合評価システムの開発報告書
1978. 3
- 10) 木村幸一郎、篠原隆政：コンクリートブロック造アパートと木造住宅の室内気候
について 日本建築学会研究報告 11号（1950）、12号（1951）
- 11) 岡野健：木材と居住性－八王子試作住宅の調査から、木材工業、
Vol. 33-10、1978
- 12) 牧福美、則元京、山田正：内装材料と湿度調節、木材学会誌、
Vol. 24-11 1978
- 13) 木方洋二：気象による木材の含水率変化（その1）、
名古屋における木材の含水率の測定、木材工業、Vol. 35-6、1980
- 14) 牧福美、則元京、山田正：内装材料と湿度調節、木材学会誌、
Vol. 26-12 1980
- 15) 鈴木滋彦、原口博文、伊達宗宏：住宅の室内気候に関する研究、木材工業、
Vol. 29-3、1983
- 16) 祖父江信夫、加藤幸一、都築一雄、竹村富男：屋内外温湿度の回帰分析による
木造住宅の屋内気候の検討、材料、第32巻、359号、1983. 8

- 17) 東 修三：木質パネル壁住宅の温度調節機能、木材工業、V o l . 3 8 - 1 1、
1 9 8 3
- 18) 東京大学総合試験所建築研究室：床下の防湿に関する研究（第1報）
日本建築学会大会学術講演梗概集、1 9 5 3
- 19) 斎藤平蔵：床下防湿に関する研究（そのII）
日本建築学会論文報告集、N O . 5 4、1 9 5 6
- 20) 宮野秋彦：構造体内の温湿度分布とその変動について、
日本建築学会論文報告集、N O . 6 6、1 9 6 0 . 1 0
- 21) 山岸昭利：床下温湿度研究（I）
日本建築学会関東支部研究発表会、1 9 6 3 . 1
- 22) 前田敏男、中村泰人、池田哲朗：某プレハブ住宅における結露実態調査
日本建築学会論文報告集号外、1 9 6 7 . 1 0
- 23) 有馬孝禮、益田恵吾：屋外ばくろ試験場における枠組壁工法外壁の
内部温湿度の計測、建築研究所年報、1 9 7 6
- 24) 有馬孝禮：屋外ばくろ試験場における屋根温度の計測（その1）
建築研究所年報、1 9 7 8
- 25) 有馬孝禮、益田恵吾：屋外ばくろ試験場における枠組壁工法外壁の
内部温湿度の計測、建築研究所年報、1 9 7 8
- 26) 神山幸弘、肱黒弘三：木造住宅構造部材の耐久性に関する研究
その9、木張り張り壁体の温・湿度、風速、木材含水率の測定結果、
日本建築学会関東支部研究報告集、1 9 8 3 . 6
- 27) 新海悟郎：都市木造住宅の老朽化過程、建築研究所報告、1 9 5 7 . 3
- 28) R.C.DeGroot,H.E.Dickerhoof:Wood Deterioration Problems in Single-Family
Houses in Mobile Country Alabama.F.P.J. Vol.25.No.3.1975
- 29) Daniel L Cassens:Importance of Wood Deterioration in Single-family
Residences for East Baton Rounge Parish, Louisiana
F.P.J. Vol.28,No.8,1978
- 30) 布村昭夫：北海道における最近のナミダタケ問題
木材工業、V o l . 3 4 - 8、1 9 7 9
- 31) 田中俊成：在来工法木造住宅の床板と柱の含水率調査
木材工業、V o l . 3 5 - 1、1 9 8 0

- 43) 神山幸弘、肱黒弘三、小野泰：木造住宅構造部材の耐久性に関する研究
 その10、在来軸組モルタル塗り住宅、外壁部の劣化状況
 日本建築学会大会学術講演梗概集、1983、10
- 44) 神山幸弘：ナミダタケによる被害の調査(II)
 木材保存、24、1983、11
- 45) 鈴木憲太郎：日本海中部地震で被害を受けた
 住宅の木質部材の腐朽およびシロアリの被害
 木材保存、24、1983、11
- 46) 有馬孝禮、丸山則義：鉄筋コンクリート造集合住宅の木造床組の劣化および
 早村俊二、佐藤雅俊 室内湿度の実態調査
 木材工業、Vol. 38-11、1983
- 47) 田中俊成、鈴木憲太郎：建築後長期間経過した農家・寺院建築の部材含水率と
 腐朽・蟻害の実態調査
 木材保存、25、1984、7
- 48) 田中俊成、鈴木憲太郎：建築後2-35年経過したモルタル塗り
 木造住宅部材の含水率実測例
 日本建築学会大会学術講演梗概集、1984、10
- 49) 田中俊成：実態調査に基づいた木造住宅各部の部材含水率分布の事例
 木材工業、Vol. 39-12、1984
- 50) Michael O. Hunt: Mechanical Characteristics of 21-Years-Old Weathered
 Nailed Joints. F.P.J. Vol. 25, No. 7, 1975
- 51) 神山幸弘、吉野秀二郎：木造住宅における釘の腐食
 日本建築学会大会学術講演梗概集、1976、10
- 52) 神山幸弘、肱黒弘三、安祥司：くぎ接合の耐久性に関する研究
 その2、既存建物より採取した試験体によるくぎ一面せん断試験、
 日本建築学会関東支部研究報告集、1976、6
- 53) 神山幸弘、肱黒弘三、安祥司：くぎ接合の耐久性に関する研究
 既存建物より採取した試験体によるくぎ一面せん断試験、
 日本建築学会関東支部研究報告集、1979、9
- 54) 平川真人：木造住宅の耐久性研究 その1 くぎの腐食と耐力
 東京住宅技術研究所年報、5、1982、8

- 55) 今村浩人：鉄網モルタル壁における釘の劣化の経年変化
6 件の木造住宅家屋調査のまとめ
木材学会誌、V o l . 3 0 - 8、1 9 8 4
- 56) 今村浩人、大黒昭夫：下見板張り外壁の釘の劣化と周辺の植込みなどの関係
木口 実、高木 純 木材学会誌、V o l . 3 1 - 1、1 9 8 5
- 57) ASTM E 632-78:Standard Recommended Practice for Developing Short-term Accelerated Tests for Prediction of the Service Life of Building Components and Materials,1978
- 58) (財)日本建築センター：低層建築物の構造耐力の性能評定に関する内部規定
ビルディングレター、2月、1983
- 59) 有馬孝禮：最近のプロジェクトからみた木質建材の課題
木材工業、V o l . 3 3 - 9、1 9 7 8
- 60) 山井良三郎：木質構造材料の性能規格について
木材工業、V o l . 3 8 - 1 1、1 9 8 3
- 61) 大熊幹章：構造用パーティクルボードの製造と材質（第3報）
パーティクルボードの耐久性について
木材学会誌、V o l . 2 2 - 5、1 9 7 6
- 62) 林燦輝、大熊幹章：構造用パーティクルボードの耐久性（第1報）
繰返し荷重試験による耐水性の評価
木材学会誌、V o l . 2 3 - 1 2、1 9 7 7
- 63) 大熊幹章：構造用パーティクルボードの耐久性
木材工業、V o l . 3 3 - 6、1 9 7 8
- 64) 林燦輝、大熊幹章：構造用パーティクルボードの耐久性（第2報）
木材学会誌、V o l . 2 4 - 1 2、1 9 7 8
- 65) 大熊幹章、鴛海四郎、松岡昭四郎：住宅構成材料としての
パーティクルボードの耐久性
木材工業、V o l . 3 6 - 6、1 9 8 1
- 66) 大熊幹章：パーティクルボードの長期使用時の疲労による強度低下について
木材保存、26号、1985.1
- 67) 川村清一：菌類と建築用材腐朽について（1）、（2）、（3）、（4）、（5）
建築雑誌、31巻、361、362、363、365、367号
1917.1.2.3.5.7

- 68) 森徹、浅野猪久夫：木材の腐朽速度に関する研究（第1報）
日本建築学会研究報告、5号、1950. 1
- 69) 十代田三郎：木材の腐朽と防腐について
日本建築学会論文報告集、第31号、1950. 8
- 70) 浅野猪久夫：木造建築物の腐朽とその調査方法
建築雑誌、第19号、1952. 12
- 71) 佐藤州建、大野和男：角釘の振りモーメント値による木材強度の判定について
日本建築学会論文報告集、第63号、1959. 10
- 72) 上村博雄、斎藤昇：木材腐朽進行の定量化の試み
日本建築学会論文報告集、第63号、1959. 10
- 73) 神山幸弘：木造建築物の耐久計画（1）－（6）
建築士、28巻、319号－324号、1979
- 74) 松岡昭四郎：ボードの耐朽性試験方法
木材工業、Vol. 35-2、1980
- 75) 田中裕美、布施五郎：木材腐朽における微生物遷移と相互作用（第2報）
建築物の床下でのステークテストにみられる
真菌類の種類と出現頻度
木材学会誌、Vol. 27-12、1981
- 76) (財) 日本住宅・木材技術センター：耐久性向上の手引き（3）
丸善、1982. 3
- 77) 高橋旨象：合板および木質ボードの生物劣化
木材保存、26号、1985. 1
- 78) (財) 日本住宅・木材技術センター：性能標準・部材耐久性報告書
1985. 3
- 79) T.C. sheffer: A Climate Index for Estimating Potential for Decay in Wood Structures above Ground. F.P.J. Vol. 21, No. 10, 1971
- 80) 有馬孝禮、鴛海四郎：アメリカ・カナダにおける木造住宅の耐久性に関する研究
と現状（その1）、（その2）、（その3）
木材工業、Vol. 35-6、7、8、1980
- 81) 渡辺要：防寒構造、p 217-231、理工図書、1975
- 82) 渡辺要：建築計画原論（Ⅲ）、p 141-151、丸善、1976

- 83) 松本衛：壁体の吸湿性を考慮した結露防止設計 I
日本建築学会近畿支部研究報告集、1972. 6
- 84) 鈴木正治：木質パネルの透湿と結露
林業試験場研究報告第257号、1973. 10
- 85) 水畑雅行、武藤康正：内部結露面の挙動（第2報）
日本建築学会東海支部研究報告集 1975. 2
- 86) 水畑雅行：内部結露面の挙動（第4報）
日本建築学会大会学術講演梗概集 1975. 10
- 87) 土屋喬雄：室内温・湿度変動の長期予測に関する研究
建築研究報告、No. 93、1981
- 88) 水畑雅行：木材面への結露面の変動（第4報）
日本建築学会論文報告集号外、1967. 10
- 89) 水畑雅行：軟質繊維板の結露と水分分布
日本建築学会大会学術講演梗概集、1967. 10
- 90) J.E.Duff:Moisture Distribution in Wood-Frame Walls in winter
F.P.J,Vol.18,No.1,1968
- 91) (財)日本建築センター：枠組壁工法による住宅の壁等の断熱性能
に関する研究報告書、1976
- 92) 信田聡、大熊幹章：木質中空パネルにおける通気性と壁内環境（第1報）
とくに壁内水分環境改善のために
木材工業、Vol. 34-9、1979
- 93) 田中俊成、葉石猛夫：木質壁体内の温湿度環境と含水率
第31回日本木材学会大会、1981. 4
- 94) 麓 英彦、竹村富男：木質壁体の熱貫流抵抗と断面構成との関係
木材学会誌、Vol. 29-2、1983
- 95) 遠藤順一、菊池弘明：壁内結露について（その1）、（その2）
坂原弘也、飯田雅史 各種試験壁内木片含水率と温度変化
日本建築学会大会学術講演梗概集、1983. 10
- 96) L.O.Anderson and G.E.Sherwood:Condensation Problems in Your Houses ;
Prevention and Solution. USDA Forest Service Research Paper,FPL,1974
- 97) 岡本 敦：断熱材の施工効果、 建築生産、1974. 10

- 98) 矢野九州男：結露の悩み 建築生産、1974. 10
- 99) (財)日本住宅・木材技術センター：木造住宅断熱化の手引き
丸善、1981. 10
- 100) Gerald E.Sherwood, Anton Tenwolde:Moisture Movement and Control in
Light-Frame Structure. F.P.L,Vol.32,No.10,1982
- 101) 岡 樹生：結露性試験方法 建築技術、No. 227、1970. 7
- 102) 竹山謙三郎：木材並びに継手のクリープに関する予備的研究(第1報)
日本建築学会論文集、23号、1944. 4
- 103) 竹山謙三郎、久田俊彦、竹之内清次：木構造の長期強度について
日本建築学会論文集、39号、1944. 11
- 104) 杉山英男：木構造、p97-135、彰国社、1971. 3
- 105) 杉山英男：木材ばりの曲げクリープ性状の理論的考察(その1)
日本建築学会論文集、155号、1969. 1
- 106) 杉山英男：木材ばりの曲げクリープ性状の理論的考察(その2)
日本建築学会論文集、162号、1969. 8
- 107) 中井孝：雪荷重を継続して載荷した実大合成ばりの曲げクリープ
日本建築学会大会学術講演梗概集、1983. 10
- 108) Henry Hall,John Haygreen,Bruce Neisse:Creep of particleboard and
Plywood Floor Deck under Concentrated Loading .F.P.J,Vol.27,No.5,1977
- 109) 有馬孝禮：木質材料のクリープ性能に関する研究
日本建築学会大会学術講演梗概集、1974. 10
- 110) 有馬孝禮：木材および木質材料のクリープ特性
AWCOM、NO. 18、1976
- 111) 中井孝：ボード類の曲げクリープ試験(2)完
木材工業、Vol. 33-6、1978
- 112) 斎藤藤市、池田正行、小川克巳：パーティクルボードの長期曲げ負荷における
変形挙動
木材学会誌、Vol. 26-11、1980
- 113) J.J.Mack:A Study of Creep in Nailed Joints. CSIRO,No.27,1963
- 114) J.J.Mack:Repetitive Loading of Nailed timber Joints . CSIRO,No.10,1960

- 1 1 5) 徳田 勉夫：釘接合の研究（第2報）
 各種含水率条件下における釘の引抜き抵抗力
 特にサビの影響について
 木材学会誌、V o l . 2 4 - 1 0、1 9 7 8
- 1 1 6) 神谷文夫、平嶋 巖彦、畑山 巖男：乾燥を伴う時間経過が
 接合部の剪断に与える影響
 木材学会誌、V o l . 2 9 - 1 2、1 9 8 3
- 1 1 7) American Institute of Timber Constructoin:Timber ConstructionManual
 1974 edition
- 1 1 8) National Forest Products Association:National Design Specification.
 Wood Construction,1982
- 1 1 9) 岡田 恒：木造住宅の固有周期とせん断耐力の関係
 日本建築学会大会学術講演梗概集、1 9 8 1 . 9
- 1 2 0) 平嶋 巖彦、金谷紀行、神谷文夫：枠組壁工法の振動実験とその解析
 日本建築学会関東支部研究報告集、1 9 8 3 . 6
- 1 2 1) 林業試験場編：木材工業ハンドブック 改訂3版、丸善、1 9 8 2 . 6
- 1 2 2) 井上 嘉：木材の劣化と防止法、実用木材加工全書⑩、
 森北出版、1 9 7 2 . 1 2
- 1 2 3) (社) 日本しろあり対策協会：木造建築物等防腐・防蟻・防虫処理技術指針・
 同解説
 1 9 8 3 . 6
- 1 2 4) 日本規格協会：木材の耐朽性試験方法 (J I S Z 2 1 1 9 - 1 9 7 7)
- 1 2 5) ASTM D 2017-81:Standard Method of Accelerated Laboratory Test of
 Natural Decay Resistant of Wood.Annual Book of ASTM Standard,1984
- 1 2 6) 住宅金融公庫建設指導部監修：住宅金融公庫融資住宅
 枠組壁工法住宅工事共通仕様書、1 9 8 3 年版
- 1 2 7) 松田誠吾、松島 巖共訳：H. H. ユーリック 腐食反応とその制御（第2版）
 p 1 1、産業図書、1 9 7 7 . 2
- 1 2 8) 有馬孝禮：木材のmechano-sorptive変形の回復
 日本建築学会関東支部研究報告集、1 9 7 8 . 6
- 1 2 9) 有馬孝禮：木材の熱圧縮時のレオロジー的研究（第3報）
 変形機構に関する一考察、日本木材学会、V o l . 2 0 - 8、1 9 7 4
- 1 3 0) 小野木重治：レオロジー要論、横書店、1 9 7 7 . 1 0

謝 辞

本論文は、筆者が昭和53年に建設省建築研究所に入所して以来、第2研究部有機材料研究室で行なってきた研究のうち、木質構造における木質部材や接合部の長期耐力性能とその評価に関する研究を取りまとめたものである。

本論文の作成に当たっては、東京大学教授大熊幹章博士から多大の御教示、御助言を頂きました。また、現在東京理科大学教授杉山英男博士からは有益な御教示、御助言を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

研究の遂行に当たっては、現在静岡大学助教授有馬孝禮博士に御指導、御助言を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

建築研究所においては、今泉勝吉博士（現工学院大学教授）、上村克郎博士（現宇都宮大学教授）、藤松進博士（現第3研究部長）、小泉重信第2研究部長、楡木堯耐久性研究室長、高橋泰一有機材料研究室長から格別の御配慮と御助言を頂きました。

さらに、実験の実施に当たっては第2研究部技官宮村雅史氏、元第2研究部技官益田恵吾氏の御協力を得ました。ここに記して御礼申し上げます。

参考資料 (本論文に関連して発表した論文等)

- 1) 有馬孝禮、佐藤雅俊、益田恵吾：パーティクルボード床張りのクリープ特性
日本建築学会関東支部研究報告集 1979.6
- 2) 佐藤雅俊、有馬孝禮、：釘接合部の繰返し荷重下での性状
昭和53年度建築研究所年報 1980.3
- 3) 佐藤雅俊、益田恵吾、有馬孝禮、楡木堯：木質壁部材の内部温湿度特性の評価法
日本建築学会関東支部研究報告集 1980.6
- 4) 佐藤雅俊：釘接合部の繰返し荷重下における変形特性
日本建築学会大会学術講演梗概集 1980.10
- 5) 有馬孝禮、佐藤雅俊、益田恵吾：パーティクルボード床張りの
クリープ特性(その2)
日本建築学会大会学術講演梗概集 1980.10
- 6) 佐藤雅俊：複合木質材料の性能評価
複合木質材料の温湿度変化に対する挙動
昭和54年度建築研究所年報 1980.12
- 7) 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、1981.3
- 8) 佐藤雅俊：木質材料の温湿度特性に関する研究(I)
壁体構成と周囲温湿度変化に伴う壁内状態について
日本建築学会関東支部研究報告集 1981.6
- 9) 有馬孝禮、佐藤雅俊、益田恵吾：木質ボードの釘せん断クリープ試験(その2)
クリープ曲線の長期推定と評価方法
日本建築学会関東支部研究報告集 1981.6
- 10) 佐藤雅俊：釘接合部の繰返し荷重下における変形特性(その2)
日本建築学会大会学術講演梗概集 1981.9
- 11) 佐藤雅俊：複合木質材料の性能評価
木質材料の温湿度変化に対する挙動
昭和55年度建築研究所年報 1982.1

- 1 2) 有馬孝禮、佐藤雅俊、益田恵吾：在来木造住宅の施工技術の体系化に関する
基礎的研究
仕口部分の水分変動による挙動、在来工法床組部材のクリープ変形
昭和55年度建築研究所年報 1982.1
- 1 3) 佐藤雅俊：木造建築物における壁体内部の環境について
木材保存 No.20 1982.1
- 1 4) 佐藤雅俊：ブロック造公営住宅における木質部材の劣化状況実態調査
日本建築学会関東支部研究報告集 1982.6
- 1 5) 佐藤雅俊：耐久性能
木材工業 vol .37-11 1982.11
- 1 6) 佐藤雅俊、宮村雅史：複合木質材料の性能評価
モルタル塗り壁体の環境実験、釘接合部における釘の錆について
昭和56年度建築研究所年報 1983.1
- 1 7) 佐藤雅俊、本橋健司、宮村雅史：木質材料の長期性能評価
木質梁部材のクリープ特性
昭和56年度建築研究所年報 1983.1
- 1 8) 佐藤雅俊：木造住宅の耐久性能と水
木材工業 第38巻 5号 1983.5
- 1 9) 佐藤雅俊、宮村雅史：木質構造の温湿度特性に関する研究（II）
壁体構成と周囲温湿度変化に伴う壁内状態について
日本建築学会関東支部研究報告集 1983.6
- 2 0) 宮村雅史、佐藤雅俊：釘接合部の高湿度環境下における釘径の変化について
日本建築学会大会学術講演梗概集 1983.9
- 2 1) 佐藤雅俊、宮村雅史：複合木質材料の性能評価
釘接合部の腐食実験
昭和57年度建築研究所年報 1983.11
- 2 2) 佐藤雅俊、安藤直人、鴛海四郎：合板ボックスビーム釘打ち接着接合と強度特性
木材工業 第38巻11号 1983.11
- 2 3) 佐藤雅俊、宮村雅史、森 和雄：通直集成材構造用梁部材および接合部の
葉多修司、大平 章 クリープ特性
日本建築学会関東支部研究報告集 1984.6

- 24) 佐藤雅俊、宮村雅史：高湿度環境下における釘接合部の耐力変化
日本建築学会大会学術講演梗概集 1984.10
- 25) 佐藤雅俊、宮村雅史：木質構造の長期性能評価
集成材梁部材のクリープ特性
昭和58年度建築研究所年報 1985.2
- 26) 佐藤雅俊、宮村雅史：複合木質材料の性能評価
壁体構成と壁体の周囲温湿度変化に伴う壁内状態、
高湿度環境下における釘接合部の耐力変化
昭和58年度建築研究所年報 1985.2
- 27) 佐藤雅俊、宮村雅史：木造建築物の生物劣化に関する研究
日本建築学会大会学術講演梗概集 1985.10