実大米松集成材の曲げクリープ性状

BENDING CREEP BEHAVIOUR OF FULL SIZE DOUGLAS FIR GLULAM BEAMS

木村 衛*, 楠 寿博**, 鴛海 四郎***

Mamoru KIMURA, Toshihiro KUSUNOKI and Shirou OSHIUMI

An experimental study on the bending creep behaviour of full-size douglas-fir glulam beam was made under non-controlled sheltered environment for 9 years for the purpose of clarifying the efficient way of defining creep deflection curve in relation to the load duration. Two experiments were carried out at stress level of 0.3 and 0.5, which is the ratio of bending stress to static bending strength. The latter concluded creep failure after 4 years loading. In this paper, the results of these experiments are presented.

For formularizing the creep deflection curve, it is necessary that the load duration should be at least more than one and a half year, but at the same time it is to be desired that first six months data is ignored. After 9 years loading of stress ratio of 0.3, unloading was made, and it showed that the flexural rigidity remained unchanged.

Keywords : *Glulam beam, Bending creep, Creep failure, Creep deflection curve, Creep recovery*

集成材梁, 曲げクリープ, クリープ破壊, クリープ変形曲線, クリープ回復

1. 序

従来の比較的小規模な木構造建築では梁の曲げクリープ変形が問題視されることは少なかったが、近年増加している集成材による大規模木構造建築では、外観、機能性及び力学的な安全性の面から曲げクリープ変形が無視しえない場合の生じる可能性がある。現行の日本建築学会木質構造設計規準⁽⁵⁾（以下学会規準と称す）では集成材に於ける曲げクリープ変形の評価法については一般木材に準じた扱いとなっている。一方、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⁽⁶⁾⁽⁷⁾他、実大集成材に対して実施したものは、その装置構成或いは長期間実施の困難さのために非常に少ない状況にある。

杉材などを用いた既往の研究^{(6)~(11)}によれば、木材の曲げクリープ限度は静的曲げ強度の40~60%程度であるとされている。クリープ限度は、長期間の荷重に対して木材がクリープ破壊しない荷重レベルの最大値であるが、学会規準では曲げ強度の5%下限値の概ね3分の1を設計上のクリープ限度と見なし、これを長期許容応力度とされている。

集成材に対して実施した例としては、Jelena らによる実験⁽¹²⁾や Ranta-Maunus らによる実験⁽¹³⁾がある。前者は高い湿度条件下ではクリープ変形が1年間で通常の2倍に達する場合があることを示して

いる。後者は最大曲げ応力度が2~4N/mm²とやや低い応力度レベルの実験を実大集成材で約8年間実施している。我が国では実大から松集成材を用いた高橋らによる約1年半の実験⁽¹⁴⁾がある。

このような状況を踏まえ、現実に近い条件を与えた場合の集成材について長期的な曲げクリープ性状の把握と、クリープ限度の確認を目的として、実大米松集成材を用いた9年間の長期載荷実験を実施した。本研究では特に学会規準による長期許容応力度レベルと、小断面木材を用いた既往の研究によるクリープ限度レベルに着目し、2ケースの実験を対象とした。

本論ではこの9年間に及ぶクリープデータの紹介とともに、クリープ予測線を設定するための、測定期間の有効性について言及する。

2. 実験概要

2-1. 試験体概要

試験体は断面120×396mm、全長6mの旧JASによる1級構造用集成材である。素材は米松で、ラミナ厚が33mm、積層数は12である。ラミナ構成は、外側2層を2等、内側4層を4等、中間層を3等とした。試験体製作に用いるラミナの抜き取り素材試験を行なった。結果を図1に示す。本試験体では目視及びグレーディングマシンに依った等級分けに有意な差が認められなかった。平均で圧縮強度

本論文は参考文献(1)~(4)に新たな測定データに基づく考察を加え、再構成したものである

* 新都市ハウジング協会 事務局長・工博

** 竹中工務店技術研究所 主任研究員・工修

*** 日本住宅・木材技術センター試験研究所構造試験室
室長・農修

Director, Association of New Urban Housing Technology, Dr. Eng.

Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.

Head, Japan Housing and Wood Technology Center, Testing and Research Laboratory, Structural Testing Division, M. Agr.

35.6N/mm²、引張強度 45.0N/mm²であった。

試験体数は、荷重レベルに対してそれぞれ1体ずつ、合計2体とした。ただし、クリープ実験に先立って試験体の力学性状を把握しておくため、同条件で製作された集成材を用いて2点集中荷重による静的曲げ破壊実験を行なった。その荷重－変形関係を図2に示す。最大耐力は、素材試験から評価した値にほぼ対応している。これより曲げ強度を求めると、43.62N/mm²となる。後述するクリープ限度の荷重レベルに対し、せん断変形を考慮してヤング率Eを次式により求めると、約11,000N/mm²の値が得られた。

$$\delta_{\alpha=0.5} = \left[\frac{a(3L^2 - 4a^2)}{24EI} + \kappa \frac{a}{GA} \right] \frac{P_{\alpha=0.5}}{2} \quad (1)$$

ここに、L、aは、全スパン長およびせん断スパン長であり、A、Iは断面積と断面二次モーメント、 $\delta_{\alpha=0.5}$ はクリープ限度の荷重 $P_{\alpha=0.5}$ における変形である。なお、断面の形状係数 κ 、せん断弾性係数 G はそれぞれ 6/5、E/15 とした。長期許容曲げ応力度を曲げ強度の 1/3 とすれば 14.54N/mm² となり、ヤング率とともに学会規準に於ける 1 級構造用集成材の規定値にほぼ等しい値であった。

なお、接触式の含水率計を用いて荷重直前に2試験体の表面含水率を測定したところ、長期荷重レベル対応のものが 11.3%、クリープ限度の荷重レベル対応のものが 12.0%であった。これらの値は各試験体に於いて任意の5点で測定した含水率の平均である。

図1 ラミナの素材試験結果

図2 試験体の静的荷重－変形関係

2-2. 荷重装置

荷重装置はそれぞれの荷重レベル別に製作している。設置場所は(財)日本住宅・木材技術センターの旧試験研究所実験棟内で、空調はなく寧ろ外気に直接触れるような環境である。装置の概要を図3、写真1に示す。各試験体は2基のコンクリート製支持架台上に置か

れている。境界条件は単純梁形式とし、一端ピン、他端ローラーとした。荷重には長さ5mに切り揃えた鋼矢板（FSP-3型）を使用した。本鋼矢板は幅400mm、重さは1枚当たり約3,000Nである。荷重レベルはこの鋼矢板の枚数により調節した。吊り金物、長ボルト及び上下一対の受け金物の組合せにより鋼矢板を試験体に荷重した。

写真1 クリープ実験状況（応力比 $\alpha=0.5$ ）

2-3. 荷重方法

荷重は2点集中加力形式である。支持点から荷重点までのせん断スパン長さ $a=1.8$ m は、等分布荷重を受ける場合の曲げモーメント分布に近似させたもので、せん断破壊が曲げ破壊に先行しないという条件も含んでいる。先に行った曲げ破壊実験はこれに対応させている。

長期荷重レベルは曲げ強度に対する応力比 α を 0.3 とし、錘の重量は 44.60kN とした。文献10によれば、応力比 0.4 ならば変位は安定し、応力比 0.6 の時にはクリープ破壊したとされている。そこでクリープ限度を想定した荷重レベルは応力比 0.5 とした。この時の錘の重量は 74.32kN である。鋼矢板は1枚ずつ正確に重量を計り、吊り金物等の鋼材の重量を考慮して必要枚数を算出した。この時、端部の不足分は板錘によって補充している。

図3(c), (d)にそれぞれの応力比の場合の荷重装置構成を示す。4台の手動油圧ジャッキ（揚程 100 mm）上に受け金物を置き、この上に所定量の鋼矢板を積み上げる。長さ調節ネジで吊り金物を試験体に荷重がかからない程度に接触させ、この時点を変位測定の基点とする。4台のジャッキはそれぞれにセットされたジャッキストローク制御用変位計により、鋼矢板の水平を保つように徐々にジャッキダウンする。ジャッキダウンの開始が実験開始時刻となる。

荷重は2体とも1991年3月26日に実施した。なお、応力比 0.3 の試験体は、午前11時9分、0.5の試験体は午後1時31分をクリープ測定のスタートとしている。

長期荷重レベルの試験体については、9年目の2000年6月15日午前10時40分に一旦除荷し、1ヶ月後の7月17日午前1時46分に再荷重し、更に午後2時0分に再除荷して実験を終了した。

2-4. 測定方法

測定は試験体の鉛直変位、実施場所の温湿度について行う。鉛直変位は、試験体中央（1ヶ所）、支持点（2ヶ所）、荷重点（2ヶ所）の合計5ヶ所について、変位計により測定する（図3(a)参照）。こ

図3 実験装置の構成

これらの変位計は、支持架台の上に架け渡した鉄骨架構に取り付ける。支持点を測定するのは、支圧に伴う支持点木部の局部変形に対する補正のためである。又、同種の変位計を不動点にセットし、これにより長期的な電気的変動等の零点修正を行った。測定は一定時間おきとし、荷重開始時点から荷重1時間後まで30秒間隔、6時間後まで15分間隔、1週間後まで1時間間隔、以後は1週間から数週間間隔で測定を行った。荷重後1週間後までは機器による連続自動測定とし、以後はポータブルの小型測定器を用いた。両者の間に測定値の差異は殆どないことを確認している。応力比0.5の試験体については、試験体中央断面に荷重前に歪ゲージを貼付し、曲げ変形状を測定した。歪ゲージの貼付位置を図3(b)に示す。測定は24時間おきに行い、歪ゲージ用接着剤の有効期間を考慮して、測定は荷重後20日目までとした。

温度及び湿度の測定記録には連続記録方式の温湿度計を使用した。温湿度計は試験体近傍に置き、荷重期間中計測を継続した。なお、定期的な測定とは別に、次の①～④の各時期に短期間の連続測定を実施した。①荷重直後、②比較的湿度の高い夏期（荷重1年目及び2年目）、応力比0.5の試験体については、③ひびわれ発生（荷重後1年半で発生）後、④その半年後の春期。なお、応力比0.3の試験体の実験終了時に、除荷、再荷重、再除荷を実施し、クリープ変形の戻り特性を計測している。

3. クリープ変形挙動

3-1. 変位測定結果

測定期間は、1991年3月26日から2000年6月15日までの9年間に亘る。試験体の中央変位と経過時間との関係を図4に示す。変位は中央の変位計の測定値から両支持点変位計の測定値の平均値を差し引いて補正した値である。変位測定と同時に記録した温度と湿度のデータを併せて図中に示している。

試験体に完全に荷重がかかった直後（約1分程度）、比較的是っきりと中央変位の増加が収まる時点が認められ、この測定値を初期変位とした。初期変位は、応力比0.3の場合17.69 mm、応力比0.5の場合31.92 mmで、図2に示す静的荷重実験結果による変位よりも若干小さく評価された。

クリープ変形は大略初期勾配と、二次勾配の領域に分けられる。その分岐点は荷重6ヶ月（4,000時間）頃で、以降変位増加の二次勾配は低い。ただし、いずれの勾配も応力比が大きい程高い。二次勾配への折点は、その年の最高温度の時期に一致しており、高湿度にも対応する。言い換えれば、高温、高湿の山をピークにクリープ変形が脈動している。以降、影響は小さいが、応力比0.5の試験体では、次に述べるひびわれの影響と重なり、その傾向が認められる。

荷重1年半頃、応力比0.5の試験体の中央下部に図5に示すようなひび割れを発見した。同図に示すように最下端から2枚目のラミ

図4 曲げクリープ変位（9年間）

ナに節があり、ひび割れは節の上の3枚目のラミナに発生していた。2枚目のラミナの節のちょうど反対側の側面にも別の節が存在し、同様なひび割れが現れている。このひび割れは測定を行った8月24日(12,410時間)から9月14日(12,910時間)の間に生じたものである。ひび割れ発生時点で変位は増加するが、その後20,000時間を越えるまで、ほぼひび割れ発生以前の勾配で経過した。しかし20,000時間を越えてから勾配が高くなっている。ひび割れのうち横ひび割れは徐々に進展し、載荷4年目の時点1995年3月28日(35,110時間)で倍の長さになった。3年半(30,000時間)経過時には節の下側にも縦ひび割れが発生し、これが最下端のラミナとの接着面に至って横方向に進展し始め、載荷4年目の時点では約120mm離れた節に達していた。そして同年4月24日(35,760時間)にクリープ破壊した。図4では、破壊の直前4月18日(35,620時間)に測定したデータまで示されている。

図5 ひび割れ発生状況と歪ゲージ貼付位置 ($\alpha=0.5$ 試験体)

表1、表2に載荷日から1年毎の中央変位と、相対クリープ(中央変位の初期変位に対する比)及び年間変位増分と初期年度増分比を応力比別に示した。応力比0.3試験体では、対初年度変位増分比は5年間ほぼ1割程度の値となっているが、6年以降湿度の影響の割合が大きくなり、ばらついている。応力比0.5試験体では、ひび割れの発生した2年目と次の3年目の変位増分比を見ると余り変化が認められないが、4年目はかなり増大している。

表1 相対クリープと変位増分 ($\alpha=0.3$ 試験体)

測定日	中央変位 (mm)	相対クリープ	年間変位増分 (mm)	初年度変位増分比
1991年3月26日	17.69	—	—	—
1992年3月26日	23.95	1.35	6.26	1.00
1993年3月26日	24.87	1.41	0.92	0.15
1994年3月28日	25.28	1.43	0.41	0.07
1995年3月28日	25.88	1.45	0.60	0.10
1996年3月26日	26.52	1.50	0.64	0.10
1997年3月27日	26.54	1.50	0.02	0.00
1998年3月20日	26.45	1.50	0.09	0.01
1999年3月19日	26.87	1.52	0.42	0.07
2000年3月24日	27.30	1.54	0.43	0.07
2000年6月15日	27.15	1.53	—	—

表2 相対クリープと変位増分 ($\alpha=0.5$ 試験体)

測定日	中央変位 (mm)	相対クリープ	年間変位増分 (mm)	初年度変位増分比
1991年3月26日	31.92	—	—	—
1992年3月26日	46.61	1.46	14.69	1.00
1993年3月26日	50.53	1.58	3.92	0.27
1994年3月28日	54.67	1.71	4.14	0.28
1995年3月28日	61.71	1.93	7.04	0.48
1995年4月18日	62.09	1.95	—	—

写真2に応力比0.5試験体のクリープ破壊直後の状況を示す。なお、クリープ破壊の直前に急激な湿度変化があり、温湿度計は8時間で94%から44%への低下を記録していた。

写真2 クリープ破壊状況 ($\alpha=0.5$ 試験体、35,760h 経過時)

3-2. 時期別詳細挙動

(1) 載荷後20日目までの歪挙動

載荷直後からのクリープ変形時の歪量を調べるため、応力比0.5の試験体の中央断面に歪ゲージを貼付し、載荷後20日間、24時間おきに測定した。図6にその結果を示す。歪ゲージの貼付位置は、図3(b)に示すように片側側面3ヶ所である。試験体のヤング率を静的実験より求めた値で評価した時、上下測定位置での歪値は1,700 μ 程度となる。載荷直後の歪値は引張側で1,260 μ 、圧縮側で1,536 μ であった。計算値より低めの値が測定されており、若干の非対称性を示した。20日間の経過は、引張側、圧縮側共に歪が僅かずつではあるが増加していることがわかる。特に載荷後1日間の増加が大きい。20日後の歪値は、それぞれ1,460 μ 、-1,670 μ となった。なお、中央の歪値は時間の経過と共に0に近づいている。

図6 中央断面歪量 ($\alpha=0.5$ 試験体 0~480h)

(2) 載荷1年目の夏期に於ける中央変位増分

比較的温湿度の高い時期(夏期)の試験体の動きを調べることを目的として、1991年8月9日16時30分より同23日11時30分まで約2週間、1時間おきに計331時間変位を連続測定した。これは載荷後、3,270時間から3,601時間に相当する。測定は応力比が0.3と0.5の両方の試験体について行った。図7にその結果を示す。試験体脇にセットした温湿度計による温度と湿度のデータを図中に併せて示した。縦軸の中央変位増分は、負値が変位の戻る方向で正値が変位の増える方向である。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。同図より試験体のクリープ変位は、ほぼ日周期で小さな増減を繰り返しながら徐々に増加していることがわかる。両試験体に共通して、夕方から早朝にかけて僅かながら変位が回復する傾向が認められる。240時間後湿度がほぼ90%と高湿度になったところで両試験体の変位量が大きく伸びているのが確認できる。331時間後の両試験体の変位増分は、応力比0.3の試験体で0.29mm、0.5の試験体で0.46mmであった。

図7 中央断面歪量 (3,270~3,601h)

(3) ひび割れが発生した後の応力比0.5の試験体の歪測定

3-1で述べたように、載荷後約1年半の時点で応力比0.5の試験体にひび割れが発生したため、ひび割れ近傍のラミナの歪状況とクリープ変位との関係を調べるため、最下端から4枚目までのラミナに図5に示すように歪ゲージを貼付し、変位とともに歪量を1時間毎に測定することとした。測定期間は1992年10月27日13時より12月16日12時までの50日間(13,970~15,170時間)である。図8にその結果を示す。横軸の経過時間は測定開始時を0とした。試験体脇にセットした温湿度計による温度と湿度のデータを図中に併せて示した。秋期のデータ例である。

変位増分と湿度の関係を見ると、高湿度で変位が増大する関係がほぼ対応している。大きな節のあるラミナに貼付した歪ゲージ(ゲージ3)の歪増分が最も増減の幅が大きく、最大で250 μ の動きを示している。逆に最も増減の幅が小さいのはひび割れの入ったラミナに貼付した歪ゲージ(ゲージ2)で応力緩和の影響と思われる。歪増分と湿度の関係を見ると、ゲージ3は、両者の増減が比較的に明瞭に対応していることがわかる。ただし、高湿度で大きく圧縮側に移

行するところから、横ひび割れより下の部分が単独に曲げ抵抗を示しているものと思われる。

図8 ひび割れ発生位置の歪と中央変位の増分 (13,970~15,170h)

(4) 載荷2年目の夏期に於ける中央変位増分

載荷1年目と同様に比較的温湿度の高い時期(夏期)の試験体の動きを調べることを目的として、1992年8月10日11時より同24日11時までの2週間、1時間おきに計336時間変位を連続測定した。これは載荷後12,070時間から12,406時間に相当する。測定は応力比が0.3と0.5の両方の試験体について行った。図9にその結果を示す。

図9 中央変位増分 (12,070~12,406h)

2体の試験体とも、載荷1年目と同様にほぼ日周期の小さな増減を繰り返しながら変化している。夕方から早朝にかけて僅かに変位が回復するのも載荷1年目と同じ傾向である。特に今回は湿度との対応が比較的明瞭に認められる。70時間目から160時間目あたりまで湿度が高い状態(90%以上)が続き、この間応力比0.3、0.5の両試験体とも変位が継続的に増加している。160時間から300時間の間の湿度が90%以下の状態では、変位増分に停滞の傾向が認められクリープ変形への湿度の影響が大きい。なお、1年目の測定結果に比較して増分量はかなり小さくなっていることが分かる。336時間の両試験体の変位増分は、応力比0.3試験体で0.07mm、0.5の試験体で0.18mmであった。

(5) 応力比0.5の試験体の載荷3年目春期に於ける中央変位増分
 応力比0.5の試験体につき、ひび割れ発生後ほぼ半年が経過した1993年4月8日12時より6月19日6時までの1,722時間(約70日間)、2時間おきに変位を連続測定した。これは載荷後17,857時間から19,579時間に相当する。図10にその結果を示す。温度と湿度については3時間毎の測定とした。但し、温湿度計の電池切れにより1,281~1,317時間の間のデータが欠如している。ひび割れ発生後も変位は日周期の増減を繰り返す。この時期、温度、湿度とも時間の経過に伴って上昇している。高湿度期間の変位増大傾向は認められるが、それ以上に全体の変位増大勾配が、ひびわれの影響も含めて大きくなっている。

図10 中央変位増分 (17,857~19,579h)

3-3. 載荷9年後の除荷挙動

載荷後9年3ヶ月経た2000年6月15日、午前10時応力比0.3試験体の除荷挙動を測定した。除荷プログラムは載荷を含め、図11に示す。除荷の方法は載荷の逆手順とし、4台の手動油圧ジャッキに全荷重を移行分担させる。

図11の載荷-除荷プログラムを参考にして初期剛性に対する各剛性を比較する。除荷時の剛性は載荷時の初期剛性に対して2.9%高、再載荷、再除荷時の剛性でそれぞれ0.2%高8.3%高であった。ただし、後者に対して再除荷後4分経過時の値を用いると、0.1%高程度となり、いずれもほぼ初期剛性で評価できて、長期の荷重に対する

剛性の劣化は認められなかった。

図12は、降荷時のクリープ回復性状である。除荷後ほぼ1ヶ月の7月17日午前9時56分(791時間)まで変形の戻り性状を観測した。図中除荷時点を原点とし、初期の載荷直後の挙動を変形の方法を逆にして重ね合せ、破線で示した。除荷に対する実験結果と良く一致している。6月15日以降、この期間の除荷しなかった場合のクリープ変形が殆ど無視できると考えれば、一般的に言われている重ね合せの原理⁽⁵⁾の妥当性が評価できる。

図11 載荷-除荷経路

図12 除荷時のクリープ回復

4. クリープ変形予測

4-1. 予測式

実大集成材の曲げクリープ予測式として、木材のクリープ変形に関する次の一般式を用いる。

$$\delta / \delta_0 = 1 + a / \delta_0 \cdot t^N \quad (2)$$

δ : 全体変形 (= 初期変形 + クリープ変形)

δ_0 : 初期変形

t : 時間 (Hour)

ここに、 a , N は定数である。(2) 式を対数表示すれば、次式を得る。

$$\Delta = A + N \cdot T \quad (3)$$

$$\Delta = \log (\delta / \delta_0 - 1)$$

$$A = \log a / \delta_0$$

$$T = \log t$$

図13は、縦軸に相対クリープ増分、横軸に時間をそれぞれ対数で示した $\Delta-T$ にとり、実験結果を示したものである。(3) 式に従えば、縦軸との交点を A とし、勾配 N なる右上がりの直線となる。測定値は、いずれの荷重レベルの試験体に於いても類似した折線状態となっており、載荷初期のばらつきや初年度夏期の高温高湿の影響を大きく受けるものと思われる。図4で述べたように、この初年度の夏期を過ぎた4,000時間($T=3.6$)以降の図4で示される二次勾配の領域で変形予測を行なうことが望ましいと思われる。

表3はクリープ計測データを(2)式で回帰して、定数 A , N を求めたものである。対象とする計測期間データを変化させて示した。応力比0.3試験体の初めから最終データまでと、応力比0.5試験体の初めからひび割れの発生した17ヶ月目までのデータによる結果と、初期の半年分を削除したデータによる結果を比較すると、大きな差があることが分かる。相関係数 R の値は初期データを含む方が1に近く、回帰の精度の良いことを示している。ここでデータの内容をみると、本計測では初期に於けるクリープ変形変動の大きな期間の計測密度が非常に高い。初めから1年までのデータから求めた

定数は、初期データを削除しなかった場合に近い。従って初期データを含むと、この初期領域の回帰に偏重し将来予測の精度に対して、むしろノイズとして働くことが分かる。図13中に初期からの全データによる回帰直線と、半年間のデータを削除した回帰直線を示した。これからも図4、図13で述べた初期データの削除が、将来予測式の精度の向上に効果があるといえる。

図13 両対数表示測定結果

4-2. 定数の決定

定数設定にはこれまでの考察から半年後からの安定領域の計測データによるが、計測期間は短い程効率が良い。この観点から、半年後以降、データ抽出期間を適宜増加させ、それぞれのケースに対する定数より計測期間と精度との関係を検討する。なお比較する精解値として、先に述べた初期の半年間のデータを削除した全有効データ

により求めた次の定数を用いることとする。

応力比 $\alpha=0.3$ 試験体: $A=-1.115$ $N=0.171$

応力比 $\alpha=0.5$ 試験体: $A=-1.053$ $N=0.183$

図14は4,000時間以降の領域を拡大した計測結果である。全有効データの範囲で、ほぼ線形関係にあることが認められる。同図中に有効データ6ヶ月と1年の回帰直線を600,000時間まで示した。前者は危険側の予測となる。この領域はクリープ変形そのものの変動より温湿度変動の影響が大きいものと考えられ、少なくとも回帰するデータは季節の1サイクルを含ませることが望ましい。

応力比0.3試験体に対し、より安定領域として初期1年間のデータを削除した場合の、以後6ヶ月のデータでは、データ数が少ないうちに変位の増減が影響して精度が得られていない。初期データのばらつきの削除として半年間程度のデータを無視すると同時に、以降の回帰のためのデータは少なくとも1年間を必要とする。この最短観測により評価される定数は次のようになる。

応力比 $\alpha=0.3$ 試験体: $A=-1.154$ $N=0.180$

応力比0.5試験体では初期の半年間データの削除により、ひび割れ発生までの有効データは11ヶ月であり、季節1サイクルをほぼ満足する最短観測といえる。

60年後のクリープ変形の予測値を、設定された定数から(2)式より求める。応力比0.3試験体に対し精解値を代入すれば相対クリープは次のように算出できる。

$$\delta / \delta_0 |_{\alpha=0.3} = 1 + 0.077(60 \times 365 \times 24)^{0.171} = 1.732$$

最短観測データによる相対クリープは次の値となる。

$$\delta / \delta_0 |_{\alpha=0.3} = 1 + 0.070(60 \times 365 \times 24)^{0.180} = 1.750$$

長期荷重レベルでは、初期変形に対して75%程度クリープによる変形増大が予測される。これは気乾状態で100%、湿潤・乾燥の繰返し状態で200%とする学会規準⁽⁷⁾で示されるクリープ変形値より

表3(a) $\alpha=0.3$ データによる定数設定 (Hour)

回帰分析期間	データ数	係数 a	係数 a/δ_0	係数 $A=\log(a/\delta_0)$	係数 N	R
0年~1年	305	0.4067	0.0230	-1.6385	0.3037	0.9876
0年~最後	414	0.4207	0.0238	-1.6237	0.2862	0.9917
0.5年~0.58年 (1ヶ月データ)	4	14.485	0.8188	-0.0868	-0.1073	0.7418
0.5年~0.67年 (2ヶ月データ)	6	4.7044	0.2659	-0.5752	0.0254	0.2194
0.5年~0.75年 (3ヶ月データ)	7	4.1030	0.2319	-0.6346	0.0415	0.4608
0.5年~1年 (6ヶ月データ)	12	2.3058	0.1303	-0.8849	0.1090	0.9094
0.5年~1.5年 (1年データ)	18	1.2421	0.0702	-1.1536	0.1803	0.9541
0.5年~2年 (1年半データ)	29	1.2929	0.0731	-1.1362	0.1759	0.9677
0.5年~2.5年 (2年データ)	38	1.3407	0.0758	-1.1204	0.1718	0.9751
0.5年~最後	121	1.3587	0.0768	-1.1146	0.1706	0.9803
1年~1.5年 (6ヶ月データ)	7	0.3849	0.0218	-1.6624	0.3065	0.9623
1年~2年 (1年データ)	18	1.3530	0.0765	-1.1164	0.1714	0.8424

表3(b) $\alpha=0.5$ データによる定数設定 (Hour)

回帰分析期間	データ数	係数 a	係数 a/δ_0	係数 $A=\log(a/\delta_0)$	係数 N	R
0年~1年	335	0.6851	0.0215	-1.6683	0.3228	0.9839
0年~1.4年 (ひび割れまで)	341	0.6831	0.0214	-1.6695	0.3244	0.9881
0.5年~0.58年 (1ヶ月データ)	4	11.702	0.3666	-0.4358	0.0167	0.1983
0.5年~0.67年 (2ヶ月データ)	6	11.787	0.3693	-0.4327	0.0158	0.3659
0.5年~0.75年 (3ヶ月データ)	7	8.4063	0.2634	-0.5795	0.0556	0.7682
0.5年~1年 (6ヶ月データ)	12	4.3225	0.1354	-0.8683	0.1335	0.9538
0.5年~1.4年 (11ヶ月データ)	18	2.8279	0.0886	-1.0526	0.1825	0.9754
1年~1.4年 (5ヶ月データ)	7	1.3434	0.0421	-1.3759	0.2629	0.9627

図 14 クリープ変形予想

かなり低い。

応力比 0.5 試験体が仮にクリープ破壊をしないとすれば、

$$\delta / \delta_0 |_{\alpha=0.5} = 1 + 0.089(60 \times 365 \times 24)^{0.183} = 1.991$$

となり、クリープ限度の荷重レベルで、一般に設計において未乾燥材のクリープで評価される初期変形の 2 倍の値に対応する。

5. 結

外気にも接する屋内無空調環境に置かれた実大の米松集成材に、長期許容応力度とクリープ限度の荷重レベルを載荷した場合のクリープ挙動を報告するとともに、クリープ変形予測について考察した。以下にその概要を示す。

・クリープ挙動について

- (1) クリープ変形は日周期で増減を繰返す。
- (2) 温湿度の影響を大きく受け、特に夏季の高温・高湿時期にクリープ変形性状に山が認められる。
- (3) クリープ限度の応力比 0.5 試験体は載荷 1 年半後にひび割れが発生し、4 年後にクリープ破壊に至った。
- (4) 長期荷重レベルの応力比 0.3 試験体における載荷後 9 年 3 ヶ月時点の除荷挙動から、一般的に言われている重ね合せの原理の妥当性が評価できた。
- (5) また除荷時、再載荷時の剛性劣化は認められなかった。

・回帰によりクリープ予測する場合に於いて

- (6) 載荷後半年間程度の初期データは、将来予測に対しノイズ効果となるため削除することが望ましい。
- (7) 少なくとも回帰に用いる観測データは、季節の 1 サイクルを含んだ 1 年以上の期間分が必要である。
- (8) 長期荷重レベル (応力比 0.3) を受ける実大米松集成材の湿潤・乾燥を繰返す環境下での 60 年後のクリープ変形は、(2)式又は (3)式によれば初期変形の 75% 程度と予想される。

謝辞

本クリープ実験の一部は、(財) 日本住宅・木材技術センターにより設置された集成材構造委員会 (平成 3 年度～5 年度: 委員長有馬孝禮東京大学教授) により実施されたものである。

参考文献

- (1) 畑中公樹、木村 衛、楠 寿博、太田道彦他 3 名: 集成材の曲げクリープ性状に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.21～pp.22、1992 年 8 月
- (2) 楠 寿博、木村 衛、太田道彦、畑中公樹他 3 名: 集成材の曲げクリープ性状に関する実験的研究 (その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.917～pp.918、1993 年 9 月
- (3) 楠 寿博、木村 衛、太田道彦、畑中公樹他 3 名: 集成材の曲げクリープ性状に関する実験的研究 (その 3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.25～pp.26、1996 年 9 月
- (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、1992 年 3 月～1994 年 3 月
- (5) 日本建築学会: 木質構造設計規程・同解説、1995 年
- (6) 杉山英男: 木材の曲げ強度と剛性に及ぼす荷重時間の影響、日本建築学会論文集第 52 号、pp.85～pp.94、1956 年 3 月
- (7) 沢田 稔: 木材梁に関する研究 (第 4 報) 曲げクリープ試験 (1)、林業試験場研究報告、No.98、pp.85～pp.116、1957 年
- (8) 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第 39 号、pp.18～pp.27、1949 年 11 月
- (9) 森 三郎: 死荷重に対する木材の応力に就いて、日本林学会誌、Vol.16、No.1、pp.85～pp.88、1934 年
- (10) 久田俊彦: 木材の長期荷重に対する強度並に断面欠損の影響、日本建築学会研究報告集第 9 号、pp.81～pp.84、1950 年 11 月
- (11) 杉山英男: Experimental Data on the Prediction of the Creep Limit of Wood in Bending from Creep and Creep Recovery Tests、明治大学工学部研究報告、No.11、pp.13～53、1958 年
- (12) Jelena S., Mladen H.: Creep Factors for Wood and Glulam Structures、Proceedings of the 1990 International Timber Engineering Conference Vol.2、pp.416～pp.423、1990 年 10 月
- (13) Ranta-Maunus Aipo, Korttesmaa Markku: Creep of timber during eight years in natural environments、Proceedings of the World Conference on Timber Engineering、2000 年 8 月
- (14) 高橋茂男、北村俊夫、森 拓郎、笹川 明他 1 名: 大気下の集成材はり、接合部、建物のクリープ変形と季節変動、日本建築学会構造系論文集第 551 号、pp.87～pp.94、2002 年 1 月
- (15) 杉山英男: 木材のクリープ限度について、第 27 回日本建築学会関東支部研究報告集、pp.5～pp.8、1960 年 1 月
- (16) 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 年 3 月
- (17) 有馬孝禮、丸山則義: 木材および木質材料のクリープ変形とクリープ破壊、第 52 回日本建築学会関東支部研究報告集、pp.325～pp.328、1986 年
- (18) 杉山英男: 建築構造学大系 22 木構造、彰国社、1971 年

(2002 年 4 月 30 日原稿受理、2002 年 8 月 12 日採用決定)