道産材を用いた木質 I 形梁の力学特性 (第 2 報)[†]曲げクリープ特性^{*1}大橋義徳^{*2}, 松本和茂^{*2}, 佐藤 司^{*2}, 平井卓郎^{*3}Mechanical Properties of Wooden I-beams with
Plantation Timber Materials in Hokkaido II.[†]Long term bending creep property^{*1}Yoshinori OHASHI^{*2}, Kazushige MATSUMOTO^{*2},
Tsukasa SATO^{*2} and Takuro HIRAI^{*3}

Bending creep properties of wooden I-beams with Todomatsu (*Abies sachalinensis*) lumber and Karamatsu (*Larix kaempferi*) plywood were examined by load-duration tests at different initial moisture content. Four I-joists of 235 mm depth were fabricated with lumber flanges and plywood webs glued by aqueous vinyl polymer solution isocyanate adhesive. These joists were divided into two pairs of specimens and each pair was conditioned at 20°C and 65% or 85%RH to adjust their initial moisture content. The creep tests for six years were carried out in a laboratory under uncontrolled air conditions. Test results showed that the mid-span deflections of specimens conditioned under 85%RH obviously increased with desorption at the start of loading. Following this immediate creep behavior, the deflections of all specimens fluctuated in response to changes of moisture content so that the deflections decreased in humid summer and increased in dry winter periodically. The deflections and moisture content of specimens conditioned at 85%RH fluctuated considerably more than those conditioned at 65%RH, and the prior conditioning in high humidity affected the creep behavior during the whole test period. The relative creep after 50 years of specimens conditioned at 85%RH was estimated to be greater than that of specimens conditioned at 65%RH. This result showed that wooden I-beams should be kept away from unexpected moisture or high humidity during shipment and application as floor framing to minimize creep deflection.

Keywords: wooden I-beam, bending creep, mechano-sorptive creep, initial moisture content.

トドマツ製材とカラマツ合板を用いた道産 I 形梁の曲げクリープ特性を把握するために、調湿条件が異なる試験体の曲げクリープ試験を行った。試験体 4 体のうち各 2 体を 20°C 65% RH と 20°C 85% RH の 2 条件で調湿した。クリープ試験は温湿度が制御されない試験棟内で 6 年間行った。85%で調湿した試験体では、載荷直後の脱湿によりスパン中央のたわみが著しく増加した。その後もすべての試験体の変形は含水率変動に呼応し、低湿度の冬季で増加、高湿度の夏季で減少する傾向を周期的に繰り返した。85%で調湿した試験体では65%で調湿した試験体よりもたわみと含水率の変動幅が大きく、試験前の調湿条件が長時間経過後もたわみと含水率の挙動に影響を及ぼした。50年後の相対クリープは65%で調湿した試験体では約1.7倍、85%で調湿した試験体では約2.4倍まで増加すると予測された。よって、道産 I 形梁のクリープを抑えるためには、工場出荷から施工までの間に余分な水分を吸着させないように養生や保管に留意すべきである。

[†] Report I: This journal 54(1), 24-32 (2008).

^{*1} Received December 14, 2007; accepted February 25, 2008. 本研究の一部は第53回日本木材学会大会 (2003年 3 月, 福岡) において発表した。

^{*2} 北海道立林産試験場 Hokkaido Forest Products Research Institute, Asahikawa 071-0198, Japan

^{*3} 北海道大学大学院農学研究院 Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

1. 緒 言

北海道産（以下、道産）の人工林材を用いて品質の高い枠組壁工法用床組部材を供給するために、トドマツ製材とカラマツ合板を用いた木質I形梁（道産I形梁）を開発した。これまでに実用設備を用いた簡易な製造方法と適正な製造条件^{1,2)}、および基礎的な力学特性³⁻⁵⁾を明らかにしてきた。しかし、その実用化に向けては、さらに様々な力学特性を把握する必要がある。とりわけ、平成12年の建築基準法の改正により構造計算が必要となる建築物では床組の長期載荷による変形が使用上の支障を生じないことを確かめるように定められ、クリープ特性の把握が不可欠となっている。水分非定常状態での木材および木質材料のクリープにはメカノソープティブ変形（以下、MS変形）と呼ばれる特異な現象が含まれ⁶⁾、近年、製材や集成材等の実大材を用いたクリープ実験⁷⁻¹²⁾が国内各地で行われている。しかし、クリープ変形が大きい¹³⁾とされる木質複合梁についての実験データ^{6,14,15)}は少ない。海外では木質I形梁のクリープ研究¹⁶⁻²¹⁾が進みつつあり、水分定常状態ではI形梁のクリープ変形は製材と差はない¹⁷⁾が、水分非定常状態では集成材や乾燥製材より大きく¹⁹⁾、フランジ断面が小さいほど変形が大きくなる²⁰⁾ことが報告されている。しかし、道産I形梁を適切に利用するためには地域の使用条件をふまえてデータを収集する必要がある。例えば、湿潤気候の日本では施工中の雨掛かりなどにより含水率が高くなるおそれがある。また、北海道では高断熱高気密工法と全室暖房・計画換気システムにより冬季の室内が過乾燥状態になり、1階と2階の床組で温湿度条件が異なる場合もある。

そこで、本研究では道産I形梁の曲げクリープ挙動の把握と設計データの整備を目的として、調湿条件の異なる試験体を用いて水分非定常状態の室内で6年間の曲げクリープ試験を行い、クリープたわみに対する調湿条件や温湿度変動の影響、住宅の床組内部で実測した温湿度と試験条件との比較、ならびにクリープたわみの長期予測方法について検証した。

2. 実 験

2.1 試験体

試験体の断面形状と側面図をFig.1に示す。梁せいは210材に等しい235 mm、梁幅は64 mmとした。既報⁴⁾によればこのI形梁のたわみ制限スパンはSPF甲種2級の210材とほぼ同等である。フランジ

Fig. 1. Cross-section and side view of specimen.

にはトドマツの人工乾燥製材を枠組壁工法用構造用たて継ぎ材のJAS(甲種2級)に準じて欠点除去し、たて継ぎしたものを用いた。ウェブにはカラマツの構造用合板（丸玉産業(株)製、JAS特類2級、4 ply、12.5 mm厚）を用い、表層の繊維方向が梁軸と直交するようにした。フランジのたて継ぎ、フランジとウェブのかん合接合、ウェブ間のバットジョイントにはいずれも水性高分子-イソシアネート系接着剤（光洋産業(株)製、主剤はたて継ぎでKR-E26、その他でKR-134L、架橋剤はAJ-1）を用いた。

クリープ試験体は4体とし、既報¹⁾の製造方法により作製した長さ10 mのI形梁4体から長さ4 mのものを1体ずつ切り出した。試験体4体の曲げ剛性を油圧式強度試験機を用いた曲げ試験により測定したところ、ほぼ同等であった。なお、I形梁は作製してから9ヶ月ほど温湿度が制御されない室内で保管されたもので、試験体を切り出した時点のフランジ材の全乾法による含水率は平均値AV 9.6%（変動係数CV=3.7%，試験体数 $n=4$ ）であった。

クリープ試験体の試験期間中の含水率変動を推定するために、各試験体の近傍から長さ500 mmのI形梁を1片ずつ切り出し、両端の切断面をポリウレタン樹脂塗料（和信化学工業(株)製、ポリウレックス537、アルミ粉末を重量比で5%添加）で被覆したものを重量測定用試験片として用意した。

クリープ試験体と試験片の4組のうち、各2組を20℃65% RHと20℃85% RHに制御された恒温恒湿室で供試直前まで約2ヶ月ほど調湿した（以下、各調湿条件を65(85)RH、各試験体を65(85)A・Bと記す）。クリープ試験体の両端からそれぞれ約70 mmほど切り落として供試直前の含水率を全乾法で測定したところ、65RHのフランジでAV 11.0%（CV 3.0%， $n=8$ ）、ウェブでAV 10.7%（CV 1.6%， $n=4$ ）、85RHのフランジでAV 15.6%（CV 2.7%， $n=8$ ）、ウェブでAV 15.4%（CV 0.6%， $n=4$ ）であった。最終的にクリープ試験体の長さは3840 mmとした。

2.2 試験方法

曲げクリープ試験の方法を Fig. 2 に示す。試験スパンは既報¹⁾で計算した実用条件（等分布荷重，根太間隔455 mm）における制限スパンをもとに3640 mmとした。荷重条件は負荷により生じる曲げモーメントとせん断力の比率が等分布荷重と同一となる4等分点2点荷重方式とした。変位量の計測はスパン中央と両支点のフランジ上面でダイヤルゲージ式変位計（株テクロック製）を用いて行い，変位計とフランジ上面の間にはプラスチックプレート挿入した。載荷荷重は1体につき1.84 kNとした。これは床根太の負担幅455 mm，スパン3640 mm，住宅居室の長期たわみ計算用の積載荷重600 N/m²，固定荷重510 N/m²としたときの設計荷重である。既報¹⁾で行った同一荷重条件の曲げ破壊試験で得られた最大荷重のAV 21.7 kN（CV 11.8%， $n=10$ ）に対しては8.5%に相当した。加力は1体につき6枚の鋼板（19×75×2730 mm）を治具（重量96 N）で吊り下げる方法により行った。変位量の測定は載荷後10，30，60，120，240，480分後，それ以降は24時間ごと，3ヶ月以降は2日に1回，3年目以降は4日に1回の間隔で行った。試験は北海道立林産試験場の試験棟（以下，試験棟）の内部で2001年9月から2007年9月まで行い，棟内の湿度調整は一切なく，温度調整は冬季の日中に温風暖房が稼働するのみであった。試験体の周辺環境の温湿度はデータロガー（エスペック製）を用いて1時間ごとに自動計測し，試験片の重量は電子天秤（メトラー製）を用いて変位量と同期させて測定した。

3. 結果と考察

3.1 温湿度・含水率・たわみ・収縮量の長期変動

試験環境の温度 T (°C)，相対湿度 RH (%) の午後1時頃の実測値とともに， T と RH から算出した乾燥空気1 kgあたりの絶対湿度 AH (g/kgDA)，木

Fig. 2. Method of bending creep test.

材の乾燥状態を示す値として気象情報で活用されている湿度履歴を重み付けした実効湿度²²⁾ EH (%), Simpson²³⁾ の平衡含水率 EMC (%), 重量試験片の含水率 MC (%) を Fig. 3 に示す。なお， MC は試験片の重量測定値と供試直前の推定含水率（前述のフランジとウェブの全乾含水率からI形断面の各部の重量比で案分して65RHで10.9%，85RHで15.5%とした推定値）を用いて算出したものであり，各条件のA・Bともほぼ同様の挙動であったため2体の平均値を示した。その結果， T と RH についてはほぼ同様な増減傾向を示したが，減少過程では RH のほうがやや遅れて変動した。 MC と EMC は T より RH に近い挙動を示した。 MC は EMC よりも変動幅が小さく，65RHでは約8.5～11.5%，85RHでは約8.5～12.5%の範囲で推移した。85RHと65RHの MC を比較すると，載荷後に初期含水率の差は徐々に小さくなり，冬季の湿度の低い時期にほとんど差がなくなるが，夏季の湿度の高い時期には85RHのほうが

Fig. 3. Fluctuation of parameters at ambient air condition.
Note: T : Temperature, RH : Relative humidity, EH : Effective humidity, AH : Absolute humidity, EMC : Equilibrium moisture content, MC : Moisture content estimated by weights and moisture content measured by the oven dry method immediately before the start of loading, $MC_{65(85)}$: Average MC of two specimens equilibrated at 20°C and 65 (85) % RH until the start of creep test, MC_0 : Initial MC at the start of loading.

65RHよりもMCが高くなった。その後も同様の傾向は見られたが、その差は経年とともに小さくなった。このことから、載荷前の調湿処理によって吸湿性が変化し、高い湿度で調湿すると長期にわたり吸湿しやすくなることが示された。

支点2カ所の平均変位 d_s を梁せいの収縮量とし、スパン中央の変位から d_s を差し引いた値を全たわみ δ_m とし、それらの全試験期間の挙動をFig. 4に示す。 d_s と δ_m は変動幅こそ異なるがほぼ同様な増減傾向を示した。 δ_m については、各試験体の載荷直後のたわみ δ_0 はほぼ同等であったが、初期含水率の高い85RHのほうが65RHよりも初期の変形増加が著しかった。その変形増加は載荷後90日間のデータを抜粋したFig. 5で見ると載荷後約10日間で生じていた。同図の85RHのMCがその期間で著しく減少しており、脱湿に伴う典型的なMS変形が生じたことが看取される。その後のたわみ変動は、Fig. 4を見るといずれのタイプとも湿度や含水率変動と鋭敏に反応しながら、湿度が低下するときにはたわみが増大し、湿度が上昇するときにはたわみが減少する傾向を長期間繰り返した。その長周期の変動幅は65RHより85RHのほうが大きく、載荷前の調湿処理が長期にわたりたわみ変動に影響を及ぼすことが示された。なお、65RHと85RHともに長期変動幅は経年とともにやや小さくなる傾向が看取された。

今回測定された湿度変動に伴うたわみ変動幅は既往の製材や集成材の実大クリープの結果⁷⁻¹²⁾に比べて大きかった。既往の研究によれば試験体の断面寸

Fig. 5. Fluctuation of MC, EMC, δ_m and d_s during the first 90 days.

Note: All symbols: See Fig. 3 and 4.

法が小さいほど、湿度変動の周期が長いほどたわみ変動は大きい²⁴⁾とされ、そのような現象の発生要因は同一応力下の引張りひずみと圧縮ひずみの収縮膨潤効果が異なるため²⁵⁾と考えられている。すなわち、脱湿過程では材の収縮によって圧縮ひずみは増加し、引張りひずみは減少するが、圧縮ひずみの変化のほうが大きいために曲げたわみが増加する。一方、吸湿過程では膨潤による圧縮ひずみの変化が引張りひずみよりも大きいために曲げたわみが回復するとされる。I形梁の場合、曲げ応力のほとんどを負担するフランジが外周環境にさらされて水分拡散が内部まで進行しやすいために、上記のような現象が製材や集成材の梁よりも顕著に発現し、実大材ながら小断面部材のように大きなたわみ変動を示すものと推察された。

3.2 温湿度・含水率・たわみ・収縮量の短期変動

含水率MCと全たわみ δ_m 、収縮量 d_s の各測定間隔における変動幅の関係をFig. 6に示す。ここでは載荷直後の初期含水率に起因するMS変形を除外するために載荷後10日以降のデータを対象とした。いずれのタイプにおいても d_s および δ_m とMCの測定間較差の相関は高く、短期的にも δ_m の変動が水分の吸脱湿量と密接な関係にあることが示された。回歸直線の傾きは、 d_s では65RHと85RHの差が明確ではないが、 δ_m では65RHより85RHのほうが大きかった。これは前節で述べたように載荷前の調湿条件によって吸湿性に差が生じて85RHのほうが含水率変動が大きかったためであろう。また、MC変動幅

Fig. 4. Fluctuation of δ_m and d_s during the whole test period.

Note: d_s : Average of displacement at both supports, δ_m : Deflection at mid-span by subtracting d_s . δ_0 : Initial deflection at the start of loading, 65(85)A・B: Symbols of four specimens.

Fig. 6. Typical relationship between MC and d_s or δ_m amplitudes except for the first 10 days after the loading starts.

Note: 65(85)B, d_s and δ_m : See Fig. 4, r : Correlation coefficient, **: Significant at 1% level, a : Slope of regression line about negative (–) or positive (+) MC amplitudes.

を正と負の領域で分けたときの δ_m の回帰直線の傾きは, MC 変動幅が正, すなわち MC の増加時のほうが減少時よりも大きかった。高橋ら²⁶⁾の研究においても初期含水率が同じでも吸湿履歴によりクリープ変形が増大することが報告されており, 適切な含水率で製造された構造材でも使用されるまでに余分な水分を吸着しないように留意すべきであろう。なお, 最近の研究では高温乾燥製材²⁷⁾や燻煙熱処理材²⁸⁾, 熱処理木材²⁹⁾ではクリープたわみの量と変動幅が小さくすることが報告されており, クリープを抑制する技術の進展が望まれる。

δ_m や d_s と温湿度パラメータとの単相関を求めた結果を Table 1 に示す。ここでも載荷後10日以降のデータを対象とした。 d_s では MC との相関が最も高かったが, δ_m では実効湿度 EH との相関が最も高

Table 1. Correlation coefficients between parameters at ambient condition and d_s or δ_m amplitudes except for the first 10 days after the loading starts.

Type	MC	T	RH	AH	EH	EMC
65A d_s	-0.683**	-0.691**	-0.023	-0.452**	-0.332**	-0.056
δ_m	-0.442**	-0.582**	-0.348**	-0.087**	-0.624**	-0.351**
65B d_s	-0.761**	-0.504**	-0.083*	-0.419**	-0.494**	-0.056
δ_m	-0.528**	-0.474**	-0.337**	-0.015	-0.671**	-0.333**
85A d_s	-0.834**	-0.584**	-0.197**	-0.544**	-0.571**	-0.162**
δ_m	-0.682**	-0.325**	-0.372**	-0.100**	-0.763**	-0.361**
85B d_s	-0.734**	-0.712**	-0.241**	-0.627**	-0.464**	-0.206**
δ_m	-0.721**	-0.264**	-0.317**	-0.098**	-0.752**	-0.301**

Note: MC , T , RH , AH , EH and EMC : See Fig. 3, d_s and δ_m : See Fig. 4, **: Significant at 1% level, *: Significant at 5% level.

かった。一般にクリープ変形は相対湿度との相関が高いと言われているが, 実大材では湿度変動に伴う水分の吸脱着に時間を要するため, 過去の履歴を積み付けした EH のほうがクリープ変動と水分変化を適切に表現できる可能性が示唆された。

3.3 枠組壁工法住宅で実測した温湿度との比較

今回の試験条件の妥当性を検証するため, 枠組壁工法住宅の床組の温湿度を測定した。対象住宅は, 旭川市内にモデルハウスとして平成13年10月に竣工した2階建て住宅(延床38.2坪)である。住宅の概要と測定位置を Fig. 7 に示す。なお, 床根太には枠組壁工法用製材が用いられている。温湿度測定は, 1階北側の台所の床組と東側のトイレ室の天井の2カ所にてデータロガー(エスベック株製)を用いて平成13年10月から14年10まで行った。温度は冬季のみ温水暖房により調節され, 湿度は制御されなかった。測定結果を Fig. 3 の試験棟内の温湿度と併せて Fig. 8 に示す。温度 T については, 1F床組では10~20℃の範囲で推移し, 2F床組では夏季に30℃まで上昇するものの年間を通して20℃付近で安定的に推移し, いずれも試験棟より変動幅は少なかった。相対湿度 RH については, 竣工直後で1・2F床組とも試験棟より高かった。その要因には, 床組に使用された製材の初期含水率の高さ, 施工時の雨掛かり等による床組製材や床下盛り砂の吸水, 基礎コンクリートの養生不足などが考えられた。その後, RH は徐々に低下し, 2月頃には試験棟とほぼ同等となった。2F床組では3月頃に約30%まで低下するが, 4月以降は緩やかに上昇しながら40~60

Fig. 7. Measuring points of temperature and relative humidity in first and second floor framing of a wooden frame house constructed as a show-house at Asahikawa in October 2001.

Fig. 8. Comparisons of T and RH between the laboratory and a wooden frame house.

Note: T and RH : See Fig. 3, 1・2F: Measured values in first or second floor framing of wooden frame house, Lab: Measured values in laboratory quoted from Fig. 3.

%の範囲で推移し、全体的に試験棟より低い湿度状態であった。一方、1F床組では4月以降は冬季間閉鎖していた床下換気口を開放したために外気の影響で大きく変動しながら上昇し、夏季には80%を超える高い湿度状態となった。なお、今回のモデル住宅は床断熱方式であったが、近年、基礎断熱方式が増えつつある。福島ら³⁰⁾によれば、同方式の床下では床断熱方式より RH が低く維持され、30~70%で推移することが報告されており、今回の試験棟と同様の環境になるものと推察される。

以上より、クリープ試験の温度条件は1F床組とはほぼ同等であり、湿度条件は1F床組と2F床組の間を推移しており、実用環境と比べて今回の試験環境は概ね妥当であったと言える。しかし、今回の載荷直後の RH より湿度が低い時期または部位に施工されると、今回より載荷直後の脱湿によるMS変形が大きくなるおそれがある。今後は、載荷時期の異なる条件でデータを蓄積すること必要であろう。

3.4 クリープたわみの長期予測

ここでは、非定常状態のクリープたわみの実用的な長期予測値について、二つの方法を用いて検証した。一つ目はパワー則であり、一定荷重下における木材や木質材料のクリープ変形の特に長時間側で適合性が高い⁶⁾とされ、次式で表される。

$$\delta_m = \delta_0 + \delta_{c(t)} = \delta_0 + At^N \quad (1)$$

ここで、 δ_m は収縮量を差し引いた全たわみ、 δ_0 は載荷直後のたわみ、 $\delta_{c(t)}$ は t 日後のクリープたわみ、 A と N は定数であり、 $\delta_{c(t)}$ と t の両常用対数の線形回帰から求めた。二つ目は、枠組壁工法建築物構

造計算指針³¹⁾に示される剛性低減係数の算出方法であり、初期たわみを載荷1分後ではなく載荷直後とすれば t 日後の剛性低減係数 K_b は次式で表される(以下、低減法)。

$$K_b = \delta_0 / \delta_m = 10^{et^f} \quad (2)$$

ここで、 e と f は定数であり、 K_b と t の両常用対数の線形回帰から求めた。なお、この方法は理論的に求められない2変数間の関係を測定結果から経験的に決定する方法として工学分野で広く用いられ³²⁾、同指針でも設計を行うための便宜的な値³¹⁾として採用されている。

t の常用対数と(1)式の $\delta_{c(t)}$ または(2)式の δ_0 / δ_m の常用対数の代表的な関係をFig. 9に示す。図中の点線は全測定データを対象とした回帰直線であり、実線は黒丸で示される載荷初日の計測データ(10分~480分後)を除外して求めた回帰直線である。点線の全測定データでは載荷直後の実測値と回帰直線のかい離が大きく、その傾向は65RHよりも85RH、(2)式の低減法より(1)式のパワー則のほうが顕著であった。実線の初日除外データではいずれも回帰直線の傾きが小さくなった。

それらの回帰式から求めた各クリープ定数を用いて計算した初期たわみに対するその後のたわみの比 δ_m / δ_0 (以下、相対クリープ)を実測値と併せてFig. 10に示す。全データを対象とした計算値(点線)では、低減法(灰色点線)よりパワー則(黒色点線)

Fig. 9. Typical correlation between $\log_{10} t$ and $\log_{10} \delta_{c(t)}$ by Eq. 1 or $\log_{10} \delta_0 / \delta_m$ by Eq. 2.

Note: $\delta_{c(t)}$: Creep deflection at t -days, δ_0 and δ_m : See Fig. 4.

Legend: ●: Date within 24 hours after the loading starts, Dotted line: Regression line about all data, Solid line: Regression line about partial data except for the data within 24 hours after the loading starts.

Fig. 10. Typical relative creep of observed data and estimated values by Eq. 1 and Eq. 2.

Note: δ_m/δ_0 : Relative creep, δ_0 and δ_m : See Fig. 4, All data: All data after the loading starts, Partial data: Partial data except for the data within 24 hours after the loading starts.

のほうが短時間側と長時間側で実測値からかい離し、その傾向は65RHよりも85RHで顕著であった。一方、初日データを除外した計算値（実線）では、パワー則（黒色実線）が実測値の中心線に近似し、試験期間をとおして実測値との適合性が高まるとともに、低減法（灰色実線）との差はほとんどなくなった。MS変形の大きな部材の長期推定においては、実測値と予測値の適合性を高めるために一次クリープと二次クリープの分離^{9, 33, 34}、パワー則に乾燥過程のMS変形を考慮した係数を付加する方法³⁵などが提案されている。ここでは初期のMS変形の大きな85RHでも初日データを除外するだけで適合性を高められることが示された。

クリープ定数と50年後の相対クリープ δ_{50}/δ_0 の予測値をTable 2に示す。全データを対象としたパワー則の定数を見ると、 A/δ_0 は85RHのほうが大きく、 N は65RHのほうが大きかった。木質構造設計規程¹³では、気乾状態の木材や集成材では A/δ_0 と N はともに0.2程度とされ、有馬ら⁶の複合梁の実験結果では A/δ_0 は0.17~0.23、 N は0.22~0.27とされている。それらと比べると今回の85RHは A/δ_0 が大きいものの N は小さく、初期のクリープ変形は大きいものの後の長期的なクリープの進行はそれほど大きくないことが示された。 δ_{50}/δ_0 については、全データによる予測値では低減法よりパワー則のほうがやや大きい、初日除外データによる予測値では両者の差はほとんどなかった。なお、試験期間の影響を検証するために、対象データを載荷から1, 3, 6,

Table 2. Creep constants and relative creep after 50 years estimated by Eq. 1 and Eq. 2.

Type	Data	Eq. 1			Eq. 2		
		A/δ_0	N	δ_{50}/δ_0	e	f	δ_{50}/δ_0
65A	All	0.102	0.197	1.71	-0.036	-0.038	1.56
	Partial	0.117	0.176	1.66	-0.039	-0.031	1.57
65B	All	0.180	0.156	1.83	-0.032	-0.086	1.68
	Partial	0.254	0.103	1.70	-0.030	-0.094	1.66
85A	All	0.427	0.114	2.30	-0.036	-0.178	2.14
	Partial	0.606	0.059	2.08	-0.027	-0.203	2.08
85B	All	0.549	0.118	2.75	-0.036	-0.241	2.47
	Partial	0.918	0.039	2.34	-0.020	-0.285	2.34

Note: A and N : Creep constants estimated by Eq. 1, e and f : Constants estimated by Eq. 2, δ_{50}/δ_0 : Relative creep after 50 years, δ_0 : See Fig. 4, δ_{50} : Predicted deflection at mid-span after 50 years, All and Partial data: See Fig. 10.

9ヶ月後、1~6年後まで増やしながら算出した δ_{50}/δ_0 をFig. 11に示す。その結果を見ると、 δ_{50}/δ_0 はパワー則（図中の黒色プロット）よりも低減法（灰色プロット）、全データ（点線）よりも初日除外データ（実線）のほうが小さく、より早く収束する傾向にあった。実用上の設計データを求める上では、構造計算指針³¹で定める試験期間（5週間以上）では安全側の評価にはなるが、初期の含水率変動が大きな試験体では過剰設計になるおそれがあり、木村ら¹⁰も提案しているように少なくとも温湿度変動の1周期（1年）以上の試験期間が望ましいと言える。

以上の結果より、初日データを除外した6年間のデータをもとに算出した δ_{50}/δ_0 を採用すると、今回

Fig. 11. Typical relative creep after 50 years estimated with data from beginning of loading to each elapsed times (1, 3, 6, 9 months and 1 to 6 years).

Note: All and Partial data: See Fig. 10.

の試験条件の場合、65%で調湿した試験体では50年後のたわみは初期たわみの約1.7倍、85%で調湿した試験体では約2.4倍に増大することが予測された。前述のように実際の施工条件によっては本試験よりも大きなクリープ変形が生じるおそれはあるが、道産I形梁のクリープをできるだけ抑えるためには、施工までに余分な水分を吸着しないように管理することが重要である。道産I形梁は小断面の乾燥製材と構造用合板を用いるため、製造時の含水率は管理しやすい。また、今回の温湿度環境ではMCが約8~12%の範囲で推移しており、同様の環境の工場で製造・保管されれば、含水率を12%以下に抑えることは可能である。あとは工場出荷から施工までの間に、事故的水掛かりなどによって吸湿しないように養生や保管に留意すべきである。

4. 結 論

本研究では、道産I形梁の曲げクリープ特性を調べるために、水分非定常状態の室内で6年間の曲げクリープ試験を行い、以下の結論を得た。

スパン中央の全たわみ δ_m は載荷後約10日間で脱湿によるMS変形を示し、変形量は65RHより85RHのほうが大きかった。その後も、 δ_m はMC変動と鋭敏に反応しながら、湿度低下時にはたわみが増大、湿度上昇時にはたわみが減少する傾向を長期間繰り返した。たわみの変動幅は、季節間の長期変動と各測定間隔の短期変動ともに、65RHより85RHのほうが大きかった。85RHのMCは湿度が高い時期に65RHより高かったことから、載荷前の調湿処理が吸湿性を変化させ、長期にわたり含水率変動とたわみ変動に影響を及ぼす可能性が示唆された。

パワー則と低減法を用いたクリープたわみの長期予測値は、パワー則より低減法、全データより初日除外データのほうが実測値との適合性が高かった。初日データを除外した6年間のデータにより算出した50年後の相対クリープは、65RHで約1.7倍、85RHで約2.4倍となる可能性が示された。道産I形梁のクリープを抑えるためには、施工までに余分な水分を吸着させないことが望ましく、事故的水掛かりなどによって吸湿しないように養生や保管に留意すべきである。

文 献

- 1) 大橋義徳, 佐藤 司, 田口 崇, 戸田正彦, 松本和茂, 高山光子, 十河哲也: 林産試験場報 **18** (4), 1-8 (2004).
- 2) 大橋義徳, 佐藤 司, 田口 崇, 前山伊三男, 栗林 茂, 久保武司, 久保拓也: 特許第3997360号 (2007).
- 3) 大橋義徳, 佐藤 司, 戸田正彦, 前田典昭, 田口崇, 古田直之: 林産試験場報 **19** (2), 1-8 (2005).
- 4) 大橋義徳, 佐藤 司, 戸田正彦, 前田典昭, 田口崇, 古田直之: 林産試験場報 **20** (1), 1-9 (2006).
- 5) 大橋義徳, 戸田正彦, 藤原拓哉, 佐藤 司, 平井卓郎: 木材学会誌 **54** (1), 24-32 (2008).
- 6) 有馬孝禮, 佐藤雅俊, 益田恵吾: 建築研究報告 **95**, 25-80 (1981).
- 7) 荒武志朗, 有馬孝禮: 木材学会誌 **41** (4), 359-366 (1995).
- 8) 武田孝志: 木材工業 **51** (11), 511-513 (1996).
- 9) 高橋茂男, 北村俊夫, 森 拓郎, 笹川 明, 五十田博: 日本建築学会構造系論文集 **551**, 87-94 (2002).
- 10) 木村 衛, 楠 寿博, 鷺海四郎: 日本建築学会構造系論文集 **561**, 169-176 (2002).
- 11) 岡崎泰男, 谷川信江, 飯島泰男, 有馬孝禮: 日本木材学会大会研究発表要旨集, 岐阜, 2002, p. 222.
- 12) 荒木博章, 池田元吉, 前田貴昭, 荒武志朗: 日本木材学会大会研究発表要旨集, 札幌, 2004, p. 108.
- 13) 日本建築学会: “木質構造設計規準・同解説”, 丸善, 東京, 2006, pp. 165-187.
- 14) 小松幸平, 前田典昭, 北村維朗: 林産試験場月報 No. 391, 8-16 (1984).
- 15) 渡部裕充, 田中 圭, 井上正文: 日本建築学会大会梗概集, 北陸, 2002, pp. 33-34.
- 16) McNatt, J. D., Superfeskys, M. J.: *U.S. Forest Serv. Res. Pap. FPL* **441**, 1-10 (1983).
- 17) Leichti, R. J., Tang, R. C.: *Wood Fiber Sci.* **21** (2), 142-154 (1989).
- 18) Fridley, K. J., Tang, R. C.: *Forest Prod. J.* **42** (6), 17-22 (1992).
- 19) Gowda, C., Kortessmaa, M., Ranta-Maunus, A.: *VTT Publications* **278**, 1-35 (1996).
- 20) Bach, L., Cheng, J. J., Khoo, H. A., Bach, J. B.: Proc. of the 4th Struct. Specialty Conf. of the CSCE, Montreal, Canada, 2002, pp. 1-10.
- 21) Wisniewski, B., Manbeck, H. B.: *J. Arch. Eng.* **9** (1), 41-45 (2003).
- 22) 日本機械学会: “湿度・水分測定と環境のモニタ”, 技報堂出版, 東京, 1992, pp. 22-24.

- 23) Simpson, W. T. : *Forest Prod. J.* **21** (5), 48-49 (1971).
- 24) 川添正伸, 祖父江信夫 : 木材学会誌 **47** (2), 81-91 (2001).
- 25) Hunt, D. G., Shelton, C. F. : *Wood Sci. Technol.* **22**, 199-210 (1988).
- 26) 高橋智佳, 古田裕三, 飯田生穂, 石丸 優 : 日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, 2005, p. 61.
- 27) Bengtsson, C., Kliger, R. : *Holzforschung* **57** (1), 95-100 (2003).
- 28) Aratake, S., Tanaka, H., Arima, T. : Proc. of World Conf. on Timber Eng., Portland, USA, 2006 (CD-ROM).
- 29) Epmeier, H., Johansson, M., Kliger, R., Westin, M. : *Holz Roh Werkst.* **65**, 343-351 (2007).
- 30) 福島 明, 入江雄司 : 日本建築学会計画系論文報告集 **478**, 17-22 (1995).
- 31) 日本ツーバイフォー建築協会 : “枠組壁工法建築物構造計算指針”, 工業調査会, 東京, 2002, pp. 138-139, 219-260.
- 32) 伊藤 學, 亀田弘行 : “土木・建築のための確率・統計の基礎”, 丸善, 東京, 1977, pp. 303-310.
- 33) 森 拓郎, 北村俊夫, 五十田博, 高橋茂男, 笹川明 : 構造工学論文集 **49B**, 593-598 (2003).
- 34) Hunt, D. G. : *Wood Sci. Technol.* **38**, 479-492 (2004).
- 35) 荒武志朗, 森田秀樹, 有馬孝禮 : 木材学会誌 **48** (4), 233-240 (2002).