

構造用合板と木材のビス接合部のせん断における クリープ限度の推定*1

小川敬多*2, 小林研治*2

Estimation of Creep Limit of Screw Joints between Timber and Structural Plywood under Constant Shear Loading*1

Keita OGAWA*2 and Kenji KOBAYASHI*2

In a situation where the development of various novel wooden structural materials continues, it becomes necessary to understand the creep properties of wooden screw joints under shear loading. Therefore, shear creep tests for joint specimens were conducted. Screw joint specimens consisting of solid wood (Japanese cypress) and structural plywood made of softwood were used for the tests. The tests were conducted in a testing room controlled at 20 °C temperature and 65% relative humidity. The shear load was applied for over 40000 hours. The stress levels were determined as 39.0-70.2% of the standard yield load obtained by monotonic-loading tests. The slip-time relationships were obtained by the tests. This study proposed a method for estimating the creep limit by analyzing the slip-time relationships. By applying the proposed method, the creep limit of the screw joint specimens was estimated as 27.6% of the yield load.

Keywords : screw joint, long-term load, shear, creep limit.

様々な木質構造用新材の開発が進んでいる昨今、ビスによる木材と木質面材料の接合部においても、長期的なせん断力が掛かることが想定されるようになってきている。これを踏まえて、ビス接合部のせん断におけるクリープ特性を把握する必要があると考え、せん断クリープ試験を実施した。主材をヒノキ、側材を構造用針葉樹合板としたビス接合部試験体を用いて、室温20 °C、湿度65%に制御された恒温恒湿室にて、40000時間を超えるせん断負荷を与えた。応力レベルは、降伏耐力を基準値として39.0~70.2%とした。せん断負荷時間の増加にともなって変位が増加する挙動を示した。本研究では、測定された変位-時間関係をもとに、クリープ限度を推定する方法を提案した。提案した方法を用いると、本試験でのビス接合部のクリープ限度は、応力レベル27.6%であることが推定された。

1. 緒 言

木材の構造物への利用に対する機運が高まるなか、様々な外力に対して安全な構造物を設計することが必須である。木質構造の構造特性には、接合部

の強度性能が支配的となることが良く知られており、したがって、接合部の強度性能の把握は不可欠である。現代の木質構造では様々な種類の接合部が用いられているが、ビスを用いた接合部は、施工性の良さや引き抜き抵抗の大きさ等を利点として、国内外で多く見られようになってきた。その利用としては、例えば、耐力壁におけるパネル材の張り付け¹⁾や、木質ラーメン構造における柱と梁の接合²⁾、直交積層板 (CLT) 壁体の脚部の留め付け³⁾等が挙げられ、これらは地震や台風等の短期的に作用する外力を想定したものであった。ところが近年では、例えば村上ら⁴⁾によるフランジとウェブ合板をビス接合した充腹梁の開発や、藤田ら⁵⁾による単板積層材

*1 Received January 22, 2020; accepted April 22, 2020.

*2 静岡大学大学院農学領域 College of Agriculture, Academic Institute, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan

Corresponding author: K. Ogawa (ogawa.keita@shizuoka.ac.jp)

のフランジとウェブをビス接合したストレートスキンパネルの開発が試みられている。これらを想定した場合には、接合部に長期的なせん断力が作用することから、接合部での長期荷重に対する変形挙動を把握することが必要となる。しかしながら、ビス接合部の短期的なせん断力下における研究例は数多く存在するものの⁶⁾、長期的なせん断力下においては実験データ^{7, 8)}が散見される程度で、変形挙動を理解するのに十分な知見を得られているとは言い難い⁹⁾。

本研究は、ビス接合部の長期的なせん断力下における変形挙動の把握を目的としており、特に、クリープ限度に主眼を置いたものである。ビス接合部試験体に対して40000時間を超える長期の载荷試験を実施し、時間の増加に伴う変形の挙動を解析することによって、クリープ限度を推定した。クリープ限度は“永久に破壊することなく継続荷重に耐えうる応力度または荷重の最大値”と知られているが¹⁰⁾、その値を決定するための明確な定義が存在しない。

機械工学分野の資料では“10000時間に0.1%のクリープひずみを生ずるような応力”という記述が見られるが¹¹⁾、木材強度学分野では、沢田¹²⁾は“単位時間当たりのひずみ増加量が一定となる時のひずみ量が、静的比例限度におけるひずみの計算値に等しくなる荷重”と提案しており、桑村¹³⁾は“建物の耐用年数内で不安定クリープ領域（いわゆる三次クリープ）に入らない応力の上限”と提案している。一方、杉山^{10, 14)}は“継続荷重を受けてもクリープが休止する応力度または荷重の最大値”と定義し、また、クリープ限度を求める解析手法として、クリープ関数（時間依存による変形量と载荷初期の変形量の比）を用いる方法を提案した。ある経過時間におけるクリープ関数と応力レベルの関係を図示した際に、傾斜の異なる二つの折れ線が現れることを発見し、その交点をクリープ限度と定めた。この杉山の方法は近年に至っても支持されており、例えば、松本¹⁵⁾による製材および集成材、中島¹⁶⁾や松本¹⁷⁾による単板積層材、荒武¹⁸⁾や高梨¹⁹⁾によ

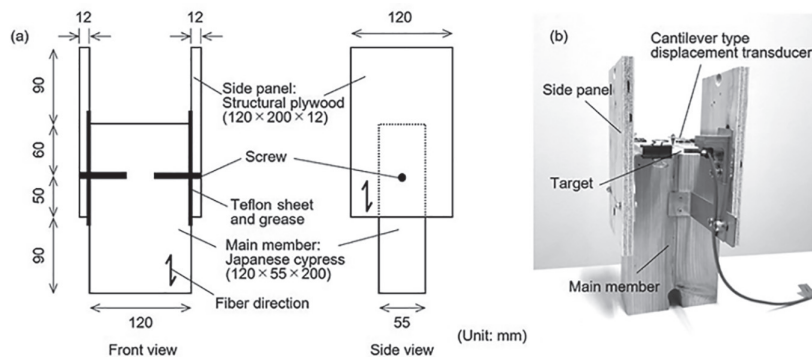


Fig. 1. Screw joint specimen.

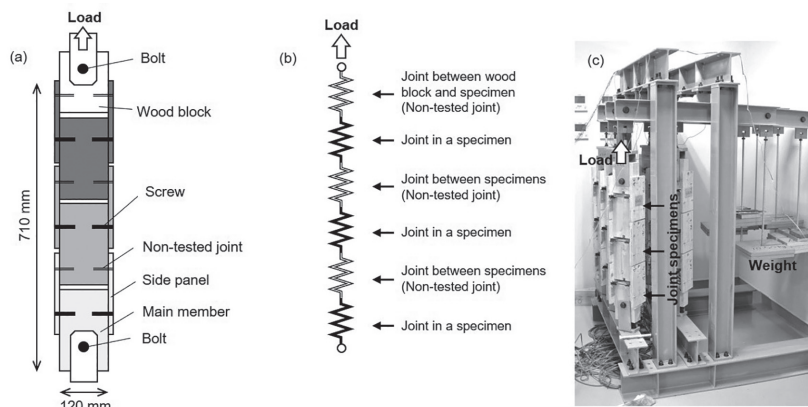


Fig. 2. Creep test specimen and experimental setup.

る CLT に対して適用された実績がある。

本報で筆者らが試みたクリープ限度の推定方法(詳細は後述)は、既往の提案とは定義や値の決定方法において違いがみられ、40000時間超という長期間で収録された変形挙動のデータを活かしたものである。なお、木材の粘弾性挙動を表現するうえで、バネとダッシュポットを用いたモデル²⁰⁾を適用することが一般的になされており、木質接合部においても、Jangら^{21, 22)}によって適用された例がある。しかしながら、本研究で得られた試験結果に対して、バネとダッシュポットを用いた四要素モデル等の適用を試みたものの、その適合性が低かったことから、本報ではこれに関する考察を行わなかった。

2. 試験体と試験方法

2.1 せん断クリープ試験

ビス接合部試験体を Fig. 1 に示す。主材には寸法 $120 \times 55 \times 200$ mm のヒノキ材 (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) を用いた。密度の平均値と標準偏差は 498 ± 23 kg/m³、含水率は $12.8 \pm 0.2\%$ であった。側材には $120 \times 200 \times 12$ mm の構造用針葉樹合板(5プライ、表層:ヒノキ、内層:スギ、JAS 特類 2 級)を用いた。密度と含水率はそれぞれ 501 ± 18 kg/m³、 $10.8 \pm 0.3\%$ であった。Fig. 1 (a) に示すように、主材に対して両側から 2 枚の側材で挟み込み、それぞれ 1 本のビスを用いて接合した。ビスは長さ 41 mm、呼び径 4.2 mm、頭部径 9.0 mm の耐力壁ビス (BX カネシン(株)製、KS4041) を用いた。主材-側材間の摩擦を抑えるために、厚さ 0.1 mm のテフロンシート 2 枚を挟み込み、また、そのテフロンシートの間にはグリースを塗布した。

クリープ試験は Fig. 2 に示すように実施した。Fig. 2 (a) で示すように、ビス接合部試験体 3 体を直列に繋げて 1 組とし(図中では、色の濃淡で別々の接合部試験体であることを示す)、これを Fig. 2 (c) で示すようにてこ式のクリープ試験機に設置した。具体的には、一番下の接合部試験体の主材を試験機下部とボルトで接合し、側材を中央の接合部試験体の主材と接合した。この接合部は力を伝達させることのみを目的としたもので、本研究の接合部の解析の対象ではない(図中では Non-tested joint と称し、二重線で示す)。なお、この接合部では上記と同じビスを片側 2 本ずつ用いて留め付けた。同様に、中央の接合部試験体の側材を一番上の試験体の主材と接合し、また、一番上の接合部試験体の側材を、力の伝達および側材の開閉防止を目的として、木製ブロック(寸法: $120 \times 55 \times 200$ mm)

と接合した。木製ブロックを試験機とボルトで接合し、ここを加力点として、図のように鉛直上向きに載荷した。これをバネモデルで示すと、Fig. 2 (b) のようになる。このように、3 体の接合部試験体に同じ大きさのせん断力が作用するセットアップを構築した。各接合部試験体において、Fig. 1 (b) に示すように、主材にカンチレバー式変位計((株)東京測器研究所製、CE-10)、側材に変位計ターゲットを取り付け、主材-側材間のスリップ変位を測定した。

載荷荷重は、0.83 kN, 1.11 kN, 1.39 kN の 3 条件とした。なお、これらは過去に同じ仕様の接合部試験体を用いた静的せん断試験した際^{8, 23)}に得られた長期許容せん断耐力(1.39 kN)に対して、0.6倍、0.8倍、1.0倍した値である。ただし、接合部試験体に作用する応力レベルの値は、次節および次章で記す単調加力試験結果に基づいてクリープ試験後に決定した。試験体数は各条件で 3 体ずつ、計 9 体とした。試験体の載荷荷重(すなわち、せん断力)、降伏耐力、応力レベルを Table 1 に示す(降伏耐力、応力レベルの値については後述)。なお、Fig. 2 (c) では本報で研究対象としなかった試験体も一緒に写っている。試験は室温 20 °C、湿度 65% に制御された恒温恒湿室²⁴⁾ で実施した。試験開始は 2014 年 11 月 12 日であり、試験終了は 2019 年 6 月 13 日とした。載荷時間は 40167 時間であった。データ収録にあたって、試験開始から 15 分間は 3 秒毎、続く 5 分間は 20 秒毎、続く 25 分間は 60 秒毎、続く 90 分間は 5 分毎、続く 10 時間は 30 分毎と順次収録間隔を増やしていき、以降は 1 時間毎にデータを収録した。

2.2 単調加力試験

クリープ特性を考察するうえで、試験体に作用した応力レベルを決定する必要がある。そこで本研究では、クリープ試験終了後の試験体を用いて単調加力試験を実施し、応力レベルの基準値を求めること

Table 1. Applied load, yield load, and stress level for each joint specimen.

| Specimen | Applied load P_a (kN) | Yield load P_y (kN) | Stress level (%) |
|----------|-------------------------|-----------------------|------------------|
| a | 0.834 | 2.14 | 39.0 |
| b | 0.834 | 2.10 | 39.7 |
| c | 0.834 | 1.86 | 44.8 |
| d | 1.112 | 2.39 | 46.5 |
| e | 1.112 | 2.34 | 47.5 |
| f | 1.112 | 1.76 | 63.2 |
| g | 1.390 | 2.22 | 62.6 |
| h | 1.390 | 2.20 | 63.2 |
| i | 1.390 | 1.98 | 70.2 |

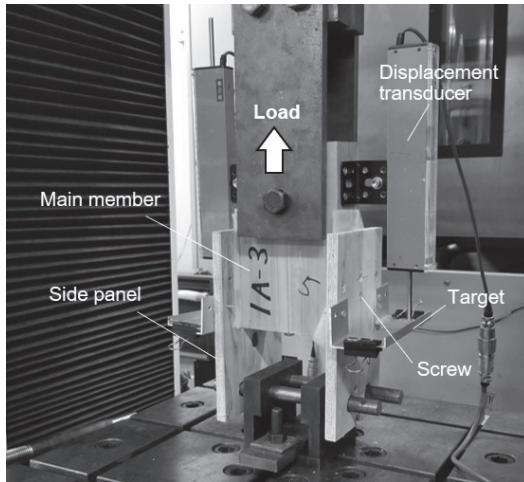


Fig. 3. Experimental setup for the monotonic-loading test.

とした。クリープ試験終了後、接合部試験体のビスを取り外し、Fig. 1 (a) における上方向に20 mm ずらした箇所に、新品のビスを打ち直した。すなわち、クリープ試験と同じ材料で、荷履歴を無視できるビス接合部試験体を作製した。この試験体を Fig. 3 に示すように、万能材料試験機（株）島津製作所製、AG-1 250kN）を用いて単調加力した。側材の下部は丸鋼を介して試験機と固定し、主材上部にM16ボルトを介して上向きに加力した。加力速度は5 mm/min とし、最大荷重に到達後、その80%に低下するまで負荷を続けた。せん断力は、ロードセル（株）島津製作所製、SFL-50kNAG）の読み取り値とした。また、主材-側材間の変位を試験体両面に取り付けた変位計（株）東京測器研究所製、SDP-100C）を用いて測定した。なお、試験体の変位は、2つの変位計の読み取り値の平均値を採用した。

3. 結果と考察

3.1 単調加力試験結果

本報では、論旨の展開のわかりやすさを優先し、始めに2.2節で記した単調加力試験の結果を報告する。試験により得られたせん断力-変位関係を Fig. 4 に示す。なお、縦軸のせん断力は、試験体1体あたり（すなわち、接合部2か所での合計）の値である。いずれの試験体においても、加力初期では急激にせん断力が増加し、1.7 kN 付近で傾きが小さくなった。その後は、ほぼ一定の傾きでせん断力が増加しながら、3.5~4.7 kN で最大荷重に至り、その後

はせん断力が低下した。なお、最大荷重時の変位はおおよそ15~25 mm であった。

この結果を用いて、クリープ試験における応力レベルの基準値を決定した。本研究では、降伏耐力 P_y を基準値に採用することとした。降伏耐力 P_y は以下の手順²⁵⁾により決定した (Fig. 5)。1) せん断力-変位関係上の縦軸値が $0.1 P_{max}$ と $0.4 P_{max}$ に対応する2点を直線で結び、これを直線 I とする。なお、ここで P_{max} は最大荷重を示す。2) 同様に、 $0.4 P_{max}$ と $0.9 P_{max}$ に対応する2点を直線で結び、これを直線 II とする。3) 直線 II をせん断力-変位関係に接するように平行移動させ、これを直線 III とする。4) 直線 I と III の交点を通り、横軸に平行な直線 IV をひく。直線 IV とせん断力-変位関係との交点を降伏点とする。これにより求めた降伏点を、Fig. 4 の白プロットで示す。いずれの試験体でも、上述の傾きが小さくなる場所よりも少し上側に位置する結果となった。なお、この傾向は筆者ら²⁶⁾が釘接合部で報告した内容と同様であった。

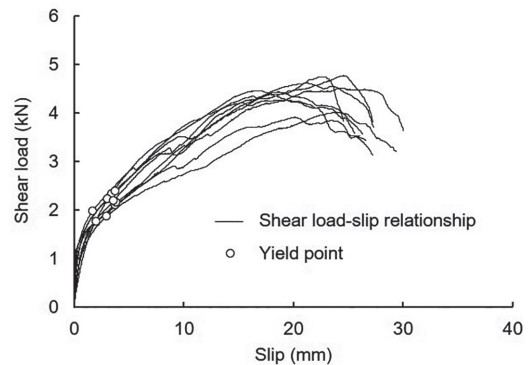


Fig. 4. Load-slip relationships obtained by the monotonic-loading test.

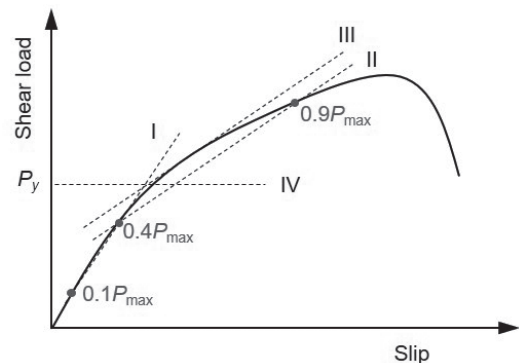


Fig. 5. Method for determining the yield load P_y .

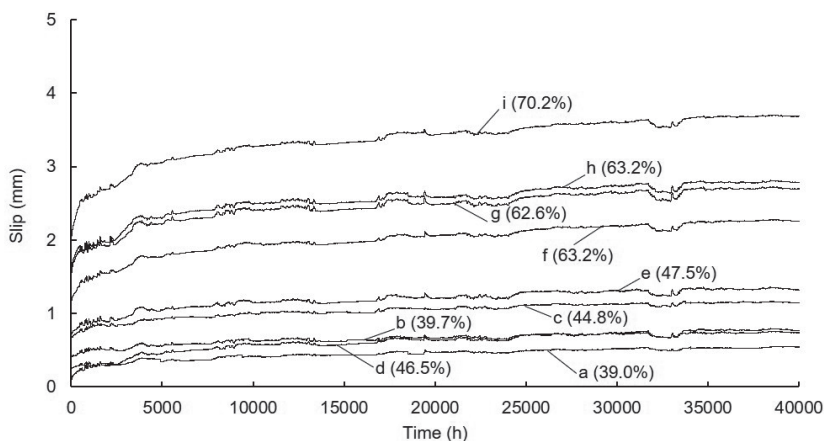


Fig. 6. Slip-time relationships obtained from the creep tests. The symbols and values in parenthesis refer to test specimen and stress level (see Table 1).

各試験体で得られた降伏耐力 P_y の値を Table 1 に示す。また、これを基に算出した応力レベルを併せて示す。なお、応力レベルは、実際に载荷した荷重 P_a を降伏耐力 P_y で除した結果を百分率で示したものである。これによれば、今回のクリープ試験の応力レベルは39.0～70.2%であった。また、いずれの P_a でも P_y を大きく下回っていることから、クリープ試験は線形粘弾性の範囲内で行われたと判断できる。

なお、部材を対象とした長期荷重性能を調べる際は、最大荷重を応力レベルの基準に採用することが一般的であるが^{27, 28)}、今回は降伏耐力を基準に採用した。部材の場合は文献の強度値等を用いておおよそその最大荷重を求めることができるが、接合部の場合は最大荷重を知るには一般的に試験を要する。一方、降伏耐力であれば、例えばヨーロッパ型降伏理論を用いれば、文献に記載される特性値からおおよそその値を求めることができる。したがって、実際に試験を実施していない（あるいはデータ等を保有していない）場合であっても、接合部のクリープ限度のおおよその値をイメージするには、降伏耐力を基準とした方が適していると考えたためである。

3.2 クリープ試験結果

クリープ試験により得られた変位-時間関係を Fig. 6 に示す。図中の記号は各試験体 (Table 1 参照) を示しており、また、括弧内の値は応力レベルを示している。いずれの試験体でも、時間が経過するにつれて、指数関数的に変位が増加した。载荷初期では曲線的に変位が増加しているが、4000～5000時間付近からは直線的に増加する様子がうかがえる。グ

ラフ中のおおよそ2500～4000時間の範囲では、変位の増加が大きくなっている。これは、この期間は恒温恒湿室の調整のため、一時的に湿度が高くなったためである。調整中に温度湿度データロガーの故障があったために正確な値が不明であるが、この期間は最大で湿度が75%程度まで上昇した可能性がある²⁴⁾。なお、4000時間以降は調整が完了し、相対湿度 $65 \pm 3\%$ の範囲内で推移している。

応力レベルに注目すると、応力レベルが低いほど変位の値は小さくなる傾向が見られた。しかしながら、試験体 d のように、応力レベルが46.5%であるものの、試験体 b や c (それぞれ39.7%, 44.8%) よりも変位が小さくなる試験体も現れた。同様に、試験体 f と h は同じ応力レベルではあるものの、変位には载荷期間全体を通して0.5 mm ほどの変位の違いが現れた。以上から、応力レベルは接合部の変位に大きく影響する要因ではあるものの、試験体のバラツキに左右されるところも大きいことが明らかになった。このバラツキの原因として、例えば、クリープ試験時と単調加力試験時のビスの打ち込み位置における部材での局所的な物性に違いがあったこと、あるいは、ビス打ち込み時に部材内部で生じている微小な破壊の様子が両試験時で違っていたことなどが考えられる。しかしながら今回の研究では、バラツキの原因の断定には至らなかった。

3.3 クリープ限度の推定

前節でも報告した通り、変位-時間関係は、時間の増加に伴って曲線的に変位が増加する範囲と直線的に増加する範囲に分けられる。そこで、直線的に増加する範囲において、その傾きを求めた。ここで

は、載荷時間が20000時間に到達すると、変位-時間関係は完全に直線的な挙動に移行している（遅延時間を過ぎている）と考え、横軸値20000~40167時間でのデータプロットを対象に、最小二乗法による直線回帰をした。なお、沢田¹²⁾が“クリープ変形の増加速度がほぼ一定となるのは200時間程度”との見解を残していることを鑑みると、解析対象が20000時間以降という設定は、完全に直線的な挙動に移行しているとの判断に足ると考えている。この傾きと応力レベルとの関係をFig. 7のプロットで図示する。これによれば、応力レベルが大きくなるにつれて、傾きも大きくなっている。このプロットに対して直線回帰をしたところ、図の点線が描かれ、決定係数は0.970と高い値を示した。続いて、この回帰線の横軸切片に注目する。横軸切片は、傾きが0になる応力レベルを意味しており、すなわち、載荷を継続させても変位が増加しないことを意味している。本研究では、これをクリープ限度であると定めた。Fig. 7中の回帰式を用いれば、本試験でのビス接合部のクリープ限度は27.6%となった。

ビス接合部のクリープ限度が得られたところで、本研究でのクリープ限度に対する考え方を、既往の考え方と比較する。本研究では、単位時間における変位の増加が0となる応力レベルをクリープ限度と定めており、これは、杉山¹⁰⁾の“継続荷重を受けてもクリープが休止する荷重の最大値”と同義であると考えられる。しかしながら、値の決定方法が異なり、杉山はクリープ関数と応力レベルの関係における傾斜の異なる二つの折れ線の交点としていることに対し、本研究の方法は、先述の回帰線の外挿により値を推定するものであり、これは、Sugimotoら²⁹⁾、Sasakiら³⁰⁾、筆者ら³¹⁾がかつて疲労限度の推定で試みた方法に考え方が似ている。上述の“クリ

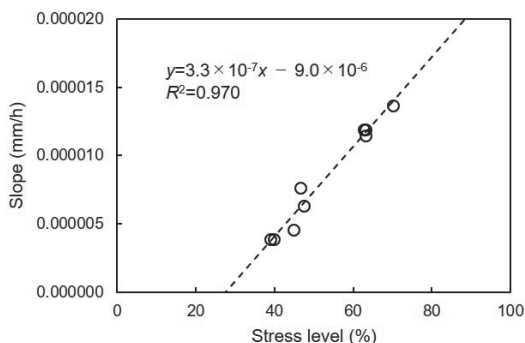


Fig. 7. Slope-stress level relationship. The intersection of the regression line (dotted line) and the horizontal axis identifies the creep limit.

ープの休止”を現すのであれば、本研究の方が適しているように考えられるが、一方、結果を得るまでに長い時間を要する点で実用性は低い。これの克服のためには、例えば、変位-時間関係において完全な直線的な変形挙動への移行の時間を判断する手法を考案し、より小さな載荷時間でのデータプロットでも、正確な傾きを求められることが重要と考えられる。なお、本試験結果に対して杉山の方法を試みたが、クリープ関数-応力レベル関係における折れ線の交点が現れず、クリープ限度は決まらなかった。これは、今回のクリープ試験での応力レベルの最低値(39.0%)がクリープ限度を上回っているためと考えられる。

4. 結 論

ビス接合部のせん断クリープ特性の把握を目的として、主材をヒノキ、側材を構造用針葉樹合板としたビス接合部のクリープ試験を実施した。試験により得られた変位-時間関係を見ると、試験開始からおおよそ4000~5000時間までは曲線的な挙動が見られたが、それ以降では直線的に変位が増加する挙動が現れた。この挙動をもとに、クリープ限度の推定を試みた。この直線的な挙動における傾きと応力レベルの関係を調べると、散布図で一直線上にプロットされることを発見し、その回帰直線を用いて単位時間における変位の増加が0となる応力レベルを求めた。これによれば、本試験でのビス接合部試験体のクリープ限度は、降伏耐力を基準とした場合の27.6%であることが推定された。ただし、本研究は恒温恒湿条件下で試験をして得られた結果である。木質構造物での利用の際は水分非平衡の状態にあることから、メカノソープディープ変形が起こりえることを考えると、クリープ限度はより低くなる可能性がある。

謝 辞

本研究は平成25年森林整備加速化・林業再生事業(地域材利用開発事業分)の一環として実施したものである。また、せん断クリープ試験を実施するにあたり、静岡大学農学部住環境構造学研究室の当所在籍学生諸君に多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を示す。

文 献

- 1) 小松幸平, 瀧野眞二郎, 東丸真一: スギ小幅板や挽き割材等で構成された耐力壁の水平せん断性能. 木材研究・資料 34, 167-186 (1998).

- 2) 秋山信彦, 稲山正弘, 小野塚真規, 河原重明, 清水 武: 鋼板ビス留め式2材合せ木質ラーメン構造の柱梁接合部に関する研究 - パネルシアを考慮した集成材-鋼板間ビス接合の解析式の提案 -. 日本建築学会構造系論文集 **79** (703), 1337-1346 (2014).
- 3) 張 雲翔, 小林研治, 安村 基: 脚部を引きボルトおよびビス留め金物で緊結したCLT耐力壁の地震時挙動. 木材学会誌 **65**(2), 71-82 (2019).
- 4) 村上素子, 福山 弘, 北村治男, 原田浩司, 鈴木 圭, 清水庸介, 後藤隆洋: 木造軸組工法によるフランジ継手のある合板充腹梁の実大曲げ試験. 日本建築学会技術報告集 **21**(48), 585-590 (2015).
- 5) 藤田和彦, 稲山正弘, 李 元羽, 成田敏基: 単板積層材ストレススキンパネルのクリープ特性 その1 実大材の検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2014, pp. 347-348.
- 6) 小林研治: 木質構造におけるビス接合部の力学特性. 木材工業 **64**(6), 252-257 (2009).
- 7) 河村 進, 稲山正弘, 李 元羽, 成田敏基: 単板積層材ストレススキンパネルのクリープ特性 その2 接着ビス接合部の検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2014, pp. 349-350.
- 8) 大木秋緒, 小林研治, 安村 基, 北村治男: 合板を側材に用いたビス接合部のクリープ試験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2014, pp. 481-482.
- 9) 小林研治: 木質構造におけるビス接合部の現状と今後の課題. 木材学会誌 **61**(3), 162-168 (2015).
- 10) 杉山英男: クリープ試験. “建築構造学大系22 木構造”, 彰国社, 東京, 1971, pp. 28-31.
- 11) 例えば川田雄一: 材料の機械的性質. “材料力学 - 基礎と強度設計 -”, 裳華房, 東京, 2003, p. 11.
- 12) 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 **98**, 85-116 (1957).
- 13) 桑村 仁: 木材の縦圧縮クリープ限度 - 鉄骨木質構造の研究 その14 -. 日本建築学会構造系論文集 **77**(681), 1691-1700 (2012).
- 14) Sugiyama, H.: The creep deflection of wood subjected to bending under constant loading. *Transactions of AIJ* **55**, 60-70 (1957).
- 15) 松本和茂, 大橋義徳: 各種道産部材の実大曲げクリープ試験. 日本木材学会北海道支部研究発表講演集 **38**, 5-8 (2006).
- 16) 中島史郎: クリープ関数を用いた荷重継続時間の調整係数 試験評価方法の適用範囲. 第66回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 2016, D27-07-1100.
- 17) 松本悠杜, 中島史郎: クリープ関数の分析に基づく木質構造材料のクリープ限度の推定法に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2016, pp. 75-76.
- 18) 荒武志朗, 深田 学: 宮崎県産スギを用いたCLTの長期性能 (その2) クリープ関数による荷重継続時間の調整係数の推定 (荷重比の検討). 第67回日本木材学会大会研究発表要旨集, 福岡, 2017, D18-P1-16.
- 19) 高梨隆也, 大橋義徳, 石原 亘, 松本和茂: クリープ関数によるカラマツCLTのクリープ限度の推定. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018, pp. 351-352.
- 20) 中野隆人: 線形粘弾性理論. “木質の物理”, 日本木材学会編, 文永堂出版, 東京, 2007, pp. 113-132.
- 21) Jang, S., Polensek, A.: Theoretical models for creep slip of nailed joints between wood and wood-based materials. *Wood Sci. Technol.* **23**, 237-249 (1989).
- 22) Jan, S., Fujimoto, Y., Mataki, Y.: Viscous-viscoelastic models for creep of nailed joints using plywood, particleboard and medium density fiberboard as sheathing materials. *Mokuzai Gakkaishi* **39**(4), 418-427 (1993).
- 23) 大木秋緒, 小林研治, 安村 基, 北山治男: 合板を側材に用いたビス接合部のクリープ試験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2014, pp. 481-482.
- 24) 小林研治, 田中 孝: 加湿器と除湿器の設置による恒温恒湿室を試みた実験室の温湿度制御性能評価. 木材工業 **70**(10), 428-431 (2015).
- 25) 河合直人: 接合部の標準試験方法. “木質構造設計規準・同解説 - 許容応力度・許容耐力設計法 -”, 日本建築学会編, 丸善出版, 東京, 2011, pp. 367-369.
- 26) 小川敬多, 原田真樹, 渋谷龍也, 宮本康太: 各種構造用面材を用いた釘接合部の一面せん断特性と変形性状の把握. 木材学会誌 **64**(4),

- 139-148 (2018).
- 27) 例えば平成12年5月31日建設省告示第1446号：建築の基礎, 主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本産業規格又は日本の農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件. 建設省 (2000). (最終改正：令和元年11月6日国土交通省告示第763号).
- 28) 例えば2018年枠組壁工法建築物 設計の手引き・構造計算指針編集委員会：材料及び接合部の許容応力度等を定める試験・評価方法とその解説. “2018年枠組壁工法建築物構造計算指針”, 一般社団法人日本ツーバイフォー建築協会編, 丸善出版, 東京, 2018, pp. 263-306.
- 29) Sugimoto, T., Yamasaki, M., Sasaki, Y.: Fatigue and hysteresis effects in wood-based panels under cyclic shear load through thickness. *Wood Fiber Sci.* **38**(2), 215-228 (2006).
- 30) Sasaki, Y., Oya, A., Yamasaki, M.: Energetic investigation of the fatigue of wood. *Holzforschung* **68**(7), 843-848 (2014).
- 31) Ogawa, K., Shimizu, K., Yamasaki, M., Sasaki, Y.: Fatigue behavior of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) under repeated compression loading tests perpendicular to the grain. *Holzforschung* **71**(6), 499-504 (2017).