

# プレストレス木床版の湿度変化特性に関する実験的研究

成 田 圭 介\*・米 谷 裕・堀 江 保

## Laboratory Tests About the Behavior of Stress-Laminated Timber Deck Influenced by Humidity

Keisuke NARITA, Hiroshi YONEYA and Yasushi HORIE

(2000年11月30日受理)

Stress-laminated timber (SLT) bridge was developed in Canada in 1970, and improved in U.S. in the middle of 1980s. SLT deck consists of lumber laminations that are compressed transversely by high-strength steel rod. Using timber, SLT is easily influenced by the change of environment conditions; especially, the change of humidity.

In this study, in case of using cedar lamina as SLT, the influence of SLT caused by the change of humidity was evaluated by measuring stress. The loss of stress stems from relaxation of the steel rod and creep of the lumber. The result of the test indicates that the value of moisture content influences the stress level: the reduction of humidity and release of moisture of timber decreases the stress level; whereas, the rise of humidity and absorption of moisture of timber give rise to increase of the stress level. It is confirmed that the condition on humidity and an early stage of the stress condition play an important role of performance of SLT.

### 1. 緒 言

わが国では、木橋は戦前から小規模な橋梁に用いられてきたが、1950年代になると、鋼橋やコンクリート橋に取って代われ、ほとんど姿を消してしまった。これは、当時のわが国には構造用木質材料の製造技術が乏しく、長大な構造部材が得られなかったことや、防腐処理技術が未熟で部材の耐久性が低かったことなどによる。<sup>1)</sup>

一方、ヨーロッパやアメリカ、カナダなど諸外国の歴史を見ると、1800年代中頃から木橋の建設が始まっている。1940年代中頃からは、集成材を使用した木橋が登場してきた。その後もアメリカ、カナダの道路橋を中心に多くの木橋が架けつづけられている。<sup>2)</sup>

大断面木造の場合と同様に、1980年代の後半になって、対候性の高い構造用大断面集成材の製造技術と防腐処理技術がわが国でも確立し、さらに木造の先進国からの近代的な木橋に関する技術情報もた

らされると、本格的な木橋を復興させようとする気運が生じてきた。また、近年の、景観や環境との親和性が重視されるような社会気運からも、木橋が注目され始めてきた。ここ数年、木橋の架設事例が急増している。<sup>2)</sup> 木橋の最大の特徴は環境に対するアメニティ効果である。木材が持つ天然材料としての特性が自然のぬくもりを感じさせ、違和感なく環境との調和を感じさせるところに鋼やコンクリートにはない特徴がある。<sup>1)</sup>

道路橋としての木橋のうち、最も実績があるのはプレストレス木床版橋である。この工法は本来、釘打ち積層床版の補修のための技術として、1976年にカナダ・オンタリオ州の道路局が開発したものである。釘打ち積層床版では、幹線道路の繰り返し荷重が原因で床版の一体性が低下し、製材ラミナ間の摩擦力が損失する現象が起きていた。このような床版の補修手段として考案されたプレストレス工法だが、1980年代からは、床版そのものを橋体とするプレストレス木床版へと発展し、オンタリオ州の道路橋示方書に設計法と施工法が規定された。プレストレス木床版橋は低コスト木橋としてヨーロッパを中

\* 秋田高専専攻科学生

心に普及し、近年ではオーストラリアや日本でも採用されるようになった。また、アメリカで更なる研究が進められ、1991年にはAASHTOによってその設計法が基準化されている。<sup>3)</sup> 最近では、1999年3月に秋田県協和町の広域林道にプレストレス工法を採用した床版橋が架設されている。

ところで、木橋の問題点はその耐久性である。わが国では近代的な木橋の歴史が浅く、架橋数も少ないため、設計施工のノウハウが十分に蓄積されていない。また、耐久性能は架設地の環境要因にも左右される。このため、周囲の環境の変化による影響を把握することは、長期間にわたる構造性能を解明する上で必要不可欠であり、耐久性向上の技術開発や、維持管理のために極めて重要である。影響要因は様々だが、特に、湿度の変動による影響は重要視されている。

本研究では、プレストレス木床版の湿度変化にもなう性状変化特性に注目し、プレストレスの経時変動、およびそれが湿度変化により受ける影響を明らかにすることを目的として、杉ラミナを用いた床版に各種湿度条件を与え、実験による検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2. 1 試験体

本研究の対象となるプレストレス木床版の試験体を図2-1に示す。

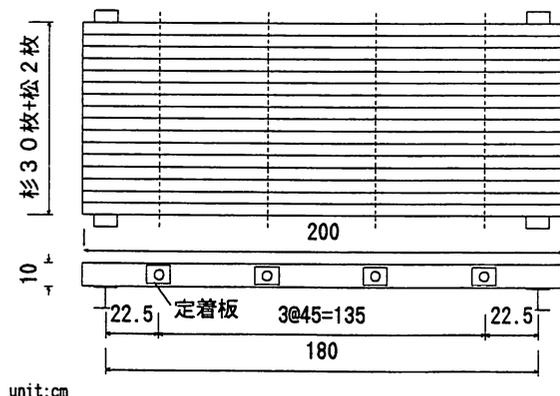


図2-1 プレストレス木床版図

床版は2点単純支持とし、その部材は、長さ200 cm、幅約2.5 cm、高さ約10.0 cmの杉の板を30枚敷き並べ、その両側に定着板に対する支圧強度を高めるために同サイズの松の板を配置し、図のような間隔で鋼棒を通した。これに取り付けたナットを締め付けることでプレストレスを発生させる。この鋼棒

の中央にはひずみゲージが2枚対称的に貼り付けてあり、これにより鋼棒のプレストレスを測定する。

### 2. 2 湿度条件

恒温恒湿室に与えた湿度条件は次の通りである。また、気温は全て20℃で一定とした。

- (1) 低湿度状態におけるクリープ挙動を確認するため、湿度30%で30日間一定とする
- (2) 高湿度状態におけるクリープ挙動を確認するため、湿度90%で30日間一定
- (3) 湿度上昇過程における床版の挙動を確認するため、湿度を30~60~90%と10日ごとに上昇させる
- (4) 湿度減少過程における床版の挙動を確認するため、湿度を90~60~30%と10日ごとに減少させる

### 2. 3 応力条件

床版に作用している応力度の違いによる挙動を確認するため、本試験体に2種類の応力度を与えた。1回目は4 kgf/cm<sup>2</sup> (鋼棒1本につき2000 kgf)、2回目は6 kgf/cm<sup>2</sup> (同3000 kgf) である。

応力とは鋼棒に与えているプレストレスを作用している面積で除した、床版に作用している単位面積あたりの力である。応力度で表現することにより、寸法の異なる床版と比較することができる。本研究では試験体の床版は同じものを使用しているため、応力度とプレストレスという言葉の意味に大差はないが、今後の研究や実橋との比較を簡便にするために、あえてここで区別する。

### 2. 4 含水率の測定

木材の含水率の変動とプレストレスの変動との関連性を確認するため、一部の測定において含水率を測定した。木材の含水率を知るためには、木材の絶対乾燥状態の重量を知らねばならないが、大きな床版を乾燥させることは不可能である。そこで本研究においては、木材の電気抵抗を利用して含水率を測定する木材水分計を利用した。これは、正確性には欠けるものの、含水率の推移を確認するためには充分であると判断した。

### 2. 5 試験方法

実験では図2-1の試験体を恒温恒湿室に設置し、2.2の湿度条件を与える。含水率の変動がなくなったところで2.3の応力条件でナットを締め付けプレストレスを導入し、その後の一ヶ月間に渡りプレストレスの変動を定期的に測定した。プレステ

ス導入直後と、湿度を変化させた直後は細かく測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 応力度による比較

床版に作用している応力度の違いによる挙動を比較することを目的として、各種湿度条件別に、プレストレス導入時から720時間(30日)までのプレストレスの変化率を示す。変化率とは、ある時間のプレストレスの、導入プレストレスに対する百分率である。プレストレスの損失は主に木材のクリープと鋼棒のリラクセーションによって生じる。さらには木材の含水率が平衡含水率(材料が放湿も吸湿もしない状態の含水率)以下の場合、床版の膨張によりプレストレスは増加し、また、平衡含水率以上の場合は収縮によるプレストレスの損失がある。

##### (1) 低湿度状態

図3-1に湿度を30日間30%で一定とした場合の結果を示す。また図3-2に応力度の大きいケースのプレストレスの変動と含水率の変動を併せて示す。

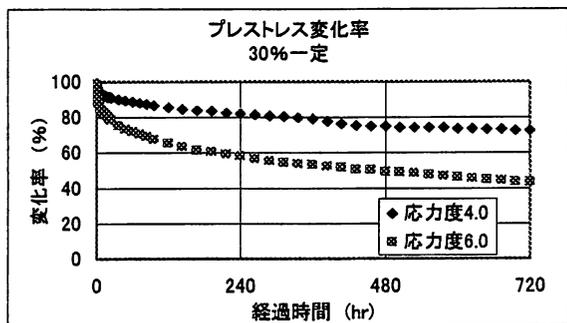


図3-1 低湿度状態下の緊張力変動

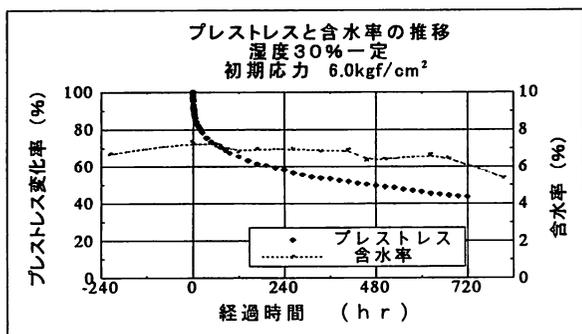


図3-2 低湿度状態下の含水率変動

一般に、応力度の大きい場合は、その変動も大きい。この結果からもそれが言える。含水率の変動は微小で、プレストレスの変動は240時間以降でほぼ一

様な下降をたどっている。すなわち、床版に作用している応力度の違いによるクリープの違いが確認された。

##### (2) 湿度上昇過程

次に湿度を240時間(10日)毎に上昇させた場合の変化率を図3-3に示す。含水率の変動を示した図3-4とあわせて比較すると、湿度の上昇の後これに伴って木材の含水率が上昇している。

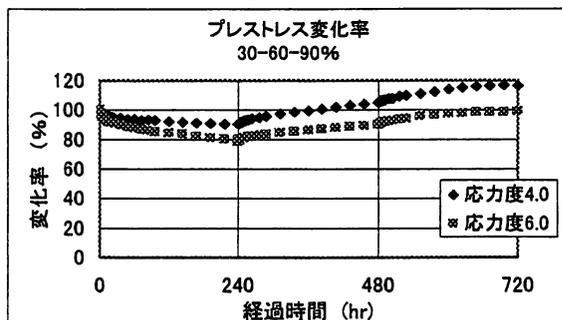


図3-3 湿度上昇過程の緊張力変動

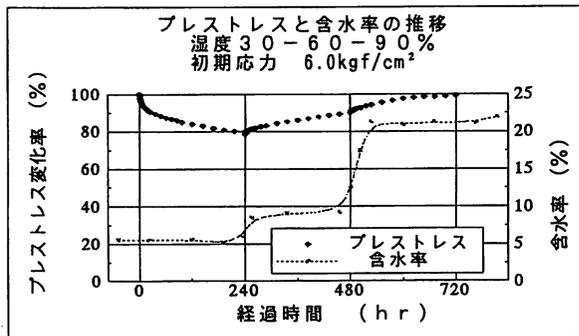


図3-4 湿度上昇過程の含水率変動

含水率の増加は材料の膨張につながり、床版のプレストレスの増加につながる。この場合、含水率の上昇中はプレストレスも増加し、含水率が一定になったところでプレストレスの増加も一樣になっている。プレストレスが小さい場合は、初めの10日間の損失は小さく、湿度上昇後、最終的には初期プレストレスを上回っている。このことから、床版に作用しているプレストレスが小さい場合は、湿度の上昇に伴う膨張が大きいといえる。すなわち、作用しているプレストレスと湿度環境条件によっては、予定以上の力で床版を締め付ける可能性もあることを示している。

##### (3) 高湿度状態

次に湿度を90%一定とした場合の結果を図3-5に示す。また、図3-6に応力6.0 kgf/cm<sup>2</sup>とした時の含水率の変動を示した。

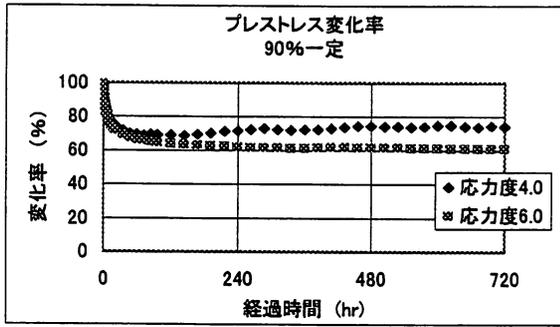


図 3-5 高湿度状態下の緊張力変動

くくなると考えられる。

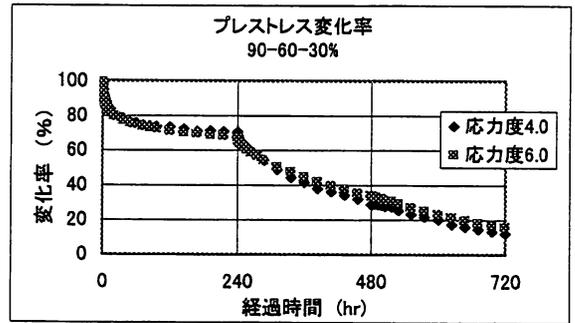


図 3-7 湿度減少過程の緊張力変動

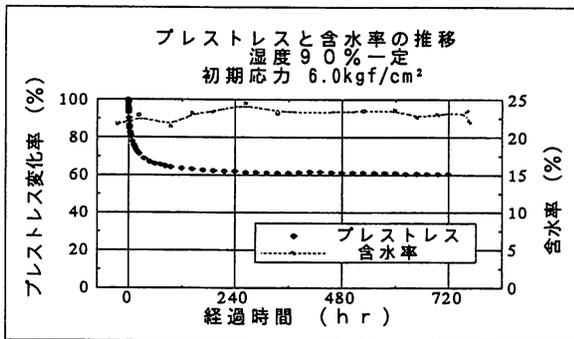


図 3-6 高湿度状態下の含水率変動

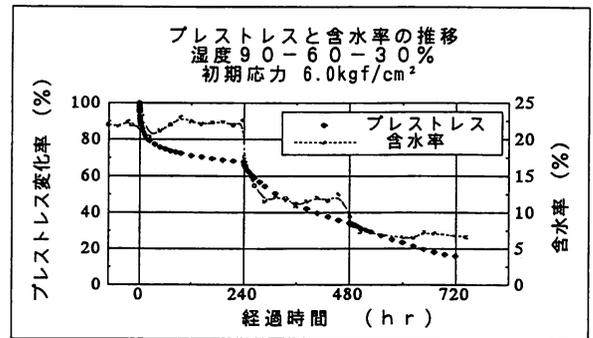


図 3-8 湿度減少過程の含水率変動

図 3-5 から、プレストレス導入直後からの損失は両者ともほぼ同じであるが、約100時間以降の変化に、初期プレストレスの大きさによる違いが現れている。プレストレスの大きい場合は初期の損失の後、一定の力を維持しているが、小さい場合は緩やかに上昇している。図 3-6 を見ると、初期のプレストレスの急激な損失の後、含水率が微妙に上昇し、その後一定となっている。プレストレスが小さい場合は、このときに増加した水分で床版が膨張し、低下したプレストレスを回復させたと考えられる。また、プレストレスの大きい場合では、減少したとはいえ床版が膨張するほどの損失ではなかったものと考えられる。

(4) 湿度減少過程

図 3-7 は湿度が減少した場合の結果である。両者とも最後まで同様な減少をたどっている。また、図 3-8 の含水率の変動を見ると、90%から60%に変化した時は、プレストレスと含水率の減少は大きいですが、60%から30%に変化した場合は、プレストレスの減少がほぼ一様となり、含水率の減少も小さい。

この現象は、湿度が上昇する過程でも起きている。図を見ると、湿度が30%から60%へ変化するときの含水率の差と、60%から90%へ変化するときの差は違う。すなわち、木材の含水率が低いほど変化しに

3. 2 湿度の影響

次に、プレストレス導入時の湿度の違いによる影響をしてみる。

図 3-9 に湿度30%と90%で30日間一定とした場合の結果を示し、クリープを比較する。導入プレストレスは3000 kgf、応力にすると6.0 kgf/cm<sup>2</sup>である。

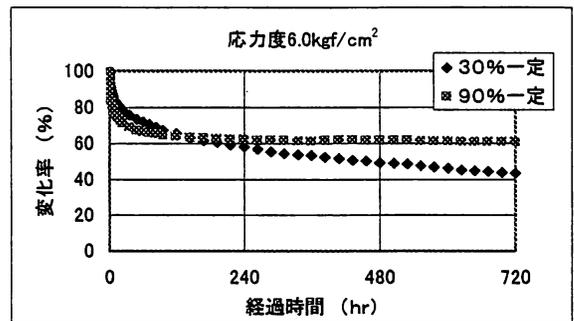


図 3-9 湿度の影響

一般に、木材の含水率が高いと力学的性能などは低下することから、湿度が高い場合はクリープによる損失が大きくなると予想された。しかし図 3-9 からは、逆に湿度が低い場合のプレストレスの損失が

大きくなっているとわかる。応力が小さい場合も同様の傾向が認められた。

湿度を10日ごとに上昇、または減少させた場合のプレストレス変化率を図3-10に示す。また、この時の含水率の変動を図3-11に示す。

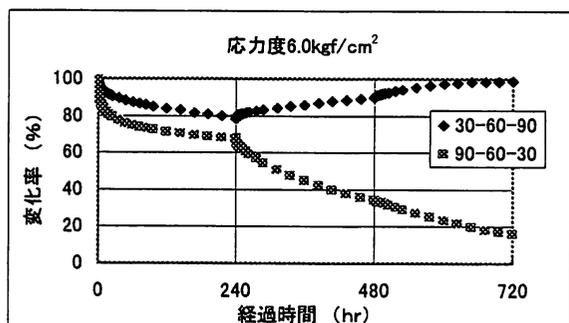


図3-10 湿度変化の影響

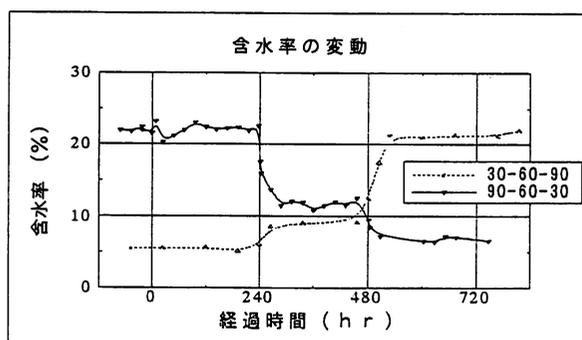


図3-11 含水率の変動

図3-10における、最初の10日間の傾向が先述の一般論と一致する。これらの違いの原因は現在検討中だが、湿度一定的环境下でも含水率が微妙に変動していることや、後述するプレストレス導入に要する時間などがクリープ挙動に影響を与えていると考えられる。そして、湿度変化後の最終的な差は約80%に広がっている。これが、湿度の変動による影響といえる。また、湿度の減少によるプレストレスの減少は、湿度の上昇によるプレストレスの増加より大きい。さらに、10日ごとに湿度を変化させているため、この結果からは湿度を変化させてから10日以降の挙動が明らかではない。プレストレスの増加にも限りがあり、ある程度時間が経てば減少に転ずると予想されるが、確認する必要がある。これにクリープによる損失も加わり、湿度変動環境下では、プレストレス木床版に作用している応力は徐々に減少していくと考えられる。

木材の含水率が低いほど含水率は変化しにくい傾向があることは先に述べた。図3-11を見ると、ある

湿度の時に吸湿も放湿もしなくなる含水率、平衡含水率に差がある。木材の平衡含水率は乾燥過程と吸湿過程で異なる性質があることを示している。

#### 4. 初期クリープ

図3-12に、導入プレストレスを3000 kgf (応力度で6.0 kgf/cm<sup>2</sup>)、湿度を30%として測定を開始した2つの実験結果を比べてみる。最初の10日間は同じ条件であるが、10日目の差は20%に開いている。この原因はプレストレスの導入作業に要する時間にあると考えられる。木材のクリープはプレストレス導入直後から始まるため、導入から測定開始までに時間がかかるとその分だけすでに損失が始まっている。また、目標とするプレストレス力への到達がすばやい場合には導入時の損失は少なく抑えられる。今回の実験では、プレストレス導入の際に時間を計っていたわけではなく、目標のプレストレス力にすばやく達した場合はよいが、そうでない場合は微調整を繰り返していたため、計測開始までに時間がかかりクリープ損失が進み、このような差が生じたと考えられる。

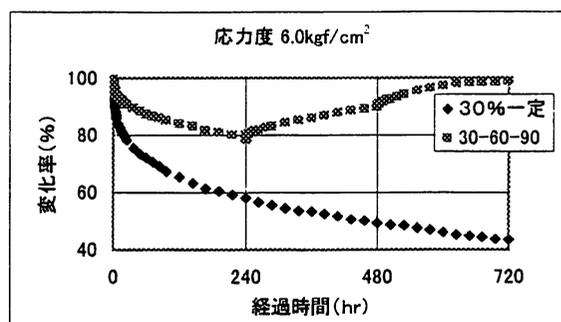


図3-12 同湿度・同応力からの緊張力変動

この現象を確認することを目的として、プレストレス導入開始から測定開始までの時間を変えて、初期のクリープを比較した。実験は、プレストレスの導入開始から7分、10分そして20分後のプレストレス力を初期値として計測を開始し、一週間測定した。導入プレストレスは2000 kgf/cm<sup>2</sup> (応力で4.0 kgf/cm<sup>2</sup>)である。また、湿度は30%で一定とした。

結果は図3-13である。20分後を初期値とした場合は、10分後を初期値としたものより初期クリープによる損失が進んでおり、測定開始後の損失が小さいことが確認された。しかし、7分後を初期値とした場合は、10分後、20分後を初期値としたものより計測開始後の損失がさらに小さくなっている。この原

因は検討中だが、プレストレス導入に要する時間の影響のほかに、ラミナの損傷などもクリープ損失の大きさに影響を与えていると考えられる。少なくとも、今後の研究ではプレストレスの導入から測定開始までに要する時間を統一する必要があると考えられる。

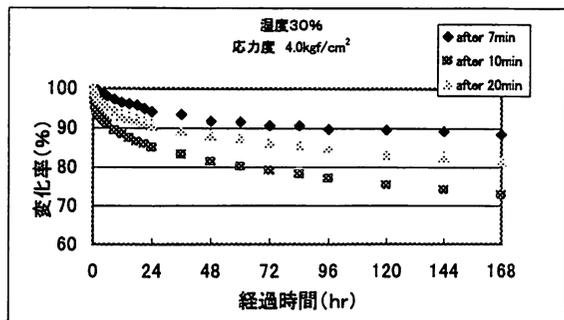


図 3-13 緊張力導入に要する時間の影響

## 5. まとめ

プレストレス木床版のクリープ挙動、および湿度の変動が与える影響を評価することを目的として、杉を用いた床版を恒温恒湿室に設置し、2種類の応力条件と各種の湿度条件を与えてプレストレスの変動を測定した。また、プレストレスの導入に要する時間が初期クリープ損失の大きさに与える影響を評価することを目的として、プレストレスの導入開始から測定開始までの時間を3パターンとり、比較検討した。得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 床版の初期応力が大きいほどクリープによる損失も大きいことが確認されたが、高湿度状態の初期クリープについては、慎重に再確認する必要がある。
- (2) 鋼棒のプレストレスは床版の含水率の変化に追従し、吸湿過程では増加の傾向にあり、乾燥過程では減少の傾向を示す。湿度上昇過程では、初期プレストレスの違いで、含水率の上昇によるプレストレスの増加に差が生じることが確認された。これにより、床版の初期応力と周囲の湿度環境条件によっては予定以上の力で床版を締め付ける可能性があることが示唆された。

- (3) 床版を締め付ける際の含水率が高いほど強度性能は低下するといわれている。応力の大小を問わず、含水率の高いほうが初期クリープによる損失の大きいことが確認されたが、初期の損失のあとで床版が膨張する傾向がみられた。
- (4) 木材の含水率について、乾燥過程からと放湿過程からでは平衡含水率が異なり、乾燥過程からのほうが若干大きくなることが確認された。また、含水率は低いほど変化しにくい傾向があることが確認された。
- (5) プレストレスの導入から測定開始までに要する時間は初期のクリープに影響を与え、同じ湿度と応力条件下でも床版は異なった挙動を示すことが確認された。初期クリープに影響を与える要因はほかにもあると考えられるが、今後の実験研究において結果を比較検討する際は、プレストレスの導入に要する時間を統一する必要がある。

以上のように、プレストレス木床版の基礎的性質と、その性能は周囲の湿度環境条件と初期応力条件が重要な要素であることが確認された。今後は、高湿度状態における初期クリープの検討をする必要がある。また、実際の供用下における挙動の評価や、木質構造物の主要部材である集成材の特性との比較検討なども重要な課題である。

このようなプレストレス木床版の挙動と湿度変動との関係を把握しておくことは、木橋の耐久性向上の技術開発や、維持管理においてきわめて重要であると考えられる。

## 参考文献

- (1) 全国林業改良普及協会：林業技術ハンドブック
- (2) 秋田県木材加工推進機構：コンサイス木材百科，1998年，p 274～277
- (3) Oliva, M.G.; Dimakis, A.G.; Tuomi, R.L. Stress-laminated wood bridge decks: experimental and analytical evaluations. Res. Pap FPL-RP-495. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. pp. 1～24