

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(2)

成 田 圭 介*・米 谷 裕・堀 江 保

Laboratory Tests About the Behavior of Stress-Laminated Timber Deck Influenced by Humidity (2)

Keisuke NARITA, Hiroshi YONEYA and Yasushi HORIE

(2001年11月30日受理)

Stress-Laminated Timber Deck (SLTD) bridge was developed in Canada in 1970s, and improved in U.S. in the middle of 1980s. SLTD consists of lumber laminations that are compressed transversely by high-strength steel rod. In our previous study, it is confirmed that the condition on humidity and an initial stress-level play an important role of performance of SLTD. The purpose of this study is to consider how the degree of the deformation of lamina that composes SLTD and the timing of re-stress influence application in stress-level under the condition that humidity, and to examine the change in stress-level of SLTD bridge in the environment. These were examined by measuring stress-level, the loss of which stems from relaxation of steel rod and creep of the lumber. Result indicated that the amount of the recovery of the deformation of lamina influenced change in stress-level of SLTD and, that the good timing of the application of re-stress was one week after the initial stressing. Moreover, it was confirmed that several kind of factors influenced the change in stress-level of SLTD bridge in the real environment.

1. 緒 言

わが国での近代木橋の多くは歩道橋であるが、林道などを中心にして道路橋も数多く架設されてきている。これは①地元産材の需要拡大と有効利用を図ること②森林保護のために間伐材の有効利用と用途開発の必要があること③目的に応じた木材加工の技術が進歩したことなど、時代の雰囲気と社会のニーズによる部分と、アメニティの一環や自然との調和など木材の持つ景観や感触のよさに基づく付加価値が一般に認識されてきたことによると考えられる。¹⁾

1976年にカナダ・オンタリオ州の道路局によって開発されたプレストレス木床版は、もともとは老朽化した木床版の補修手段であったが、1980年代のはじめからは床版そのものを橋体とする工法として発展した。現在では床版橋に限らず、アーチ橋やラーメン橋の橋床としても数多く採用されている。プレ

ストレス木床版は、幅員方向に敷き並べた木質材料を複数のプレストレス (PS) 鋼棒で緊張することで一体化させ、床版の剛性と耐久性を向上させる構造である。1983年にオンタリオ州道路局の道路橋示方書 (OHBDC) に設計法と施工法が規程されており、アメリカにおいても道路橋示方書 (AASHTO) に設計基準が取り入れられ、近年ではヨーロッパの設計基準 (Eurocode-5) にも取り入れられている。道路橋としての木橋のうち、このプレストレス木床版橋が最も多く、特に北米で架設数が多い。¹⁾²⁾

わが国では昭和62年以降で800~900の木橋が架設されており、20橋以上は道路橋である。最近の秋田県においては、平成11年3月に協和町の林道にプレストレス木床版を橋床に採用した百目石橋 (集成材タイドアーチ橋) が架設され、平成12年12月に藤里町の広域基幹林道に坊中橋 (鋼・集成材ハイブリッド木橋) が完成している。¹⁾

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

* 秋田高専専攻科学生

秋田県産天然ゼオライトの地盤工学的性質に関する考察

- Balkema, pp. 137-142, 2001.
- 6) 伊藤 颯, 伊藤宏幸, 鵜沼雄一: セリサイトを含む地盤の圧密沈下予測法とレオロジー特性に関する研究, 東北地域災害科学研究, 第37巻, pp. 223-228, 2001.
 - 7) Holtz, R.D. & Kovacs, W.D.: An Introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall Inc. P. 544, 1981.
 - 8) Mayne, P.W.: Cam clay predictions of undrained strength, ASCE, Vol. 106. GT11, pp. 1219-1242, 1980.

ない。また、木材は周囲の温湿度変化に伴う含水率変化によって膨張と収縮を繰り返す特性を持つ材料であるため、木橋の耐久性能は架設地の環境にも左右される。さらに、プレストレス木床版の場合は、そのプレストレス変動、すなわちクリープ変形挙動も構造特性に重要な影響を与える。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、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。こうした背景のもと、本研究では、木道路橋として最も実績のあるプレストレス木床版の湿度変化に伴う性状変化特性に注目し、プレストレス木床版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、温湿度を制御した条件での、プレストレスの経時変動を測定する実験による検討を行っている。また、床版を構成するラミナの变形程度に関する検討と、再プレストレスの導入時期に関する検討も行っている。

2. プレストレスとクリープ挙動

プレストレス木床版のプレストレス変動は、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。プレストレス木床版は、PS鋼棒が緊張されることによりラミナ同士が圧縮され、一体化し、床版として機能させる構造である。木材に限らず、材料は荷重を受けると変形する。この場合、木材は幅員方向からの荷重を受けるので、床版の面内方向に変形が進む。この木材の変形によって、PS鋼棒の緊張が緩み、床版に作用しているプレストレスの損失となる。さらに木材の変形は、湿度変化による木材中の水分量の変化にも敏感に反応する。

これまでの研究で、プレストレス木床版に与えているプレストレスが大きいほどクリープ変形による損失も大きくなること、プレストレスの変動傾向は湿度変動による木材の含水率変化によって重大な影響を受けることなど、プレストレス木床版の基礎的性質とその性能は応力条件と周囲の湿度環境条件が重要な要素となることを確認している。³⁾

3. 実験概要

3.1 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3-1と写真3-1に示す。部材は長さ200 cm、2.5×10 cm断面の杉ラミナを30枚配置し、幅員両端部に定着板のめり込みを考慮して剛性の高い米松ラ

ミナを配置した。この試験体に4本のPS鋼棒を通し、両側を定着板で固定する。鋼棒に取り付けられたナットを締め付けることにより、鋼棒が緊張され、プレストレスが発生する。このPS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、これによって鋼棒の緊張力を測定し、床版に作用するプレストレスを調節する。

3.2 試験方法

実験は、図3-1の試験体を恒温恒湿室に設置し、プレストレスの経時変動を計測した。恒温恒湿室に与えた条件は、気温は20°Cで一定とし、さらに高湿度状態としては湿度90%、低湿度状態としては湿度30%とした。本試験体に導入した緊張力は、PS鋼棒1本につき2000 kgfである。このプレストレス力を圧縮面の面積で除したプレストレス応力は4 kgf/cm²である。

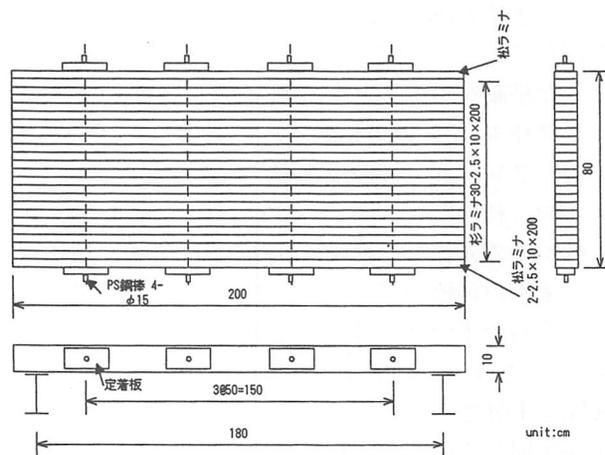


図3-1 プレストレス木床版図

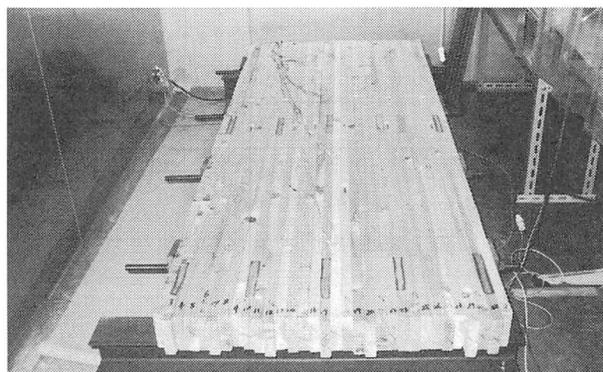


写真3-1 恒温恒湿室内設置状況

1) ラミナの変形程度に関する実験

プレストレス導入作業に要する時間の影響を評価することを目的として、プレストレス導入作業の開始から5分、7分、10分、20分後のプレストレス力を初期値として測定を開始し、7日間のプレストレス変動を計測した。

2) 再緊張時期の影響

プレストレス木床版の強度は、床版を定期的に締め付けることで維持される。高湿度となる環境では、橋の架設直後からプレストレスが急激に減少する傾向があるので、再緊張の時期は適切に選ぶ必要がある。この再緊張時期の影響を検討するための実験は、最初の締め付けの後、1日後、または3、7日後に再度プレストレスを導入し、15日間のプレストレス変動を計測した。

4. 実験結果

4. 1 ラミナの変形程度に関する検討

これまでの研究で、導入プレストレスと湿度条件が同じでも、測定開始直後のプレストレス変動は異なる挙動を示すことを観測した。³⁾ 図4-1に初期プレストレスを3000 kgfとして開始した二つの実験の、プレストレスの変化率(ある時間のプレストレスの、初期プレストレスに対する百分率)を示す。縦軸がこの変化率、横軸は経過日数である。それぞれ、4本の鋼棒のプレストレス力の平均値である。このうちの1つは30日間に渡り湿度30%一定としたもので、もう一つは湿度を30%から10日ごとに60%、90%と上昇させたものである。最初の10日間は湿度条件が同じであるが、10日目には約20%の差が生じている。

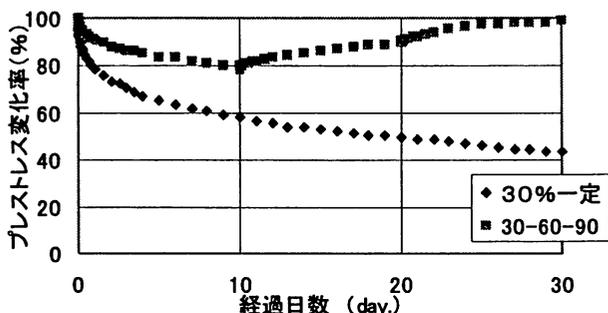


図4-1 同湿度・同応力条件からの緊張力変動

筆者らはこの原因をプレストレス導入に要する作業時間の影響と考えた。すなわち、木材のクリープ変形はプレストレス導入直後から始まるため、プレ

ストレスの導入作業開始から測定開始までに時間がかかると、その分だけすでに木材の変形が進み、これによるプレストレスの損失も始まっている。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。本研究では、プレストレス導入の際に時間を計っておらず、目標のプレストレス力にすばやく達した場合はよいが、微調整を繰り返した後に達した場合は、計測開始までに時間がかかり、クリープ変形とプレストレス損失が進み、このような差が生じたと考えられた。この現象を確認するため、本項では、プレストレスの導入作業開始から、測定開始までの時間を数パターンとり、初期のクリープ挙動について検討する。実験は、プレストレスの導入開始から5分、7分、10分、20分後のプレストレス力を初期値として測定を開始し、7日間の変動を計測した。導入プレストレスは2000 kgfである。湿度を30%とした測定の結果を図4-2、湿度を90%とした時の測定結果を図4-3に示した。なお、図4-2、図4-3の凡例に示してある番号は、実験を行った順序である。

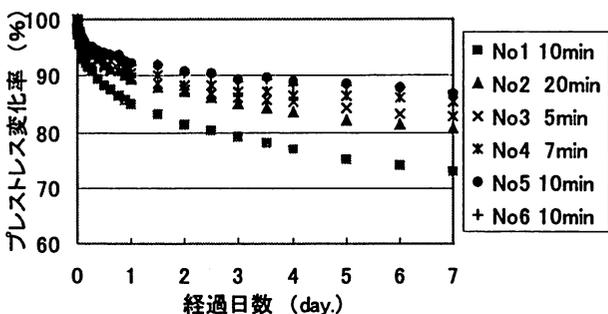


図4-2 低湿度状態下の作業時間の影響

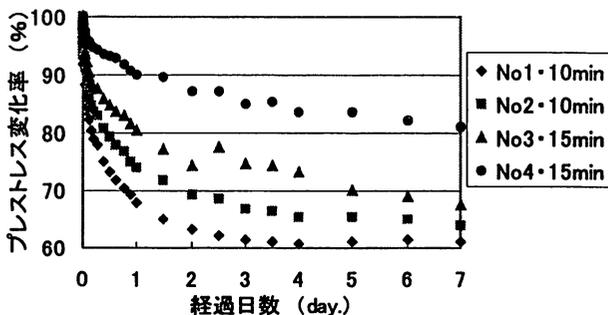


図4-3 高湿度状態下の作業時間の影響

作業時間を同じにしても、7日後のプレストレスの値は異なっている。また、実験回数を重ねるにつれ、プレストレスの損失量は小さくなっていったことが示された。また、図4-3では導入開始から15分後を初期値として測定を開始したケースが2つある

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(2)

(No 3, No 4)が、No 4の測定はNo 3の測定終了後30分後に作業を始めたものである。7日後のNo 4のプレストレス損失はNo 3より10%以上小さくなった。

木材を含め、弾性を持つ材料は荷重を除去すると変形がもとに戻る。実験では、1つのケースの測定が終了すると、PS鋼棒の緊張力を緩め、床版を解体している。これによって床版を構成しているラミナの変形を回復させるが、この変形の回復を確認することは不可能であり、完全にもとに戻るとは考えにくい。

すなわち、プレストレスの損失傾向のバラツキは、プレストレスの導入作業に要する時間に起因するものではなく、実験を重ねたことによるラミナの変形の回復程度が影響を与えていると考えられる。

4. 2 再プレストレスに関する検討

プレストレス木床版のプレストレスは、架設の後徐々に緩んでくるが、再度締め付けることによって、強度を維持することが可能である。この作業を行わない場合、プレストレスは導入時の80%が損失するという報告がある。通常、2度目の締め付けは、最初の締め付けの約1週間後に行われる。²⁾

高湿度となる環境では、プレストレスが測定開始直後から急激に減少する傾向があることが認められているので³⁾、高湿度となる環境では、再プレストレスの時期は適切に選ぶ必要があると考えられる。本項では、高湿度環境下での、初期緊張から2度目の緊張までの時間を変え、その影響を検討する。

図4-4は初期緊張のみの場合と、7日後に再緊張した場合それぞれのケースの30日間のプレストレスの変動を示したものである。

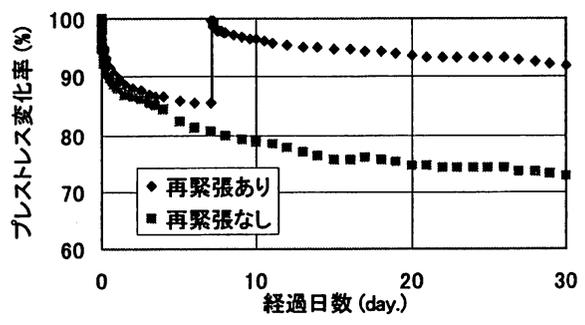


図4-4 再緊張の効果

初期緊張のみの場合、測定開始直後の急激なプレストレス損失の後、約10日目以降から一様の減少傾向を示しているが、再緊張した場合、これによって

損失したプレストレスを回復し、その後の損失も抑えられている。

図4-5は2度目のプレストレスを導入する時期を1日後、3日後、7日後、として計測した結果を比較したものである。

どのケースも、測定開始直後から数日間の変動傾向が一致しており、前述したラミナの変形の回復量がある程度近似してきていると考えられる。

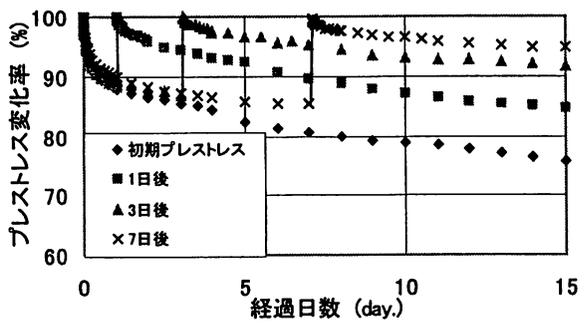


図4-5 再プレストレス時期の比較

初期緊張のみとしたケースと1日後に再緊張したケースでは、10日後の時点で約10%の差があるが、再緊張したケース同士の差は約5%と小さくなっている。また、1日後に再緊張したケースでは、測定開始直後から急激に進む初期のクリープ変形が収束しておらず、再緊張以降もプレストレス減少が続いている。これに較べ、再緊張の時期が遅いほど、クリープ変形は収束に向かい、再緊張後のプレストレス損失はより小さくなるようである。すなわち、ある一連のプレストレス変動傾向があるとき、ある時点で木床版を再緊張することで、高水準のプレストレスでこの変動傾向が継続されると考えられる。プレストレス木床版のクリープ変形は時間が経つほど収束するが、木床版の耐久性能に重大な影響を及ぼす前に再緊張する必要があるため、これを一週間後とするのは妥当であると考えられる。

2度目の締め付けが1週間後に行われた後、次の締め付けが4～6週間後に行われるが、維持・管理のためには、このようにプレストレスレベルを把握し、適切な時期にプレストレスを導入することが不可欠であるといえる。

5. 実橋のプレストレス変動

ここまで、水分定常状態におけるプレストレス木床版の性状変化特性を、モデル試験体を用いて実験的に検証した。実際に橋が架設される現場は温湿度

が絶えず変化する環境である。このため、実際の供用環境下におけるクリープ挙動を評価することは重要な課題である。本項では、秋田県内に架設されたプレストレス木床版を橋床にもつ、集成材アーチ橋を対象にして行われたPS鋼棒の緊張力測定の結果を元に、実際の使用環境下のクリープ挙動について検討する。

平成11年3月に秋田県協和町の広域林道に完成した集成材タイドアーチ橋「百目石橋」はこの型式のアーチ橋としては国内最大規模である。本橋の橋床にはスギ集成材を用いたプレストレス木床版が採用されており、各種の試験に供されている。

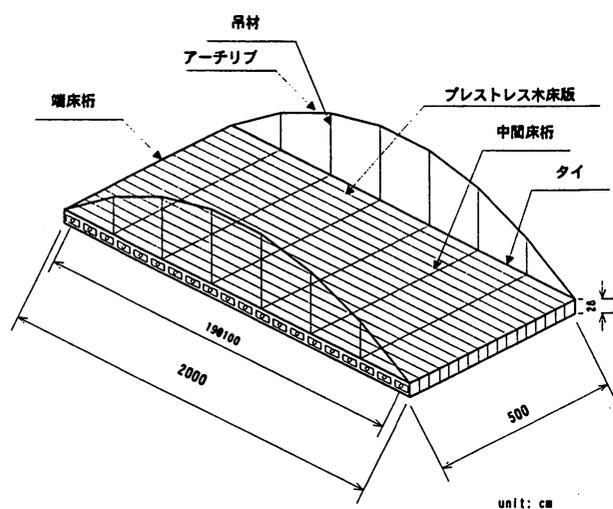


図 5-1 百目石橋概略図

床版部は橋長20.9 m、支間長20.0 m、幅員5.0 m スギ集成材ラミナと両端部のナラ集成材ラミナより構成されている。PS鋼棒は1 m間隔で20本配置されており、設計緊張力は19 tf (プレストレス応力は約6.5 kgf/cm²) である。20本のPS鋼棒のうち6本には緊張力を測定するロードセルが設置されてい

る。また、本橋には、温湿度変動がプレストレス変動に与える影響を評価するために、床版裏側の橋台上に温湿度センサーが設置されており、定期的に記録されている。PS鋼棒の緊張作業は1回目('99/2/5)の後は13日後('99/2/18), 19日後('99/2/24), 47日後('99/3/24)に計4回行われている。

このプレストレスと温湿度の測定データをもとに、実際のプレストレス木床版のクリープ挙動、およびプレストレス変動について検討を加える。図5-2に初期緊張から360日間のプレストレス変動を示す。6本の鋼棒の平均値である。図5-3は同時に測定した温湿度の変動である。2つの図より、プレストレスの変動は温湿度とよく対応していることがわかる。

図5-2より、プレストレスは初期緊張の後では急激に減少し、再緊張の後では約200日までゆるやかに減少しており、以後、設計値のおよそ50%で落ち着いている。モデル試験体による実験と同様、実橋においても再緊張後のプレストレス損失は小さくなることが確認された。

図5-4と図5-5に、90日経過後(5月)から5日間のプレストレス変動と温湿度変化を拡大して示す。恒温恒湿室内の実験では、湿度変化後、比較的早い時間でプレストレスの変動につながったが、実際の環境においてある程度の大きさを持つ木橋の場合、湿度が変化してからプレストレスが変動するまでに時間差がある。湿度は夜に高くなり昼に低くなるが、プレストレス力については気温と同じで、昼に高くなり夜に低くなっている。相対湿度の値は(降雨等による)空気中の水分量の変化によっても変わるが、気温の変化によっても変わる。温湿度を制御した恒温恒湿室内とは異なり、湿度の変化は必ずしも空気中の水分量の変化にはつながらないため、こ

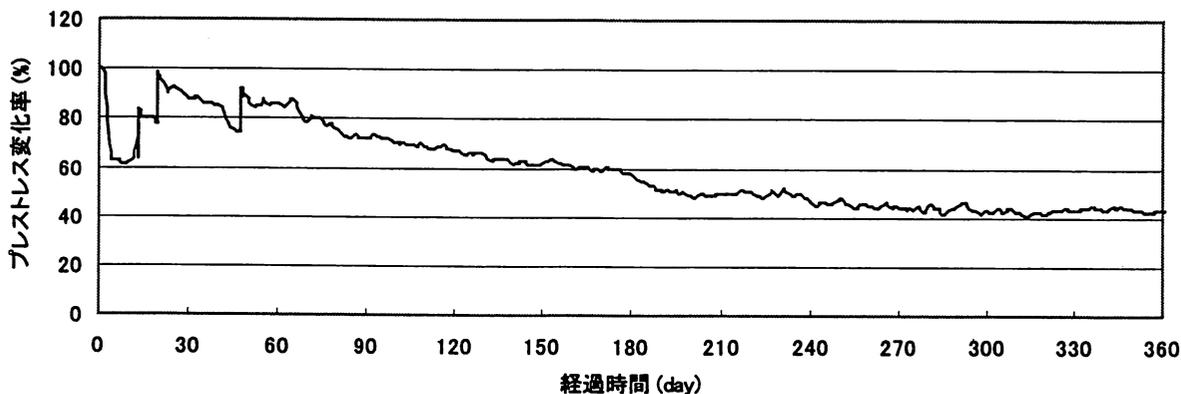


図 5-2 百目石橋の緊張力変動

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(2)

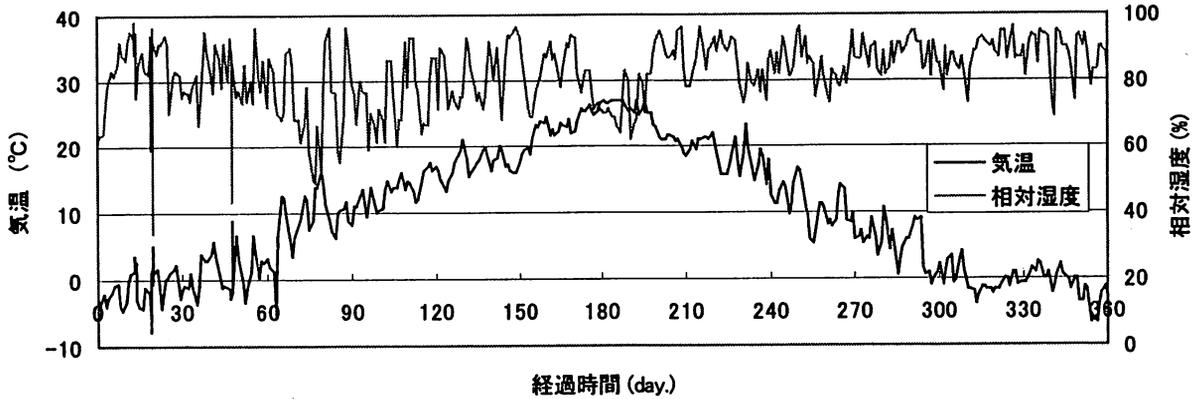


図 5-3 温湿度変動

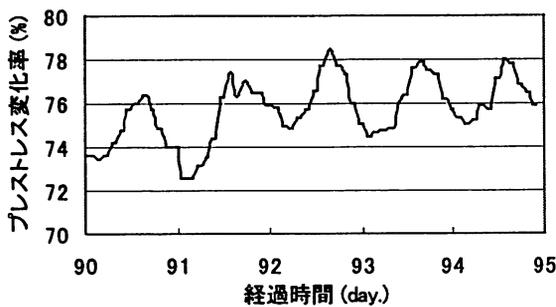


図 5-4 プレストレス変動 (5日間)

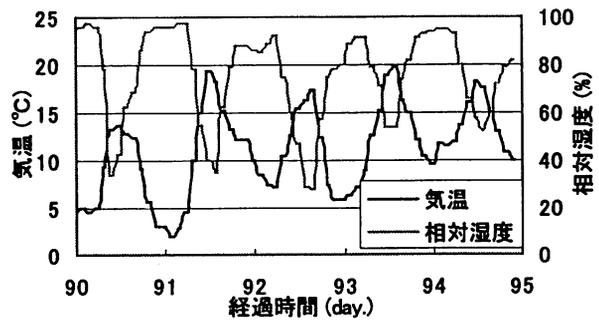


図 5-5 温湿度変動 (5日間)

のような時間差が生じていると考えられる。

これまで、木材のクリープ挙動や変形に関する影響要因は主に湿度変動であると、温度の変化による影響を考慮していない。木材の熱による影響は含水率の変化による影響に比べ非常に小さいからである。しかしながら、180日付近(8月)のプレストレスの急激な損失と温湿度変化の関係は特徴的であり、この点に関しては温度変化もプレストレス変動の影響要因として考慮する必要がある。

このように、実際の木橋は種々の要因によって影響を受けるので、それぞれの影響要因の程度を評価するための実験も不可欠であると考えられる。

6. 結 言

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、杉を用いた木床版を恒温恒湿室に設置し、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のクリープ特性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数パターンとり、比較

検討した。さらに、再プレストレスを導入する時期の影響を確認するため、初期緊張から再緊張までの期間を変化させて測定し、比較検討した。また、モデル実験と実橋との比較として、秋田県協和町に架設された百目石橋のプレストレス変動について検討した。得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 同じ湿度と応力条件下でもプレストレス木床版は異なったプレストレス損失傾向を示すことが観測されている。この現象は、実験を重ねたことによるラミナの変形とその回復程度が影響を与えていることが示唆された。今後はこのような実験の再現性について検討する必要がある。
- (2) プレストレス木床版のプレストレス力は鋼棒を緊張することによって維持される。この再緊張の時期によって、その後のプレストレスの損失傾向が異なることが確認された。高湿度状態におけるプレストレス木床版のクリープ挙動の特徴は、初期の急激なプレストレス損失だが、この損失がある程度収束してから再プレストレスを与えると、その後の損失も小さくなる傾向があった。
- (3) 実際の供用環境下のプレストレス木床版のプレ

ストレス変動には、木材のクリープ変形、PS 鋼棒のリラクセーション、そして温湿度変動による含水率変化の影響が絡み合っていると考えられる。このプレストレスの変動は、1日の温湿度の変動にも敏感に対応していることが確認された。

以上のように、プレストレス木床版のプレストレス変動には様々な影響要因が複雑に絡み合っている。プレストレス木床版橋の耐久性能に密接に関わるプレストレスを維持するには、これらの要因を十分に考慮して管理する必要があると考えられる。また、水分非定常状態におけるプレストレス木床版のクリープ挙動は、水分定常状態とは異なった挙動を示すことが確認されている⁴⁾ので、プレストレス変動に影響を与える要因の、それぞれの影響の程度を評価・検討することが不可欠である。今後は、定湿状態において温度を変化させる等の実験を行う必要がある。

このようなプレストレス木床版のクリープ挙動に影響を与える要因を把握しておくことは、木橋の耐久性向上の技術開発や、維持管理において極めて重要であると考えられる。

謝 辞

百目石橋のプレストレスおよび温湿度の測定データを提供していただいた、秋田県立大学附属木材高度加工研究所に対し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会：木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論文報告集，2001年
- 2) Ritter, M.A: Timber Bridges-Design, Construction, Inspection, and Maintenance, Forest Service, USDA, 1990.
- 3) 成田圭介，米谷裕，堀江保：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，秋田高専研究紀要第36号，2001年，pp 75～80
- 4) 佐々木貴信，薄木征三，長谷部薫，飯島泰男：湿度変動下におけるプレストレス LVL 床版のクリープ挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 45A, pp. 1335～1342, 1999.