

プレストレス木床版の曲げ特性に影響を及ぼす 諸要因に関する実験的研究

下 間 幹*・米 谷 裕・堀 江 保

Experimental Study About the Bending Characteristics of Stress-Laminated Timber Deck Influenced by Several Factors.

Motoki SHIMOMA*, Hiroshi YONEYA and Yasushi HORIE

(2002年11月29日受理)

Stress-Laminated Timber Deck (SLTD) was developed as repair technology of nail-laminated lumber deck, and improved it. SLTD consists lumber laminations that are compressed transversely by the high-strength steel rod. The purpose of this study is to investigate behavior of warp and to consider change in stress-level under the condition changing humidity and natural environment. These were examined by measuring warp and stress-level, result indicated that several kind of factors influenced the behavior of warp of SLTD.

1. 序論

我が国では、2515万 ha (国土の67%) の森林面積を保有し、蓄積は35億 m³ となっている。しかし、人工林の生長阻害を防ぐために伐採された間伐材は5割が未利用資源として伐倒放置されているので、有効利用法の開発が課題となっている。

木材については、栽培による再生産が可能で森林管理をしっかり行えば枯渇することがないことから注目されている材料である。また、生産時においても、環境への負荷が少ない資源である。このことから、適切に使用すれば、環境保全にも大きく貢献すると考えられる。

このような流れを受けて、土木分野において、間伐材の有効利用法の一つとして、木橋が注目されている。我が国の木橋建設は、1980年代後半になって、耐候性の高い構造用大断面集成材の製造技術が確立したこと、木造の先進国であるアメリカやカナダなどの諸外国からの近代的な木橋に関する技術情報をもたらされたことにより、本格的な木橋建設が始まり、実際に、ここ数年、架設事例が急増している。

木橋の中でも、道路橋としてはプレストレス木床

版橋が最も実績がある。プレストレス木床版は、当初、釘打ち積層床版の補修技術として考案され、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た。さらに、アメリカでは研究が進められて、1991年にはAASHTOによって、その設計法が標準化されている。しかし、我が国では、近代的な木橋の歴史は浅く、架設数も少ないため、設計施工のノウハウが十分に蓄積されていない。こうした背景のもと、本研究では、様々なケースでの荷重載荷によるたわみ特性の解明を目的として、プレストレス木床版の模型を製作し、載荷実験を行うことにより検討した。また、湿度変動に伴うプレストレス変動のデータなどから環境条件の違いによるたわみ特性への影響も検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究で用いたプレストレス木床版とは、幅員方向に敷き並べた複数の木材にPC鋼材を通して、緊張をすることによって圧縮力を与え、木材間の摩擦により接着剤を用いずに木材を一体化させ、床版として機能させる構造となっている。

本研究で用いたプレストレス木床版の試験体を図2-1に示す。試験体に用いた木材の種類と寸法は

* 秋田高専専攻科学生

次のようになっている。

- (1) 種類：杉 寸法：高さ 8cm, 厚さ 2.5cm, 長さ, 200cm
- (2) 種類：杉 寸法：高さ 10cm, 厚さ 2.5cm, 長さ, 200cm
- (3) 種類：松 寸法：高さ 10cm, 厚さ 2.5cm, 長さ, 200cm

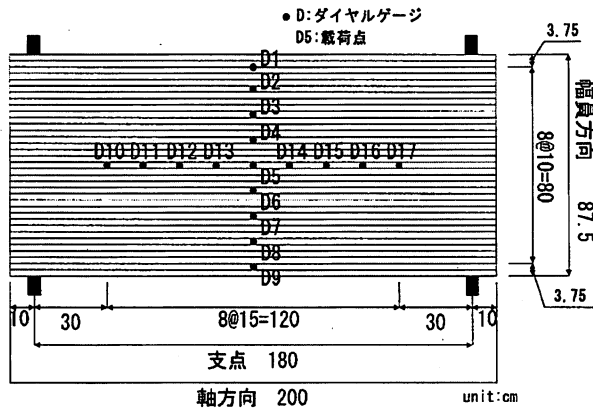


図 2-1 試験体

これらの木材を幅員方向に35枚敷き並べた。たわみを測定するために設置したダイヤルゲージは中央に1個、軸方向には中央から15cm 間隔に8個、幅員方向には中央から10cm 間隔に8個の計17個を配置した。そして、この試験体にあらかじめ所定のプレストレスを与え、たわみ量を測定し、たわみ特性の検討を目的として載荷実験を行った。実験は試験体に用いた木材の種類、試験体の高さ、荷重条件、導入プレストレス力、プレストレス導入箇所数などの条件を変えて繰り返し行った。

2.2 プレストレス導入方法

実際に架設されている木橋に用いられているほとんどのプレストレス導入方法は図 2-2 のようになっている。これは、木材の中央に穴を開け、PC 鋼材を貫通させて、ねじの締め付けにより定着板を通して圧縮力を与える方法で一般的に用いられる。しかし、本研究ではこの方法を用いて実験を行うと、鋼棒間隔を変えたい時にもう一度穴を開けなければならないということやその事によって複数の穴ができてしまい、強度が低下し、たわみ特性に影響を及ぼすことが考えられるため使用しなかった。そこで、

本研究では積層した木材の上下に PC 鋼棒を通し、定着板とナットで PC 鋼棒を固定し、緊張はねじの締め付けにより定着板から木材へ圧縮力を与える方法で実験を行った。実験で用いたプレストレス導入方法を図 2-3 に示す。この図 2-2 と図 2-3 のプレストレス導入方法の違いによるたわみ特性への影響がないことは前研究で確認されている。また、プレストレス力のデータはロードセルにより測定した。

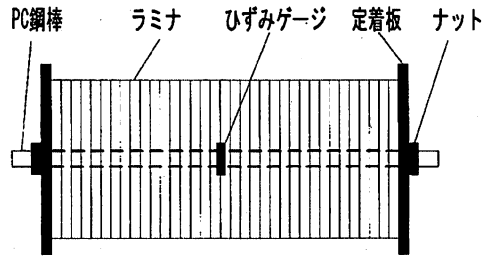


図 2-2 従来のプレストレス導入方法

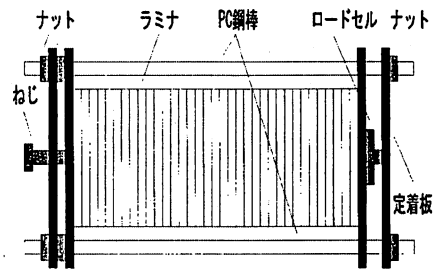


図 2-3 本研究で用いたプレストレス導入方法

2.3 プレストレス導入箇所

プレストレス導入箇所は鋼棒間隔 45cm, 90cm, 45cm の 2 点からの導入と鋼棒間隔 22.5cm, 45cm, 45cm, 22.5cm の 4 点からの導入で実験を行った。図 2-4 に導入箇所 2 点, 4 点を示す。

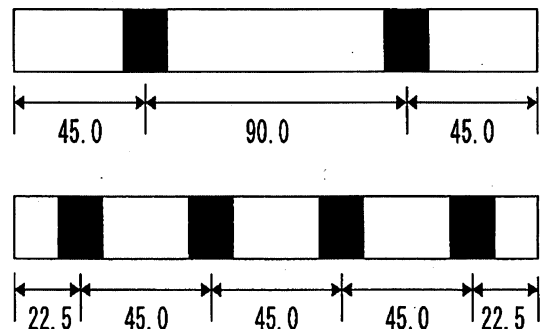


図 2-4 導入箇所 2 点と 4 点

2.4 木材の弾性係数測定実験

木材の弾性係数測定は厚さ2.5cm、長さ200cmの木材を支間長180cmとして単純支持し、支間中央に集中荷重を載荷させる。そして、荷重載荷時のたわみ量2mm、4mm、6mm地点の荷重を測定して、その値を式2-1に代入し、3ケースの弾性係数の平均を取り、平均値をその木材の弾性係数とする。また、本実験の試験体には中央1点載荷のため、たわみやプレストレスの伝達を考慮して弾性係数の高い木材から順番に中央から配置した。実験装置を図2-5に示す。

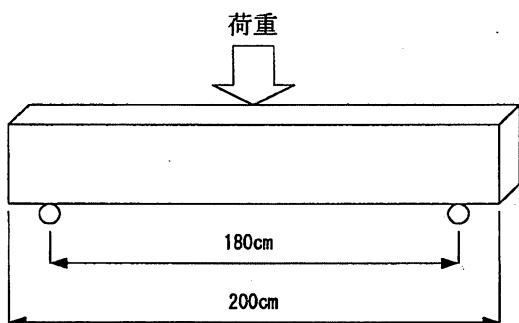


図2-5 弾性係数の測定実験装置図

$$E = P l^3 / 48 y I$$

式2-1 弾性係数の算出式

E: 弾性係数(kgf/cm²) P: 荷重(kgf)
 l: 支間長(cm) I: 断面二次モーメント(cm⁴)
 y: たわみ(cm)

3. 床版構成の違いに関する実験結果と考察

3.1 導入箇所数の違いによる比較

導入箇所数の違いによるたわみ特性への影響の解明を目的として導入箇所2点と4点において、載荷実験を行った。試験体は杉床版で、高さ8cmでの実験結果を使用した。この実験を行うことにより、実際の工事現場におけるPC鋼材の過大な挿入を無くし、不経済性を解消できると考えられる。

(1) 載荷点のたわみ挙動

図3-1に、導入している平均プレストレス応力を同じとし、荷重0.5tと1.0t載荷した時のたわみ量を測定し、比較した実験結果を示す。なお、D5はダイヤルゲージ5をあらわす。つまり、載荷点位置でのたわみ量で、最大のたわみ量がでている点となる。

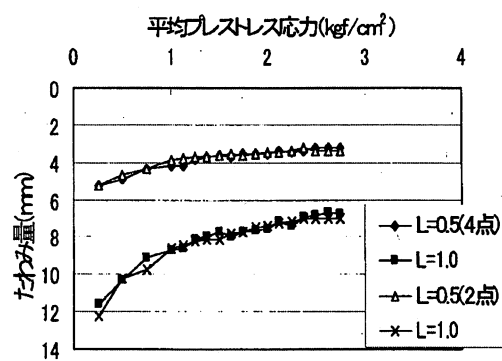


図3-1 載荷点(D5)のたわみ挙動

図3-1より、載荷点においては、導入箇所2点と4点を比較して、大きな差は見られなく、ほとんど同じたわみ特性を示している。また、荷重が0.5tから1.0tへと2倍に変化したのに伴い、たわみ量も2倍へと変化している。ここでは、荷重とたわみ量が比例の関係にある。たわみ量は平均プレストレス応力の小さい時に変化量は大きく、平均プレストレス応力が大きくなるに連れて変化量は小さくなっている。これは、木床版が不安定な状態から安定していることをあらわしている。図3-1より、平均プレストレス応力2kgf/cm²がこの床版を安定させるのに適切なプレストレス応力であると判断できる。

(2) 軸方向のたわみ挙動

載荷した荷重が軸方向へどのように伝わり、たわみとしてあらわれているかを検討するために、図3-2にD10でのたわみの挙動を示す。D10は軸方向にみて最もはなれた位置のダイヤルゲージを示している。

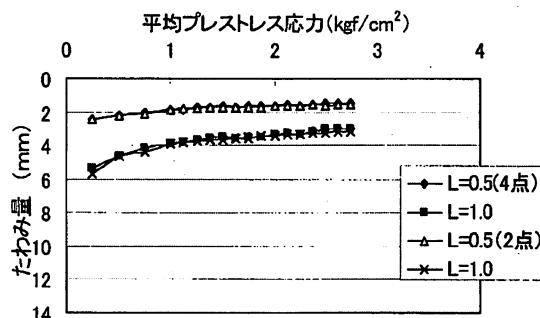


図3-2 D10のたわみ挙動

図3-2より、D10でのたわみ挙動は載荷点でのたわみ挙動と同じような挙動を示しており、載荷点から離れていることから荷重の影響が載荷点より小

さいため、たわみ量とその変化量が小さいことにそのままあらわれている。このことから、軸方向には、荷重によるたわみは均等に伝わっていていることがわかる。また、D10においても導入箇所2点と4点での大きな差は見られなかった。

(3) 幅員方向のたわみ挙動

載荷した荷重により、幅員方向ではどのようなたわみがあらわれているかを検討するために、図3-3にD1のたわみ挙動を示す。D1は載荷点より幅員方向にみて最も離れている位置のダイヤルゲージをあらわしている。

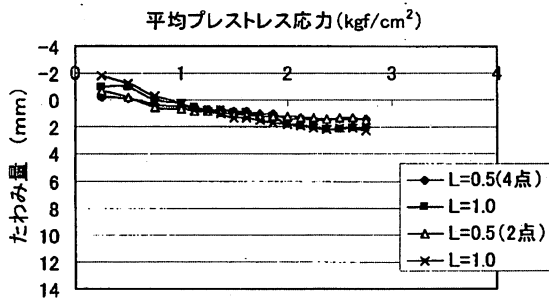


図3-3 D1のたわみ挙動

図3-3より、D1のたわみ挙動は載荷点や軸方向とは異なり、平均プレストレス応力が小さい時はダイヤルゲージがマイナスの値を示し、木床版の端の木材が浮き上がっていることを示している。この時、導入箇所4点よりも2点の方が少しだけ浮き上がりが大きくあらわれた。これは、導入箇所2点の方が導入箇所数が少ないためプレストレスの伝達が導入箇所4点に比べ、床版の全体に十分行き渡っていないと考えられる。しかし、この差は微小なもので問題となるほどのものではない。また、平均プレストレス応力の大きい時には、最大のたわみ量があらわれている。これは、木床版が安定し、一体となって荷重を受けていることにより、幅員方向への荷重によるたわみが均等に伝わっていていることをあらわしている。全体的にみると幅員方向においても導入箇所2点と4点での大きな差は見られなかった。

3つの観点から導入箇所2点と4点でのたわみ特性への影響を検討したが、特別に大きな違いは見られなかったので、導入箇所数の違いによる影響は考える必要はない。しかし、導入箇所2点と4点どちらのケースにおいても、平均プレストレス応力の小さい時、つまり、木床版がまだ安定していない時に、幅員方向の端の木材に浮き上がるということが見られたので、木床版を安定させるのに十分なプレス

レスを導入しなければ、荷重の大きさによっては崩壊の可能性があると考えられる。また、今回の実験では、プレストレス導入直後の載荷実験であったので、導入したプレストレスはほとんど損失することはない状態で実験が行われている。しかし、導入箇所2点と4点では、平均プレストレス応力が同じであっても、PC鋼材1本あたりの導入プレストレスに違いがあるので、1本あたりのプレストレスの損失量も異なる。そうすれば、必ずしも全体の損失量が同じになるとは限らない。そうすると、導入箇所2点と4点でたわみ特性の違いがあらわれる可能性がある。この点については、今後、実際に実験を行って、検討していく必要がある。

3.2 床版高さの違いによる比較

杉床版において、床版高さ8cmと10cmの載荷実験より床版高さの違いによるたわみ特性への影響を検討した。この時、導入プレストレスレベルを同じにするために平均プレストレス応力による比較検討、荷重によるダメージレベルを同じにするために、試験体の寸法と弾性係数の違いを考慮して、式2-1より、床版高さ8cmに荷重0.3t、0.6t載荷したのに対し、10cmでは荷重0.5t、1.0tの載荷が同レベルだと算出した。この条件を用いて、それぞれ実験を行った。この時、理論上では同じレベルの条件設定をしているので、同じたわみ特性を示すと考えられる。そして、実際に実験を行った結果、載荷点と軸方向のたわみ挙動においては違いが見られなかったが、幅員方向のたわみ挙動において、たわみ特性の違いが見られた。図3-4に幅員方向の端(D1)のたわみ挙動を示す。

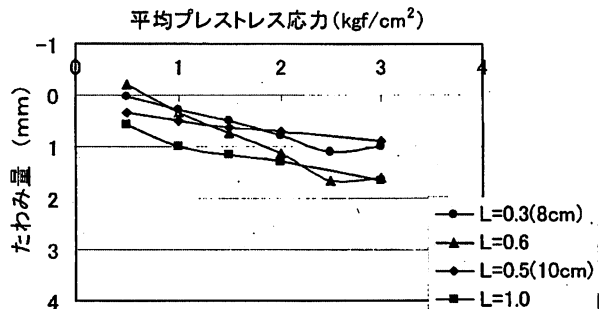


図3-4 D1のたわみ挙動

図3-4から、床版高さ10cmにおいては、幅員方向の端においても安定したたわみ挙動を示していることから、荷重に対して、床版全体が梁のようにたわんでいることがわかる。一方、床版高さ8cm

においては、たわみ量の変動が大きく、荷重0.6tになったときに、変動量がさらに大きくなっていることから、荷重に対して、床版全体が板のようにたわんでいることがわかる。このことから、同プレストレスレベル、同荷重レベル下で実験を行っても、床版高さの違いによりたわみ特性が違ってくるということがわかる。また、今後は床版高さだけではなく、試験体の幅や長さにおいても、その違いを検討し、どの要素が最も影響するかを解明する必要がある。

3.3 材種の違いによる比較

材種の違いにより、たわみ特性に直接的に影響を及ぼすと考えられる要因は弾性係数である。そこで、高さ10cm、厚さ2.5cm、長さ200cmと同じ寸法の杉と松をそれぞれ弾性係数測定実験を行い、その後、載荷実験より得られた実験結果から比較検討した。

(1) 弾性係数

弾性係数測定実験の結果、松の平均弾性係数が141,000、杉の平均弾性係数が77,200となり、松の方が約2倍大きい弾性係数となった。

(2) 載荷実験の結果

図3-5に最大たわみがあらわれる、載荷点(D5)のたわみ挙動を示す。

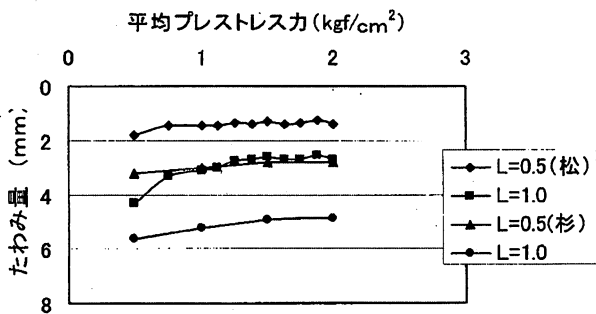


図3-5 載荷点 (D5) でのたわみ挙動

図3-5より、荷重0.5t、1.0tのそれぞれにおいて、杉床版のたわみ量は松床版のたわみ量の約2倍となっている。これは弾性係数の差がそのままたわみ量の差へとつながっていると考えられる。次に、図3-6、図3-7に、幅員方向のたわみ挙動を示す。これは、荷重0.5t、1.0t、平均プレストレス応力0.5、1.5 (kgf/cm²) について示した。

図3-6では、たわみ量には差があるが、松床版と杉床版ともに同じような挙動を示している。しかし、荷重が大きくなった図3-7においては、杉床

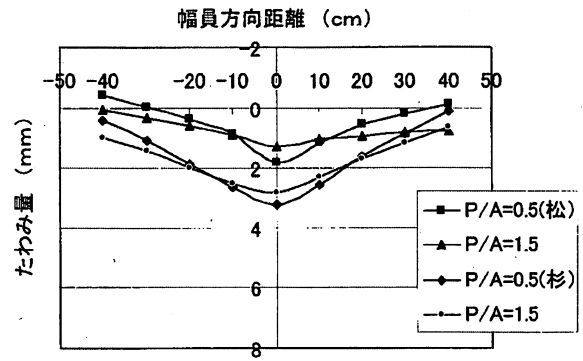


図3-6 幅員方向たわみ分布図 (荷重0.5t)

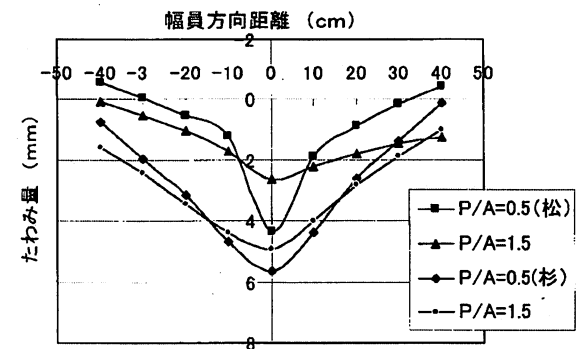


図3-7 幅員方向たわみ分布図 (荷重1.0t)

版の挙動には大きな変化はないが、松床版においては、導入平均プレストレスの小さい時に、載荷点において、急激にたわみ量が大きくなるという分布になっている。これは、松床版の弾性係数が高く、導入プレストレスが小さいため、プレストレスの伝達が載荷点まで十分に伝わっていないことが原因だと考えられる。このことにより、木床版は安定せず、完全に一体化することができていない状態だと考えられる。さらに、荷重が0.5tから1.0tと大きくなったことにより、この影響がたわみ分布にあらわれたと考えられる。このことから、今後の課題として、プレストレス伝達の状況も実験により明らかにしていき、検討する上での影響要因としていく必要がある。

4. 環境条件の違いに関する実験結果と考察

プレストレス木床版橋は世界のいろいろな場所に架設されており、それぞれ違った気候や環境にある。そして、それぞれの環境条件により、いろいろな影響を受けている。そのなかで、特に湿度は木材に大きな影響を与えていると考えられる。そこで、湿度によるたわみ特性への影響を検討した。ここでは、

前研究結果より得られたプレストレス木床版における、湿度変化に伴うプレストレス変動測定結果と載荷実験結果を使用した。また、実環境下について考察するために曝露実験結果を使用した。

4.1 湿度によるプレストレス変動

図4-1に、杉床版で床版高さ10cmの湿度によるプレストレス変動を示す⁵⁾。湿度条件は、湿度上昇(30%→60%→90%)、湿度下降(90%→60%→30%)である。湿度は恒温恒湿室内で制御した。

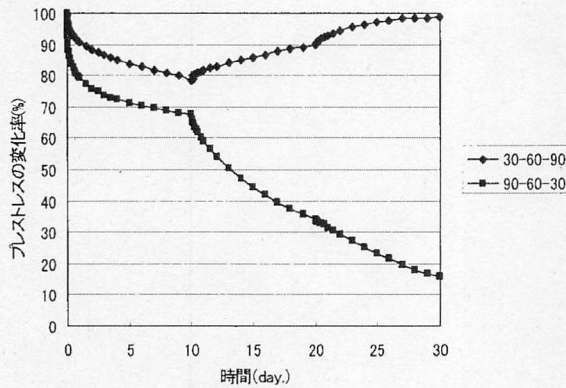


図4-1 湿度によるプレストレス変動⁵⁾

ここで、プレストレス変化率とは、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である。プレストレスの損失は主に木材のクリープ変形と鋼棒のリラクセーションによって生じる。図4-1より、湿度の影響によるプレストレスの影響が大きいことがわかる。30日間経過した段階で、湿度上昇過程においては、プレストレス変動が小さいため検討する必要はない。しかし、湿度下降過程では、プレストレスが初期値の約15%となっているので、検討する必要がある。

4.2 載荷実験の結果

湿度によるプレストレス変動測定の実験と同じ、床版高さ10cmの杉床版に荷重0.5t、1.0tを載荷させた時のたわみ量変化を図4-2に示す。図4-2は最大たわみが発生している載荷点位置のたわみ量を示している。

図4-2より、この床版において、平均プレストレス応力2kgf/cm²で床版は安定したと判断できる。しかし、これに、湿度によるプレストレス変動の結果を考えると、床版に安全だと考えられる平均プレストレス応力2kgf/cm²導入したとしても、この床版が実際に架設されて、30日経過後に同じ荷

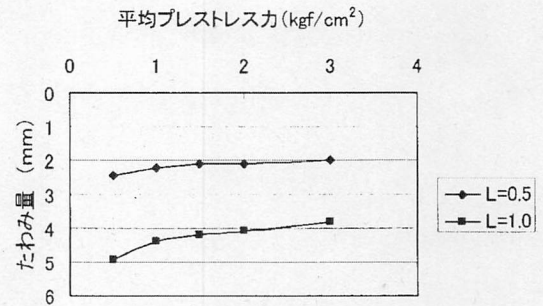


図4-2 杉床版高10cmのたわみ挙動

重0.5t、1.0tが載荷したときには、プレストレス損失によりたわみ量も変化する。湿度下降の環境では、プレストレスが初期値の約15%なので、導入プレストレスは約0.3kgf/cm²となり、木床版は不安定な状態なので、30日間経過まえに再プレストレスの作業が必要である。

4.3 実環境下でのプレストレス変動

実際の自然環境下では温湿度など環境は絶えず変化している。このため、実際の供用環境下におけるプレストレス変動や再プレストレス導入時期を検討することは重要なことである。そこで、図4-3の試験体を用い、曝露実験を行い考察した。

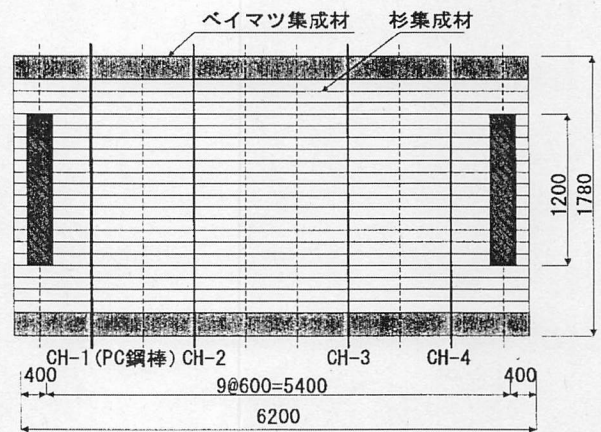


図4-3 曝露試験体

次に、CH-1~4のPC鋼棒のプレストレス変化率を図4-4に示す。

ここで、1回目の再プレストレス導入から2回目までが室内での計測、2回目以降が室外での計測である。CH-1と4(外側のPC鋼棒)とCH-2と3(内側のPC鋼棒)がそれぞれ同じようなプレストレス変動を示した。そして、CH-1~4のほうがプレストレス損失が大きくあらわれた。これは、外側の

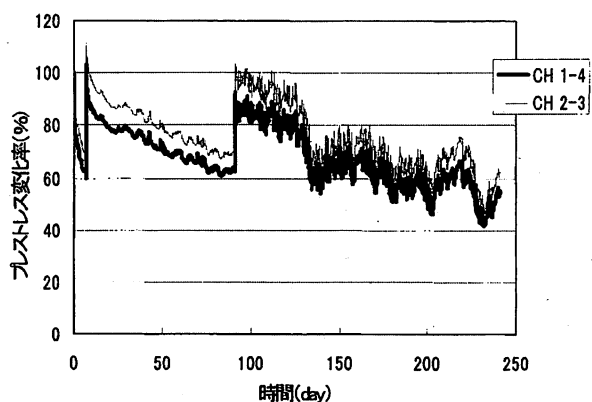


図4-4 曝露試験のプレストレス変動

PC 鋼棒のほうが温湿度などの環境条件による影響を受けやすいことを示していると考えられる。

また、プレストレス変動の範囲は50~110%と大きくなっている。次に、図4-5に経過日数100日~110日のプレストレス変動と湿度変化の計測結果を示す。

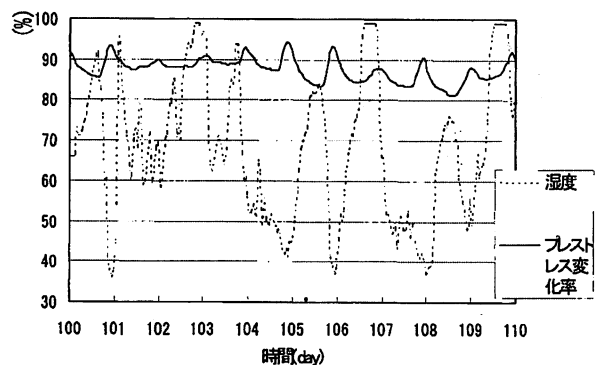


図4-5 プレストレス変動と湿度変化

図4-5より、プレストレス変動と湿度変化が交互に波をうっていることがわかる。これより、自然環境下では湿度変化に対してプレストレス変動が生じるまでに時間差がある。湿度は空気中の水分変化と気温により変わる。これより、恒温恒湿室内での実験とは異なり、湿度変化が必ずしも空気中の水分量の変化にはつながらないために時間差が生じたと考えられる。自然環境下では湿度変化に加えて温度変化も影響要因になってくると考えられる。このように種々の影響要因の評価をしていくことが重要だといえる。

4.4 まとめ

このように湿度などの環境条件の違いによる、プレストレスやたわみ量への影響は大きく、湿度変動

などの環境条件の違いを把握することは重要である。そして、その環境にあわせて、初期導入プレストレスや再プレストレス時期の検討を行う必要があることがわかった。また、今後はより多くの条件で実験を行い、それぞれの条件において、初期導入プレストレスや適切な再プレストレス時期を明らかにしていく必要がある。

5. 結論

実験結果の検討、考察より得られた知見をまとめて以下に示す。

- (1) 導入プレストレスが小さく、木床版が完全に一体化せず、不安定な状態にあるとき、荷重載荷により、木床版幅員方向の端の木材が浮き上がるという現象が見られた。これは、荷重レベルによっては木床版を崩壊させる要因となる可能性が考えられる。
- (2) プレストレス導入直後は、導入箇所数の違いによるたわみ特性への影響は見られなかった。今後は、プレストレス損失後において、たわみ特性に違いがないか検討する必要がある。
- (3) 床版高さの違いによるたわみ特性への影響の検討では、同プレストレスレベル、同荷重レベルにおいても、床版高さ10cmでは全体が梁のようなたわみ特性を示し、8cmでは板のようなたわみ特性を示し、その違いがあらわれた。
- (4) 木材の弾性係数の違いはそのまま荷重に対するたわみ量の違いへとつながっている。また、プレストレス伝達にも影響していると考えられ、重要な要因である。
- (5) 荷重載荷によるたわみ特性にはプレストレスの伝達が深く関係していると考えられるので、今後、実験により明らかにしていく必要がある。
- (6) 環境条件のなかでも、湿度がプレストレス損失に及ぼす影響は大きく、環境にあわせて、初期導入プレストレスや再プレストレスの時期の検討を行う必要がある。

以上のように、床版構成や環境条件の違いによるたわみ特性の影響は大きく、いろいろな状況を想定し、その影響を明らかにしていくことは重要である。そして、検討の積み重ねが、今後、設計基準の基礎となっていく。

参考文献

- 1) (財) 秋田県木材加工推進機構：コンサイス木材百科, pp4~7, pp274~277, 1998年

- 2) 上村武：木材の知識 商品の流通と解説，経済調査会，pp3～21，1979年
- 3) Ritter, M.A.: Timber Bridges-Design, Construction, Inspection, and Maintenance, Forest Service, USDA, Washington, D.C., 1990
- 4) Michael G.Oliva: Stress-laminated Wood Bridge Decks Experimental and Analytical Evaluation
- 5) 成田 圭介：秋田高専研究紀要第36号，プレストレス木床版の湿度変化に関する実験的研究(2) 2002年，pp75～80