

集成材・鋼床版ハイブリッド木橋の温度・ひずみ測定に関する考察

A Study on Measurement of Temperature and Strain of Hybrid Timber-Steel Deck Bridge under Environmental Changes

佐々木貴信*, 薄木 征三**, 後藤 文彦***, 飯島 泰男****

SASAKI Takanobu, USUKI Seizo, GOTOU Humihiko and IJIMA Yasuo

*博 (工) 秋田県立大学講師, 木材高度加工研究所 (〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1)

** 工博 秋田大学教授, 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

***博 (工) 秋田大学助手, 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

**** 農博 秋田県立大学教授, 木材高度加工研究所 (〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1)

The construction of a new type of Hybrid Timber Bridge made of glued laminated timber (glulam) beams and truss and steel deck was completed in the beginning of the new millennium in the Akita Prefecture, Japan. A remote monitoring system was set up for the long-term measurements of the strain and temperature of the bridge under environmental changes during service. The behaviors of the steel deck and glulam beams during environment changes due to the difference of their thermal expansion coefficients can be monitored. There was no significant expansion and contraction of the steel deck at environment temperature. The results of measurements suggest that the glulam members are sensitive to humidity changes as shown by the expansion and shrinkage data.

Key Words: glued laminated timber, steel deck, hybrid timber bridge, monitoring system

キーワード: 集成材, 鋼床版, ハイブリッド木橋, モニタリングシステム

1. はじめに

近年、木材の弱点を補強することを目的に、木材と金属系材料あるいは木材と繊維系材料を複合した、木質ハイブリッド部材に関する研究開発が建築構造の分野を中心に進められている^{1),2)}。こうした技術は木橋の分野にも取り入れられており、国内でも繊維補強集成材を主桁に用いた歩道橋などの施工事例もある³⁾。最近では集成材と鋼床版を組み合わせたハイブリッド桁の技術が開発され、この構造を採用した木橋の架設事例も増えつつある。平成12年12月に秋田県藤里町の広域基幹林道米代線に完成した坊中橋は、鋼床版と集成材の合成桁構造を採用した橋長が55m、幅員が12.3mのわが国では初めてのハイブリッド型の木橋である。

木質ハイブリッド部材の開発は、木材の強度面の高性能化を目的にしているが、木材は強度面だけでなく耐久性の面においても、腐朽という弱点をもつ。したがって木橋のように常時風雨に曝される過酷な環境で使用される場合には、耐久性向上についての対策が必要不可欠である。耐久性向上策としては、防腐処理薬剤による処理や木材保護塗料の塗布などの化学的処理、あるいは部材を銅板で覆う、構造全体に屋根をかけるなどの構造的に

工夫するといったことが考えられるが、何れも木材腐朽が発生する条件になる水分を近づけないことが最大の課題となる。集成材と鋼床版を組み合わせたハイブリッド桁構造では、鋼床版が集成材主桁に対して屋根の働きをすると考えることができるため、木床版を用いた場合と比較して長期の耐久性を期待することができる。類似の構造で、木橋の床版にコンクリート床版を用いた海外の事例は幾つかあるが⁴⁾、鋼床版を木橋に採用した例は世界的にも類例がない。しかし、これら異種材料を複合したハイブリッド構造が温度変化を受けた場合には、材料ごとの線膨張係数の違いにより、温度差応力を生じることが懸念される。本ハイブリッド構造の開発に際しては、鋼床版の溶接熱やアスファルト舗装熱などによる温度応力の影響について、模型実験やFEM解析によって十分な検討がなされているが、本構造を初めて採用した坊中橋では、供用条件下における温度およびひずみデータを収集することで、温度差応力の影響を確認し、同形式のハイブリッド木橋の設計へフィードバックすることを目指してモニタリングシステムが導入されている⁵⁾。本論文ではこのモニタリングシステムで得られた架設後600日間のひずみ、温度の変動と環境温湿度の関係、およびアスファルト舗設時の熱影響について考察する。

2. 対象橋梁の概要

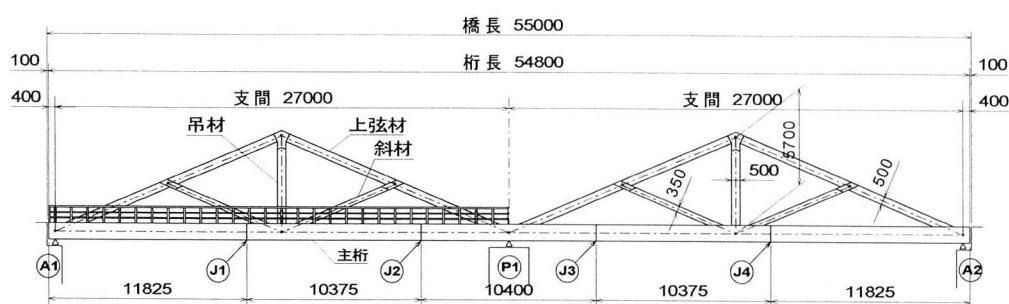
写真－1に坊中橋の全体写真を、図－1に坊中橋の一般図をそれぞれ示す。本橋は集成材を主要構造部材に用いた道路木橋であり、橋長 55m、支間 27m の 2 径間連続補剛トラス木桁橋である。主桁、トラス部材には地元産材のスギを用いた大断面集成材が使用されている。トラス部はキングポストトラス形式であり、背後に位置する世界自然遺産白神山地をイメージしている。図－2に正面図を示す。車道幅員 7.0m、片側歩道幅員 2.0m を含む全幅は 12.3m となっている。本橋の設計にあたっては、主桁の桁高を低く抑えるために鋼と集成材のハイブリット構造を採用することになった。この構造は図－3に示すように、集成材主桁の上下面に橋軸方向に沿って設けたスリットにサンドブラスト処理した鋼板をエポキシ樹脂接着剤によって挿入接着するもので、高剛性・高強度の性能が得られる^{6),7)}。また、床版には鋼床版 ($t=12\text{mm}$) を採用することで橋全体の軽量化と、床版自身の耐久性向上が図られている。木橋の耐久性を向上させるためには、できるだけ屋根をつけ、庇を長くするなど木部に雨水がかかりにくい構造にする構造的耐久化の対策が重要とされているが⁸⁾、本橋では、歩道側の G2 桁はブラケットによって、歩道のない G1 桁は、張出したデッキプレート（図－2）によってそれぞれ雨水が直接掛からな

いような構造が採用されている。また、直接風雨に曝されるトラス部材については、部材上面をステンレス鋼板の小屋根で覆うことで、雨水対策が施されている。さらにこれら全ての集成材は、防腐処理薬剤の加圧注入処理と、木材保護塗料の塗布による防腐対策が行われている。

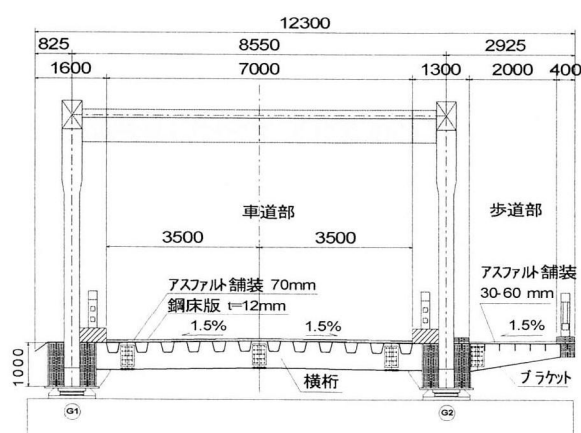
主桁の構造は $350\text{mm} \times 1000\text{mm}$ の集成材を並列にわたるダブルビームの構造（図－3）で、トラス部材との連結部には集成材ブロックが配置されている。全長 54.8m の主桁および鋼床版は橋軸方向と幅員方向にそれぞれ 5 分割されたブロックで現場に運ばれ、橋軸方向に対しては図－1に示す①～④の位置、幅員方向に対しては図－2に示す横桁およびブラケットの連結位置において、



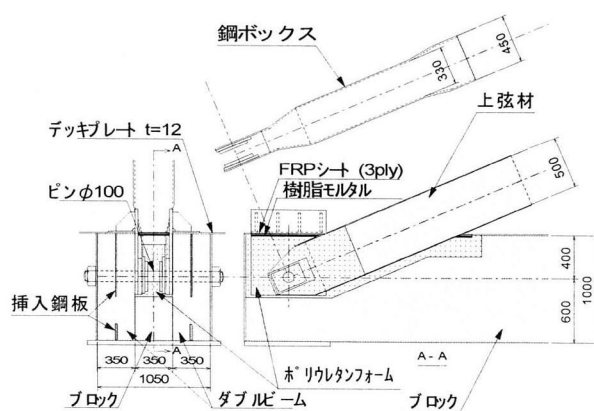
写真－1 坊中橋



図－1 一般図



図－2 正面図



図－3 トラス-主桁の格点部

それぞれ現場溶接とボルト連結によって接合されている。横桁および歩道部ブラケットは橋軸方向に 2.075m の間隔で配置されている。主桁やトラス部材に用いられたスギ集成材は JAS 規格⁹⁾で E75-F240 に分類される材料で、曲げヤング率 7.35GPa、曲げ強度 23.5MPa の性能が保証されている。

3. モニタリングシステムの概要

本橋に導入されたモニタリングシステムは、温湿度環境の変動に伴うハイブリッド桁の挙動、および構造全体の特性を評価することを目的として、図-4に示す位置において、集成材主桁、鋼床版、トラス部材の各主要構造部材のひずみ（総数 32 点）あるいは表面温度（総数 12 点）を毎時自動計測するものである。本論文では、これらの測定データのうち、温湿度の環境変動下におけるハイブリッド桁の挙動に着目し、主桁端部の測定データについての評価を行う。すなわち、図-4に示した計測位置のうち、主桁端部の斜線で示した位置における計測を対象とする。したがって、これ以外の支間中央位置での主桁挿入鋼板およびデッキプレート、あるいはトラス部材におけるひずみ計測は、載荷時応力が大きくなる位置を対象としており、橋梁の構造特性の評価を念頭に置

いたものである。

測定ではずれ止め部分の接着層に及ぼす温度応力の影響を直接的に確認することが困難であるために、図-5(a),(b)に示すように G1 桁、G2 桁それぞれの端部において接合部近傍（デッキプレート裏面と集成材側面）のひずみと温度を測定している。写真-2に示したのは、G1 桁 A2 橋台上の位置でのセンサの取付け状況である。現場において長期間のひずみ計測を行う上では、ひずみゲージの耐久性が問題になる。本橋では、架設から2年以上の測定を計画しているため、ひずみゲージの十分な防湿対策が不可欠である。このため、本橋では、写真-2および図-6に示すように、ひずみゲージと温度センサ（測温抵抗体）全体をゴム製のプロテクターで囲い、内部を防湿用のコーティング剤で充填している。また、集成材の材温の測定はひずみゲージの位置とは別に、温度センサを集成材に埋込み行っている。また、ひずみ測定は出力を増大させるために2アクティブゲージ法とし、固定抵抗を用いたブリッジ回路を構成している。そして、これらの各ひずみ・温度センサおよび温湿度計の測定データは、橋台の脇に設置したパソコンにデータロガー（共和電業製 UCAM-20PC/USB-70A-30）を介して保存されており、電話回線を利用した遠隔地からの操作およびデータの回収も可能になっている。

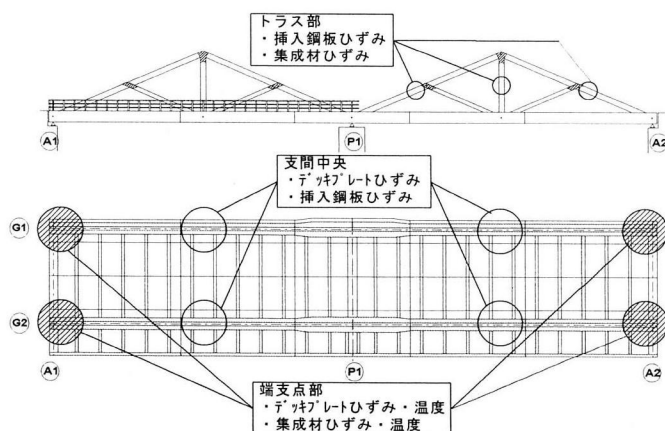


図-4 ひずみ測定位置図

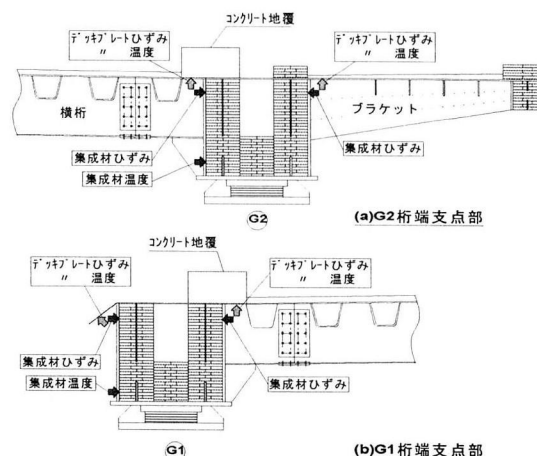


図-5 ひずみ測定位置詳細図

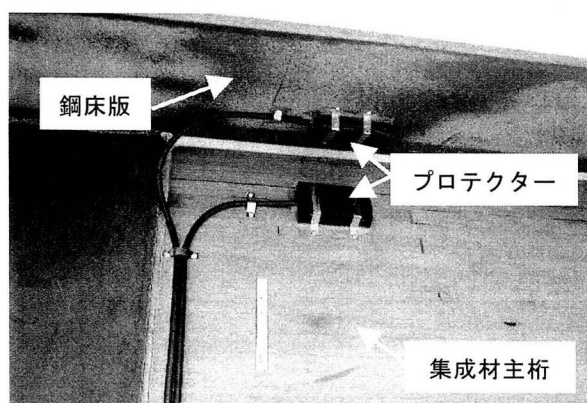


写真-2 ひずみゲージ（G1桁A2支点）

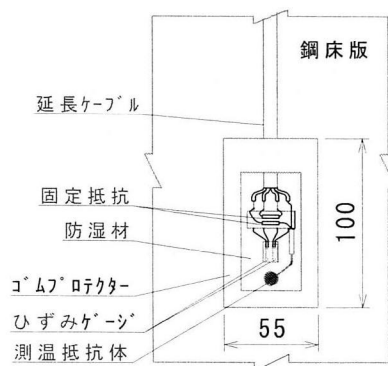


図-6 ひずみゲージ詳細図

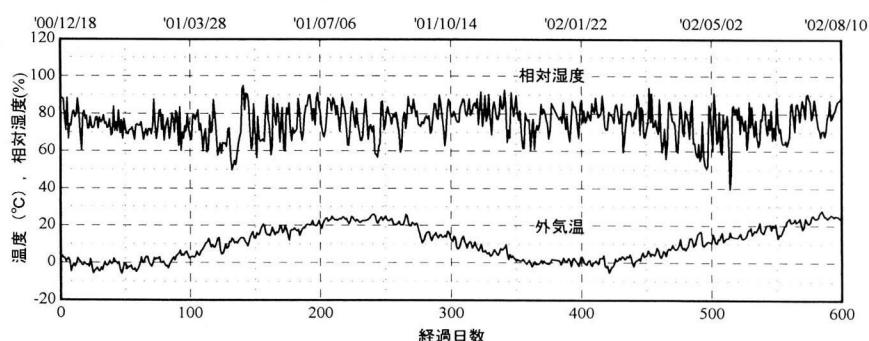
4. 測定結果と考察

4. 1 部材温度の季節変動

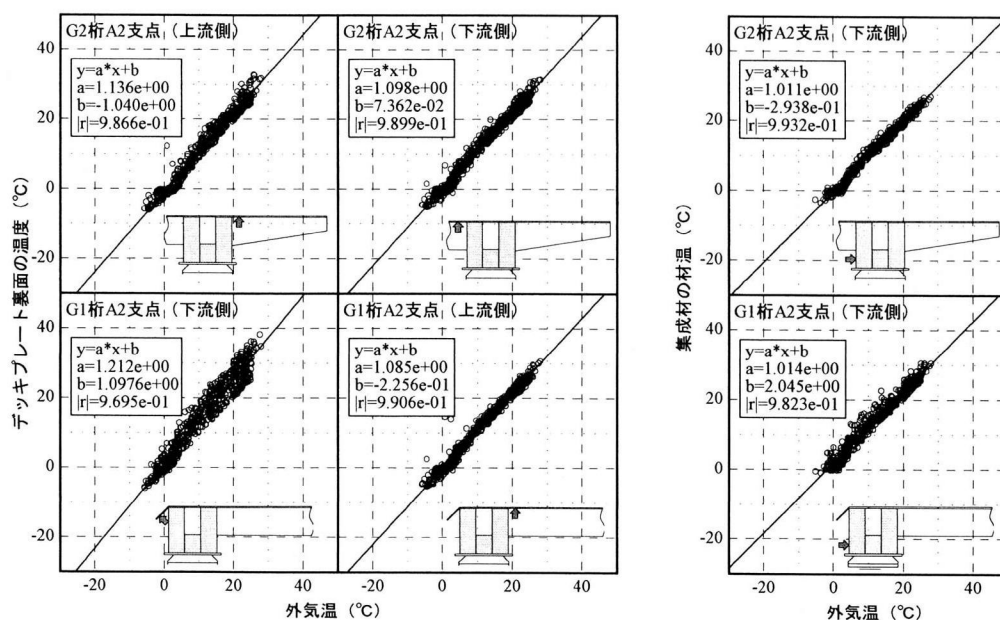
図－7に示したのは架設工事完了後の平成12年12月から平成14年8月までの約600日間の架橋地点の温湿度変動について、毎時刻測定データを平均した日平均として表したものである。この平均気温の最高気温は28.0℃、最低気温は-5.8℃であった。また、この期間における最高気温は33.8℃、最低気温は-8.8℃であった。相対湿度は40～95%、平均で75%と年間を通して多湿な状況にあることが分かる。A2橋台上の支点近傍(以下A2支点と呼ぶ)における測定を例に、外気温の変動に対する、デッキプレート裏面および集成材の材温の関係を示したのが図－8である。いずれの測定位置においても相関係数 r が0.9以上の高い相関が得られているが、最小二乗法により求めた回帰直線の傾きには、測定位置や材料の違いによる差が多少認められる。これらの回帰直線の傾きからデッキプレート裏面の温度は、外気温よりも10%程度高くなる傾向にあることが認められるが、G1桁下流側においては、約20%高い値を示している。これは、G2桁やG1桁上

流側の測定位置では何れもコンクリート地覆やアスファルト舗装が遮温層として機能するのにに対し、G1桁下流側の計測位置は、主桁を雨水から保護するために設けられているデッキプレートの張出し部(写真－2)であり、舗装されずに露出したデッキプレートは直射日光による熱供給が著しく多くなるためと考察される。このように、鋼床版の温度は外気温よりも高い値を示すのに対し、集成材の材温は、ほぼ外気温と同じ温度になることが確認された。なお、本橋のモニタリングシステムでは測定点数の制約から、集成材の温度測定は2箇所という仕様で測定箇所が検討され、温度差が最も大きくなると予想された上述の2箇所が測定箇所として設定されたが、図－8に示したように、両者の回帰直線の傾きや相関係数の差異が僅かであることから、測定箇所の違いによる材温の差異は無視できる程度であり、デッキプレートと集成材の温度測定位置が異なっても、同様の評価を行って差し支えないものとして扱っている。

次に、一例として図－9、図－10にG1桁A2支点の上下流側のデッキプレートおよび下流側集成材の温度変動について、夏期および冬季の5日間(毎時刻データ)



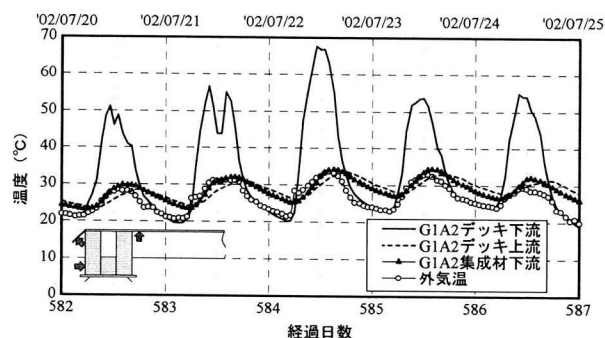
図－7 温湿度の季節変動(日平均)



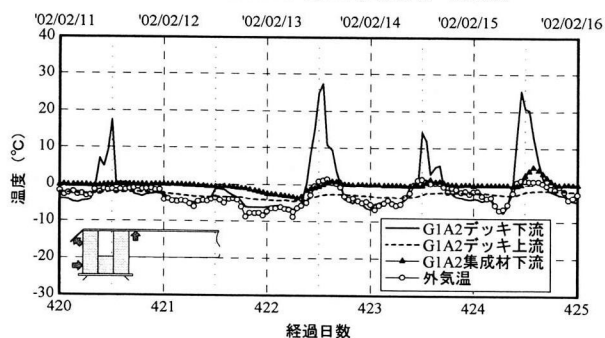
図－8 外気温とデッキプレート温度の関係(A2 支点)

の変動を拡大して図示する。これらの図から、下流側デッキプレート部の温度は、夏期には70℃近く、冬季でも30℃近くまで温度が上昇していることが確認でき、直射日光の影響を受けていることが明瞭に確認できる。一方、鋼床版が露出していない上流側では、夏期には外気温の変動と同様の傾向を示し、急激な温度上昇は認められないが、夜間においても温度が下がらない現象が見られる。また、冬季間においては0℃～-5℃付近で外気温よりも小さな変動で推移していることが分かる。これらは、アスファルト舗装、コンクリート地覆、あるいは冬期間の積雪が遮温層となり、保温効果が生じているためと考えられ、日平均データにおいて外気温よりもデッキプレートの温度が高くなるのも同様の理由によるものと推察される。集成材の温度変化については、夏期は外気温および上流側のデッキプレートと同様の変動傾向を示しているが、冬期間においては、外気が氷点下であっても、材温は零度前後に保たれていることが確認できる。これは、金属材料に対して木材の熱伝導率が小さいという性質に起因するものであると考察される。

以上より、部材温度の変動についてまとめると、デッキプレートについては外気温の変動と相関があり、平均的に外気温よりも10%～20%程度高くなる傾向が確認された。また、未舗装部では夏期に最高で約70℃の値が測定され、冬季でも天候によっては30℃程度まで温度が上昇していることが明らかになった。集成材の材温は、外気温とほぼ同じ変動傾向を示すことが確認されたが、外気温が氷点下であっても、材温は外気温ほどには低下せず、零度付近を保持することが明らかになった。こうした温度変動の影響によりひずみが生じているものと予



図－9 G1桁A2支点温度変動（夏期）

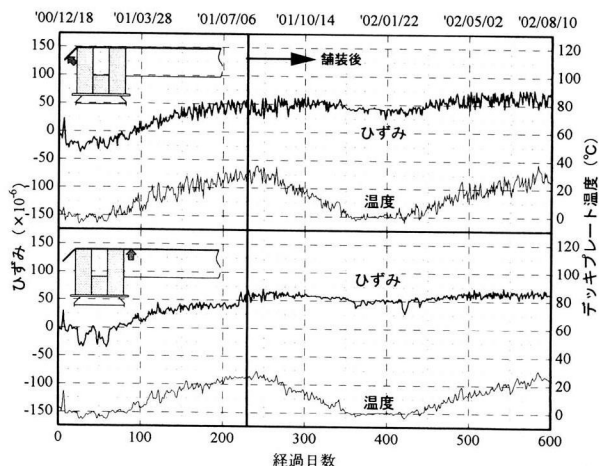


図－10 G1桁A2支点温度変動（冬季）

想されるが、次節では外気温の変動の影響が大きかったG1桁を例にひずみの変動傾向について考察する。

4. 2 温湿度変動に伴うひずみ変動

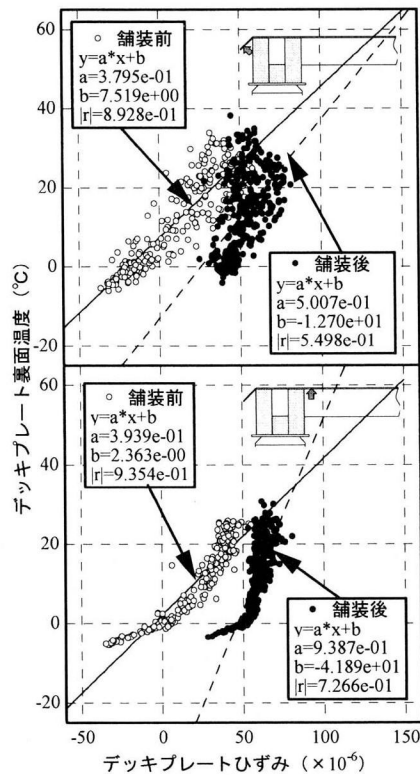
図－11に示したのは、測定開始から600日間のG1桁A2支点におけるデッキプレートのひずみ変動データ（日平均）である。ここで、ひずみは測定開始時の値をゼロとして、これに対する相対値として表している。これらの図から、デッキプレートのひずみ変動は部材表面温度の変動と良く対応していることが確認できる。同図から、デッキプレートのひずみは日単位での細かい変動に加えて、季節変動に伴う長期的な変動を生じていることが分かるが、図中に示したアスファルト舗装の施工を境に、季節変動幅が小さくなっていることが確認できる。このことは、外気に直接曝される未舗装の鋼床版では、長期的な温度変動によるひずみが蓄積されるが、舗装による断熱作用によって変動幅が小さくなるなど、アスファルト舗装による何らかの効果が生じているものと推察される。図－12は、図－11に示したデッキプレートのひずみ変動データについて、アスファルト舗装の施工前、施工後に分けて、材温との関係を示したものである。同図から、舗装を境にしてひずみの変動傾向が変化していることがより明確になる。G1桁上流側では、その傾向が明瞭であるが、未舗装の下流側においても、舗装の効果によって、ひずみの変動幅が小さくなっているのが分かる。この傾向はG2桁A2支点やA1支点側においても同様に認められたが、それぞれの測定点について図－12のように求めた回帰直線の傾きから、1℃あたりのひずみ量を求めると表－1のようになる。舗装前については、図－4の斜線部位置における全8箇所の測定点に対して、舗装後については未舗装部（G1桁下流側）と舗装部に分けてそれぞれ温度とひずみの関係を求めた。後述する集成材の変形に伴う鋼床版のひずみ成分も含まれるため厳密な評価は困難であるが、表－1の係



図－11 デッキプレートひずみ変動（G1桁A2支点）

数と、鋼の線膨張係数 ($\alpha=1.2\times10^{-5}$) を比較しても 1/5 ～1/9 程度と十分小さいことから、年間を通じての温度変化に伴う鋼床版のひずみ量は、接着層に影響を与える程度には達しないものと考察される。

なお、本橋の舗装構成は2層から成っており、基層には4cm厚の砕石マスタックアスファルト(SMA)、表層には3cm厚の密粒度アスファルトが用いられている。鋼床版の舗装にはたわみ追従性に優れたグースアスファルトやSMA舗装が一般的であるが、前者の場合、打設時の温度が240℃前後と高温であるため、舗装時における温度応力が発生することが予想される^{10),11)}。本橋のアスファルト舗装時においても、舗装熱の影響による挙動を確認するために、基層の舗装時にモニタリングシステムを用いた各部材の温度・ひずみ測定を実施したが、全ての測定位置において温度上昇やひずみ増加の傾向は殆ど認められなかった。これは、SMA舗装の舗設時の温度が150℃前後と比較的低温であったこと、測定位置がコンクリート地覆の直下の位置であったことなどが関係するものと考えられる。

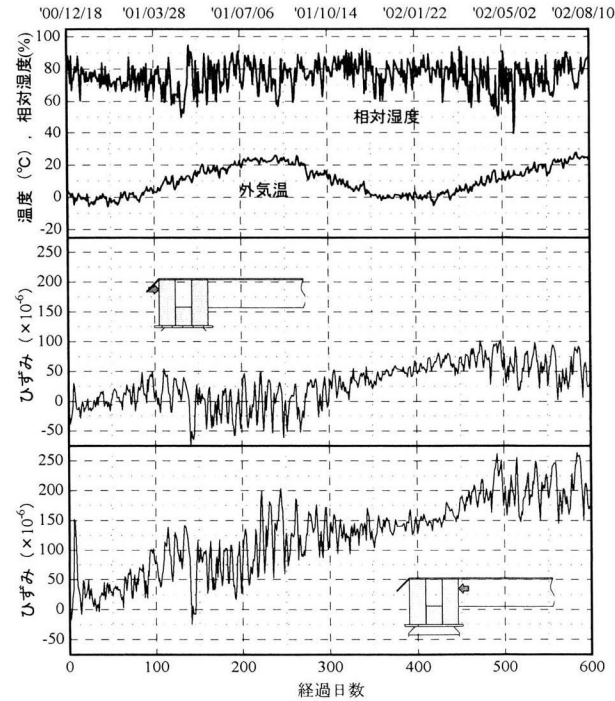


図－1 2 デッキプレート温度・ひずみ関係

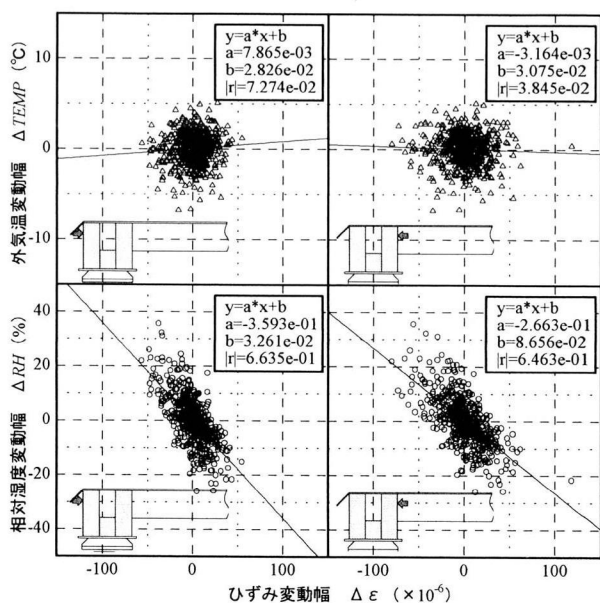
表－1 デッキプレートの温度・ひずみ係数

		係数	測定点
舗装前		$2.53 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	全測定点 (8箇所) の平均
舗装後	舗装部	$1.35 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	G1 桁上流側、G2 桁 (計6箇所) の平均
	未舗装部	$1.95 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	G1 桁下流側 (計2箇所) の平均

図－1 3に、図－7の外気温湿度データとG1桁A2支点における集成材桁のひずみ変動データ(日平均)を並べて示す。同図から集成材のひずみの変動は短期的には相対湿度の変動に対応していることが認められる。一方、長期的な変動は、外気温の季節変動に対応する傾向が認められる。次に、これらの日平均データについて、集成材のひずみの変動幅 ($\Delta \epsilon = \epsilon_{i+1} - \epsilon_i$) に対する、外気温の変動幅 ($\Delta \text{TEMP} = \text{TEMP}_{i+1} - \text{TEMP}_i$) および相対湿度の変動幅 ($\Delta \text{RH} = \text{RH}_{i+1} - \text{RH}_i$) の関係をそれぞれ図示してみると、図－1 4のようであり、集成材のひずみは、相対湿度の変化と相関があることがより明確になる。一方、気温の変化との間には相関が認められない。木材の繊維方向の線膨張係数は $\alpha=1.7\times10^{-6} \sim 2.5\times10^{-6}$ 程度であるが、実用上は熱による変形は無視できるとされている¹²⁾。これは、気温の変化に伴う相対湿度の変化により木材の含水率が変わり変形する影響の方がはるかに大きく作用するためである。木材中の含水率変動によって生じる膨潤・収縮の変形はメカノソープティブ変形と呼ばれる、木質材料特有の性質ある¹³⁾。部材毎に初期含水率や弾性係数などの物性が異なるために、図－1 3のようにひずみの変動傾向に多少の差異が生じるが、湿度変動に対応した変形挙動はG2桁A2支点やA1支点側においても同様に認められた。これらの測定点についても、図－1 4と同様に回帰直線を求め、相対湿度1%あたりのひずみ量を平均すると $-3.50 \times 10^{-6} / \%$ になる。相対湿度の変動幅は、最大で $\pm 40\%$ 程度であるので、スギ集成材のヤング係数を7.35GPaとして、軸応力を計算すると、1.03N/mm²程度であり、長期許容応力度(圧縮:5.9N/mm²、引張:4.9N/mm²)に



図－1 3 集成材のひずみ変動 (G1 桁 A2 支点)



図－１４ 集成材ひずみの温湿度相関（G1 桁 A2 支点）

対しても十分安全であると判断される。以上のように、集成材桁のひずみは湿度変動に伴う変形の影響が大きく、先述の温度変化に伴う鋼床版の変形がどの程度影響を与えているかを評価することは困難であるが、集成材および鋼床版に作用するひずみレベルから、接合部の接着層に影響を与える程度の温度応力は作用しないものと考察される。

５．まとめ

温湿度変動下における集成材・鋼床版ハイブリッド木橋の挙動を評価することを目的として、実橋において導入された温度およびひずみに関するモニタリングシステムの架設後 600 日間の測定データについて考察した。

得られた知見をまとめると以下のとおりである。

（１）デッキプレート裏面の温度は外気温の変動と相関があり、平均的に外気温よりも 10%～20%程度高くなる傾向が確認された。また、未舗装部では夏期に最高で約 70℃の値が測定され、冬季でも天候によっては 30℃程度まで温度が上昇していることが明らかになった。

（２）デッキプレートのひずみ変動は表面温度の変動と良く対応していることが確認された。また、アスファルト舗装施工後には、季節的な変動幅が小さくなることが確認された。

（３）アスファルト舗装時における熱影響が懸念されたが、合材の温度が比較的良かったことなどから、舗装熱の影響による温度上昇やひずみ増加の傾向は殆ど認められなかった。

（４）集成材のひずみの変動は温度変動ではなく、相対湿度の変動に対応するという、木質材料特有の挙動が本測定結果からも確認できた。この湿度変動に伴う変形の影響が大きいために、鋼床版の変形により集成材

桁に発生するひずみ成分を評価することは困難であるが、集成材および鋼床版に作用するひずみレベルから、接合部の接着層に影響を与える程度の温度応力は作用しないものと考察される。

実橋の供用条件下で得られたこれらの測定データによって、温湿度変動に伴うハイブリッド桁の挙動を把握することができたが、今後さらに、恒湿条件下における模型実験等により温度差応力の影響を評価し、同形式のハイブリッド木橋の設計へフィードバックしていくことが必要である。

謝 辞

本研究の測定を行うに当たり（株）日本製鋼所室蘭製作所および秋田県山本総合農林事務所諸氏の協力を得たことを記し謝意を表する。本研究は平成 12 年度日本学術振興会基盤研究(C)(1)（課題番号 12650469）の補助のもとに行われたものである。

参考文献

- 1) 田中弘臣、小野徹郎ほか：木質複合建築構造技術の開発-鋼板及び炭素繊維を用いた木質ハイブリッド梁の実験-日本建築学会大会学術講演梗概集、（北陸）C-1, pp.307-308, 2002. 8
- 2) 飯島泰男、板垣直行、中島史郎：木質複合建築構造技術の開発-異種材料複合集成材におけるせん断強度と接着耐久性-日本建築学会大会学術講演梗概集、（北陸）C-1, pp.311-312, 2002. 8
- 3) 北海道岩見沢市他：千樹橋～新素材を使用した木造橋～、橋梁、pp.54-64, Vol1997.5.
- 4) Baidar Bakht, Ray Krisciunas: Testing Prototype Steel-Wood Composite Bridge, SEI, IABSE, Vol.7, No.1, 1997.
- 5) 佐々木貴信、薄木征三、寺田寿：鋼・集成材ハイブリッド木橋の載荷実験とモニタリング、木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.11-14, 2001.7
- 6) 佐々木貴信、薄木征三ほか：1／2 モデル鋼補剛木桁（SW 桁）の載荷実験、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集、I-A324, 1999.9
- 7) 薄木征三、佐々木貴信、熱海明彦、Mohan P. Sharma：集成材・鋼床版ハイブリッド桁リブ鋼板のせん断応力度、構造工学論文集、Vol.47A, pp.1221-1227, 2001.3
- 8) 木橋設計施工の手引き・木橋づくり新時代、（財）日本住宅・木材技術センター編著、1995.1
- 9) 新しい集成材 JAS 規格の解説、（財）日本住宅・木材技術センター、1998.2
- 10) 奥田基：グースアスファルト舗装時における鋼床版の挙動、本四技報、Vol.13, pp.22-27, No.48, 1988.10
- 11) 石橋和美、小野久和：グースアスファルト舗装時に鋼床版桁に生じる温度差と応力度、技報まつお、No.8, pp.37-41, 1984.10
- 12) 北原覺一：木材物理、森北出版、1966
- 13) 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, 1999.3

（2002年9月13日受付）