

合成桁橋梁の健全度モニタリングを目的とした温度変形挙動の検討

Deformation of composite girder bridge due to temperature for bridge health monitoring

小林 裕介*, 三木 千壽**, 出野 麻由子***, 斎藤 勝晶***

Yusuke KOBAYASHI, Chitoshi Miki, Mayuko DENO and Katsuaki SAITO

*工修, 東京工業大学, 理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

**工博, 東京工業大学教授, 理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

***学生会員, 東京工業大学, 工学部土木工学科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

The performance of composite girder bridge due to temperature is very complicated, because of difference of heat capacity between steel and concrete. In this study, in order to examine the deformation of composite girder bridge due to temperature variation, two experiments were performed. The first experiment was carried out in the laboratory by controlling the temperature. The latter was carried out with exposure of solar radiation. As results, it was confirmed that reaction stresses and deformation occur by temperature gradient at the cross section of the girder due to temperature variation.

Key Words: temperature, deformation, solar radiation, monitoring,

キーワード: 温度, 変形, 日射, モニタリング

1. はじめに

近年老朽化した構造物が増加する中, その健全度評価やメンテナンスの効率化を目的とした構造物のインテリジェント化¹⁾に注目が集まっている. その1つとして橋梁に計測器を設置し, ネットワークを介して遠隔地から常時橋梁の状態を監視することのできる長期遠隔モニタリングシステム^{2),3),4),5)}も様々な検討が始まっている. このモニタリングにおける健全度評価手法, もしくは異常検知手法として, ①経常的に橋梁に作用する外力と, その変形との相対的な変化を捉えることによってそれを行うもの⁶⁾や, ②センサによって直接損傷そのものを検出する方法^{7),8),9)}などが提案されている. 筆者らは, 上記①の方法の一つとして, 温度による変形に着目した, 橋梁の健全度評価モニタリングシステムについて検討を行っている. 橋梁を変形させる要因としては様々なものがあるが, 温度による変形はその変形量が大きいことから変形の支配的要因であることが多い. したがって, その挙動を常時観測し橋梁に生じた何らかの異常を把握することにより, モニタリングに適用することができると考えられる. これまで, 温度変化に伴う橋梁の変形については, いくつか検討がなされている^{10),11)}. しかしながら, 鋼-コンクリート合成桁橋梁においては, 鋼とコンクリートの熱容量の違いから, 温度変形は非常に複雑な挙動を示すことが予想され, その特性については必ずしも明らかとなっていない.

このようなことから, 本研究では鋼-コンクリート合成桁橋梁

の温度による変形挙動を明らかにすることを目的として, モデル桁試験体の放熱実験, および実橋を模した大型試験体を用いた日射実験を実施した.

2. 放熱実験

ここでは, モデル桁試験体に対する放熱実験を実験室内で実施した. まず, 鋼-コンクリート合成桁試験体を製作し, 実験室内で人為的に予熱し, 放熱過程における挙動を計測した. 実橋梁では, 日射の方向が変化し桁の温度変化は多様であり, 部材間どうしでは拘束力が働く. 本実験では, このように変形を複雑にする諸因子を除き, 合成桁が温度変化に対しどのように変形するかを検討した.

2.1 試験体概要

本研究の目的に合わせ, 桁長4130mm, 支間長3760mmの鋼-コンクリート合成桁を製作した. 断面の設計に関しては, 実橋梁における合成桁断面の挙動に模擬させるために, 中立軸位置を実合成桁橋梁と同程度の桁上縁から12%の位置になるように設計した. 製作はコンクリートと鋼の付着を保つように注意して, 鋼桁の上に型枠を組み立て, 呼び強度 30, スランプ 12 の早強コンクリートを上から流し込んだ. また, 上フランジ面にスラブアンカーを 50 cm間隔で配置した. 試験はコンクリートを一週間湿潤養生させたのちに実施した. 支持条件は, 片端

を固定支承，もう一端はローラーを用いた自由支承とする単純支持とした。試験体の側面および断面の模式図を図-1 に，写真を図-2 に示す。

2.2 試験方法

図-1 の試験体を均一に温め，温度が定常状態になったところで試験体から熱源を取り除き，放熱を開始する。本実験では，熱源として電気毛布を用いた。電気毛布を 5 枚用いて試験体を包み込み，その上を電気毛布の付属品であるパッドで覆い，さらにその上から断熱シート，ブルーシートで包み込むことで，試験体を外気から遮断させた断熱環境をつくった。測定は以下の項目について行った。

(1) 温度分布の測定

断面における温度勾配を把握するために，図-3，図-4 に示すように熱電対を設置した。コンクリートに関しては内部の温度分布も測定することが可能なように，内部にも熱電対を埋設した。測定断面の選定では，長手方向で温度分布は対称であると仮定し，図-3 に示すように，支間中央断面，固定端から 1000 mm の断面，500 mm の断面とした。

(2) 応力分布の測定

断面内の温度勾配によって生じる温度応力を，図-3，図-4 に示すひずみゲージの測定値から算出する。

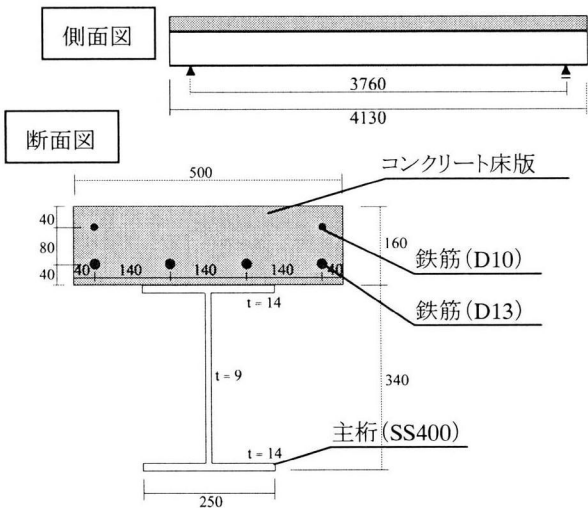


図-1 室内実験の試験体模式図

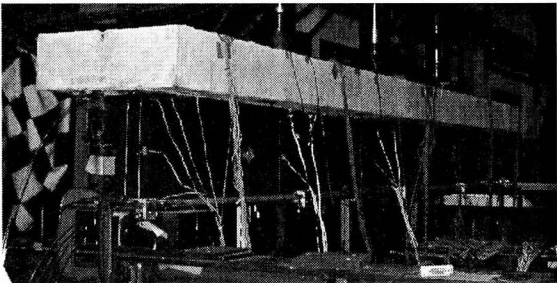


図-2 室内実験の試験体写真

(3) 温度変化による変形の測定

温度変化によって生じる桁の変形を把握するために，ひずみゲージと，図-5 に示すように変位計を設置した。

ひずみゲージは，リード線が温度の影響をひろわないように，温度補償型の 3 線単軸ゲージ¹²⁾を用いた。ひずみゲージ設置断面の選定は，温度との比較および温度による自由膨張を含んだひずみの算出を考慮して，熱電対と同断面とした。但し，支持条件が単純支持のため，長手方向で対称性はないものとして，自由端から 1000 mm の断面，500 mm の断面にも設置した。

変位計については，他のセンサと同断面のたわみ，長手方向の変位について下フランジ位置において測定することとした。

放熱過程の測定時には，実験室内の気温についても測定をした。また，測定時に気温の変動が極力少なくなるよう，放熱開始を実験室内の温度が落ち着いている夜半とした。

2.3 初期状態からのひずみ，温度応力の算出

本実験では，温度補償型ひずみゲージを使用した。このひ

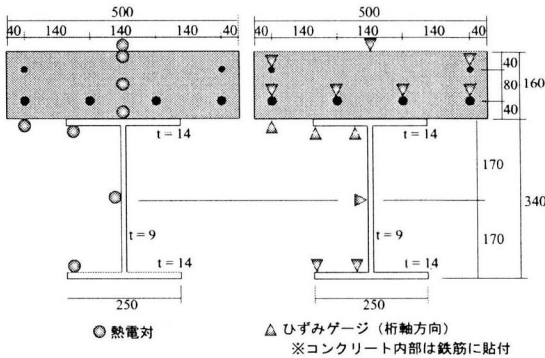


図-3 熱電対・ひずみゲージ設置断面図

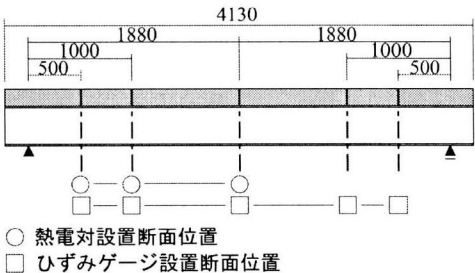


図-4 熱電対・ひずみゲージ設置断面位置

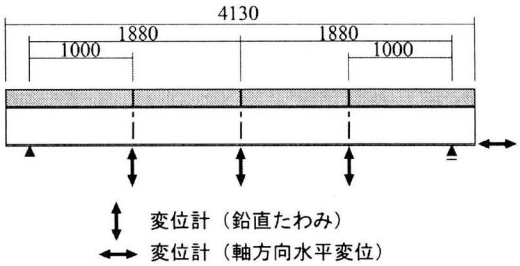


図-5 変位計設置図

ひずみゲージは温度変化による材料の自由膨張分のひずみ ε_t を測定しないように設計されている。そのため、計測されるひずみ ε^* は断面内の温度勾配によって生じるひずみとなる。そこで本実験では、初期状態からの変形を捉えるために、以下の式で初期状態からのひずみ ε を算出した。

$$\varepsilon = \varepsilon^* + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot \Delta t \quad (2)$$

ここで、 α は線膨張係数(鋼・コンクリート共に $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、 Δt は初期状態からの温度差を表す。

また、たんに自由膨張だけでは温度応力は生じないことから、温度応力はひずみの測定値 ε^* にヤング率 E を乗じて算出した。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon^* \quad (3)$$

2.4 測定結果・考察

(1) 温度分布

予熱終了時にコンクリート上面と下フランジとで温度が 5 度程度違っているが、これはひずみゲージ等のリード線を配線するために、試験体下部で断熱シートに隙間を持たせたためと考えられる。

図-6 に放熱時の支間中央断面の温度の時間推移を示す。

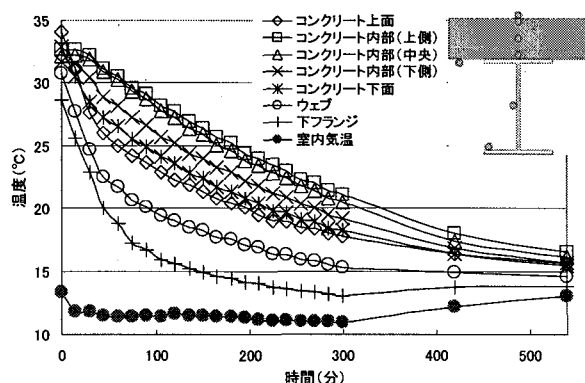


図-6 放熱過程における支間中央断面温度と時間推移

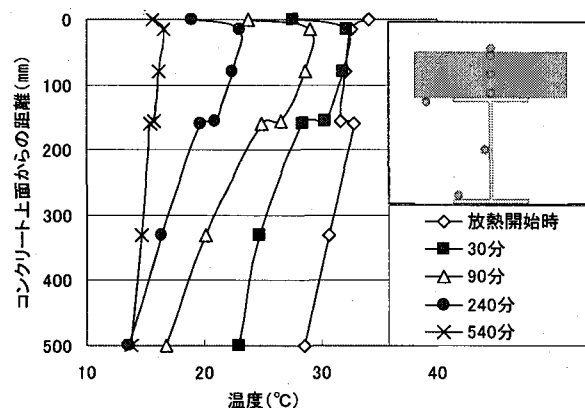


図-7 放熱過程における支間中央断面の温度分布

鋼桁では放熱開始後 60 分まで急激に温度が下降しているが、コンクリートの内部では温度が緩やかに下降している。図-7 に支間中央断面の温度分布を示す。放熱開始後 30 分を経過しても、コンクリート内部では温度の変動がないことが分かる。放熱開始後 90 分のときに断面内の温度勾配が最大となり、その後温度勾配は減少を続け、540 分で断面内の温度がほぼ一定となっている。

(2) 温度応力

測定された実測ひずみから、式(3)を用いて断面の応力分布を算出した。図-8 に自由支承から 500mm の断面の応力分布を示す。コンクリートの部分で圧縮応力が、鋼の部分で引張応力が生じていることが分かる。これは、鋼の温度が急激に下がり、鋼桁が長手方向で収縮しようとしているのに対し、コンクリート内部の温度は鋼と比べて下がっておらず、コンクリートが長手方向であまり収縮せず、結果として鋼桁の収縮を拘束したため鋼では引張応力が生じ、逆にコンクリートでは鋼によって収縮の方向に作用を受けるため圧縮応力が生じたと考えられる。

(3) 変形挙動

図-9 にコンクリート上面と下フランジのひずみの時間推移を、図-10 に変位計の計測結果を示す。図-9 のひずみとたわみの結果から、放熱開始後 90 分まで試験体のたわみが上方に増し、その後たわみ量が減少しつつづけている。これは、(2)の温度応力と同様に、放熱開始後 90 分までは鋼の温度が急激に下がり、鋼桁が長手方向で収縮しようとしているのに対し、コンクリート内部の温度は鋼と比べて下がっておらず、コンクリートが

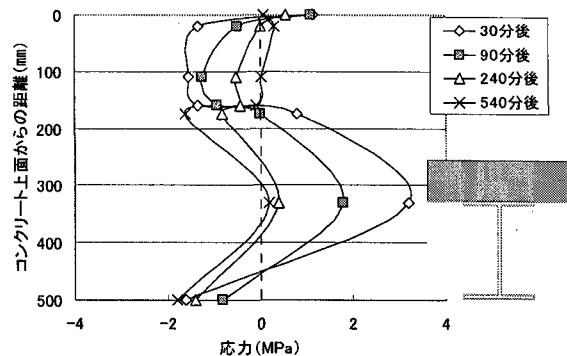


図-8 断面の温度応力分布

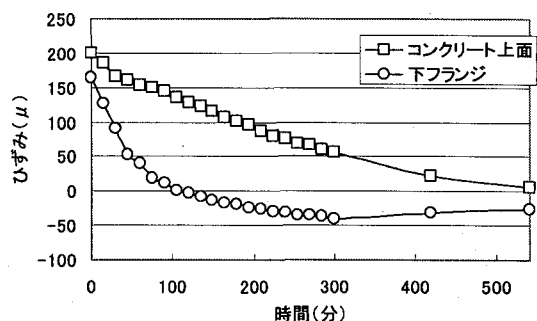


図-9 コンクリート上面と下フランジのひずみの時間推移

長手方向であまり収縮しなかったために、図-11 のように桁が上方にたわんだものと考えられる。このことから、鋼-コンクリート合成桁橋梁で温度変化によって生じる桁のたわみは、桁断面内の鋼桁とコンクリートの温度差に起因すると考えられる。この鋼桁とコンクリートの温度差と、支間中央のたわみについて図-12 に示す。この図から分かるように、これらは非線形の関係にあり、温度差拡大方向と縮小方向でループを描く形となっている。図-13 に支間中央の桁断面における各部位での温度と、自由支承における水平変位の関係を示す。ウェブ・下フランジの温度は、水平変位と線形に近い関係にあるが、コンクリート表面および内部の温度は、水平変位と非線形な関係となっている。

3. 日射実験

2. で述べたように、橋梁の周りの温度が均一でそれが放熱による変形を生じた場合には、合成桁は上方にたわみ、鋼-コンクリートの温度差とたわみは非線形な関係を示した。しかし、実橋では日射により同じ鋼部材でも温度差が生じる等その挙動はより複雑である。そこで、そのような実際の天候下で合成桁がどのような挙動をするかを把握するために、大型試験体を用いて日射実験を行った。

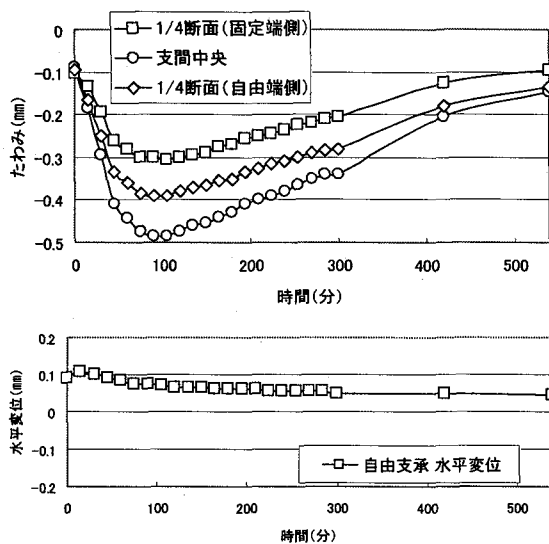


図-10 変位計 計測結果

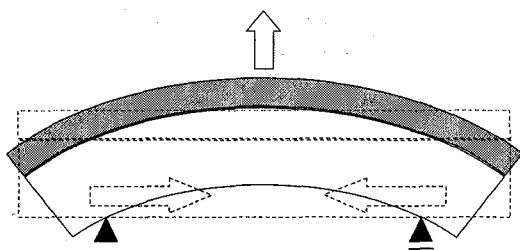


図-11 試験体の変形模式図

3.1 試験体概要

試験体は以前に静的・動的载荷試験に用いたものを本試験のために転用した。試験体寸法は、桁長 12m, 支間長 11m, 桁高 2m, 桁間 5.7m の鋼-コンクリート合成 2 本主桁で、図-14 に示すように片方の主桁の側面が南西を向くように屋外に設置されている(以下、南西側を日向側と称し、反対側を日陰側とする)。支持条件は西側 2 支承部を固定、東側 2 支承部を自由とする単純支持である。自由支承には温度変形に対してスムーズに移動のできるローラー支承を用いた。試験体の模式図を図-15 に、その写真を図-16 に示す。通常の橋梁では、断面から日射が桁内に差し込むことはないということを考慮して、試験体の南東側の断面をブルーシートで覆い、日射が差し込まないように配慮した。

3.2 試験方法

この屋外実験においても前述の室内実験と同様に、日射による試験体の温度分布、温度勾配によって生じる変形挙動、応力状態を明らかにする。測定に使用したセンサは、ひずみゲージ・熱電対・変位計とした。日向側の桁におけるセンサの設置概要を図-17 に示す。日陰側の桁についても、日向側の桁と同様にセンサを設置した。但し、本試験体は以前に他の

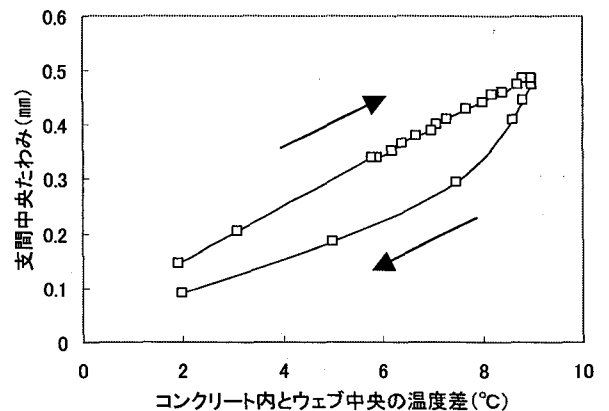


図-12 温度勾配と支間中央のたわみの相関

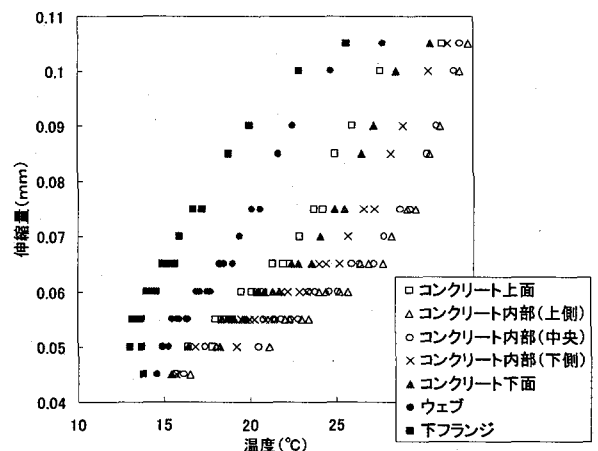


図-13 桁の温度と水平の伸縮量

実験に使用されたものを転用してきたため、コンクリート内部に熱電対・ひずみゲージを埋設することは出来なかった。

測定は1日を1サイクルとし、試験体の温度が最も低く落ち

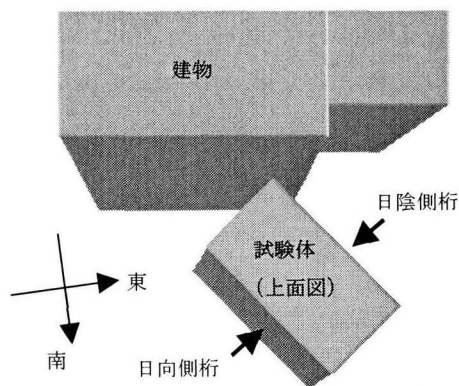


図-14 試験体の配置

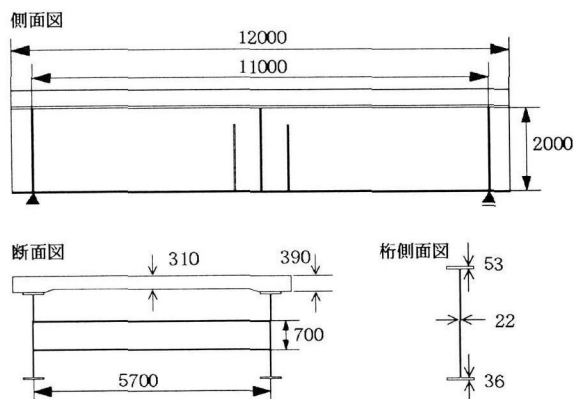


図-15 試験体の寸法

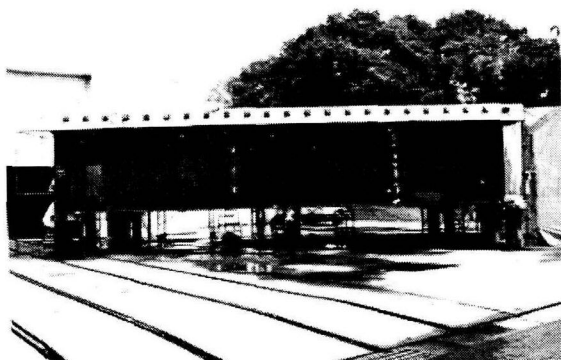


図-16 試験体写真

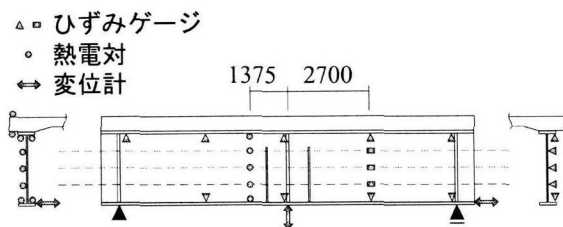


図-17 センサ設置図 (日向側 側面図)

着く午前 6:00、再び温度が落ち着く 24 時間後の午前 6:00 を終了時刻として、計 11 サイクル行った。測定周期は 30 分とし、すべてのセンサについてデータを収録した。なお、外気温についても測定を行った。

本試験体は実橋とは異なり、地上高さ1m程度の低い場所に設置されているため、地面からの熱の影響、つまり地表付近の気温勾配にの影響を受ける可能性があった。その確認のために、地表 1m、3mの高さで気温を計測した。その結果、両者の温度差は図-18 に示すとおり非常に小さいことが分かったため、本実験では地面からの熱の影響は考慮しなかった。

3.3 測定結果・考察

(1) 温度分布

図-19 に 1 日の支間中央の温度の時間推移を示す。日向側のウェブの温度が、気温よりも最大で 20°C 程度も高いのに対し、コンクリート床版下面の温度は気温が最大となる 14:00 でも気温より低く、日向側では 15:00 を過ぎたくらいに、日陰側では 17:00 を過ぎた頃に気温よりも高くなる。夜になると、ウェブの温度は外気温とほぼ同じになるのに対し、コンクリート床版下面の温度は、夜間を通して常に外気温より高い温度を維持している。

図-20 に晴れの日と曇りの日の 14:00 と明け方 4:00 の桁断面温度分布を示す。今回の実験では、コンクリート床版内部に熱電対を埋設することができなかったため、図-20 ではコンクリ

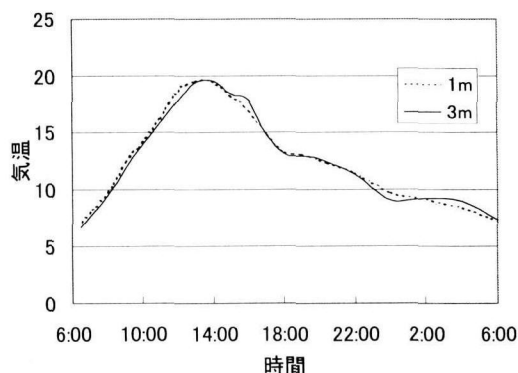


図-18 計測期間中(晴れ)の気温変動

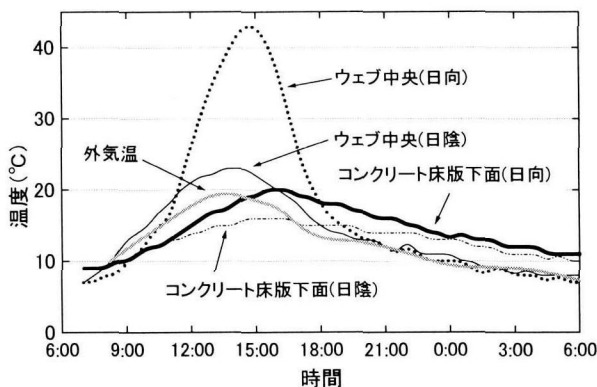


図-19 一日(晴れ)の桁温度の推移

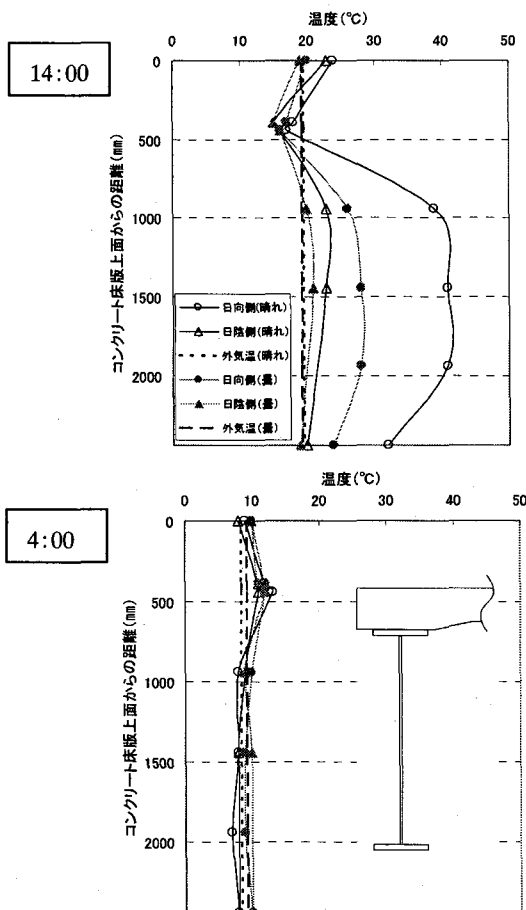


図-20 支間中央の桁断面温度分布

ート床版の上面と下面の温度を直線で結んでいるが、実際のコンクリート内部の温度は、図-20 で示される温度よりも、14:00 ではより低く、4:00 ではより高くなっていると考えられる。

(2) 変形挙動

図-21 に支間中央たわみの時間変動を、図-22 に自由支承の伸縮量を示す。いずれも、晴れの日向日向側の桁の変位量が他の条件のものに比べて 4 倍程度大きい。直射日光による桁の変形量が大きいことが確認できた。また、支間中央のたわみ量が最大となる 15:00 付近では、図-22 から鋼桁の温度が高く鋼桁が長手方向に伸びているが、コンクリート床版内の温度が低く、床版が鋼桁の伸びを拘束した結果、図-23 のように下方方向にたわみが生じたと考えられる。室内実験のときのたわみは上方に出たのに対し、本実験での桁のたわみが下方であるのは、桁断面の温度勾配が逆になっていたためということとなる。

ここで、室内実験のときと同様に、コンクリート床版とウェブの温度差を温度勾配として、温度勾配と日向側桁支間中央のたわみとの関係について図-24 に示す。但し、本実験ではコンク

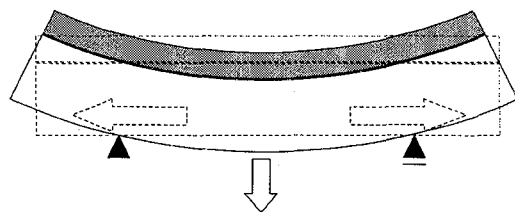


図-23 桁の変形模式図

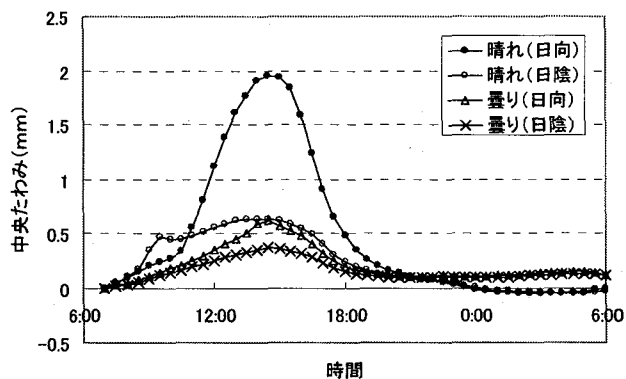


図-21 支間中央のたわみ変動

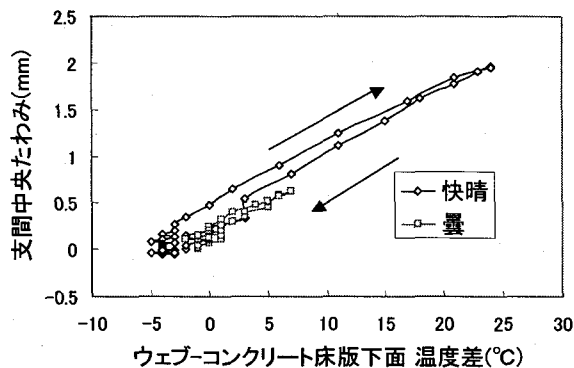


図-24 ウェブ温度と支間中央のたわみ

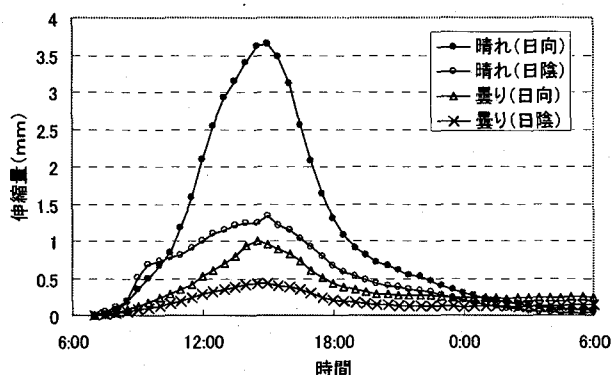


図-22 自由支承の伸縮量

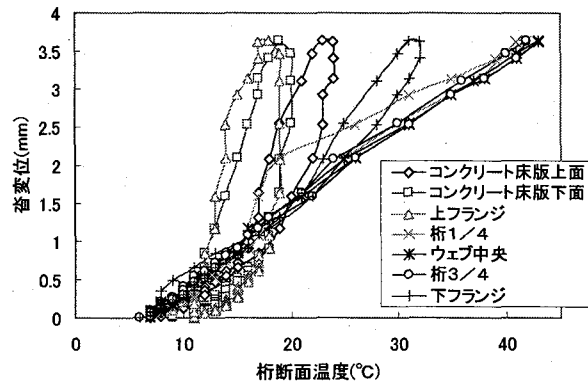


図-25 桁の伸縮量とウェブ中央の温度

リート床版内に熱電対を埋設できなかったため、コンクリート床版下面の温度をコンクリート床版の温度とした。また、データは気象条件による相違をみるために、快晴・曇りを示した。図から分かるように、温度勾配と支間中央のたわみとの関係には、放熱実験のときと同様に非線形性があり、ループの形状を示している。また、曇の日は晴れの日よりも線形に近いことが分かる。これは、鋼-コンクリートの温度差が小さいことに起因すると考えられる。次に、日向側桁の支間中央における断面の各部位の温度と自由支承における桁の伸縮量との関係を図-25 に示す。変位は、桁のウェブ中央より下の部位の温度と線形性が高いが、コンクリート床版の表面及びその近傍での温度とは非線形の関係を示すことが分かる。

4. まとめ

鋼-コンクリート合成桁橋梁の変形挙動を明らかにすることを目的として放熱実験および日射実験を行った。その結果を以下にまとめる。

- ① 鋼桁は直射日光の影響を受けやすく、本実験では鋼桁の温度が気温よりも最大で 20℃大きかったのに対し、コンクリート床版の温度は日中気温より低く、夜間を通して気温より高い。
- ② 鋼-コンクリート合成桁では、外的な温度変化に対して、桁断面内に温度勾配が生じ、その結果として内部拘束応力およびそれに起因する変形が生じる。
- ③ 温度変化による合成桁のたわみは、コンクリート内の温度と鋼桁ウェブ中央の温度の差に依存し、それらは非線形性を示す。但し、曇の日などのように鋼-コンクリートの温度差が小さいときは、線形に近い関係となる。
- ④ 温度変化による水平変位は、支間中央におけるウェブ高さ中央より下の部位の温度とは線形の関係にあるが、コンクリート床版表面及びその近傍の部位の温度とは非線形の関係にある。

本研究では、放熱試験および日射試験により温度変化による鋼-コンクリート合成桁の挙動を明らかにすることが出来た。今後、橋梁に異常が生じた際にこれらの挙動がどのように変化するかを追従することで、温度変化を利用した健全度モニタリングを行うことが可能であると考えられる。

謝辞

本研究の実験では、建設機械化研究所の皆様に多大なるお力添えをいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中山隆弘：全体的動向の解説，構造工学技術シリーズ No.12 「Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring」に関する公開講演会資料，pp.1-7，1999。
- 2) 三木千壽，水ノ上敏雄，小林裕介：光通信網を利用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発，土木学会論文集，No.686/VI-52，pp.31-40，2001.9。
- 3) 岡林隆敏 ほか：可搬型振動計測システムによる構造物の振動特性推定，土木学会論文集，No.591，pp.327-337，1998。
- 4) 三上修一，大島俊之，ムハマド S ラーマン，山崎智之：構造物維持管理のためのワイヤレスモニタリングシステムの開発，土木学会第 54 回年次学術講演会概要集，I-A205，pp.410-411，1999。
- 5) 阿部允，杉館政雄，小芝明弘：鋼橋の点検・診断用システムと機器，橋梁と基礎，No.31 Vol.8，pp.173-179。
- 6) B.Peeters, J.Maeck and G.De Roeck: Dynamic monitoring of the Z24-Bridge: separating temperature effects from damage, Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, pp.377-386, 2000。
- 7) 阿部允，公門和樹，三木千壽 ほか：疲労損傷モニタリングセンサーの開発，土木学会第 54 回年次学術講演会概要集，I-A208，pp.416-415，1999。
- 8) 水ノ上敏雄，三木千壽：ひずみ分布測定型光ファイバセンサの鋼橋梁モニタリング適応性，土木学会第 55 回年次学術講演会概要集，I-A318，2000。
- 9) Paul E.Grayson, William Law, Larry D.Thompson: Not Your Father's strain gauge, ASCE Vol.58, No.7, pp.68-71, 1998。
- 10) 西川和廣，山本悟司，鹿嶋久義：温度変化に伴う橋梁の挙動に関する計測結果の分析，土木学会第47回年次学術講演会概要集，I-449，pp.1074-1075，1992。
- 11) 西川和廣，村越潤，山本悟司：実橋における長期ひずみ計測結果の分析，土木学会第 46 回年次学術講演会概要集，I-324，pp.686-687，1991。
- 12) 東京測器研究所 製品総合カタログ

(2001 年 9 月 14 日受付)