

鋼合成桁の温度分布に影響を及ぼす環境要因に関する実験的研究

An experimental study on environmental factors that affect temperature distribution of steel composite girders

高木優任*, 横山功一**, 原田隆郎***

Masahide Takagi, Koichi Yokoyama, Takao Harada

*工修 新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

** 博士(工学) 茨城大学教授, 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

*** 博士(工学) 茨城大学助手, 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

In order to investigate the difference of temperature distribution of composite girders that have different slab types, Field measurements were conducted. Three types of slab were used in the test, i.e. ① RC slab, ② Concrete-filled I-beam grid slab, and ③ Steel plate-concrete composite slab. Clarifying the environmental factors that affect the temperature distribution of girders, heat transfer analysis was also conducted. As a result of these investigations, it is confirmed that there is no difference in the temperature distribution of composite girder by the difference in slab type.

Key Words: Composite girder, Temperature distribution, Heat transfer analysis, Sunshine

キーワード: 合成桁, 温度分布, 熱伝導解析, 日射

1. はじめに

近年, 鋼橋分野においては橋梁建設のコスト縮減, 合理化, 省力化などを狙いとして, 鋼桁とコンクリート系あるいは鋼・コンクリート合成系の床版とを合成した合成桁橋梁に関する検討が盛んに行われている¹⁾。これらの検討においては様々な観点から研究がなされているが, 橋梁の温度に関する検討例はあまり見られない。実際の橋梁では, 日射, 気温変動などの架橋地点の周辺環境によって部分的に温度が変化して, 橋梁内部での温度分布が様にならないことは周知の事実である。このため, 異種の材料である鋼材とコンクリートとを組み合わせた合成桁では, 日射などの周辺環境の変化によって, 床版と桁などの部材間の温度差に起因する不静定力が発生することになる。したがって, 合成桁橋の合理的な設計法を確立するためには, 温度による不静定力を把握することも一つの重要な課題であり, その一歩として橋梁における温度分布のデータを蓄積することが必要となる。

また一方で, 近年では鋼橋建設の合理化, 高耐久性化を目指して, 各種の合成床版が提案されている²⁾。しかしながら, 鋼橋で一般に用いられている RC 床版を有する合成桁の温度分布に関してさえも, 橋梁部材の温度変化を詳細に検討した例は少ないのが現状であり, 増してや最近採用例が増加してきている合成床版に関してはこれらのデー

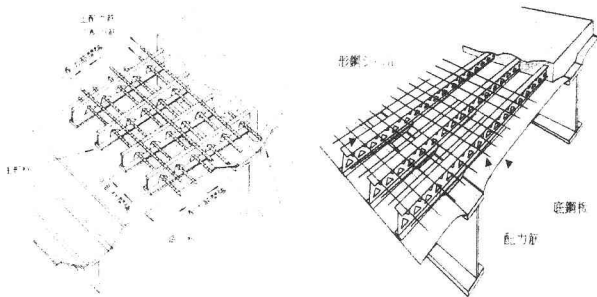
タはほとんどなく, 温度分布に関するデータの蓄積が望まれる。

ところで, 橋梁の温度変化には季節的な気温の変化による長期的(1年周期)かつ一様な温度変化と, 日射などによる短期的(1日周期)かつ局所的な温度変化の2種類がある。このうち, 季節的な気温の変化については, 一様な温度変化として処理できるため, 基準温度と供用期間中の最高気温と最低気温とを適切に設定できれば, 設計計算上の問題は少ないと考えられる。一方で, 短期的な温度分布の変化については, 道路橋示方書⁴⁾では, コンクリート床版と鋼桁とを合成した合成桁では, コンクリート床版と鋼桁との相対的な温度差が無視できないため, コンクリート床版, あるいは鋼桁のいずれかが 10℃高温の場合を対象として照査することとしている。しかしながら, このような温度差を発生させる要因については, 日射, 風速などの環境因子が多く, 実際にこれらを計測, 検討した例も少なく, 不明な点が多いのが現状である。

筆者らは過去に, 温度変化が設計上重要な要因となる, 上部工, 下部工, ならびに基礎までを一体化したインテグラル橋の温度分布を把握することを目的として, 実際に建設された鋼桁を有するインテグラル複合ラーメン橋梁³⁾を対象とした短期的な橋梁の温度分布の変化, ならびに周辺環境についての測定とシミュレーション解析を行った。その結果, 環境要因が短期的な橋梁内部の温度分布に及ぼ

表－１ 試験体の概要

	床版形式	床版厚	底鋼板 厚さ	床版幅	配筋	主桁	桁長
Type-1	RC 床版	16cm	—	1.0m	主筋:D13@100mm(上下共) 配筋筋:D19@125mm(上下共)	H588×300 ×12×20	6.5m
Type-2	I 形鋼格子床版		1mm		主部材:I-105@200mm 配筋筋:D19@125mm(上下共)		
Type-3	鋼板・コンクリート 合成床版		6mm		ズレ止め:I-105@300mm 配筋筋:D19@100mm(上側のみ)		
断面剛性: Type-1, Type-2 断面二次モーメント $I=316,000\text{cm}^4$ Type-3 断面二次モーメント $I=324,000\text{cm}^4$ 注) ヤング係数比 $n=7$ として算出 Type-2 は底鋼板無視, Type-3 は底鋼板有効として断面剛性を算出							



(a) I 形鋼格子床版 (b) 鋼板・コンクリート合成床版
図-1 検討対象床版

す影響を考察し、解析によるシミュレーションが可能であることを確認した⁵⁾。しかしながら、これらのデータは温度としては標準温度に近い春期の気候について測定したものであり、温度変化で重要な指標となる年間の最高、最低気温をそれぞれ記録する夏期、ならびに冬期を対象としたものではなく、季節的な環境要因の変動を考慮に入れた温度変化の評価は課題として残された。また、測定の対象とした橋梁はRC床版を有するものであって、床版形式を合成床版としたものについては確認されていないため、これらの点についても確認しておく必要があるものと考えられる。

本研究では、鋼桁とRC床版、あるいは合成床版とを一体化した合成桁の温度分布に周辺環境が与える影響を明らかにすること目的として、鋼桁とRC床版、合成床版とを合成した合成桁を複数製作して屋外に設置し、周辺の温度、ならびに環境条件を測定した。この結果をもとに、合成桁の温度分布に与える周辺環境の影響を考察すると共に、床版形式の違いによる合成桁の温度分布の違いについて考察した。また、測定結果を定量化するため、FEMを用いたシミュレーション解析を実施し、周辺環境の変化による合成桁の温度変化を解析的に追跡することが可能であることを確認した。

2. 試験の概要

2.1 試験体

合成桁橋梁を模擬した長さ6.5m、幅1.0mの試験体を

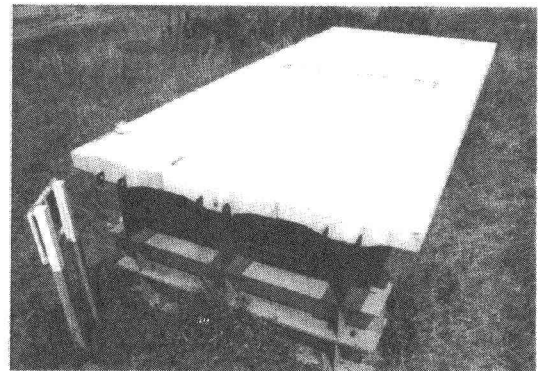


写真-1 試験体設置状況

3体製作し、試験に供した。主桁は高さ588mmのH形鋼、床版は厚さ16cm、ハンチ高5cmとした。床版と桁の合成は桁上フランジ上にスタッドを打設することで行った。試験体の概要を表-1に示す。

試験体は、床版形式の差異による温度分布の違いを観察するため、以下に示す3種類とした。

Type-1 RC床版

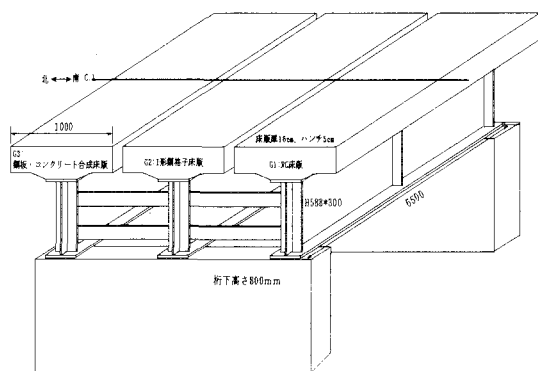
Type-2 I形鋼格子床版

Type-3 鋼板・コンクリート合成床版

Type-1 は一般的な鉄筋コンクリート床版であり、本研究において基本となるものである。Type-2 のI形鋼格子床版はRC床版中の主鉄筋の代わりにI形鋼を埋め込んだもので、床版の底面に厚さ1mmの亜鉛鉄板を有している⁶⁾。Type-3 の鋼板・コンクリート合成床版は、厚さ6mmの鋼板を床版の底面に有している。この形式については、ズレ止めの特長を有する各種の構造が提案されているが、ここでは、ズレ止めとして形鋼(I形鋼)を用いたものを使用した⁷⁾。

試験体の断面剛性は、表-1に示すようなものとなった。試験体の断面寸法は、H形鋼橋梁の実績例を参考に、床版厚さを道路橋示方書⁴⁾の最低床版厚分確保し、床版幅は平均的な主桁間隔として決定した。主桁のH形鋼は、合成桁断面の中立軸位置が床版面に入らないようになるサイズを選定した。

検討の対象としたI形鋼格子床版、ならびに鋼板・コンクリート合成床版の構造概要を図-1に示す。



図－２ 試験体設置位置

2.2 試験体設置場所

試験体の設置場所は、千葉県富津市の新日本製鐵㈱総合技術センター内のヤードである。設置地点の経緯度はおよそ、北緯 35 度 20 分、東経 139 度 50 分である。試験体の設置状況を写真－1 に示す。試験体周辺に日射、風などを遮るものは一切ない。

試験体の配置を図－2 に示す。試験桁は、橋軸方向がちょうど東西方向になるように配置した。また、側面からの日射の影響を受ける一番南側には RC 床版を設置した。

2.3 測定項目

周辺環境の季節的な違いによる温度分布の相違を観察するため、夏期、ならびに冬期のそれぞれについて測定を行った。夏期は平成 14 年 8 月 22 日から 8 月 27 日までの 6 日間、冬期は平成 15 年 2 月 5 日から 2 月 12 日までの 8 日間である。

橋梁の温度分布に影響を与える環境因子として、日射量、ならびに気温を測定した。また、後ほど説明するシミュレーション解析の検証を実施する際に必要となる、熱流束、ならびにひずみを測定した。

日射量は試験桁の上に水平に設置した日射計で、温度は日陰に置いた百葉箱の中に設置した温度計で計測した。また、試験体表面の温度は熱電対を、熱流束は感知精度 0.008W/cm² の熱流束センサーを、ひずみはひずみゲージをそれぞれ試験体表面に貼付して測定した。

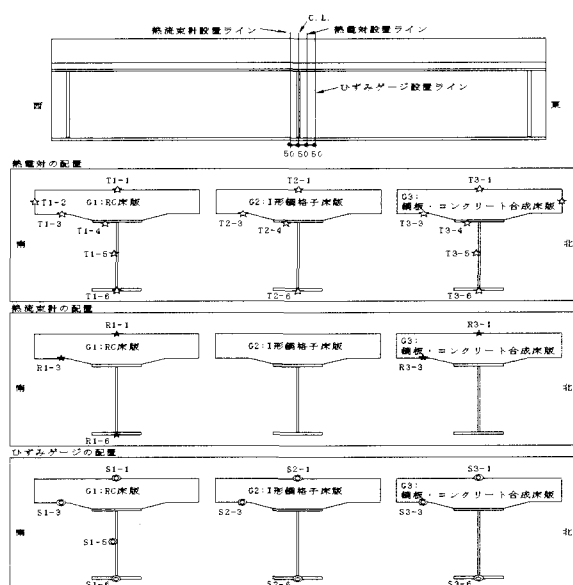
計測器具の配置を図－3 に示す。

3 周辺環境の理論解

3.1 熱伝導解析の基礎方程式

物体の温度分布は、熱伝導解析により求めることができる。熱伝導の基礎方程式は、物体の熱伝導率が等方・等質であり、物体内部の発熱量が 0 であるとする、次式で表される。

$$-\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$



図－3 測定位置

ここに、

ρ : 密度 (kg/m³)

c : 比熱 (J/kg・K)

T : ある時刻 (t) の任意地点での温度

λ : 熱伝導率 (W/m・K)

境界での外部との熱のやり取りを表現する熱流束は、フーリエの法則より、以下の式で与えられる。

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

ここに、 n は境界上での外向法線である。

すなわち、解析においては、材料の密度、比熱、熱伝導率を与え、熱的な境界部に熱流束を与えればよいことになる。

3.2 日射量

日射については、建築分野の日照学⁸⁾においてすでに評価法が確立されており、太陽から物体に直接入射する直達日射量は以下の式で表されることがわかっている。

$$\text{水平面} : J_H = (J_0/r^2) P^{\cos h} \sin h \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

$$\text{鉛直面} : J_V = (J_0/r^2) P^{\cos h} \{ \cosh \cos(A - \alpha) \} \quad (\text{W/m}^2) \quad (4)$$

ここに、 J_0 : 太陽定数 (=1244W/m²)

P : 大気透過率

h : 太陽高度 (rad)

A : 太陽の方位角 (時角) (rad)

α : 受射面の傾斜方位 (rad)

(南向き鉛直面の場合 0)

式 (3), (4) 中の r は地球と太陽との間の距離とその年平均値 (1,495×10⁵km) との比率を表し、夏至に 1.016、冬至

に 0.984 であることがわかっている。

また、式(3)、(4)中の大気透過率 P は、天空の環境因子や混濁の度合によって、一定の場所においても年変化や日変化を生じる。一般に、冬場の方が大気透過率は高くなることが知られている⁸⁾。

また、日射には大気層を通して直接入射する直達日射のほか、大気中で散乱され天空から到達する天空輻射がある。全天空による水平面の天空輻射の強さは次式で表される。

$$J_s = 1.2J_0 \sinh \frac{(1 - P^{\cos \theta})}{(1 - 1.4 \ln P)} (1 - P) \quad (\text{W/m}^2) \quad (5)$$

以上より、全天日射量は直達日射量と天空輻射量の和として表される。

$$\text{鉛直面: } J = J_H + J_S \quad (\text{W/m}^2) \quad (6)$$

$$\text{水平面: } J = J_{\nu} + J_S \quad (\text{W/m}^2) \quad (7)$$

3.3 日射以外の熱流束

日射以外の熱流束の算定式を以下に示す。計算方法の詳細は文献^{5), 9)}を参照されたい。

- ・大気放射による熱流束 q_a

$$q_a = \varepsilon \sigma T_a^4 \quad (8)$$

- ・橋梁からの放射による熱流束

$$q_r = -\varepsilon \sigma T_0^4 \quad (9)$$

- ・大気による対流熱伝達

$$q_c = h_c (T_a - T_0) \quad (10)$$

ここに、

ε : 橋梁表面の放射率 (= 吸収率)

σ : ステファン・ボルツマン定数

$$= 5.67 \times 10^{-8} \quad (\text{W/m}^2\text{K}^4)$$

T_a : 周囲の大気の絶対温度 (K)

T_0 : 橋梁表面の絶対温度 (K)

h_c : 対流熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{K}$)

対流熱伝達率 h_c は主として風速に関係し、その方向、

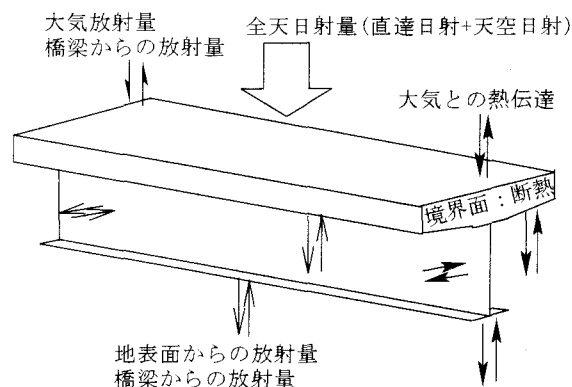


図-4 熱的境界条件

表面の形状および材料の種類にも多少影響を受けるが、風速に大きく関係するとしてユングスの実験式によって以下のように見積もることができる⁸⁾。

$$h_c = 6.16 + 4.19\nu \quad (\nu \leq 5 \text{ m/s})$$

$$= 7.52\nu^{0.78} \quad (\nu > 5 \text{ m/s}) \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (11)$$

ここに、 ν : 風速 (m/s)

3.4 熱的境界条件

橋梁と外部との熱収支は、たとえば日射は床版表面だけに影響するなど、各境界面によって異なっている。本研究で考慮する熱的境界条件を図-4に示す。境界部における熱流束 q は、前節で述べた、

q_s : 日射による放射熱量

q_a : 大気や地表からの放射熱量

q_r : 表面から周辺への再放射量

q_c : 大気による対流熱伝達

の4種類を考慮した。

- ・全天日射、および大気放射は床版上面、橋台上面に作用

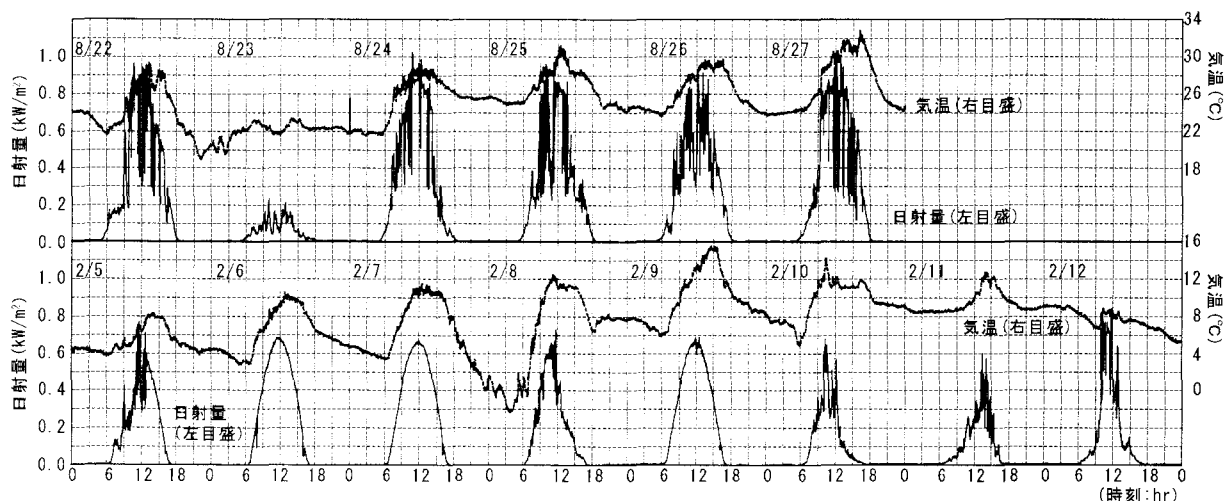
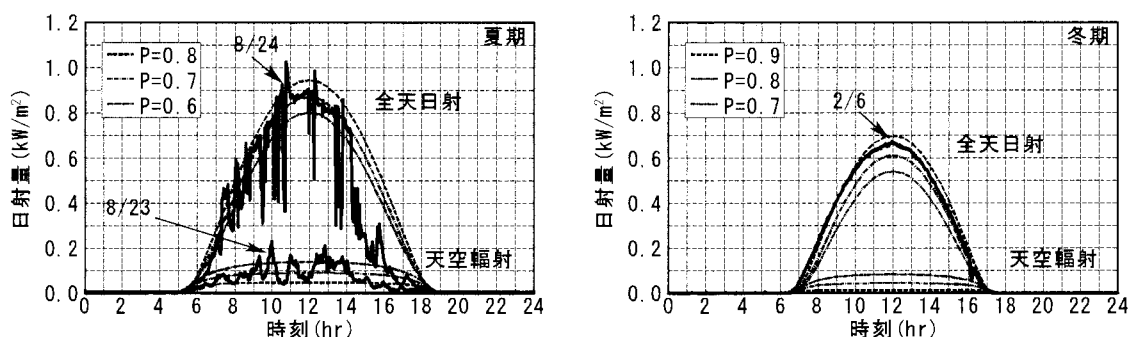


図-5 日射量の測定結果



図－6 日射量の測定結果と計算値の比較

させる

- ・対流熱伝達、ならびに橋梁からの放射は断熱面を除くモデルの表面全体に作用させる
- ・地表面からの放射(=大気放射と考える)は床版底面、桁に作用させる

なお、熱の流れる方向は、橋梁への入熱を正、橋梁から放射される熱を負とした。

4. 測定結果

4.1 日射量と気温

日射量と気温の測定結果を図－5に示す。図－5より、8月の測定では8/23のみが雨天で日照は全くなく、日中の気温も上昇していない。その他の日は晴れであったが、曇りがちであったため、日射量の変動が大きかった。一方、2月の測定では、2/6、2/7、2/9は快晴であり、太陽が雲に全くかからなかった。ところが、2月の測定の後半(2/10～12)は曇りがちの天気であり、日射量はあまり小さくなく、日中の気温上昇も他の日に比べて小さかった。

日射量の計算結果と測定結果との比較を図－6に示す。夏冬それぞれで晴天の日を選び、大気透過率を変化させて計算した値と測定結果とを比較した。図－6より、夏期は大気透過率を0.7とした場合に、冬期は大気透過率を0.9とした場合によく一致しており、理論値は大気透過率を変化させることにより測定値とよく一致することがわかる。このことから、大気透過率は年間で変化しており、一定でないことが確認できる。

4.2 熱流束

熱流束の測定結果と計算結果の比較を図－7に示す。熱流束計による測定結果は、3.3で述べた、

- ・日射による熱流束
- ・大気放射による熱流束
- ・橋梁自身の放射による熱流束
- ・対流熱伝達による熱流束

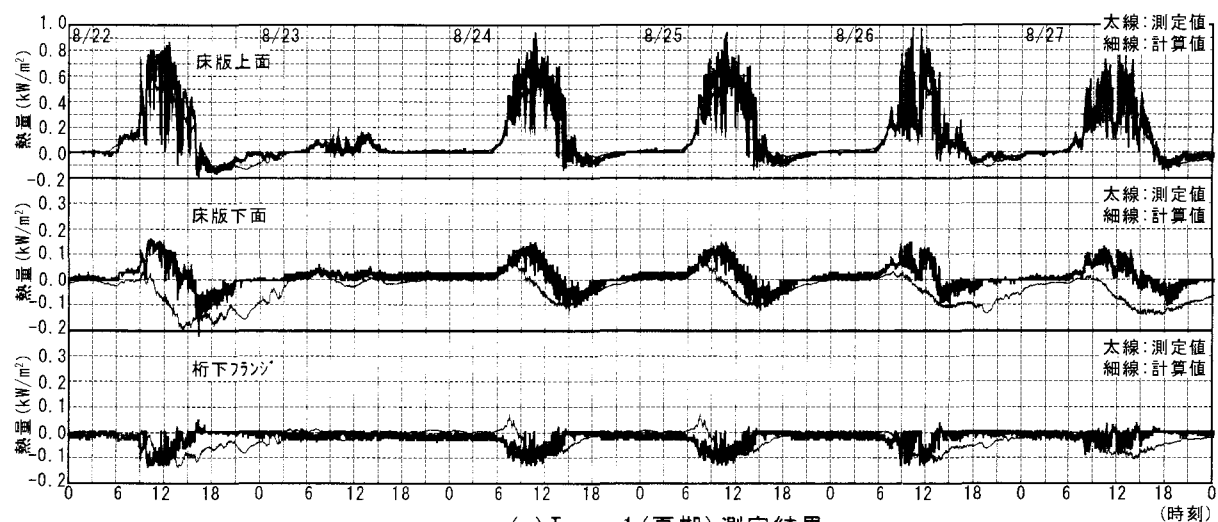
を総合したものである。計算結果は、3.4で示した境界条件のもとに、風速 $v=4\text{m/s}$ として計算した($v=4\text{m/s}$ とした

理由については後で述べる)値を合計したものを表している。なお、熱流束は熱流束センサーで測定したが、センサーの表面が黒色であるため、試験体の表面とは放射率(吸収率)が異なることに注意が必要である。ここでは、センサーに合わせるため、計算値では放射率(吸収率) $\varepsilon=1.0$ とした。

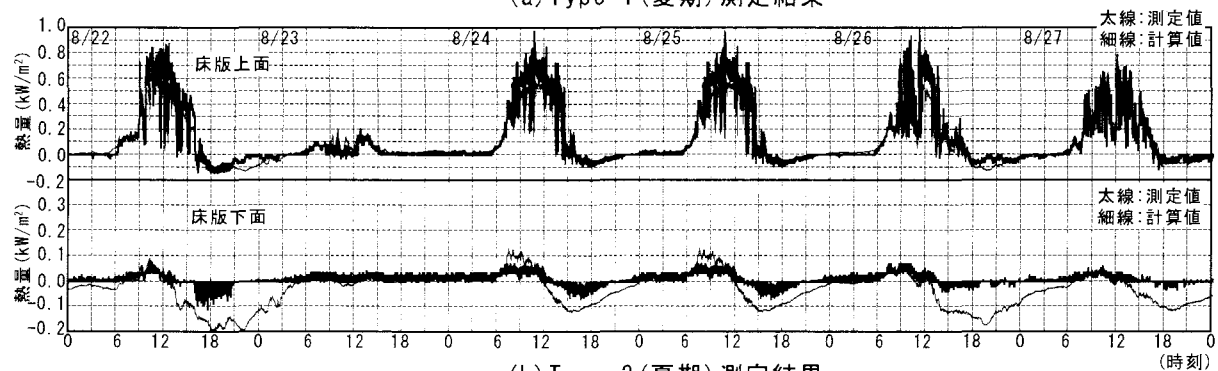
図－7中の床版表面の熱流束は、夏期、冬期とも計算値と測定値は良く一致した。この部位の熱流束は日射が支配的であるので、橋梁に入射する熱流束はほぼ日射量に比例している。

床版下面の熱流束は、夏期、冬期ともType-1とType-3で傾向が異なる。すなわち、計算値と測定値との比較において、Type-3では測定値の方が計算値よりも若干小さい値を示しているのに対し、Type-1の測定値は晴天の日の日中の熱流束が $0.1\text{kW/m}^2 (=0.01\text{W/cm}^2)$ ほど計算値よりも大きくなっている。側面から日射が入射するType-1の側だけ熱流束が大きいので、これは、橋梁表面側から回り込んでくる天空輻射による日射の影響ではないかと考えられる。図－8に、式(5)により計算した天空輻射を考慮した計算値と測定値との比較を示す。天空輻射による入射熱量を考慮することによって、計算値は測定値に近づくことがわかる。しかしながら、これらの差異を生じる要因としては風速の違いによる熱伝達率の差なども考えられるため、必ずしも天空輻射による影響であるとは言えず、今後、精査が必要である。

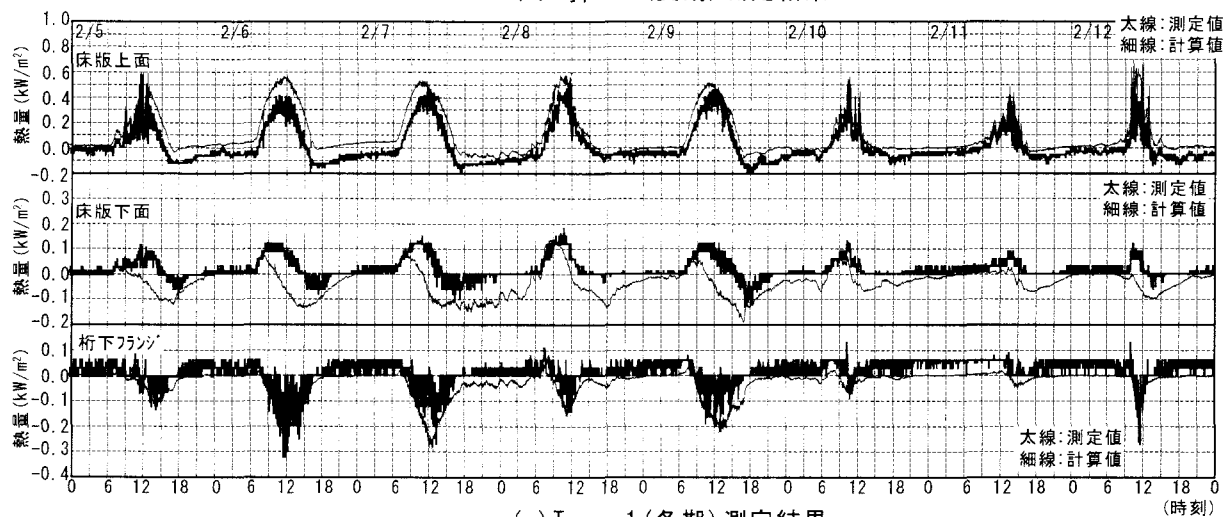
図－7の桁下フランジの熱流束は、夏冬ともに測定値と計算値とが比較的よく一致しているといえる。桁下フランジには日射の影響があるが、熱流束計は日射の当たらない側に設置したため、日中は日射により温度が上昇して測定点は気温よりも高い温度になるので、熱の流入よりも流出のほうが大きくなっていると考えられる。しかしながら、日射の影響については、桁に日射が入射してこないType-2、Type-3の桁下フランジの熱流束を測定していないため、特定はできなかった。また、夏期と冬期との比較では、冬期の方が熱の流出量が全般的に大きかったが、これは、夏期は太陽の高度が高いため床版で日射が遮られ、桁に達する直達日射が少なくなっているのに対し、冬期は太陽高度が低く、直達日射が桁によく届き、周辺の気温と



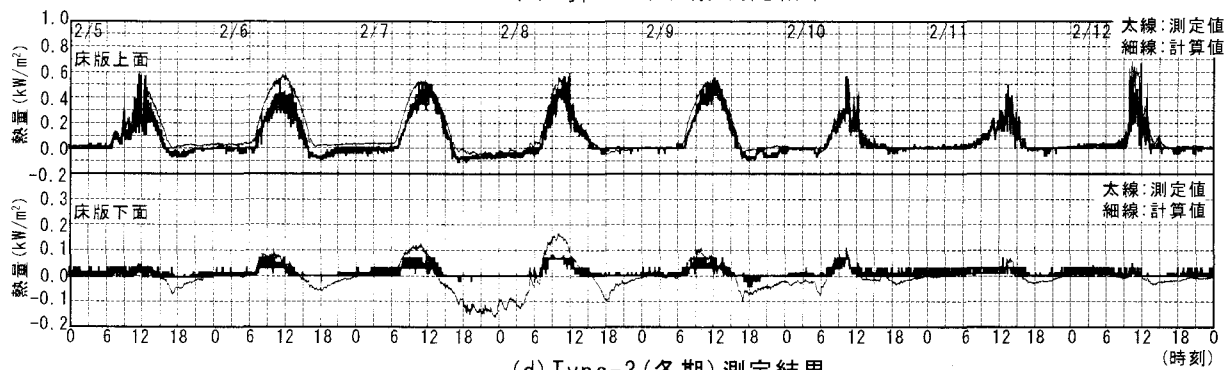
(a) Type-1 (夏期) 測定結果



(b) Type-3 (夏期) 測定結果

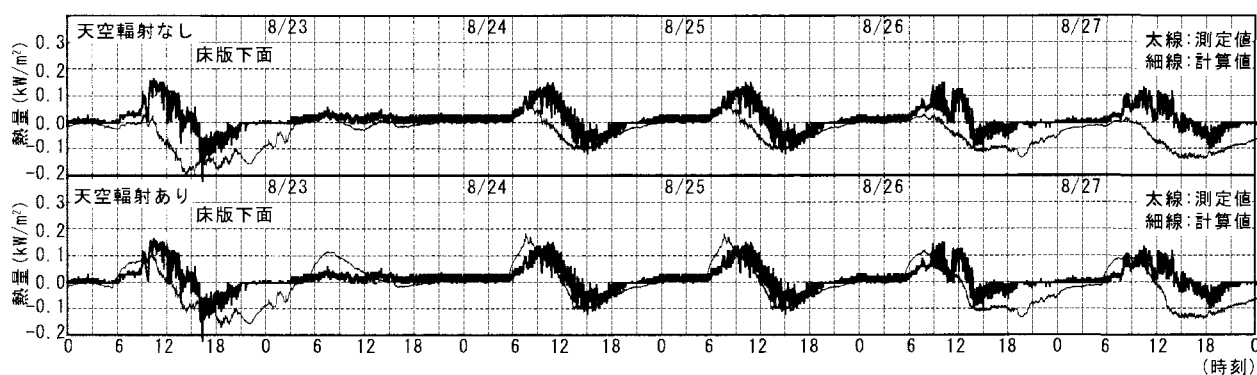


(c) Type-1 (冬期) 測定結果

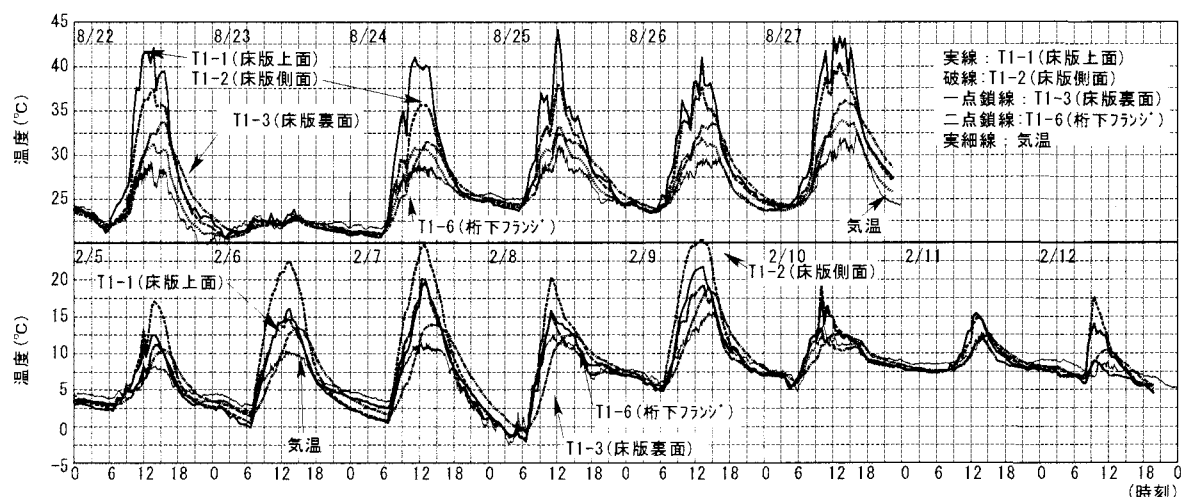


(d) Type-3 (冬期) 測定結果

図-7 熱流束測定結果



図－8 計測値と解析値(天空輻射の有無)との熱流束の比較(Type-1: 床版下面)



図－9 Type-1 (RC 床版) の温度計測結果

の差が大きくなるためであると考えられる。

以上より、熱流束に関しては、側面からの日射の影響を考慮する必要はあるものの、熱的な境界条件は本論文の3.で示す方法によって表しても大きな間違いはないことが確認できた。

4.3 温度の測定結果

Type-1 の試験体各部における温度の測定結果を図－9に示す。図－9より、夏期、冬期ともに日射の影響を受けて各日とも午前6時ごろから温度が上昇し始める。その後、部位によって温度上昇の割合は異なるが、夏期は床版表面が、冬期は床版側面の温度上昇が他の部位と比べて大きい。これは、夏期は床版表面の、冬期は床版側面の直達日射が大きくなるためであると考えられる。また、図－5からわかるように、日射量は午後12時頃が一番大きくなるが、橋梁表面の温度のピークはどの部位においても12～15時ごろであり、日射のピークとは少しズレがある。なお、温度のピークが発生する順番は床版表面→床版下面の方向で生じている。1例として、夏期の8/22を例に取ると、床版表面の温度のピークが最も早い時刻(13:00ごろ)に発生し、そのあと、床版側面(13:30頃)、床版下面(15:30頃)の順番でピークを迎えている。これは、床版表面か

ら入射した熱量が床版表面の温度を上昇させ、この温度が床版内部の側に拡散していくためであるが、コンクリートの熱容量が大きいと、熱の伝達に時間がかかることがピーク時刻にズレが生じる原因である。

図－10に、各試験体の部位ごとの温度履歴を比較したものを示す。図－10より、夏期では、床版上面、床版下面、ならびに桁下フランジといったすべての部位で、Type-1の温度変化が他の2形式(Type-2、Type-3)と若干異なることがわかる。これは、Type-1が一番南側に位置しているので、側面からの日射の影響を受けるためである。また冬期では、Type-1の下フランジの温度が高いことが目立つ。これは、冬期は太陽の高度が低いと、床版の張出し部分が庇とならずに下フランジにまで直達日射が届くためであり、日射により熱量の供給がなされているためである。一方で、RC床版より北側に設置したType-2とType-3とでは日射が当たらないため、夏冬ともほぼ同じような温度で推移している。このことから、周辺環境の変化に対する合成桁の温度分布の変化に対しては、床版形式の違いによる差異は認められず、底面に鋼板を有する合成床版であってもRC床版と同じような温度履歴を示すことが確認できた。

また、図-10中には気温のデータも表示したが、日射の

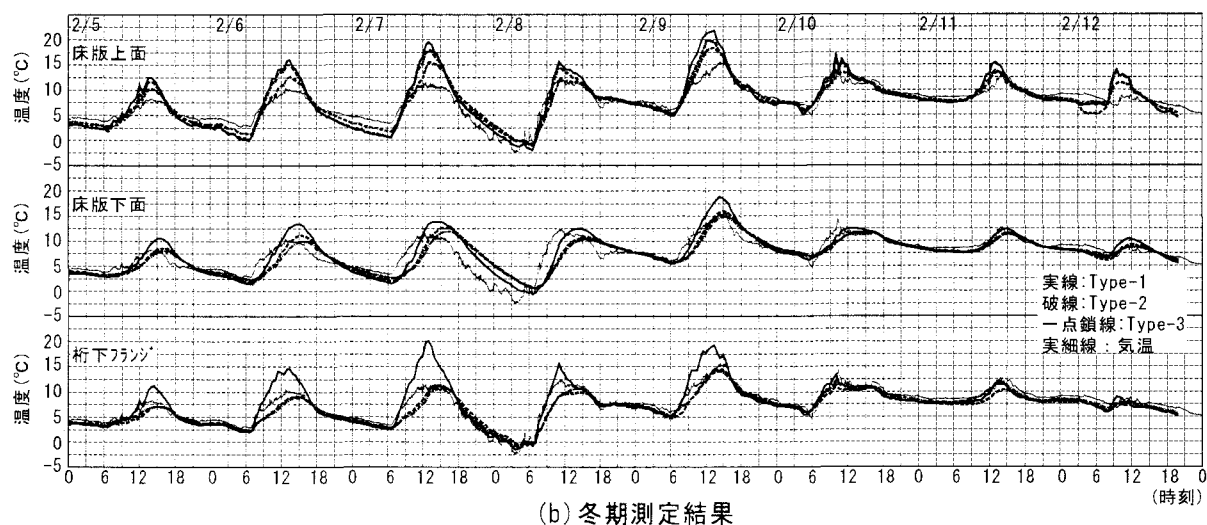
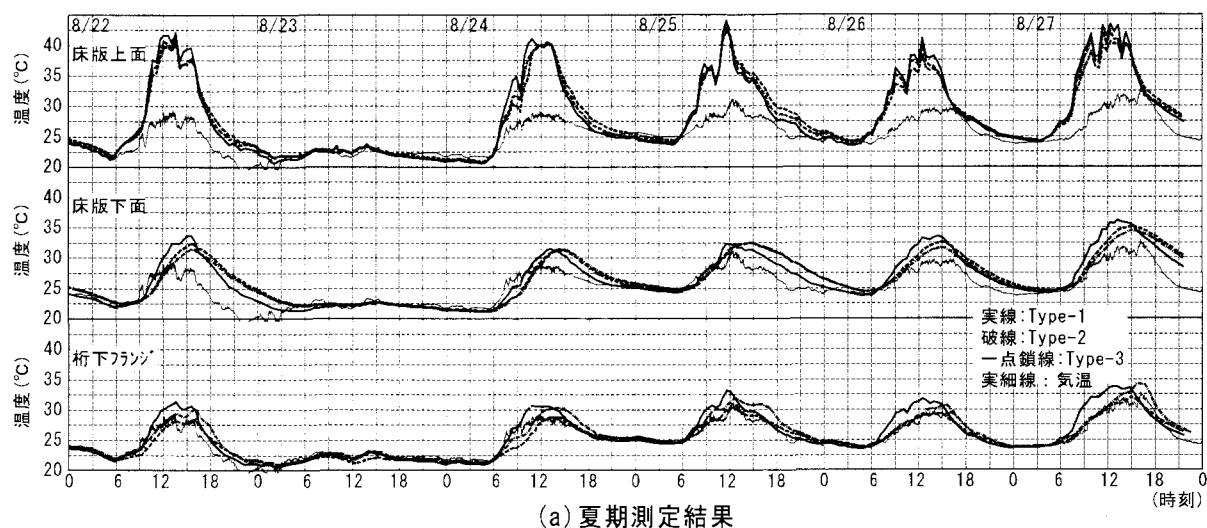


図-10 各タイプの温度履歴の比較

入射しない鋼桁下フランジ(Type-2, Type-3)の温度履歴は気温にほぼ追従することを確認した。

4.4 ひずみの測定結果

Type-1 試験体(RC 床版)の試験体各部のひずみの測定結果を図-11 に示す。また、各タイプの部位ごとのひずみの測定結果の比較を図-12 に示す。なお、図中のひずみの符号は引張りを正、圧縮を負として表示している。

図-11 より、合成桁内部でのひずみ分布は、温度変化が最も大きい床版表面で最も大きな引張ひずみが発生し、桁は圧縮ひずみとなっていることがわかる。

図-12 より、側面からの日射の入射の有無ならびに床版形式の相違により、各タイプで中立軸位置が変化するため、ひずみの詳細な履歴はタイプごとで異なっている。しかしながら、ひずみの発生する傾向は各タイプで全体的にはほぼ同じで、日射によって床版表面の温度が上昇することによって床版表面のひずみが上昇し、それに少し遅れて床版下面のひずみが上昇する。一方で鋼桁は、床版の温度上昇による不静定力の影響を受け、ひずみを生じていることがわかる。また全体を眺めてみると、冬期の桁下フランジ

でのひずみ履歴において、Type-1 で日中はひずみの反転が生じていることがわかる。これは、下フランジに日射が当たり、桁の下フランジの温度が上昇し、桁に圧縮力が生じるためである。しかしながら、今回の計測では試験体は単純支持されているため、このひずみレベルは最大でも 20μ 程度と小さい。

5. 熱伝導解析

5.1 解析の目的

先に述べた測定結果の妥当性を評価し、数値シミュレーションによる温度分布の評価が可能であるかどうかを検証することを目的として、FEMを用いた熱伝導解析による温度分布のシミュレーション解析を行った。解析コードは汎用構造解析ソフト MARC2001¹⁰⁾を用いた。

5.2 解析モデル

解析モデルを図-13 に示す。鋼桁はシェル要素、コンクリートはソリッド要素でモデル化した。また、合成床版の底鋼板はシェル要素でモデル化した。

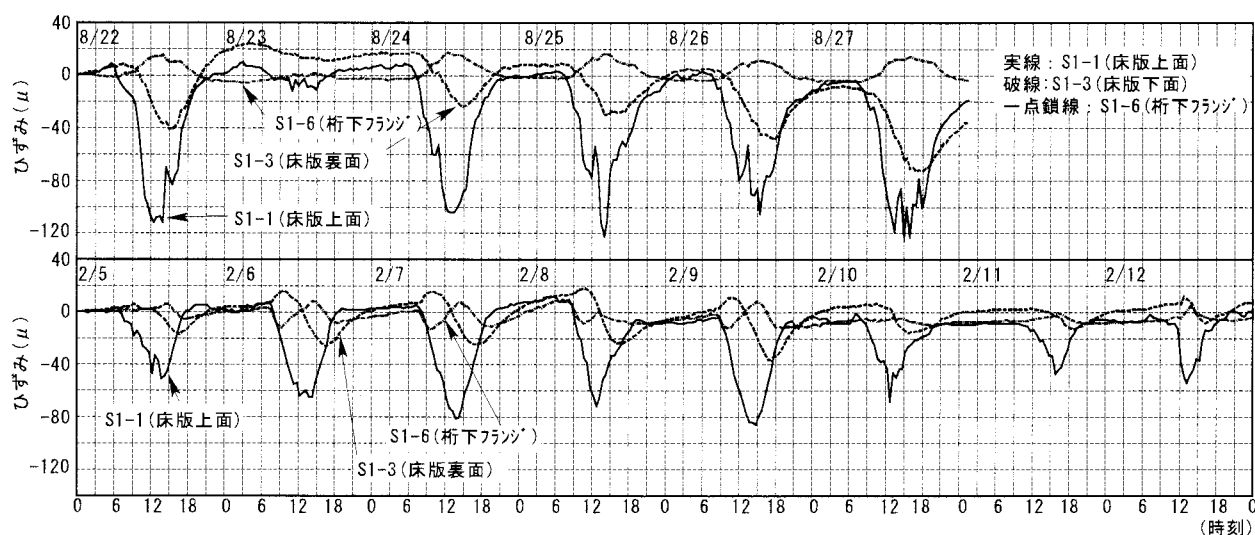
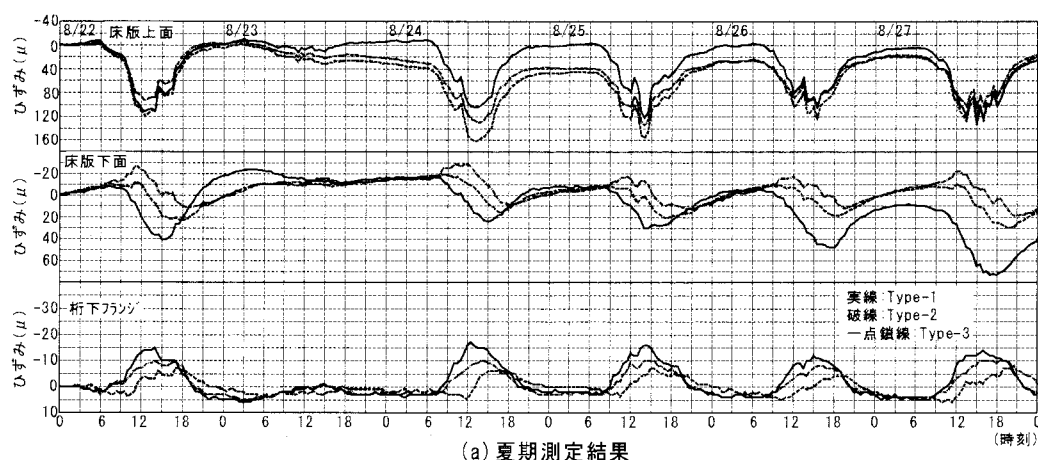
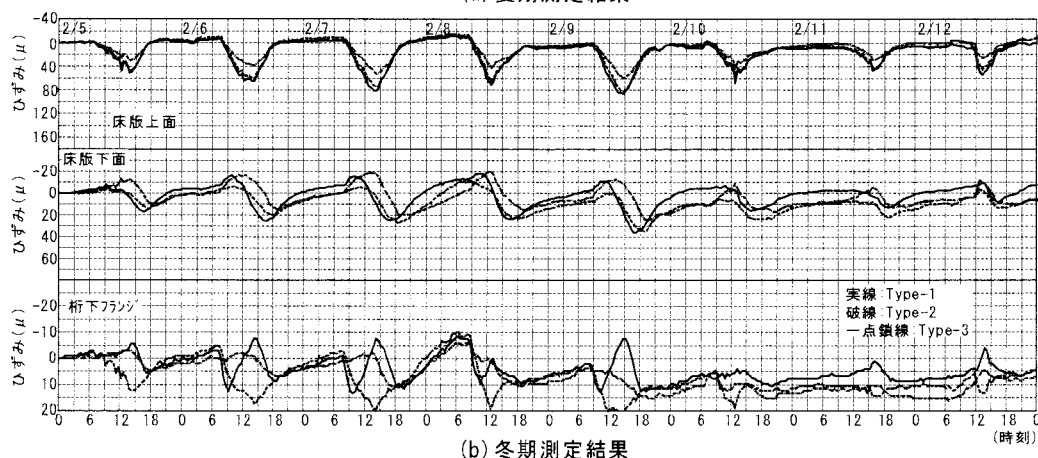


図-11 Type-1 ひずみの履歴



(a) 夏期測定結果



(b) 冬期測定結果

図-12 橋軸方向ひずみの測定値と解析値の比較 (Type-1 夏期)

図-13 からわかるように、解析モデルは、構造の対称性を考慮し、長手方向の長さを半分とした 1/2 モデルとした。境界条件として、長手方向の界面は断熱面とし、熱流束は図-4 に示す方法で与えた。ここで、日射量、気温は実測の値を用い、30 分間隔で解析を行った。

5.3 材料特性

解析に使用した各材料の材料特性を表-2 に示す。材料の吸収率、放射率は色、表面の状態などによって変化する

表-2 材料特性

	鋼材	コンクリート
密度 (kg/m ³)	7850	2500
比熱 (J/kgK)	460	1200
熱伝導率 (W/mK)	52	1.40
初期温度 (°C)	夏	24.15
	冬	3.0
放射率 (= 吸収率)	0.9	0.9
日射吸収率	0.9	0.7

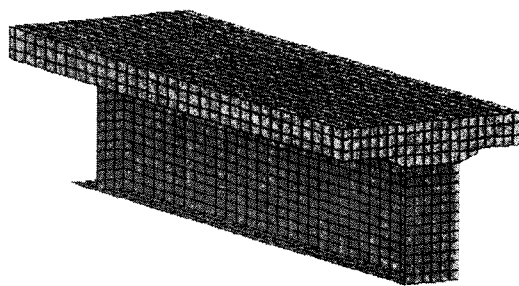
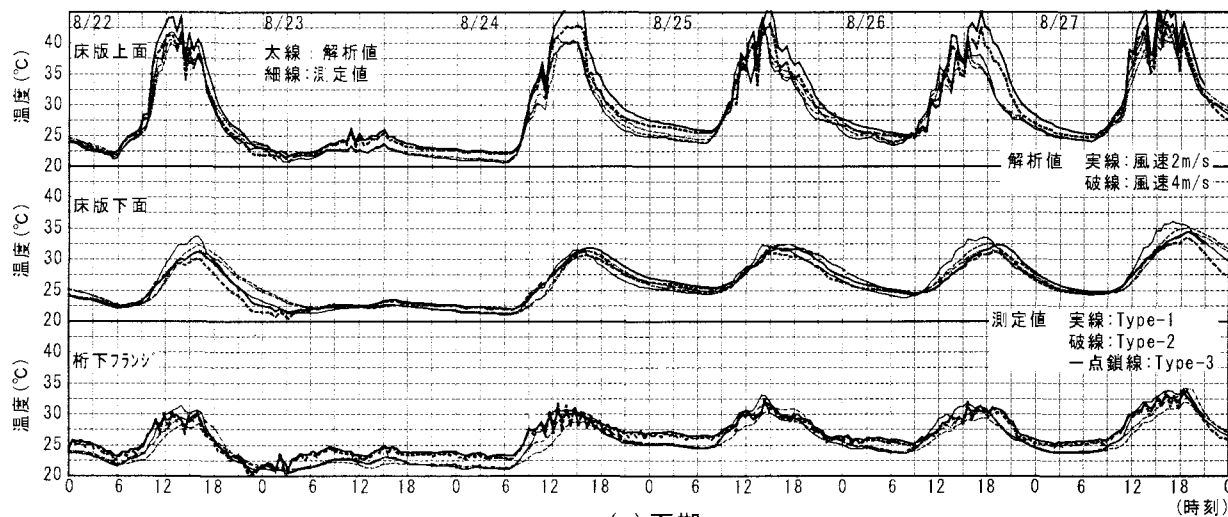


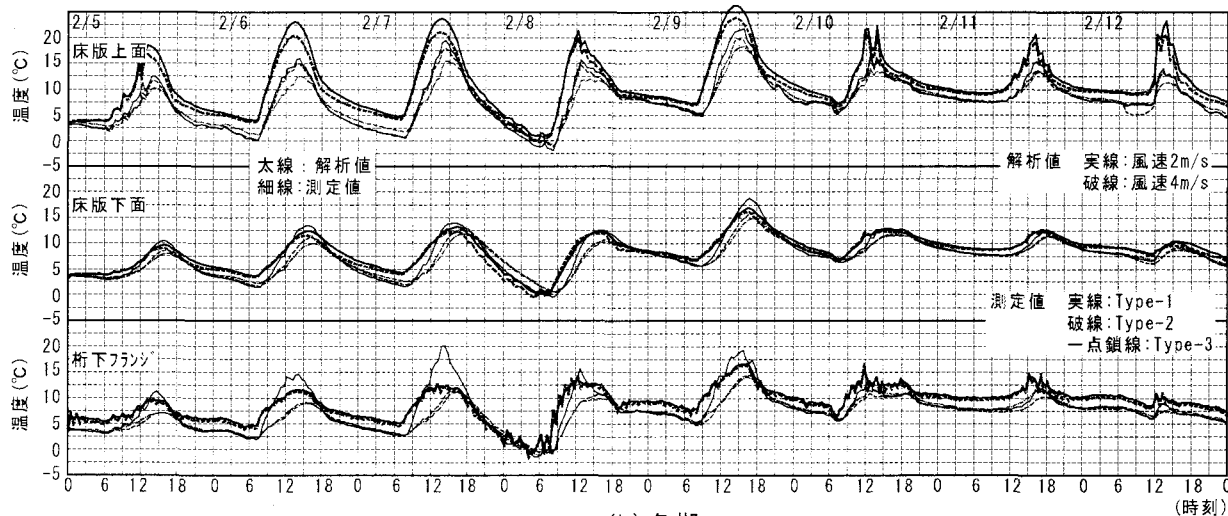
図-13 解析モデル

表-3 解析に使用した材料特性

鋼材	線膨張係数	1/°C	12E-06
	弾性係数	N/mm ²	2.05E+05
	ポアソン比		0.3
コンクリート	線膨張係数	1/°C	12E-06
	弾性係数	N/mm ²	2.45E+04
	ポアソン比		0.2



(a) 夏期



(b) 冬期

図-14 熱伝導解析結果と測定値との比較

ことが知られている。今回の試験で用いたコンクリートの表面には舗装などは施されておらず白色に近いため、建築の屋根材の評価で一般に用いられている数値¹¹⁾を用いることにし、日射吸収率を0.7、放射率を0.9とした。また、鋼材も今回特に塗装などは行わなかったが、表面は黒皮が残った状態であり、黒色に近い状態であると考え、放射率、日射吸収率ともに0.9とした。

5.4 風速の設定

式(11)からわかるように、対流による熱伝達、すなわち熱流束の設定には風速が大きく関係する。今回の測定では風速は測定しなかったため、風速をパラメータとして解析を行った。ちなみに、気象庁の観測データによると、試験体設置地点付近(千葉県木更津市)での風速は、8/22~8/27の間の平均風速が1.5m/s、最大風速が5.0m/s、2/5~2/12

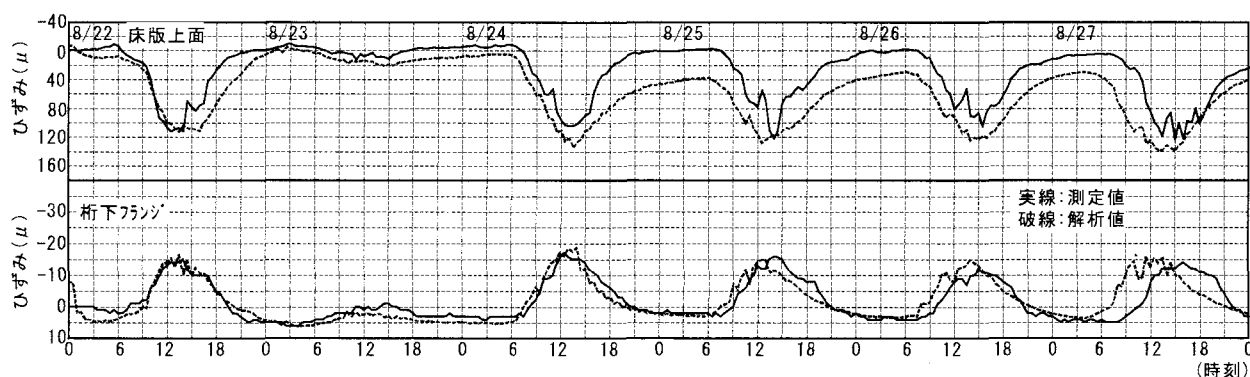


図-15 橋軸方向ひずみの測定値と解析値の比較 (Type-1 夏期)

の間の平均風速が 2.1m/s、最大風速が 7.0m/s であった。気象庁データの観測地点の地形は定かではないが、今回測定の対象とした試験体を設置した位置は海沿いの開けた地形であり、内陸部よりは一般に風が強いものと推察される。したがってここでは、風速の影響を考察するため、風速を 2m/s、4m/s の 2 種類として解析を行った。

5.5 温度の解析結果と測定結果の比較

熱伝導解析の結果と測定値との比較を図-14 に示す。ここでは、Type-1(RC 床版)、Type-2(I 形鋼格子床版)、Type-3(鋼板・コンクリート合成床版)の 3 タイプすべてについて解析を行った。しかしながら、その結果を比較すると、各タイプ間では床版下面(底鋼板)での 1℃以下の温度の相違しか見られず、その他の部位についてはほとんど差がなかった。したがってここでは、図を見やすくするため、Type-1 の解析結果のみ示した。

図-14 より、風速による影響は、温度の高くなる床版表面において顕著であり、その他の部位では大きな違いは見られない。これは、風速が影響する対流による熱伝達は、式(10)および式(11)からもわかるように桁表面の温度と気温との差に比例するため、風速が大きくなるほど、気温との温度差が大きくなる床版表面で熱の流出が大きくなるためである。したがって、風速が大きくなるほど、床版表面での最高温度が低下することになる。

また、解析結果と測定値とを比較すると、解析の方が若干高い温度で推移しているが、温度履歴の傾向は測定値をよく近似できていると考えられる。また、風速を変化させた解析の結果については、風速 4m/s の方が測定値に近い結果が得られた。また、冬期における下フランジの温度履歴については、解析値は Type-2, 3 に近い傾向を示した。これは何度か述べているように、Type-1 では日射の影響を受けて下フランジの温度が高くなっているのに対し、解析では下フランジに日射を入力していないためである。このため、解析値は日射の当たらない Type-2, 3 と同じ傾向を示したものと考えられる。

以上より、側面からの日射の影響について検討する余地はあるものの、夏冬ともに解析結果は測定結果を 2~3℃

程度の誤差で比較的精度よく再現できていることから、本研究で提案した熱伝導解析によって、季節を問わず日射などの周辺環境の影響を考慮した橋梁内部の温度分布をシミュレートすることが可能であるといえる。

6. 熱応力解析

熱伝導解析結果を受け、熱応力解析を行った。メッシュ分割は図-13 と同じとし、線形弾性解析を行った。試験体の支持条件は一端を単純支持し、対称面は幾何学的対称の境界条件を与えた。解析に使用した材料特性を表-3 に示す。材料の線膨張係数は、道路橋示方書⁴⁾にしたがい、鋼桁、コンクリート床版共に $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。

解析は、構造モデルの単純さから Type-1 を対象とした。また、冬期は側面からの日射の影響が大きいことから、この影響の比較的小さい夏期のみを対象として解析した。解析の結果得られたひずみ履歴を測定値と比較して図-15 に示す。

図-15 より、床版上面のひずみにおいて解析値が測定値を若干上回ったが、解析値と測定値は比較的よく一致しているといえる。また、桁下フランジのひずみは測定値によく一致しており、解析による応力のシミュレーションも可能であることが確認できた。

7. まとめ

本研究では、合成桁の温度分布に及ぼす周辺環境の影響、ならびに床版形式の違いによる温度分布の違いを確認するため、床版と鋼桁とを合成した試験桁を作成して野外に設置し、温度、ならびに周辺環境の測定を行った。また、得られた結果を定量化するため、FEM を用いたシミュレーション解析を行った。検討の結果、得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 水平面に入射する日射量の測定値は、理論的な値とよく一致することが確認できた。水平面に入射する日射量には太陽高度が大きく関係するため、太陽高度の大き

い夏期の方が冬期よりも日射強度は大きかった。また、大気透過率 P については、今回の測定結果から推定するとおよそ、夏期は 0.7、冬期は 0.9 であり、季節的な変動が大きいことが確認できた。

- 2) 本研究では、橋梁内部の温度分布を評価する熱伝導解析の方法として、周辺環境の変化を熱流束として与える方法を提案し、日射、気温、風速などをパラメータとする熱流束の理論的な評価法を示した。提示した熱流束の評価法の妥当性を検証するため、試験体の熱流束を測定した結果、橋梁側面に入射する日射量の評価が必要ではあるが、提案した熱流束の評価方法がほぼ妥当であることを確認した。
- 3) 床版形式の違いによる合成桁の温度分布の違いを観察するため、RC 床版、I 形鋼格子床版、鋼板・コンクリート合成床版の 3 種類の床版を有する合成桁について測定を行い、観察を行った。しかしながら、温度分布には試験体間で有意な差が見られず、床版形式の違いによる温度分布の差は観察されなかった。
- 4) 橋梁内部の温度分布は、日射が直接入射する床版表面が最も大きく、この部分のひずみが最も大きくなった。一方で、鋼桁の温度分布は、日射が入射しない面については気温にほぼ追従することが確認できた。また、南側に面した桁では側面からの日射の影響があるが、とくに冬期は太陽高度が低いため、側面から入射する日射の影響が大きくなる。
- 5) 測定結果を定量化し、環境因子のパラメトリックな検討を可能にするため、熱伝導解析、ならびに熱応力解析を行い、測定結果との比較を行った。解析の結果、熱伝導解析による温度分布の解析結果は測定結果と同じ傾向を示した。また、熱伝導解析により得られた温度分布を用いて行った温度応力解析の結果も測定値と傾向が一致した。このことから、熱伝導解析、熱応力解析を用いることで、合成桁の温度分布、ならびに熱応力の推定が可能であることがわかった。

以上のような検討の結果、各種の床版を有する鋼桁の温度分布がシミュレーションできることがわかったので、橋梁の設置位置(緯度、経度)を決め、冬期、ならびに夏期の気温変化、風速を統計データなどから設定すれば、橋梁表面の温度分布、ならびに温度変化による変形をシミュレー

ションすることができる。今回の検討では、試験桁のみを対象として検討を行ったが、実際の橋梁スケールや構造形式(2 主桁、多主桁、複合ラーメン形式等)によって温度応力の影響度は異なることが予想される。これらの検証は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 例えば、高速道路技術センター：PC 床版鋼連続合成 2 主桁橋の設計・施工マニュアル、平成 14 年 3 月。
- 2) 八部順一：我国における合成床版の開発・適用状況について、第 4 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、土木学会鋼構造委員会、pp. 35-44, 2001. 8
- 3) 道下泰博、本間宏二、平田尚、櫻井信彰、渡部弘明、藤川敬人：インテグラル複合ラーメン橋(西浜陸橋)の設計と施工、橋梁と基礎、Vol. 35, No. 2, pp11-18, 2001. 2.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、2002. 3.
- 5) 高木優任、横山功一、原田隆郎：外部環境の変化がインテグラル複合ラーメン橋の挙動に及ぼす影響に関する検討、鋼構造論文集、Vol. 10, No. 38, pp. 69-79, 2003. 6.
- 6) 藤井康盛、高木優任：I 形鋼格子床版の階段状荷重漸増載荷による輪荷重走行疲労試験、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集、共通セッション(CS)、pp. 334-335, 1999. 9.
- 7) 森忠彦、藤井康盛、松井繁之、大西弘志：H 形鋼ジベルを用いた鋼板・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験、土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集、共通セッション(CS)、pp. 532-533, 2000. 9.
- 8) 二村忠元、小木曾定彰、小島武男、前田敏男、勝田高司、日置隆一：改訂増補 建築学大系 8 音・光・熱・空気・色、彰国社、1969.
- 9) 横山功一、原田隆郎、土屋嘉則：周辺温度環境の変化がインテグラルアバットメント橋に及ぼす影響に対する検討、茨城大学工学部研究集報第 48 巻、pp. 77-86, 2001.
- 10) MSC Software Corp. : MARC2001 ユーザーズマニュアル、2001.
- 11) 宮野秋彦：屋根の断熱設計、屋根叢書 2、アメックス協販、

(2003 年 9 月 12 日受付)