

温度日変動に伴う既設合成鋼鉄桁橋の実挙動の検討について

On examination of real behavior of the existing steel composite girder bridge according to change on day of temperature.

○山村 浩一* 岩崎 正二** 出戸 秀明***
Koichi YAMAMURA Shoji IWASAKI Hideaki DETO

ABSTRACT The temperature change is a load that acts frequently to the composite girder bridge, and when the influence is large, it becomes a factor to control the load-carrying capacity of the bridge like the live-load.

In the present study to understand real behavior of the composite girder bridge according to the day change of temperature, the temperature, the strain, and the displacement of each part of a bridge were continuously measured for 20 days. This paper takes up the result in a typical fine day within 20 days and clarifies the true behavior of the composite girder bridge according to the temperature change by examining the relations between the material temperature and the main girder strain etc.

Keywords：連続計測，温度ひずみ，支承変位，既設合成桁橋
continuous measurement, thermal strains, displacement at bearing point,
existing steel composite girder bridge

1. まえがき

合成桁橋を变形させる常時の外力として活荷重と温度変化がある。合成桁の設計では、温度変化の影響として床版コンクリートと鋼桁との温度差（標準 10℃）を考慮することになっている。床版コンクリートと鋼桁のずれようとする力を鋼桁の上フランジに配置されているスタッドジベルが拘束するため合成桁には温度応力が生じる。この温度応力と活荷重応力をスパン中央の主桁下フランジで比較すると、両者の比率は 10% 程度になることが多く、設計上は、温度変化が合成桁に及ぼす影響は小さいと言える。

一方、温度変化に関する論文では¹⁾ 温度差による主桁の変形が活荷重による変形に比べ大きくなることが述べられている。特に既設橋梁における温度変化の影響は、環境の変化や劣化の進行などによって架設当時に比べかなり大きくなっている可能性がある。著者らが実施した BP-A 支承を用

いた既設合成桁橋（全 7 橋）の実橋載荷試験の結果²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾では、支承の水平移動機能が不十分なため、主桁下フランジのひずみ分布は、両端固定桁で生じるひずみ分布になることを確認している。また、BP-A 支承の移動機能に関する過去の研究⁶⁾では、約 20 年間使用した支承を取替えた際の活荷重挙動について報告している。それによると、可動支承の水平移動量は取替え前が解析値の約 46%、取替え後においても解析値の約 55% であり、支承を取替えても水平移動機能はさほど改善しないようである。

これらを考え合わせると、BP-A 支承を用いた合成桁橋は、活荷重だけではなく温度変化に対しても両端固定桁に近い状態で挙動している可能性がある。そして、これが実際であるとするならば、BP-A 支承を用いた合成桁橋の耐荷力評価や補強設計を行う際は、実挙動を考慮した検討も必要になるとと思われる。

* 東邦技術株式会社 道路部（〒014-0041 秋田県大仙市大曲丸子町 2-13）

** 博士（工学）岩手大学工学部社会環境工学科教授（〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5）第 2 種正会員

*** 博士（工学）岩手大学工学部社会環境工学科教授（〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5）

温度変化は合成桁に対して頻繁に作用する荷重であり、支承機能が低下しその影響が大きくなる場合には、活荷重と同じように合成桁の耐荷性を左右する要因になる。しかしながら、温度変化によって合成桁がどのように挙動し、また、合成桁のどの部分にどの程度の応力を発生させているかについては必ずしも明らかになっていない。

そこで、本研究では、合成桁橋の温度日変動に伴う実挙動を把握するため、合成桁各部の温度、ひずみ、変位を20日間に渡り連続計測した。本論文は、20日間のうちの代表的な晴れ日の結果を取上げて、部材温度と主桁ひずみ、あるいは、支承変位と主桁ひずみ等の関係を示すことにより温度変化による合成桁の実挙動を明らかにする。また、温度変化の影響度を捉えるために、主桁各部の温度ひずみの計測値と設計で考慮している温度ひずみ、活荷重ひずみを対比する。加えて、主桁の温度差と橋脚の変位量から温度軸力を試算し、その結果に基づき可動支承の水平移動機能等について検討する。

2. 対象橋梁および計測方法

2.1 対象橋梁

対象橋梁は、昭和57年に架設された支間長27.75mの2径間単純合成桁橋である。支承形式はBP-A支承で、設計荷重はL-14（二等橋）である。図-1に対象橋梁の一般図を示す。目視調査の結果、G3桁の沓座モルタルにひび割れや破損が見られたが、このほかに目立った損傷は認められなかった。

対象橋梁の日照環境は、図-1に示すようにG3桁が7時30分～11時30分まで日射を受け、橋面は7時30分～17時まで日射を受ける（9月9日の日照環境）。また、対象橋梁は交通量が極めて少なく、大型車両が通行することはほとんどない。

2.2 計測方法

計測は2010年8月26日から9月14日までの20日間実施し、温度、ひずみ、変位を1分間隔で連続計測した。表-1に今回使用した計測機器の主な仕様と性能を示す。計測されたデータ値は、データロガーにセットしたフラッシュメモリーカードにCSV形式で保存し、それを2～3日おきに回収した。なお、データロガーの電源には、仮設電気

を使用している。計測対象桁は、図-1に示す第2径間のG2桁とG3桁である。

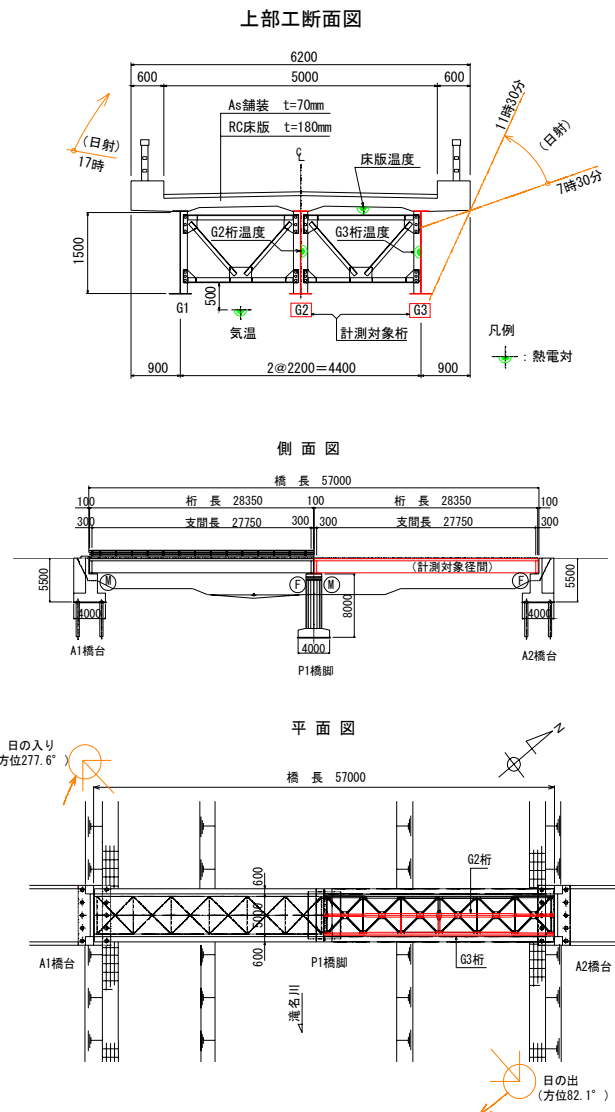


図-1 対象橋梁一般図

表-1 計測機器

機 器 名 称	仕 様	性 能
データロガー	30チャンネル	ひずみ: $\pm 1 \times 10^{-6}$ 熱電対温度: 0.1°C
データロガー	10チャンネル	
スイッチボックス	50チャンネル	
ひずみゲージ	防水型 ゲージ長6mm	1ゲージ3線式 自己温度補償ゲージ
変 位 計	容量 10mm, 25mm, 50mm	0.001mm

図-2 はひずみゲージ、変位計および熱電対の設置位置を示したものである。

ひずみゲージは主桁 1 本あたり 30 点設置し、日射を受ける G3 桁のひずみゲージは、全て日陰側（G2 桁側）に取付けた。ひずみの温度補正に関しては、1 ゲージ 3 線式の自己温度補償ゲージを使用するとともに、データロガーで温度変化に伴う熱出力を自動補正する方法を用いている。

熱電対は、スパン中央付近の G2, G3 桁のウェブと床版下面にそれぞれ 1 箇所設置し、外気の影響を受けないように断熱シートで被覆した。気温測定用の熱電対は、桁下 0.5m の位置に取付けた。この位置は、気象観測における気温の測定方法（地上 1.2～1.5m で風通しがよく直射日光が当たらない）に適合するものであり、計測された気温は対象橋梁近傍のアメダスの観測記録とほぼ一致することを確認している。

変位計は、各桁に 6 箇所、橋脚天端に 1 箇所設置した。主桁のスパン中央と橋脚の変位計は、写真-1, 2 に示すように地盤にしっかりと固定した支柱にマグネットスタンドを取付けて変位計をセットした。また、支承部の変位計は写真-3 に示すような鋼製の架台を橋脚天端にアンカーボルトで固定し、それにマグネットスタンドを取付けて変位計をセットした。G3 桁支承部の変位計は、風雨や直射日光が当たらないように木板で覆いをしたほか、変位計に伸縮装置からの雨水が滴下しないように伸縮装置の下面に雨どいを設置した。また、橋脚上の主桁に設置されていた耐震連結板は、主桁の挙動を拘束する可能性があったため仮撤去した。



写真-1

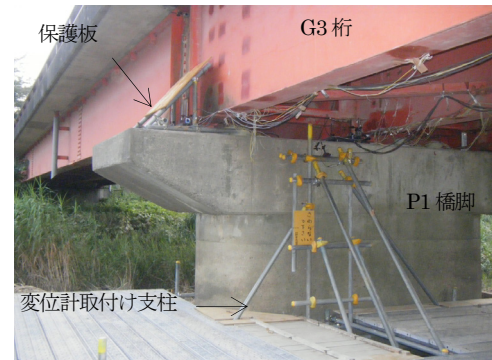


写真-2



写真-3

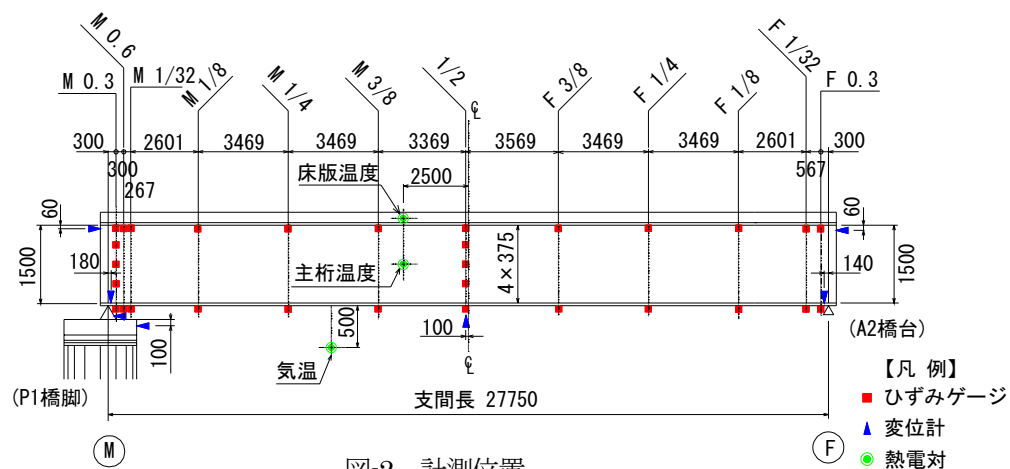


図-2 計測位置

3. 計測結果と考察

計測期間中の晴天日、曇天日、雨天日の計測結果はそれぞれがほぼ同じ傾向になっている。ここでは、合成桁の温度挙動が大きくなる晴天日の計測結果に着目することとする。計測期間 20 日のうち晴天日は 15 日で、そのうち代表的な 9 月 9 日 0 時～9 月 10 日 8 時の計測結果を取り上げて考察する。

3.1 気温および部材温度

図-3 は気温と部材温度の変動を示したものである。図中の基準点（9 月 9 日 7 時 30 分）は G2 桁と G3 桁の温度がともに 20℃に達した時刻であり、本文で示すひずみや変位の値はこの時刻の計測値をゼロとして示している。

常時日陰にある G2 桁の温度は、8 時～15 時の時間帯は気温とほぼ同じ温度で上昇し、その後は、気温より 3℃～4℃高く、G3 桁の温度よりは約 2℃高い状態を保ちながら降下する。

G3 桁は 7 時 30 分～11 時 30 分頃まで日射を受ける。この時間帯における G3 桁の温度変動は、7 時 30 分～9 時の間に 9℃上昇し、その 1 時間後には 3℃降下して、再び緩やかに上昇する。温度の急上昇は日射の影響によるものであるが、その後の温度降下については、次のように考える。

図-4 に示すように G3 桁外面は 7 時 30 分頃から日射を受けて、太陽高度が高くなるにつれて床版の張出し部が庇となり日射の範囲が徐々に減少する。G3 桁の温度が降下を始めた 9 時頃には日陰が熱電対の位置まで達する。日射を受けて高温となっていた熱電対周辺の鋼板の温度が、日射が遮られたことによって急降下したものと考えられる。さらに、9 時～10 時の時間帯は、床版の温度が G3 桁より 6℃低い状態にある。G3 桁の熱が床版へ移動するいわゆる熱移動現象も生じていたものと思われる。

床版の温度は、7 時～15 時を除いて主桁より約 10℃高い状態を保ちながら変動し、最低・最高温度に達する時間は主桁のそれより 4 時間ほど遅くなる。このような傾向を示すのは、床版の熱伝導率が主桁の熱伝導率の約 1/30 と小さいことによるものであろう。

以上のような気温と部材の温度変動は、計測期間の晴れ日に共通して見られた特徴である。なお、9 月 9 日 0 時～9 月 10 日 8 時の気温および部材の最大温度差は、気温 12.1℃、G2 桁 9.5℃、G3 桁

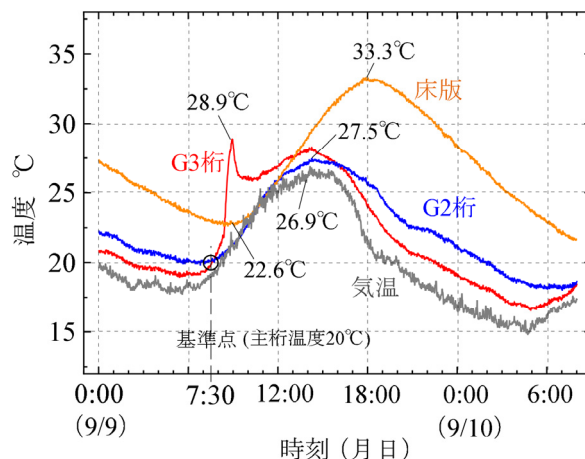


図-3 気温と部材温度

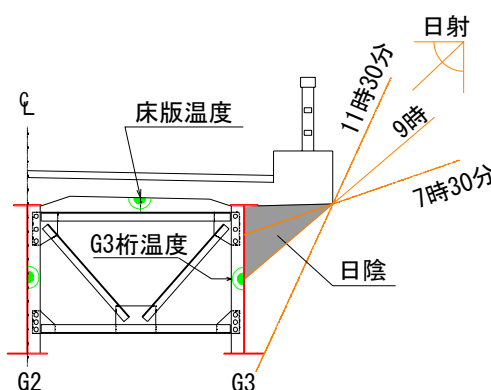


図-4 G3 桁の日射範囲

12.4℃、床版 11.7℃であった。

3.2 主桁の温度ひずみ

図-5、図-6 は主桁温度が大きく変化する時間を選定し、その時間における主桁下フランジのひずみ分布を示したものである。選定した時間は、8 時 53 分、10 時、11 時、14 時、16 時、23 時および 6 時（10 日）である。

図-5 および図-6 を見ると、主桁の温度が上昇し基準点温度より高くなると下フランジには圧縮ひずみが生じ、特に支点部付近のひずみが著しく増加する。ひずみの分布は不規則で、変動も大きい。

主桁が拘束されていなければ、下フランジのひずみ分布は床版と鋼桁の温度差によって生じる断面内ひずみが下フランジにほぼ一様に分布するはずである。G2 桁と G3 桁のひずみ分布が不規則なのは、主桁が拘束されていることが原因であると考えられる。

主桁の温度が高い状態では、ひずみ分布の偏り

も見られる。G2 桁ではスパン中央から可動支点側のひずみが固定支点側に比べ大きくなり、G3 桁ではその逆である。このようなひずみ分布になるのは、可動支承の水平移動機能が低下しているためと考えられる。経年劣化等により BP-A 支承の摩擦係数が増加して、主桁の伸縮を拘束しているものと思われる。既設支承の摩擦係数の増加は個々の支承で異なるはずであるから、この摩擦係数の違い（拘束力の違い）がひずみ分布の偏りの要因であると考えられる。

ひずみの分布図には、ひずみがほとんど変化しない特異点が見られる。G2 桁では M1/32 点と 1/2 点、G3 桁では M1/4 点である。G2M1/32 点は、以前実施した実橋載荷試験でも同様の傾向が見られ、検討したが⁷⁾、原因は明らかになっていない。

図-7 は支点付近と 1/2 点のひずみの変動を示したものである。主桁の温度は 15 時頃まで上昇するが、主桁のひずみは 11 時から減している。温度とひずみは必ずしも関連しないようである。11 時頃に 20μ 程度の突出した圧縮ひずみが計測されている。同時刻に支承、橋脚でも突出した変位が計測されている。ひずみや変位の図を見ると突出した波形の前後では、ひずみや変位に変化が見られないことや圧縮ひずみが計測されたことから考え、床版と桁の温度差によって上部工が上方へ変位した際のひずみや変位が計測されたものと思われる。

図-8、図-9 は、それぞれ G2 桁、G3 桁の上フランジのひずみ分布を示したものである。G2 桁では、温度とひずみは関連し、同程度の大きさのひずみがほぼ一様に分布している。上フランジは、下フランジに比べて主桁の拘束の影響が小さい可能性がある。

拘束の影響を確認するために、M0.6 点の 16 時における床版と鋼桁の温度差によって生じるひずみを求めた。その結果、ひずみの計算値は 46μ 、計測値は 53μ で、その差はわずかである。G2 桁上フランジには、ほぼ設計どおりのひずみが生じていると考えられる。

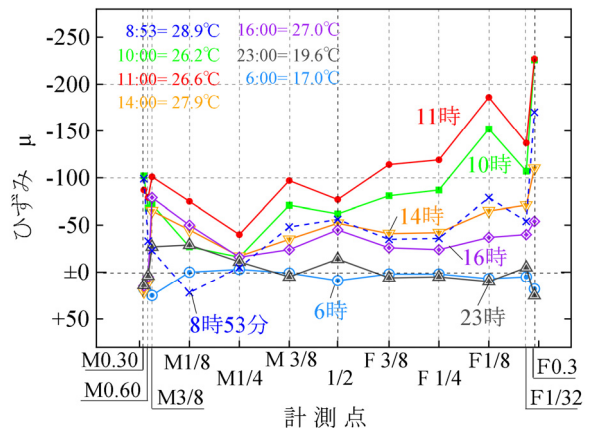


図-6 G3 桁下フランジのひずみ分布

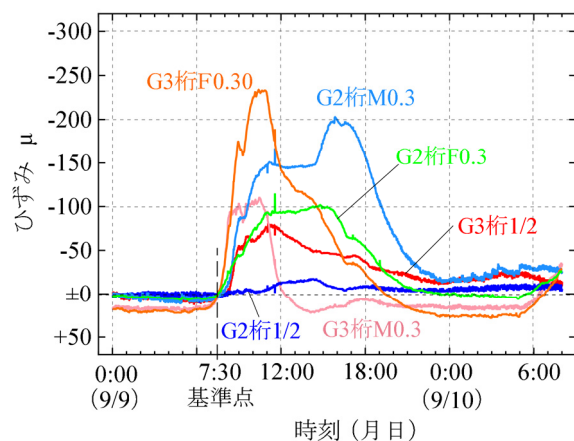


図-7 下フランジのひずみ変動

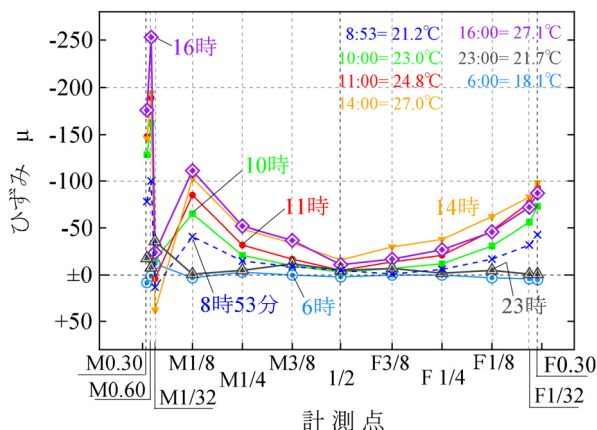


図-5 G2 桁下フランジのひずみ分布

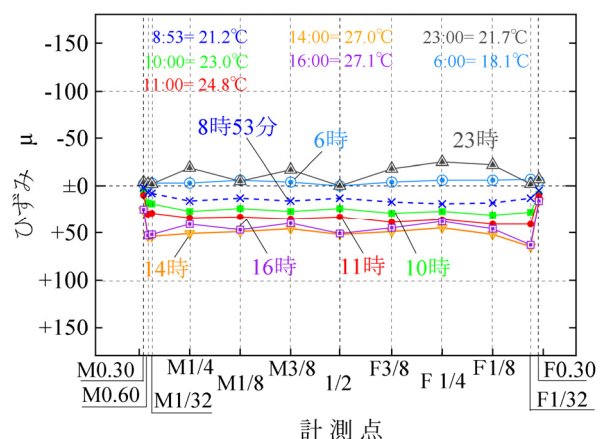


図-8 G2 桁上フランジのひずみ分布

図-9 は、G3 桁上フランジのひずみ分布である。日中の温度差が約 3℃と小さいため、ひずみの変動は少ない。1/2 点を除くと、温度とひずみは相関している。G3 桁下フランジが約 3℃の温度差で大きなひずみ変動を示すのに対し、上フランジのひずみは安定している。上フランジが床版と一体となって挙動していることがその要因であると思われる。

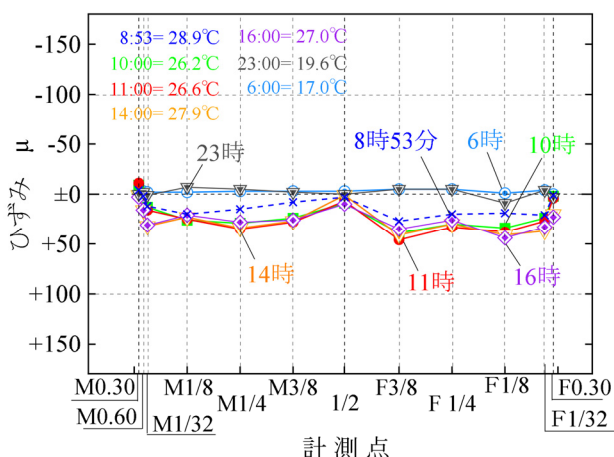


図-9 G3 桁上フランジのひずみ分布

3.3 支承および橋脚の水平変位

図-10、図-11 は、支承および橋脚の水平変位を示したもので、図-10 は温度、図-11 は下フランジ F0.3 点のひずみを重ね合わせたものである。変位は全て地盤を不動点とした値である。また、変位計の接触子は上査に当てている。上査は主桁下フランジとボルトで連結されているため、ここで示す支承の変位は主桁の変位と同じである。

G3 桁の温度が急上昇する 7 時 30 分～10 時の支承の変位は、主桁が伸びる方向に合わせて正常に変位しているようである。しかし、10 時～14 時の温度上昇時は、主桁伸びる方向とは逆の方向へ変位している。この状態では、主桁の拘束力が大きくなり、下フランジの圧縮ひずみが増加するはずである。ところが、図-11 を見ると 10 時以降のひずみは急激に減少している。そこで橋脚天端の変位に着目すると 7 時 30 分～10 時は主桁の伸びとは逆の方向へ変位し、10 時以降は主桁が伸びる方向へ変位している。10 時以降の主桁のひずみが減少したのは、橋脚の変位によって主桁の拘束力が軽

減されたものと思われる。

橋脚が変位する方向は、計測径間の主桁の伸縮方向と相反していることから、橋脚は他径間主桁の温度変形の影響を受けて変位しているものと思われる。

支承では、特徴的な変位も見られる。23 時～6 時の支承変位が階段状になっている。主桁の温度が基準点温度を下回ってさらに降下するような状態では、主桁の温度軸力が増加して、それが可動支承の摩擦力を上回ると支承が滑り、また静止する「付着－滑り」を繰り返しているようである。

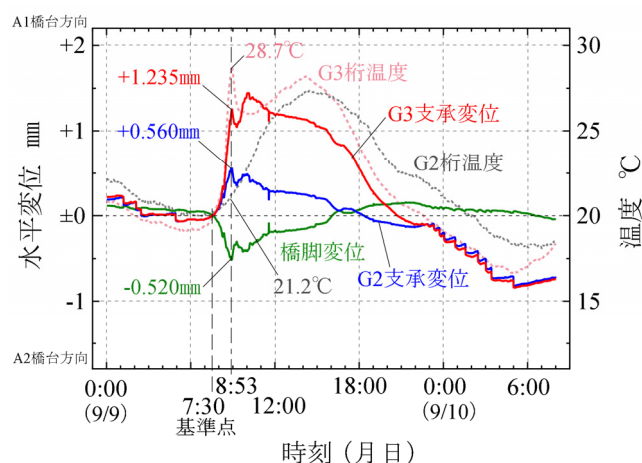


図-10 支承および橋脚の水平変位
(主桁温度との重ね合わせ)

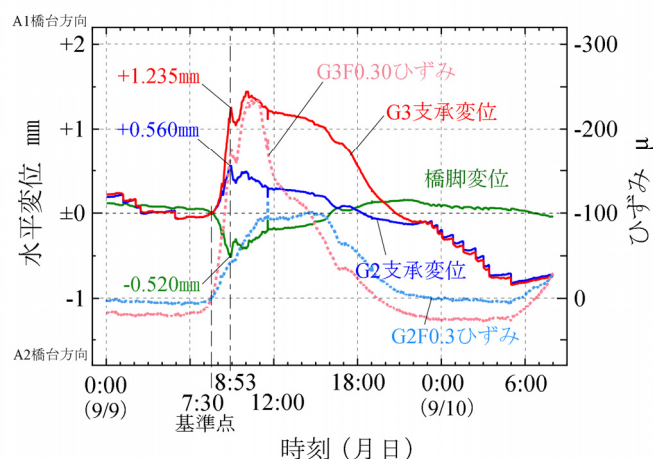


図-11 支承および橋脚の水平変位
(ひずみとの重ね合わせ)

4.1 温度ひずみ

1/2 点の計測値は、設計で考慮している温度ひずみに比べ小さいため、スパン中央付近の主桁については温度の影響は小さい。M0.6 点、M1/32 点の計測ひずみは、活荷重ひずみよりも大きく、設計で考慮している温度ひずみの約 3~7 倍に達する。支承付近の主桁は温度の影響が大きくなるため、注意が必要である。

支承機能が低下している合成桁では、主桁に温度軸力が生じる。温度軸力は支承の拘束状態によっては、下部工を変形させるような大きな荷重になる。ここでは、主桁の温度と橋脚天端の変位の計測結果を基に、対象橋梁で生じた温度軸力を試算し、その影響度を捉えることとする。試算条件は以下のとおりである。

- ①各主桁の温度条件は、主桁の温度が急上昇した7時30分の温度と8時53分の温度の差とし、温度を測定していないG1桁の温度はG2桁と同じ値とする (G1, G2 : $+1.1^{\circ}\text{C}$, G3: $+8.8^{\circ}\text{C}$).
- ②橋脚天端の変位量は7時30分と8時53分の差とする (0.52 mm).
- ③解析モデルは図-12に示す3次元フレームモデルを用いる. 主桁のフレームモデルは、鋼桁と床版コンクリートのヤング係数比を7とし、床版と鋼桁の合成断面でモデル化する.
- ④支承は水平移動しないものと仮定し、主桁と橋脚梁の結合条件はピンとする.

⑦簡易モデルであるため、他径間の影響や床版コンクリートと鋼桁の温度差による影響は考慮できない。これらの影響は基礎バネのトライアル値に含まれるものと仮定する。

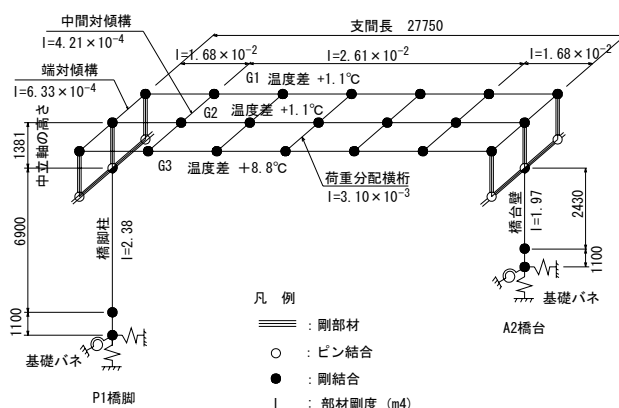


図-12 解析モデル

下部工名		橋 台	橋 脚
項 目			
鉛 直 バ ネ ×1.0E+6 kN/m	初期設定値	4.16	3.17
	解析入力値	54.08	41.21
水 平 バ ネ ×1.0E+6 kN/m	初期設定値	1.26	1.06
	解析入力値	16.38	13.78
回 転 バ ネ ×1.0E+6 kNm/rad	初期設定値	9.93	4.23
	解析入力値	129.09	54.99
地盤N値（初期設定）		N=10（杭頭～3m） N=50（3m以深）	N=50

計測点		M0.6	M1/32	M1/8	1/2
項目					
設計ひずみ μ	活荷重 L-14	47	67	155	248
	温度差 10°C	±37	±37	±37	±24
計測ひずみ μ	温度差 9.5°C	-260	-106	-116	18

温度荷重の解析結果を表-3 に示す。

橋脚天端に作用する水平力は 138kNで、この値はレベルⅠ地震動による水平力 318kNの 43%に相当する。地震時の許容応力度の割増し $\alpha=1.5$ を考慮すると温度変化による水平力は地震時水平力の 65%である。今回試算した温度変化による水平力は、多く見積もっても橋脚耐力の 65%程度であると考えられるので、橋脚に及ぼす温度変化の影響は、比較的少ないものと思われる。

現状の可動支承の摩擦係数を検討したところ、 $\mu=0.77$ であった。摩擦係数 $\mu=0.77$ は、無潤滑な状態の鋼と鋼の摩擦係数 $\mu=0.8$ に近い値である。設計上のBP-A 支承の摩擦係数は $\mu=0.15^{8)}$ なので、対象橋梁の支承の水平移動機能は、かなり低下しているものと思われる。

5. まとめ

- ・温度日変動に伴う橋梁各部のひずみや変位を連続計測することにより、主桁ひずみ、支承変位、橋脚変位および温度変化との関係を示すことができた。
- ・温度変化による主桁ひずみは、設計で考慮している温度ひずみの約3～7倍に達し、主桁の位置によっては、活荷重ひずみより大きくなる。
- ・支承機能低下による主桁の拘束力は、可動支承の移動のほかに、橋脚の柱が変形することによって軽減されているようである。
- ・対象橋梁に作用する温度荷重は橋脚を変形させるほど大きいですが、検討の結果、橋脚に及ぼす温度変化の影響は、比較的少ないものと考えられる。
- ・対象橋梁の可動支承の摩擦係数は現状で $\mu=0.77$ 程度であり、支承の水平移動機能はかなり低下しているものと思われる。

【参考文献】

- 1) 出野麻由子, 三木千壽: 温度変形を利用した橋梁の健全度評価モニタリングにおける可能性の検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 2001. 10
- 2) 社団法人岩手県土木技術センター: 道路設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響(第 1 回共同研究報告書), 1999. 6
- 3) 社団法人岩手県土木技術センター: 道路設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響(第 2 回共同研究報告書), 2000. 6
- 4) 社団法人岩手県土木技術センター: 道路設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響(第 5 回共同研究報告書), 2005. 6
- 5) 山村浩一, 岩崎正二, 出戸秀明, 五郎丸英博, 田中正徳: 既設 2 連鋼鉄桁橋の静的および動的特性に及ぼす下部工の影響について, 土木学会構造工学論文集, Vol. 54A, 2008. 3
- 6) 徳田浩一, 岩崎雅紀: 支承の活荷重挙動に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol. 41A, 1995. 3
- 7) 田中正徳, 山村浩一, 岩崎正二, 出戸秀明, 佐々木一馬: 既設鋼鉄桁橋の桁端部ソールプレート近傍のひずみ挙動, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2008. 3
- 8) 社団法人日本道路協会: 道路橋支承便覧, pp. 54. 1991. 7

表-3 温度荷重の解析値

項 目 \ 検討位置	G1 可動支承	G2 可動支承	G3 可動支承	橋 脚
① 温度水平力 kN	46.3	-144.3	235.9	137.9
② 温度鉛直力 kN	17.3	-45.4	27.6	-0.5
③ 死荷重反力 kN	281.6	231.9	281.6	795.1
支承摩擦係数 ① / (② + ③)	0.15	0.77	0.76	-