

第二東名上伊太第一橋下り線工事における FBG光ファイバセンシングによるPC上部工の計測管理

Measurement Control of Prestressed Concrete Bridge Construction Using FBG Optical Fiber Sensing at the Kamiita First Bridge on the Second Tomei Expressway

本山 寛^{*1} 小林 薫^{*2} 松元 和伸^{*3} 塩谷 智基^{*1}
Hiroshi Motoyama Kaoru Kobayashi Kazumobu Matsumoto Tomoki Shiotani
熊谷 幸樹^{*1} 田村 琢之^{*1} 梶田 茂世^{*4} 石塚 健一^{*5}
Koki Kumagai Takuyuki Tamura Shigeyo kajita Kenichi Ishizuka

【要旨】

第二東名上伊太第一高架橋（PC 上部工）下り線工事は、その工事区間内において構造形式の異なる第一高架橋、第二高架橋からなる。第二高架橋は、上部工と下部工が剛結される PC2 径間連続ポータルラーメン箱桁橋（橋長 83m）であるが、下部工の施工が先行して約 3 年前に完了しており、上部工との材齢差が大きいいため、そのまま剛結をすると上部工のクリープおよび乾燥収縮変形により構造上の安全性と耐久性の観点から問題となるひび割れが生じる可能性があった。そのため、橋台手前まで主桁を施工したところで、所定の収縮変形量が確認された後剛結する対策を実施した。これを実施するにあたり、FBG 光ファイバセンサ等を用いて所定の収縮変形量を確認した後下部工との剛結を行う中で、計測管理を行い、下部工にひび割れの発生もなく、無事工事を完了することができた。

【キーワード】 光ファイバセンシング FBG ポータルラーメン橋 乾燥収縮 クリープ

1. はじめに

本工事は、第二東名高速道路の静岡県島田市上伊太地区における工事区間約 240m であり、PC3 径間連続ラーメン箱桁橋の上伊太第一高架橋と、PC2 径間連続ポータルラーメン箱桁橋の上伊太第二高架橋からなる。

このうち、上伊太第二高架橋では、下部工の施工が先行して完了していることから上部工と下部工の材齢差が大きくなり、プレストレスによる主桁の弾性変形に加え、そのまま剛結すると上部工のクリープおよび乾燥収縮変形により構造上の安全性と耐久性の観点から問題となるひび割れが生じる可能性があった。そのため、上記の下部工への有害な影響を解消するために複数の対策を実施するとともに、クリープおよび乾燥収縮による主桁の収縮変形量とその進行を計測管理することとなった。ここでは、TDM（時間分割多重化）方式の FBG ケーブルセンサを用いた主桁の変形量および区間ひずみの計測により、収縮変形に関して実施した計測管理方法とその計測結果について報告する。

2. 工事概要

工事名：第二東名高速道路上伊太第一高架橋
(PC上部工)下り線工事

発注者：中日本高速道路株式会社

施工者：飛鳥建設株式会社

工事場所：静岡県島田市上伊太

STA.490+34.5～STA.492+73.0

工期：平成16年9月23日～平成18年11月30日

工事内容：

①上伊太第一高架橋

PC3径間連続ラーメン箱桁橋

橋長127m 有効幅員16.5m

②上伊太第二高架橋

PC2径間ポータルラーメン箱桁橋

橋長83m 有効幅員16.5m

1. 技術研究所 先端計測プロジェクト 2. 技術研究所 3. 技術研究所 第一研究室
4. 名古屋支店 第二東名陸奥高架橋作業所 5. 土木事業本部 技術統括部 設計 G

3. 計測概要

3.1 施工条件と施工順序

上伊太第二高架橋は、図-1の①に示すように下部工が先行して施工されすでに構築が完了している。図-1の④に示すように上部工を剛結すると、プレストレスによる主桁の弾性変形に加え、上部工と下部工の材齢差から、主桁のクリープおよび乾燥収縮による変形が下部工に曲げ変形をもたらし、橋台背面主鉄筋に大きな引張応力が発生し、橋梁に構造上の安全性と耐久性に影響を及ぼすひび割れが発生する可能性があった。

そこで、主桁の設計・施工では上記の問題を解決し、橋梁全体としての構造上の安全性と耐久性を確保するため、プレストレスによる弾性変形、クリープおよび乾燥収縮等による上部工の収縮変形が下部橋台に及ぼす影響の軽減を図るために、設計において以下の対策を実施した。

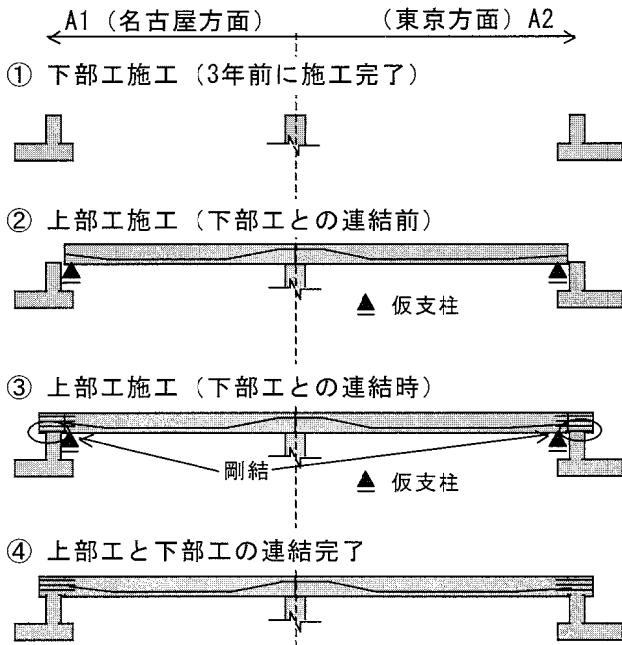


図-1 主桁構築における上施工順序

- (1) 橋台手前まで主桁を構築した状態でPCケーブルの緊張を行う(図-1, ②)。
- (2) 緊張後45日間放置し、主桁のクリープ・乾燥収縮が所定の量まで進行してから橋台との連結部を施工する。この期間での主桁の設計収縮量は、A1側, A2側とも約3mmである。

ここで、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の進行速度は、その配合、配筋量、外気温等に左右されるため「45日間」というのはあくまでも目安となっており、設計協議において主桁が設計収縮量に達したと判断される場合に連結部を施工することとした。

写真-1に上伊太第二高架橋の施工状況を示す。



写真-1 上伊太第二高架橋施工状況

表-1 計測項目および使用機器

| 計測項目 | 使用機器 | 数量 |
|------------------------|------------------|----|
| ①桁端部伸縮量測定 | 高感度変位計 CDP-25 | 6 |
| ②気温測定 | 熱電対 (T型) | 11 |
| ③桁中間部伸縮量測定 | FBGケーブルセンサ | 14 |
| ④桁鉛直変位測定 | レベル測量 | 8 |
| ⑤コンクリート表面温度・計測Box内温度測定 | 熱電対 (T型) | 5 |
| ⑥コンクリート線膨張係数測定 | ひずみ計 KM-100BT | 2 |

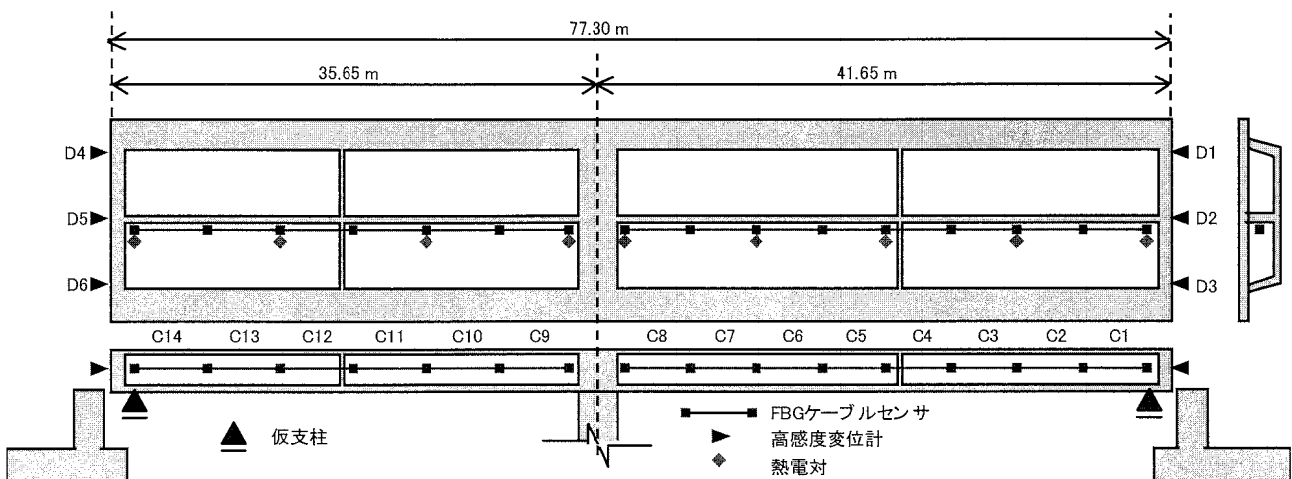


図-2 計測器配置図

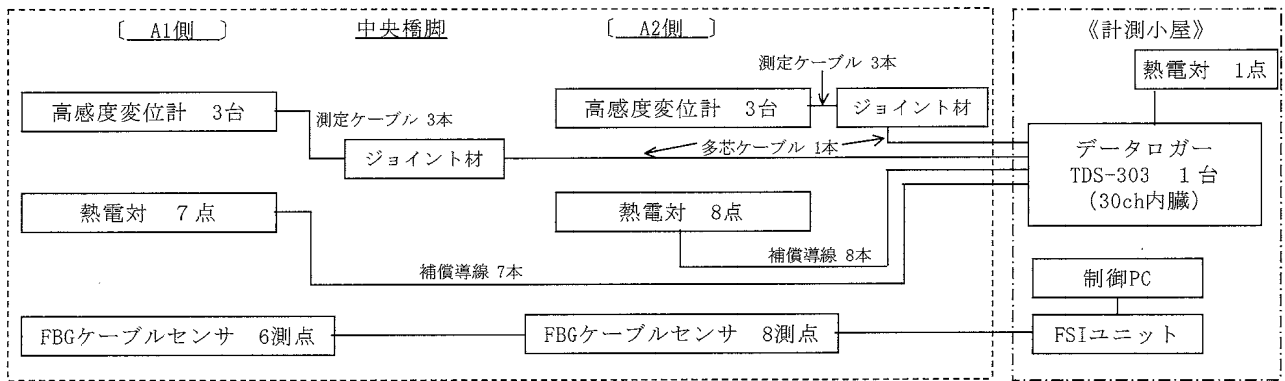


図-3 システム系統図

3.2 計測概要

図-2に計測器配置図、表-1に計測項目、使用機器を示す。

主桁のクリープおよび乾燥収縮等による収縮変形が実際に設計収縮量に達したかどうかを確認するため、以下の計測を行った。

- (1) 主桁端部の総伸縮量
- (2) 中間部での連続的な伸縮量
- (3) 桁中間部の鉛直変位量（日常管理）

これらを計測することにより、主桁端部だけではなく、局所的な主桁中間部の変形や異常な変形の有無を把握し、施工管理することとした。

3.3 計測システムおよび計測方法

本計測では、電気式計測器とFBG光ファイバセンサの両方を使用しており、計測およびデータ回収はそれぞれの計測システムを構築し、行った。

- (1) 電気式計測器（高感度変位計、熱電対）

図-3に示すように、各計測器を計測小屋内にあるデータロガーにそれぞれの伝送ケーブルで接続、データは1分間隔で自動計測を行った。

- (2) FBG光ファイバセンサ（FBGケーブルセンサ）

全てのセンサを1本の光ファイバケーブルでつなぎ、FSIユニット（光計測装置）により1分間隔で自動計測を行った。計測データはFSIユニットの制御用PCに蓄積され、適時、記録媒体でデータを回収し、PCにてデータ整理を行った。

- (3) コンクリート線膨張係数測定

現場にて、コンクリート打設時に供試体（10×10×40cm）を作成した。このとき、内部に測温機能付きひずみ計を埋設した。28日標準養生後、室内の試験装置内で温度を変化させながらひずみ量を計測し、コンクリートの線膨張係数を測定した。

3.4 計測期間

計測期間はPC緊張後の以下の期間である。

計測期間：2006年7月14日～2006年8月28日（45日間）

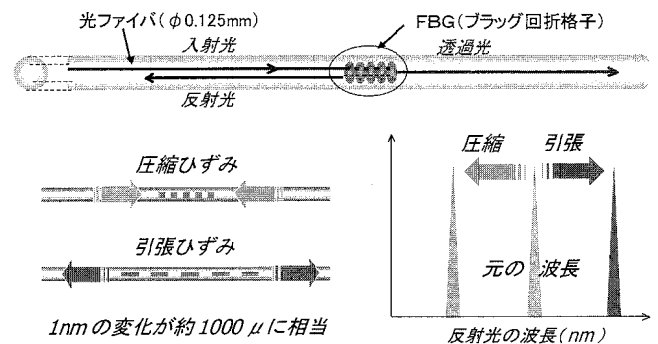
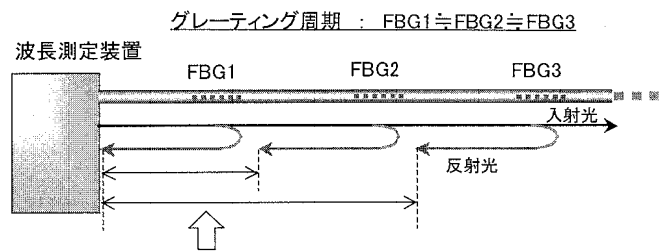


図-4 FBGとひずみ



波長測定装置からの距離に応じて、反射波に時間差が生じる

図-5 TDM方式

4. TDM方式FBG光ファイバセンシング

4.1 FBGによるひずみの測定原理¹⁾

FBG (Fibre Bragg Grating) は、光ファイバに紫外線を照射し一定周期の回折格子（グレーティング）を加工したもので、FBGに光を入射させると、グレーティング周期に応じた特定波長の反射光が戻る。したがって、図-4に示すようにFBG近傍の光ファイバに軸方向のひずみが生じると、FBGのグレーティング周期が変化し、それに応じて反射光の波長もシフトする。反射光と波長シフトの関係は以下ようになる。

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad (1)$$

λ_B 、 $\Delta\lambda_B$ ：それぞれFBGの反射波長と波長シフト、 P_e ：実効光弾性係数、 $\Delta\varepsilon$ ：付加されたひずみ。

この性質を利用することにより、光ファイバをひずみ計測器として使用することができる。

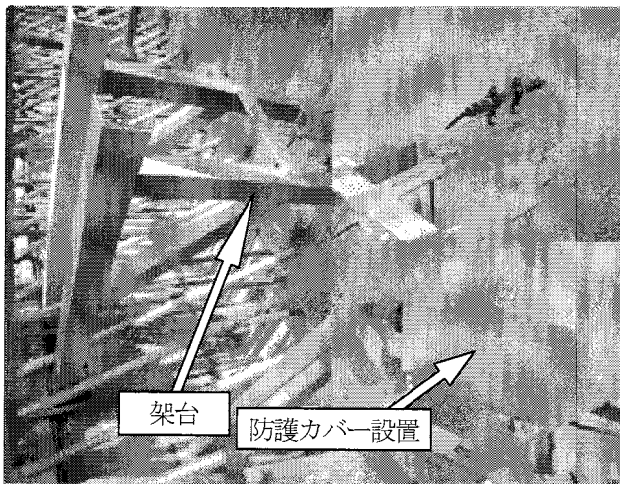


写真-2 高感度変位計設置状況

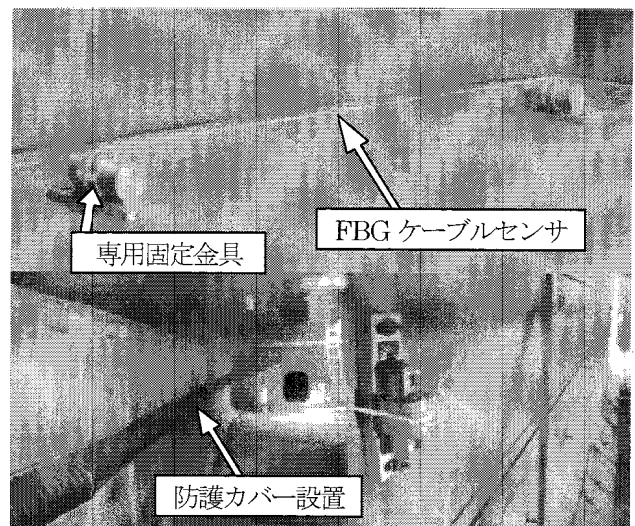


写真-3 FBG ケーブルセンサ設置状況

4.2 TDM方式FBG光ファイバセンシング¹⁾

1本の光ファイバに複数のFBGを直列配置し、それぞれのFBGからの反射波長を測定する方法には、測定する波長軸上に多重化するWDM (Wavelength Division Multiplexing) と時間軸上に多重化するTDM (Time Division Multiplexing) がある。ここでは当社が採用しているTDM方式について説明する。

光を発信し、FBGでの反射が元の場所に到達するまでには時間を要する。これを利用してFBGを多重化しているのがTDM方式である (図-5 参照)。すなわち1本の光ファイバに複数個配置されたFBGを、ある入射光に対してFBGから反射光が戻ってくるまでの時間差によりそれぞれのFBGを識別する。これにより、1本の光ファイバ内に最大100個までFBGを配置することが可能である。

5. 計測機器設置

5.1 桁端伸縮量測定

桁端伸縮量測定は、中立軸上の主桁端部に高感度変位計を直接接触させて計測した (図-2 計測器配置図のD1~D6)。写真-2に示すように、先行して施工が完了している橋台を不動点とし、その橋台コンクリートに架台を固定し、そこに変位計を固定した。

5.2 桁中間部伸縮量測定

桁中間部変位量測定は、FBG ケーブルセンサ^{2) 3)} を使用した。FBG ケーブルセンサは、伸縮する繊維被覆で光ファイバを覆ったひも状のセンサである。これを、所定の緊張力を負荷し専用固定金具を用いて測定対象物に固定する。これにより、センサを設置した2点間の相対変位が計測できる (写真-3 参照)。

写真-3の設置状況に示すように、箱型の主桁内部中立軸上にFBG ケーブルセンサを約5m間隔で設置し計測を行った (図-2 計測器配置図のC1~C14)。今回は、

圧縮ひずみが生じることが想定されたため、FBG ケーブルセンサにあらかじめ 2500μ から 3000μ の引張力を負荷し設置した。

A1側、A2側それぞれに1系統ずつFBG ケーブルセンサを設置し、各系統は中央ピア部でコネクタにより直結してFSIユニットに接続した。

6. 計測結果

以下では、PC 緊張後の7月14日から8月28日までの45日間における主桁伸縮量の計測結果を示し、その考察を行う。

6.1 主桁伸縮量計測結果

図-6、図-7に、PC 緊張作業終了後の7月14日からのA1側、A2側それぞれの主桁上下面の表面温度、主桁端部および内部の気温の経時変化を示す。主桁において、主桁上部の表面温度は、最大 47°C 、最低 20°C 、平均 32°C 、主桁端部では、最大 41°C 、最低 19°C 、平均 26°C 、主桁下部の表面温度は、最大 31°C 、最低 18°C 、平均 26°C となっており、主桁周辺の温度は日射の影響で場所によって大きく異なる。これに対し主桁内部の気温は、最大 33°C 、最低 22°C 、平均 29°C であり、主桁上部の表面温度や端部の気温に比べその変動が小さい。また複数点計測しているが場所による変化もほとんどない。

今回、対象としたのは軸方向に長い構造物であることから、計測結果の考察においてコンクリートの温度変化に対する伸縮量を無視することはできない。主桁周辺の温度は、上部、下部、端部で大きく異なり、それによりコンクリート内部の温度分布はかなり複雑になっているものと考えられる。また、コンクリート表面および表面付近は、気象条件による外気温の変化などにより急激な温度変化が生じることも考えられる。したがって、気象

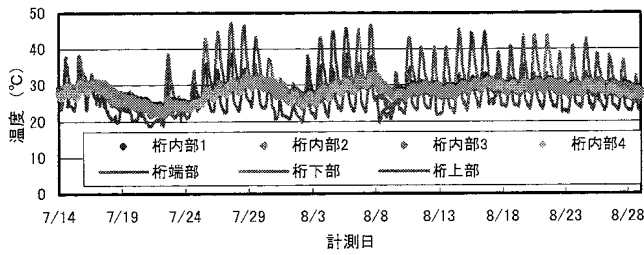


図-6 A1側主桁周辺温度

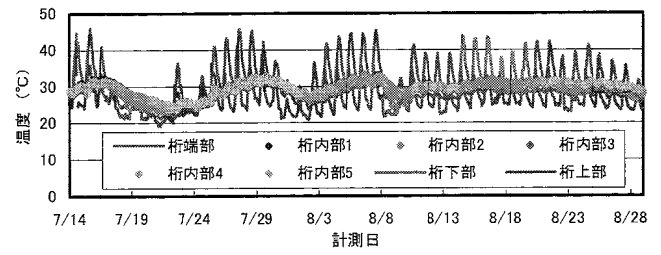


図-7 A2側主桁周辺温度

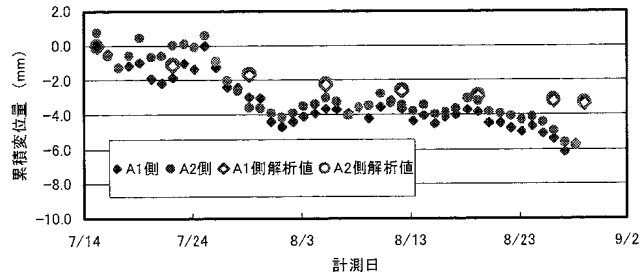


図-8 FBGケーブルセンサによる計測結果

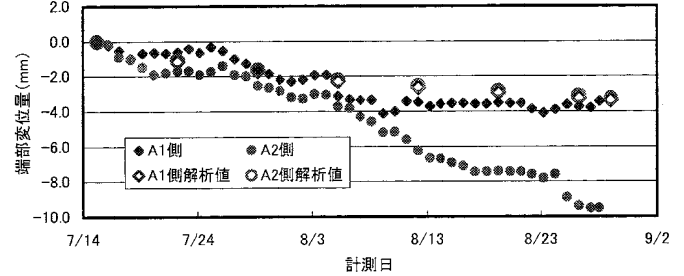


図-9 端部変位計による計測結果

条件の影響が小さく、コンクリート内部の温度変化を最も良く表していると考えられる主桁内部の複数箇所の気温を、A1側、A2側でそれぞれ平均化したものを用いて、コンクリートの温度変化に対する伸縮量の補正を行った。

図-8に、FBGケーブルセンサによる桁中間部により計測された伸縮量の端部での累積変位量の経時変化、図-9に、高感度変位計による桁端部伸縮量（各端部3台の平均値）の経時変化を示す。ここでは、日射の影響を受けにくく、気温変動も小さいAM5:00におけるデータを抽出して示している。また、FBGケーブルセンサについては、それ自体も温度変化の影響を受けるため、ケーブルセンサ自体の温度による変化の補正も行っている。FBGケーブルセンサによる計測結果では、PC緊張後約11日間はあまり収縮が進行していないが、その後5日間で収縮が4mmまで急速に進行し、さらにその後は徐々に収縮が進行し、最終的な収縮量は、A1側で5.6mm、A2側で5.8mmとなった。

それに対し高感度変位計による計測結果は、A1側とA2側で収縮の進行に差が生じた。A1側では、PC緊張後の3日間で約1mm収縮したが、4日から11日の間では収縮が進行しなかった。しかし、その後10日間で3mmまで収縮し、最終的に3.4mmまで収縮した。この値は、PC緊張後45日間における主桁収縮量の解析値とほぼ同等の値である。一方A2側では、PC緊張後の6日間でA1側に比べ約2倍の収縮量となり、その後21日間はA1側との収縮量の差が一定のままA1側と同様の収縮挙動を示した。しかし、8月11日より急速に収縮が進行し、最終的に9.5mmまで収縮した。

A1側とA2側の収縮量の合計は、FBGケーブルセンサでは11.4mm、高感度変位計では13.0mmとなった。PC

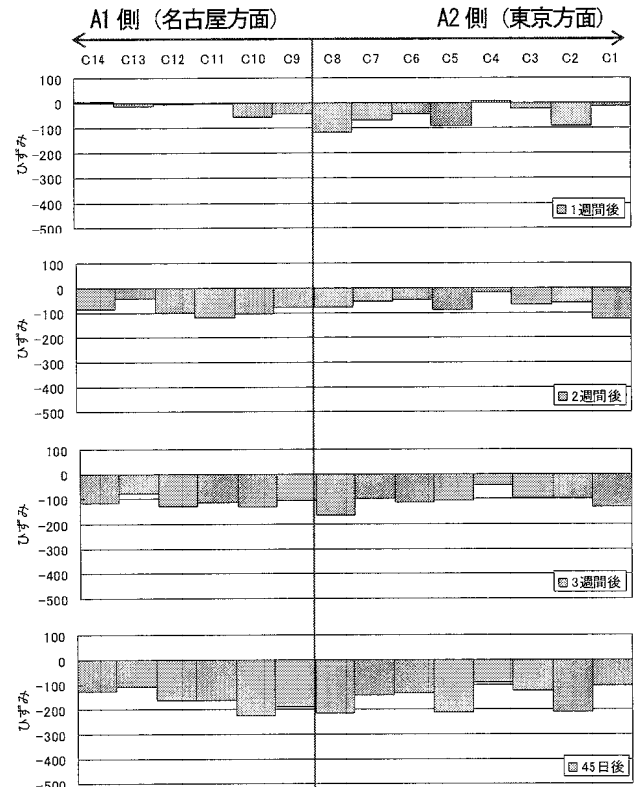


図-10 FBGケーブルセンサによる区間ひずみ

緊張終了後の45日間における主桁収縮量の設計値の合計が約6mmであることから、この期間において設計値に対し2倍近く収縮が進行したことになる。これは、設計時の設定気温が25°Cであるのに対し、本計測期間における平均気温が29°Cであったため、また夏季の施工であったためにクリープおよび収縮変形が設計よりも早く進行したと考えられる。これにより剛結後の収縮量が少なくなるため、主桁の収縮にともなう下部工への有害な影

響をさらに軽減することができ、構造上さらに安全になったものと考えられる。

なお、FBG ケーブルセンサと高感度変位計による収縮量の合計には1.6mmの差が生じた。これは、図-2の計測器配置図を見るとわかるように、FBG ケーブルセンサは主桁内部を計測しているため端部壁部分の収縮変形を計測していないのに対し、高感度変位計は主桁全体を計測しており、両者の計測対象とする長さには約6mの差があったためと考えられる。

また、高感度変位計では主桁の長さそれほど差がないにもかかわらずA1とA2側の収縮量で差が出た原因の一つとして、中央ピアに対してA1側とA2側で主桁が非対称であり、橋脚自体が主桁のクリープ変形と連動してわずかにではあるがA2側に曲げ変形したためと推定される。これに対しFBG ケーブルセンサでは、設置場所が主桁内部であり橋脚等の全体の変形に影響されないため、主桁の収縮量を正確に計測することができたものと考えられる。

6.2 桁中間部ひずみ計測結果

FBG ケーブルセンサは、約5m間隔でセンサが設置されており、各区間のひずみを計測している。図-10は、FBG 光ファイバケーブルセンサにより計測したPC緊張後の1週間後、2週間後、3週間後、45日後の区間ひずみ分布を示したものである。この図より、時間の経過とともに圧縮ひずみが全体的に漸増していることが分かる。また、45日後の区間ひずみ分布を見ると、桁中間部は概ね100~200 μ 程度の圧縮ひずみ状態であり、特に大きな圧縮ひずみや引張りひずみの発生している区間は見られなかった。これは、PC緊張後のクリープひずみと乾燥収縮によって、主桁全体がほぼ均等に収縮していたためと考えられる。

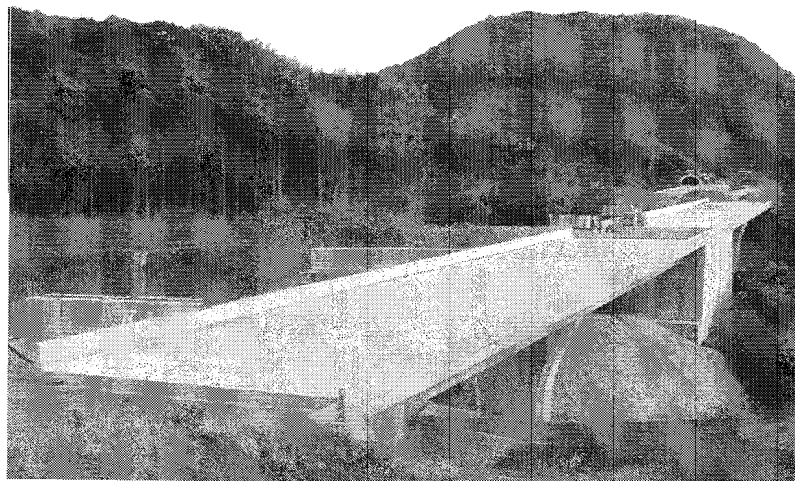


写真-4 上伊太第二高架橋施工完了

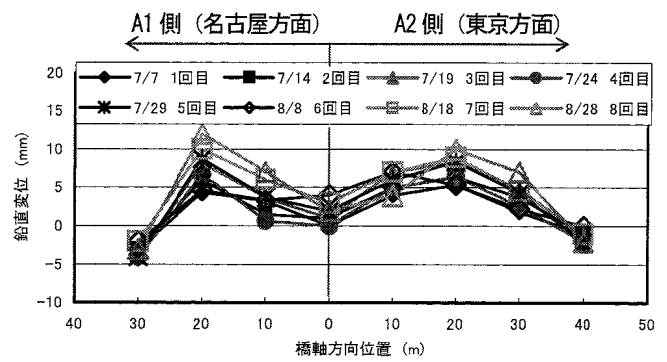


図-11 桁鉛直変位測定結果(初期値:7月4日)

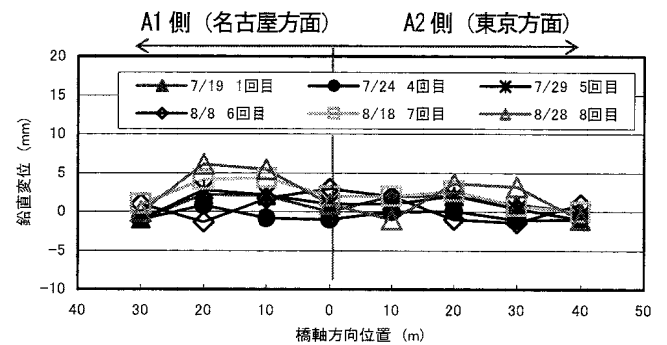


図-12 桁鉛直変位測定結果(初期値:7月14日)

6.3 桁鉛直変位計測結果

図-11に、PC緊張前の7月4日を初期値として、PCケーブル緊張中および緊張後に実施した桁鉛直変位の測定結果を示す。また、図-12に7月14日のPC緊張終了時を初期値とした桁鉛直変位の測定結果を示す。これらの図から以下のことがわかる。

- PC緊張により桁中間部が最大6mm隆起し、桁端部仮支点で最大3mm沈下した。
- PC緊張後の桁鉛直変位は大きな変動はなく、緊張

後 45 日経過した 8 月 28 日時点で、A1 側中間部で最大 12 mm、A2 側中間部で最大 10 mm 隆起し、仮支点ではそれぞれ 3 mm、2 mm 沈下した。

- ・ PC 緊張後の隆起量の増分は、A1 側と A2 側で、それぞれ設計値が 3 mm と 4 mm であるのに対し、6 mm と 4 mm であり、大きな差異はなかった。

以上のことから、桁部鉛直変位は PC 緊張にともない A1 側、A2 側とも桁中間部が持ち上がる形状となり、クリープおよび乾燥収縮が進行するに従って漸増する傾向を示した。この PC 緊張後の鉛直変位は、設計値に比較して大きな差異はなく、桁軸方向の変形が設計値よりも大きいことを考慮すると、問題となる変形ではないと考えられる。

7. おわりに

今回、PC 緊張後 45 日間が経過し、高感度変位計による主桁端部での収縮量計測および FBG ケーブルセンサによる主桁中間部での収縮量計測の両計測方法において、設計収縮量以上の主桁収縮量が確認されたことから、主桁と橋台との連結が実施され、下部工橋台にひび割れの発生もなく、無事本高架橋工事の完成に至った。写真 4 に上伊太橋第二高架橋完成時の写真を示す。

本計測管理結果により、TDM 方式の FBG ケーブルセンサにより PC 上部工のクリープおよび乾燥収縮による収縮量および区間ひずみを実用上十分な精度で計測できることが示された。また、主桁端部の高感度変位計では

主桁全体の収縮量は把握できるが、主桁中間部の各区間の収縮変形挙動を把握することはできない。したがって、本高架橋と同様の構造形式で上部工と下部工に材齢差があるものには、主桁端部だけではなく主桁中間部の区間ひずみ分布を計測することは計測管理を行う上で有効であることが確認された。

今後は、FBG ケーブルセンサでの計測方法を工夫することにより、橋梁等のたわみ計測にも適用していきたい。

謝辞：

本工事に於いて計測管理を実施するにあたり、中日本高速道路株式会社横浜支社および静岡工事事務所の皆様には、ご理解ならびにご指導を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) Raymond M. Measures : Structural Monitoring with Fiber Optic Technology, Academic press, pp.213-232, 2001
- 2) 熊谷, 塩谷, 田村 : 時間分割多重化による FBG 光ファイバ計測システム, 電力士木, No.323, pp.88-90, 2006.5
- 3) 小林, 松元, 塩谷, 熊谷, 田村, 阿保, 本山, 柏木, 加藤 : 時間分割多重化による FBG 光ファイバセンサを用いたモニタリングシステム, とびしま技報 No.55, pp.156-161, 2006

Summary : The Kamiita First Bridge on the Second Tomei Expressway consists of two bridges, one of which is of portal rigid frame structure. The bridge girders were to be fixed to the substructure, which had already been completed three years before. The difference between the concrete ages of the bridge girders and substructure could have caused structural damage to this bridge.

To prevent such damage, the authors planned to fix the bridge girders to the substructure after confirming the prescribed shrinkage value of the girders by measurement control using FBG optical fiber sensors. With the prescribed shrinkage having been confirmed, the girders were fixed to the substructure to complete the construction of this bridge.

Keywords : optical fiber sensing, FBG portal rigid frame bridge, dry shrinkage, creep