

長大橋モニタリングシステムの開発と適用例

岩城 英朗 *1・稲田 裕 *2・若原 敏裕 *3

1. はじめに

新たな社会資本投資が堅調に進む一方、高度成長期に整備が進められた社会資本は、供用開始より30～40年の年月を経ており、これらの安全かつ効率的な維持管理は今後の大きな課題である。

すでに米国では、1990年代から橋梁や高速道路などの老朽化に伴う大小の事故、障害が頻発して社会問題化しており、さらにノースリッジ地震などの数々の地震災害を契機として、社会資本の維持管理手法に関する検討が盛んであるが、その中で適用が有望視されている技術に構造ヘルスマニタリングがあげられる^{1, 2)}。

構造ヘルスマニタリングとは、構造体にあらかじめセンサー等を設置して、そのセンサーからの情報から、損傷箇所の検知や劣化度の診断を目的とした技術であり、いわばセンサー技術、計測技術と、計測データを適切に処理し、損傷、劣化の指標を導出する解析技術の複合技術である³⁾。

しかし従来は、光ファイバーセンサーに代表される先端センサーの開発、および、これらセンサーを構造体に設置するためのセンサー適用手法の開発が主体となっていた。

そのため、果たしてこれらの先端センサーを用いた構造ヘルスマニタリングシステムは、社会資本の管理者、利用者などに対して、損傷の検知や、維持管理に有用な情報を提供できるのかどうか、解析技術の開発を含めて改めて検討する必要がある。

その一方で、現在数多く建設が進められている長大橋では、架設時には安全かつ高精度な施工管理を目的として、各種センサーによる計測や高精度な測量などによる大規模管理が必須であり、さらに、完成後、供用中には長期にわたる維持管理をサポートする何らかのモニタリングシステムの設置が必要である。これらは従来、別個のシステムとして考えられていたため、供用中の長期の維持管理におい

て非常に重要な指標となる架設中および完成直後（供用初期）の構造性能を引き継ぐことは困難であった。

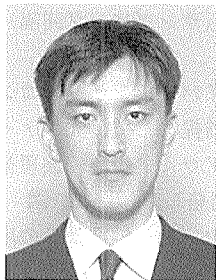
そこで、架設時の施工管理から完成後、供用中の維持管理まで一貫して担うことが可能な構造モニタリングシステムの構築が可能であれば、設計者、施工者、さらに管理者にとって有益でかつ有効なツールとして活用することができる。また、一貫したシステム構築により、高性能、高耐久性などの利点に関わらず、コスト面で導入が困難であった光ファイバーセンサー等の先端センサーの使用にも改めて道を開くことができる。

本報では、筆者らが開発した光ファイバーセンサーを主体とした長大PC橋構造ヘルスマニタリングシステムの概要を紹介する。また、同システムを用いて架設開始から完成まで、そして、供用開始以降に取得したデータと、これらの分析結果をあわせて示し、実橋の維持管理へ向けた今後の展開を検討する⁴⁾。

2. 適用対象

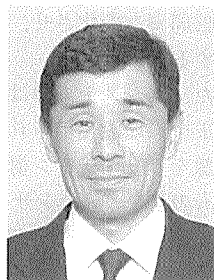
本報で構造モニタリングシステムの適用対象とした一面吊りPC斜張橋を図-1に示す（2006年12月に開通したバイチャイ橋：ベトナム・ハロン市：中央支間長435m⁵⁾）。

本対象の施工においては、架橋地点の状況と環境を考慮し、移動型枠を用いた張出し架設工法を用いた。同工法を用いた施工では、安全かつ高精度な施工のために、架設全期間にわたって、型枠移動やコンクリート打設、斜材緊張などに伴う構造体の変形の常時把握、および出来高の管理や、台風などの強風時の変形や振動予測が重要な課題となる。そのため本対象においても、測量による線形管理を施工ステップごとに行い、あわせてひずみゲージ（鉄筋計）、熱電対、傾斜計、風向風速計など、200箇所以上のセンサーを使用した計測システムを設置した。



*1 Hideaki IWAKI

清水建設(株) 技術研究所



*2 Hiroshi INADA

清水建設(株) 技術研究所



*3 Toshihiro WAKAHARA

清水建設(株) 技術研究所

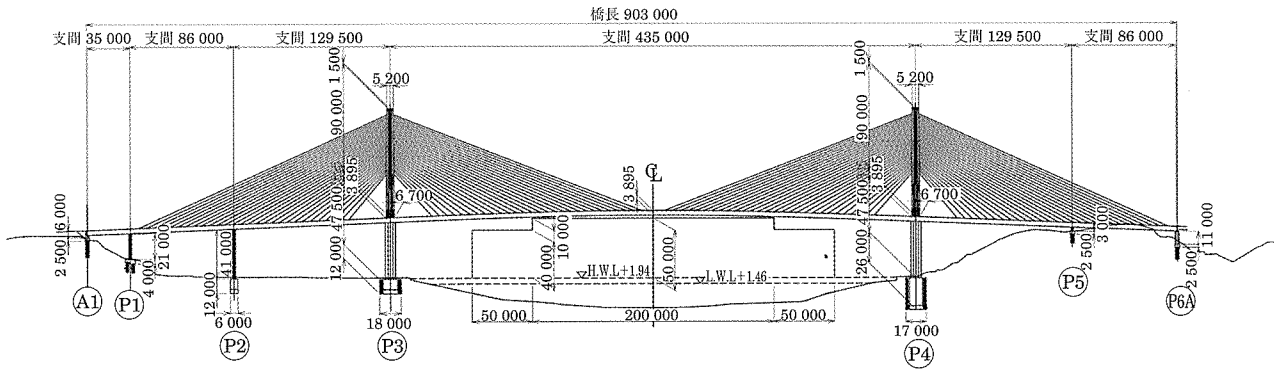


図 - 1 適用対象とした PC 斜張橋

3. システム構成

3.1 システム概要

前節にも示したとおり、長大 PC 斜張橋の架設時には、以下に示す項目を主眼に施工管理を行う必要がある。

- ・ 工事進捗に沿った線形・出来高の管理
 - ・ 施工期間中にわたる気候変動などの外乱に対する応答
 - ・ 型枠移動などで発生する振動（内乱）に対する応答
- さらに、完成後、供用中の維持管理においては
- ・ クリープ、斜材張力の緩和等の影響
 - ・ 強風などの外乱に対する応答
 - ・ 走行車両等の活荷重による応答

等を逐次計測し、維持管理の指標とする必要がある。

これら要件を満たすために、以下の計測システムを構築し設置した。

- ・ 光ファイバーセンサーを用いたひずみ・温度計測システム
- ・ サーボ型加速度計などを用いた強風応答計測システム

なお、上記 2 つの計測システムで取得したデータをインターネットを通じてデータセンターに転送し、所定のデータ処理をした後、サーバー上に保存するシステムを合わせて設置した。設計者、管理者などは Web ブラウザを通じて本システムを用い、どこからでも計測データの参照や分析を行うことができる。

以上のシステムを総合して、長大橋モニタリングシステム（以下、本システム）とした。本システムの概要を図 - 2 に示す。なお、本システムの設置は、図 - 1 に示した適用対象の対称性を考慮し、同図に示す主塔 P3 側とした。

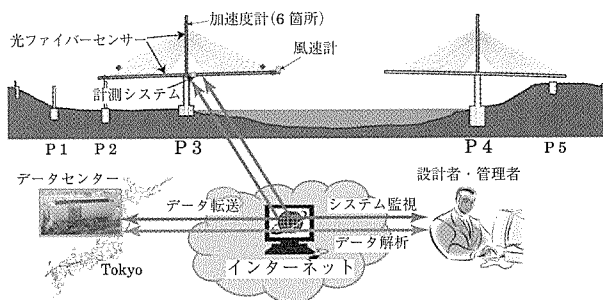


図 - 2 システム概要図

3.2 光ファイバーセンサーを用いた計測システム

高速・大容量通信メディアとして現在広範に使用されている光ファイバーは、それ自身もさまざまな物理特性を利用してセンサー素子として活用することが可能である。光ファイバーセンサーにはさまざまな方式があるが、従来の電気信号を利用したセンサーと比べおおむね、

- ・ 外部ノイズ等に影響せず、高い安定性を有する
 - ・ 耐食性、耐久性に優れる
- という利点を有する。

本システムで用いた光ファイバー分布センサー（B-OTDR 方式）は、光ファイバーの軸方向に沿って非常に短い周期のパルス光を入射すると光ファイバー中のパルス光伝搬にもなって微量な光が反射するという特性（後方散乱）を利用している。反射光の波長は光ファイバーに加わるひずみや温度で変化するため、反射光の波長と伝搬時間（パルス光を入射してから反射光が受信されるまでの時間）をあわせて記録すれば、光ファイバー全域をひずみセンサー、温度センサーとして使用できる。

なお、計測できるひずみ・温度の長さ方向の精度（空間分解能）と光ファイバーに入射するパルス光の周期（幅）とは反比例関係にあり、入射パルス光の周期（幅）を長くすると、空間分解能は低下する。たとえば、入射パルス光の周期が 10 ns (10×10^{-9} 秒) の場合の空間分解能は 1 m となり、ある点で計測された計測値（ひずみ・温度）はその点の前後 0.5 m の範囲の平均ひずみ（温度）値となる。周期が 100 ns の場合の空間分解能は 10 m である。さらに、反射光は非常に微弱な光であるため、実際の計測ではパルス光を反復して入射し、反射光を平均化してひずみ・温度を求める。また、入射パルス光の周期とはべつに、反射光の受信間隔を変化させ、計測間隔（サンプリング間隔）を設定する⁶⁾。

また、本システムでは、光ファイバーセンサーがコンクリート中に埋設使用されることを前提として、光ファイバー素線をポリエチレン樹脂およびアラミド繊維で被覆補強したものをひずみセンサーとして開発し、適用した（図 - 3）。さらに、コンクリート埋設時にもセンサー外部からの応力（側圧や付着による引張や圧縮）の影響を回避するために、光ファイバー素線をステンレス細管に内挿し保護したものを温度センサーとして使用した。

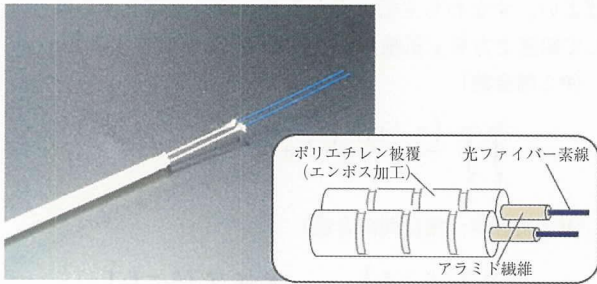


図-3 光ファイバーひずみセンサー

光ファイバーセンサーの敷設に際しては、移動型枠に沿って主塔P3から延伸するPC主桁の四隅に上記センサーを順次埋設する工法を用いた。すなわち、まず図-4に示すとおり、主桁四隅に埋設するおのおのの光ファイバーセンサーの始端（主塔P3側）をセンサー埋設開始当初から光スイッチを介して計測器に接続して計測可能な状態とし、センサーの未埋設部および終端はリールを使用し束ね移動型枠の先端部近傍に仮設した。つぎに、主桁延伸に伴う型枠の移動および配筋完了後、リールから光ファイバーセンサーを引き出して鉄筋に沿わせ固定し、コンクリート打設にあわせて主桁中に埋設した。図-5に本工法の概要を示す。

本工法の適用により、主桁延伸の開始初頭から完成まで、継続した計測が可能となり、かつセンサー設置の労力を大

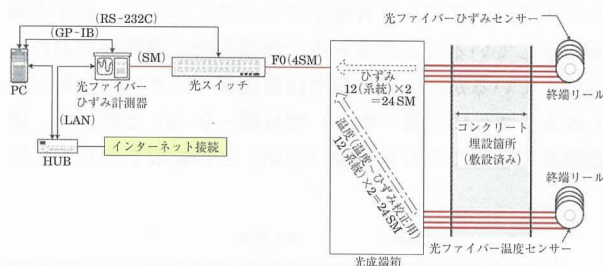


図-4 光ファイバー計測システム

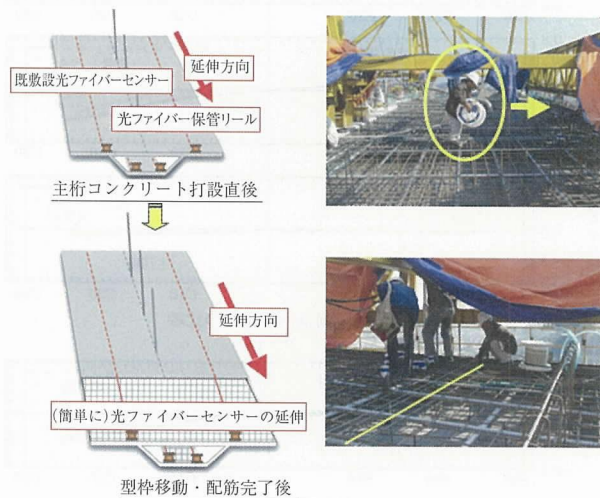


図-5 光ファイバーセンサー延伸プロセス

幅に軽減できた。

使用した光ファイバーセンサーの総延長は、ひずみセンサーと温度センサーを合わせて約5000mとなった。

3.3 風速計・加速度計の配置

図-6に風速計と加速度計の配置を示す。図-6に示すように主径間張出しの先端部に超音波風速計を設置、また、加速度計はP3橋脚柱頭部にx（橋軸方向）、y（橋軸直角方向）、z（延長方向）の3成分、主塔頂部にx、yの2成分、側径間にy、zの2成分、主径間側にyおよびzR、zLの3成分、さらに、側径間および主径間の斜材におのおのの斜材軸直角方向に1成分の加速度計を配置した。

主塔および主桁に設置した加速度計は、施工の進捗に伴い、先端の架設ブロックへ移動した。ただし、側径間側はP2橋脚からP3橋脚の中央までの移動、主径間側はスパン中央までの移動とした。また、これに伴い、斜材に設置した加速度計も順次先端架設ブロックまで移動した。

これら風速計および加速度計は、施工中は主に架設系の台風などの強風により引き起こされるガスト応答や不安定振動の有無を調べるために用い、同時に構造同定（周波数分析）により施工中の構造系の固有振動数の変化を調べる目的でも使用した。

また、完成供用時には、施工時と同様に強風時のガスト応答予測、さらに、加速度計を用いて活荷重の荷重履歴などの検討を行うことができる。

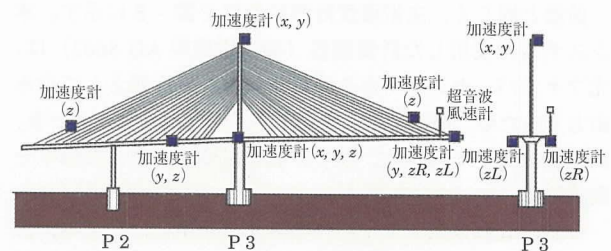


図-6 風速計および加速度計配置

4. 架設時の計測結果

4.1 ひずみ計測結果

架設時の主桁ひずみ計測結果例を図-7に示す。本システムでは、入射パルス光の周期を20n秒、反射光の平均化回数を213回、計測間隔（サンプリング間隔）を0.5mと設定した。すなわち、敷設した光ファイバーセンサー全域において、0.5m刻みでひずみ値が得られ、そのおのおのひずみ値は、計測点の前後1m（計2m）の光ファイバーセンサーに沿った範囲のひずみ平均値（ひずみ分布）である。

上記の計測パラメーターを用いた場合に必要計測時間は1本のセンサーあたり数分程度である。このため、振動や衝撃などによって生じるひずみ変化には追従しない。すなわち、本システムから得られるデータは、ほぼ静的現象によって得られたひずみ値である。

なお、光スイッチに接続したすべての光ファイバーセン

サーの計測が完了するまでの時間は、光スイッチのチャンネル切替え、おのおののセンサーからの計測データの保存に要する時間などを含めると、約1時間である。

また、本システムで採用した光ファイバーセンサーは、現場での施工の進捗に合わせてコンクリート打設時に埋設するため、破断に対する補償として、1本のセンサーに2本の光ファイバー素線を配置する方式を採用しており(図-3)、リール先端部で両素線を折り返して融着し、センサー全体でループ状にしている。このため、コンクリート打設時などに1本の光ファイバー素線が破断しても、残りの一方から光を逆向きに入射することで、途切れることなく計測が可能となる。図-7においてもリール先端部を中心としてひずみ値は左右対称であり、センサー中の光ファイバーは2素線ともに稼働状態にあることを示している。

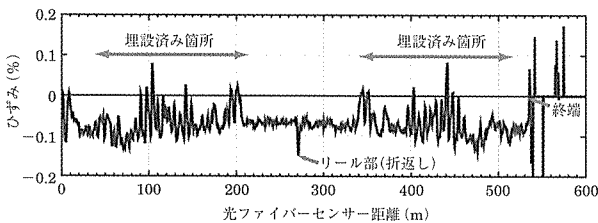


図-7 ひずみ計測結果の一例

4.2 温度計測結果

前項と同じく、主桁温度計測結果例を図-8に示す。本システムで使用した計測機器(横河電機製AQ 8603)は、光ファイバーセンサーからの計測値はひずみ値としてのみ出力するため、前節で示した光ファイバー温度センサーを、別途恒温槽中で校正し、ひずみ値を温度に変換した結果を図示した。

なお、これら光ファイバーセンサーを用いたひずみ、温度計測は本システム稼働開始当初から、連日2(架設中)~4時間(完成後)おき(1日あたり6~12回)に継続して実施している。

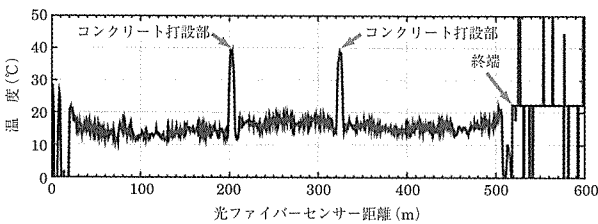


図-8 温度計測結果の一例

4.3 たわみ曲線

架設時の主桁たわみ分布を把握することは施工管理上非常に重要である。前項で示した光ファイバーセンサーによるひずみ値から、主桁たわみ曲線を求めた。

なお、ひずみ値から主桁たわみ曲線を求めるには、主桁を連続梁としてモデル化し、工事進捗による主桁と各塔との締結・閉合に沿って変化する境界条件を逐次反映させ

ばよい。すなわち主桁のたわみ曲線は、主塔P3を原点として鉛直上方をy正軸、主径間方向をx正軸とすると、

(P2閉合前)

$$y = - \int_0^x \int_0^x \frac{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)}{h} dx dx + \theta x$$

(P2閉合後~側径間閉合前)

$$y = - \int_0^x \int_0^x \frac{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)}{h} dx dx + \frac{x}{L} \int_0^L \int_0^L \frac{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)}{h} dx dx$$

$\varepsilon_a, \varepsilon_b$: 主桁上床版, 下床版の計測ひずみ値,

h : 光ファイバーセンサーの間隔(主桁の桁高),

L : P2~P3間の距離,

θ : 主塔P3底部の傾斜角

のように求めることができる。以降の工程(側径間側閉合→主径間側閉合)においても同様である。

図-9に主桁延伸工程(ブロック25)におけるたわみ曲線を、前ステップ(ブロック24)の斜材緊張後の線形を基準値として示した。

連続計測を行っている光ファイバーセンサーから得られたひずみ値より求めた主桁たわみ曲線の状況が、施工ステップの進展にともなう荷重変化に沿って、刻々と変化していることが分かる。

図-9(a)では本システムで求めたたわみ曲線と、前ステップ(ブロック24)斜材緊張時を基準とした測量レベル(相対レベル値)を比較した。たわみ曲線(実線)と、測量レベル差分(▽印)は各施工プロセスにおいて、良好な関係を示していることが分かる。側径間側の線形はおおむね近似しているが、主径間側では既設ブロック部分に差がみられる。さらに、図-9(b)では図-9(a)と同様に、詳細設計で求めたたわみ曲線(○印)との比較を示した。同

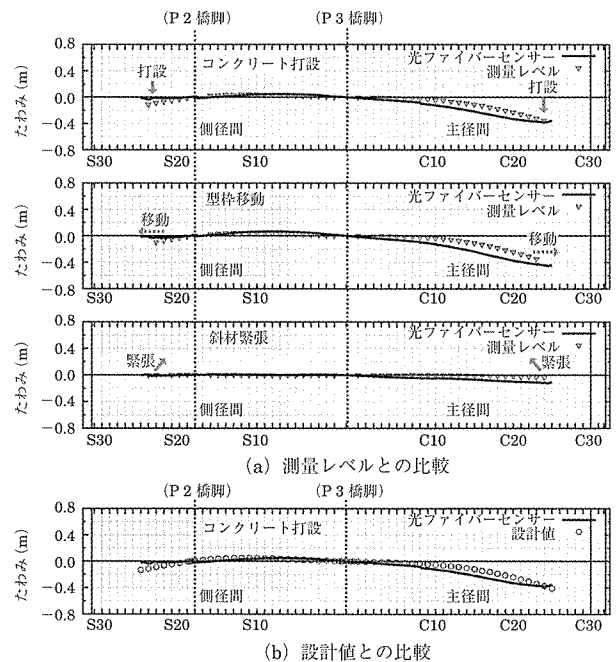


図-9 主桁たわみ曲線

図でも主径間側の既設ブロック部のたわみ量に差が見られる。

この差は、主塔の橋軸方向の変形（側径間側の曲げ越し）の影響が計測値に反映されないことが原因と考えられる。

これらの結果から、主桁全体の線形管理を光ファイバーセンサーのみで行うことは現状では困難である。しかし、作業が行われていない早朝など、限定した条件下のみ実施する測量に対して、光ファイバーセンサーを用いた連続計測から得られたひずみ値を用いてたわみ曲線を時々刻々求め、測量値を補間する方法は、次ステップの上げ越し管理を行ううえで有用であると考えられる。

4.4 固有振動数の変化

図 - 10 は架設系の固有振動数の変化を施工の進捗に応じて調べたものである。

図中○印は加速度計から得られた固有振動数を示したものである。データは1日に一回、深夜に30分間の加速度記録を測定し、その記録に対し構造同定を行い、主桁および主塔の最低次の固有振動数を算定した。

図 - 10 から分かるように、主桁・主塔、いずれも、施工の進捗に伴い固有振動数は低下し、側径間中央のP2橋脚

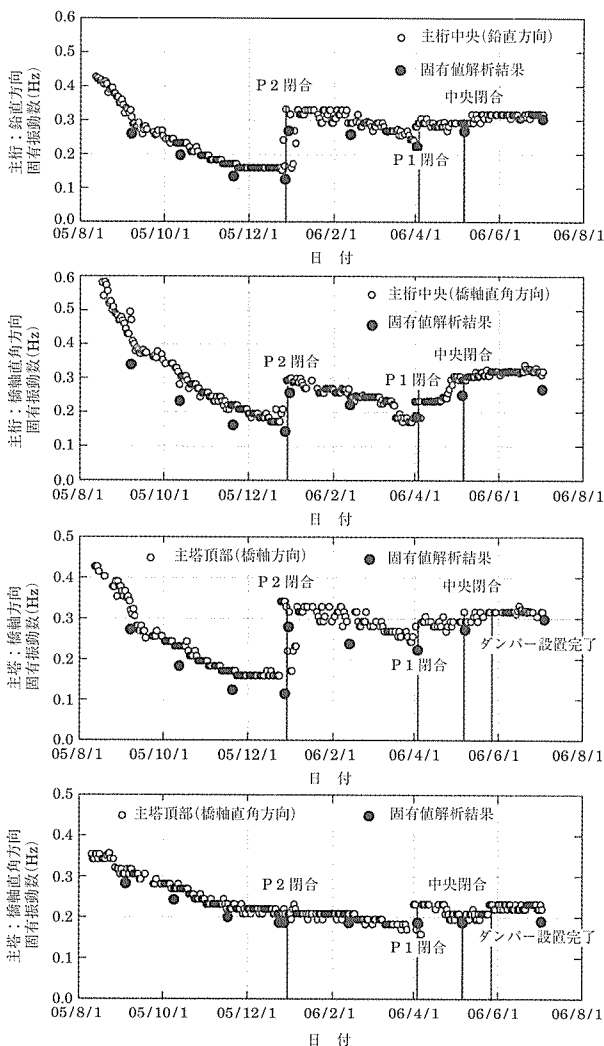


図 - 10 固有振動数の変化

を閉じた段階で、構造系が変化し固有振動数も増加する。また、これらの変化は、P1橋脚閉合、中央閉合時にも生じるが、両張出し状態（やじろべえ状態）の場合からP2橋脚を閉合した際の変化に比べればわずかである。図中に●印でおおのこの段階の固有値解析結果を示しているが、おおむね、解析結果より10%ほど測定結果の方が大きな値となっている。この原因として、設計で用いたコンクリートのヤング率と微小ひずみ領域でのヤング率との違いが影響していると考えられる。図 - 10の結果から、設計で期待したおりの構造系の安定が確保されていることが分かる。また、施工の進展に伴う変化の傾向も測定値と解析値はよく対応していることが分かる。

5. 完成後の計測結果

図 - 11 に完成時の主桁ひずみ分布を示した。これを完成後の主桁ひずみ分布の初期値とすることができる。

供用中の維持管理においては、図 - 11の結果と、コンクリート埋設時の初期ひずみ値、温度変化から求められる主桁応力分布と、次節に示すひずみ、温度の推移に注目して

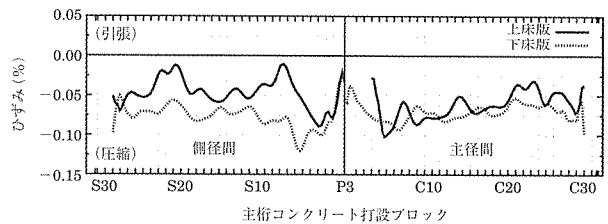


図 - 11 完成時の主桁ひずみ分布

検討を行う。

図 - 12 は、架設中からの完成供用中を通じ、主桁P3基部（側径間ブロック04：前節の図 - 11中のS04）における主桁上床版および下床版のひずみと温度の経過日数ともなう推移を示したものである。なお、図には橋面工開始から供用開始までの間のデータは割愛している。これは、橋面工において防水シート融着やアスファルト舗装を行う際の人為的な加熱によるひずみや温度変化の影響を、データ処理の都合で嫌ったことと、この間、本設電源への切替え（架設時から完成供用時の電源切替え等）により、たびたび電源供給が止まることから機器メンテナンス期間としたことが理由である。

図中に示した実線のとおり、ひずみ変化、ならびに温度の変化は、おおむね周期的に推移している。図中の実線は、架設期間のデータに基づき、簡単な自己回帰モデルを作成し、供用開始後のひずみと温度の推移を予測したものである。上床版ならびに下床版のいずれも、供用後の主桁コンクリート温度を推定できていることが分かる。

また、ひずみに関しては、橋面工の自重で下床版のひずみ値がわずかながら圧縮側にシフトするものの、傾向に大きな差は見られない結果となった。今後、供用後のデータも踏まえ、数年のデータを蓄積し、数理・統計的な手法で将来予測を行い、異常な兆候や変化が見られた場合は、点

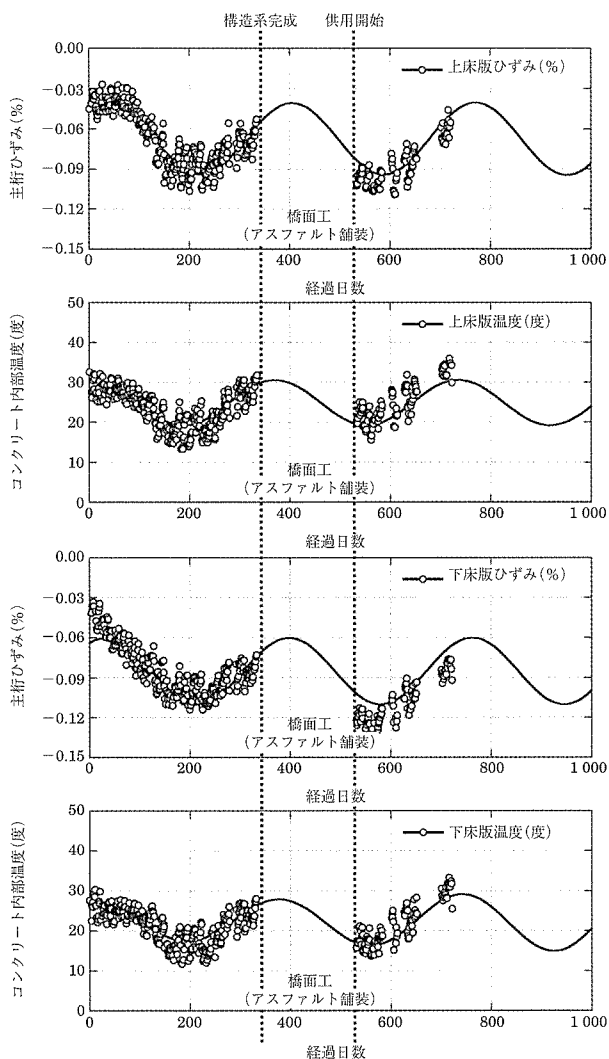


図-12 経過日数に伴う主桁ひずみおよびコンクリート内部温度の変化

検の実施を検討するなど、本システムから得られる結果が、PC橋の維持管理における有用なツールとなり得ると考えられる。

6. おわりに

本報告で示した、長大PC斜張橋に対する構造ヘルスマニタリングシステムの開発および実橋への適用を通じて、

- ・架設時から完成供用中までの一貫したシステム構築
- ・センサー設置にかかる労力の低減
- ・高精度かつ継続した施工管理（システム運用）
- ・架設時の計測データ、解析結果を完成供用中の維持管理の初期値として円滑に継承

が可能であることを示した。

さらに、完成供用中の計測データおよび、これを用いた解析結果から、長大PC斜張橋の維持管理における有用なツールとして活用できる可能性を示すことができた。

しかしながら、本報で示した結果は、本システムが維持管理に活用できる可能性の提示に留まっており、今後、本システムの長期運用を通じた継続したデータの取得と、データ整合性の確保が不可欠となる、息の長い研究・開発が必要である。

本システムは海外（ベトナム）での適用であることから、2006年7月より、現地研究機関（ベトナム交通運輸大学）との共同研究として、本対象の完成、供用開始以降の本システムの運用を共同で行っている。日常のデータチェックやメンテナンス、あるいは、今後の維持管理へ向けたデータ分析などは同大学との連携体制で行うことを基本としている。

ベトナムと日本の研究者、エンジニアによる共同開発成果を目指し、今後も継続してシステム運用を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) K. P. Chong, N. J. Carino, G. Washer: Health Monitoring of civil Infrastructures, Smart Materials and Structures, Vol. 12, pp.483 - 493, 2003. 05
- 2) A. Mita: Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures, Proceedings of Second Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 56 - 67, 1999. 09
- 3) 武田展雄ほか：第1回～第3回知的材料・構造システムシンポジウム, 1999. 12, 2000. 12, 2002. 01
- 4) 岩城英朗, 稲田裕, 若原敏裕：光ファイバひずみセンサ (B-OTDR) を用いた長大斜張橋施工時モニタリング, 土木学会第62回年次学術講演会, pp. 805 - 806, 2007. 09
- 5) 中村智樹, 土田一輝, 大野浩, 永元直樹：パイチャイ橋建設工事, プレストレストコンクリート, Vol. 49, No. 1, pp. 11 - 19, 2007. 01
- 6) 横河電機：光ファイバひずみアナライザ AQ 8603 製品資料

【2008年1月17日受付】