

光ファイバー組込み式 PC 鋼より線による 張力分布計測技術

曾我部 直樹*1・今井 道男*2・中上 晋志*3・早坂 洋太*4

PC 構造物の品質、耐久性を確保するためには、設計断面へ確実にプレストレスが導入され、供用中におけるその変動が設計で想定された範囲以内であることが重要である。通常の緊張管理では、緊張ジャッキの圧力と PC ケーブルの伸び量から摩擦の影響を推定し、設計断面へ導入されるプレストレスが評価されるが、定着後の張力の変動を計測することはできなかった。これに対して、長スパンのひずみ分布を計測可能な光ファイバーによるひずみ計測技術に着目し、光ファイバーを組み込んだ PC 鋼より線を用いることで PC ケーブル全長の張力分布を計測、評価できる技術を開発した。本報では、光ファイバーを組み込んだ PC 鋼より線による PC ケーブルの張力分布を計測する技術と、PC 橋梁上部工への適用事例について紹介する。

キーワード：光ファイバー、PC 鋼より線、張力分布、モニタリング

1. はじめに

プレストレスコンクリート（以下、PC）構造物は、必要なプレストレスが導入・維持されることが前提となっており、施工時にはプレストレスを確実に導入すること、また供用期間中にはその変動が想定された範囲内であることが求められる。一般的に、施工時における PC ケーブルの緊張管理では、シース管内の摩擦係数を仮定し、緊張ジャッキの圧力と PC ケーブルの伸び量から設計断面に導入されるプレストレス量を間接的に評価する。しかし、この方法はあくまで緊張時における管理方法であり、定着後の張力の変動については把握できない。また、任意の位置に設置して張力を直接計測することが可能な磁歪式センサー¹⁾なども実用化されているが、センサーを設置した箇所の張力しか計測できないといった課題があった。一方、PC 構造物の維持管理においては、PC ケーブルの全長にわたって必要な張力が確保されていることを確認するとともに、グラウトの充填不良などによる PC ケーブルの腐食・破断の有無を検知したり、破断に伴うプレストレスの減少量や影響範囲を把握することが重要である。

そこで、筆者らは、施工時および供用期間中における PC ケーブルの全長にわたる張力分布を計測可能な技術として、光ファイバーによるひずみセンサーを用いた計測技術を開発した。本報告では、光ファイバーを組み込んだ PC 鋼より線（以下、光ファイバー組込み式 PC 鋼より線と称する。）による PC ケーブルの張力分布を計測する技術と、PC 橋梁上部工における適用事例について述べる。

2. 光ファイバー組込み式 PC 鋼より線

2.1 光ファイバーによるひずみ計測技術

光ファイバーを用いたひずみ計測技術は多数実用化され

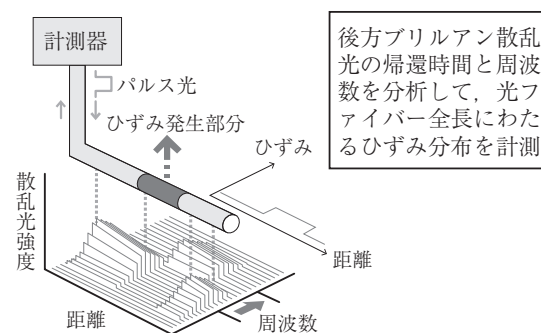


図 - 1 光ファイバーによるひずみ計測 (BOTDR 方式)

表 - 1 計測の仕様 (BOTDR 方式)

計測精度	約 ± 50 μ
最小計測間隔	約 5 cm
位置分解能	約 1 m
計測範囲	～数 km 光ファイバー全長にわたり、 任意の点の計測が可能
計測時間	約 3 分/回
配線	光ファイバー片端を計測器に接続

たものがあるが、ここではパルス光を入射したときに観測される後方ブリルアン散乱光を利用した BOTDR 方式²⁾について述べる。計測原理のイメージ図および仕様をそれぞれ図 - 1 および表 - 1 に示す。光ファイバー内に入射した光は、伝播しながらあらゆる方向に散乱するが、このうち入射方向と逆に散乱する後方ブリルアン散乱光は、入射光との波長差が散乱位置のひずみに依存することが知られている。そのため、光ファイバー内にパルス光を入射したときのブリルアン散乱光の帰還時間とその波長を分析することで、光ファイバーの全長にわたるひずみ分布を計測できる。

*1 Naoki SOGABE：鹿島建設 (株) 技術研究所

*2 Michio IMAI：鹿島建設 (株) 技術研究所

*3 Shinji NAKAUE：住友電気工業 (株) 特殊線事業部

*4 Yota HAYASAKA：リテックエンジニアリング (株) 技術本部



タイプ	裸線タイプ	ECFタイプ
概要		
	裸線表面に接着剤で光ファイバーを接着	エポキシ樹脂被覆内に光ファイバーを組込み

図 - 2 光ファイバー組込み式 PC 鋼より線

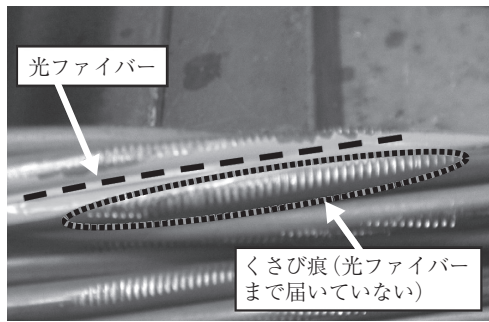


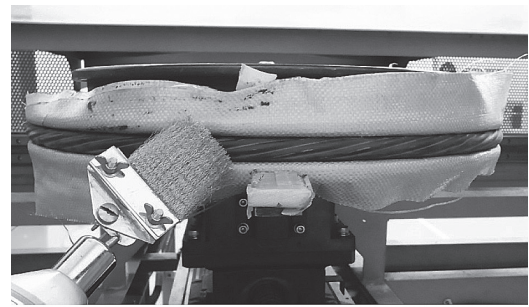
写真 - 1 定着部の状況 (裸線タイプ)

光ファイバーによるひずみ計測技術は、機械設備のモニタリングなど、他業種において 20 年以上の実績がある。また、土木分野においても、橋梁主桁のひび割れ検知や斜面表層崩壊のモニタリングなどでの適用実績がある。

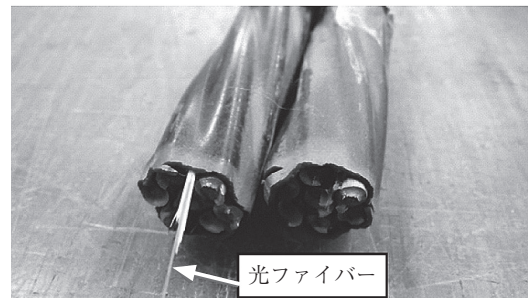
2.2 光ファイバー組込み式 PC 鋼より線による張力計測

光ファイバー組込み式 PC 鋼より線については、裸 PC 鋼より線に光ファイバーを設置するタイプ（以下、裸線タイプと称する）と、内部充填型エポキシ被覆 PC 鋼より線のエポキシ被覆内に光ファイバーを埋設するタイプ（以下、ECFタイプと称する）の 2 種類を開発した（図 - 2）。裸線タイプについては、出荷前の PC 鋼より線の表面に光ファイバーを接着剤により設置する。また、ECFタイプについては、エポキシ被覆時に光ファイバーを同時に組み込むようにしている。いずれも、光ファイバーは PC 鋼より線の表面の凹部に収まるように設置されており、PC 鋼より線の外径や表面の性状はほとんど変わることが無い。そのため、運搬・シース管への挿入時の接触や定着用くさびとの干渉による光ファイバーの損傷を防ぐことができる。一度定着を行ったのち、くさびを取り外した光ファイバー組込み式 PC 鋼より線の写真（裸線タイプの例）を写真 - 1 に示すが、定着時にもくさびの歯は光ファイバーに到達しておらず、光ファイバーを損傷させずに通常どおり緊張・定着が可能であることが確認できる。また、ECFタイプに関しては、通常の ECF 鋼より線の防食性能を確認する品質管理試験として行われるピンホール試験や引張破断試験³⁾を実施し、光ファイバーの組込みが防食性能に影響しないことを確認している（写真 - 2）。

光ファイバーと PC 鋼より線の一体性については、引張試験で検証を行っている。同試験では、長さ約 1.2 m の光ファイバー組込み式 PC 鋼より線を対象とし、2 000 kN 万



(a) ピンホール試験



(b) 引張破断試験

写真 - 2 ECF タイプの品質確認試験の状況

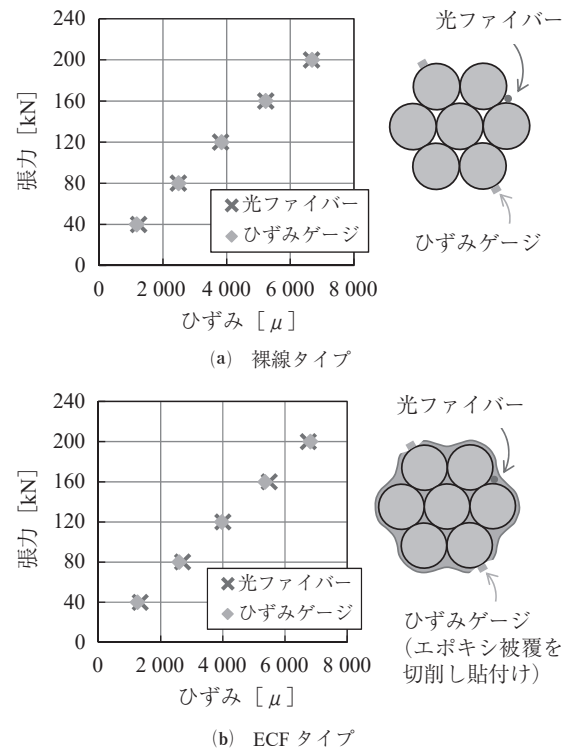


図 - 3 引張試験による光ファイバーの一体性の検証

能試験機によって張力を作用させた際のひずみについて、光ファイバーとひずみゲージによる計測結果を比較した。なお、ひずみゲージは供試体の長さ中央付近に貼り付けており、ECFタイプにおいては、長さ約 1 cm の範囲のエポキシ樹脂被覆を切削し、側線の表面を露出させたうえで貼り付けた。計測結果を図 - 3 に示すが、荷重とひずみの関係はほぼ線形であり、光ファイバーとひずみゲージの計測結果はおおむね一致していることが分かる。このように、

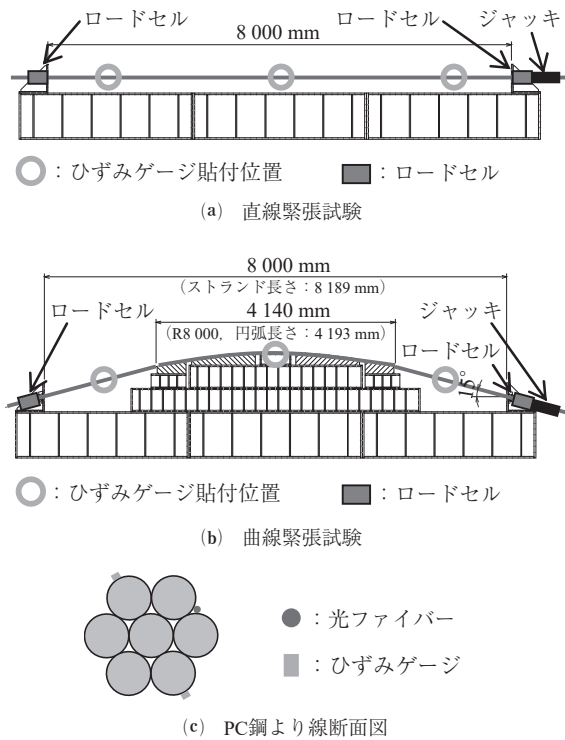


図 - 4 計測性能試験の概要

裸線タイプではエポキシ系接着剤を介して、ECFタイプではエポキシ樹脂被覆を介して、それぞれ光ファイバーがPC鋼より線に接着され、両者が滑らずに一体化して挙動することが確認されている。

緊張時および供用時に光ファイバーによるひずみ計測を行うことで、PC鋼より線の全長にわたるひずみ分布が把握でき、それを張力に換算することで張力分布を評価することができる。光ファイバーは、高い耐久性を有しているため、人が立ち入り可能な場所まで延伸しておくことで、随時、張力分布を再計測することができ、定期的な計測により、橋梁の供用中の変動を評価したり、PCケーブルの異常の有無や位置を検知したりするなど、維持管理に活用できる。

3. 計測性能の検証

3.1 張力分布の計測性能の検証実験

実構造物を想定した長さや曲線配置された場合においても、光ファイバーとPC鋼より線が滑ることなく一体として挙動してひずみ分布を計測可能であることの確認と、計測精度の検証を目的として、光ファイバー組込み式PC鋼より線の緊張試験を実施した。

緊張試験の概要を図 - 4 に示す。試験ケースは、裸線タイプの7本より光ファイバー組込み式PC鋼より線(1S15.2)を直線状に設置したもの(以下、直線緊張試験と称する)、およびPC橋梁上部工の柱頭部におけるウェブケーブルを想定し、曲げ半径8000mmで曲線状に設置したもの(以下、曲線緊張試験と称する)の2ケースとした。緊張時には、所定の緊張力(緊張ジャッキの圧力)に達するごとに、光ファイバーによってひずみ分布を計測し

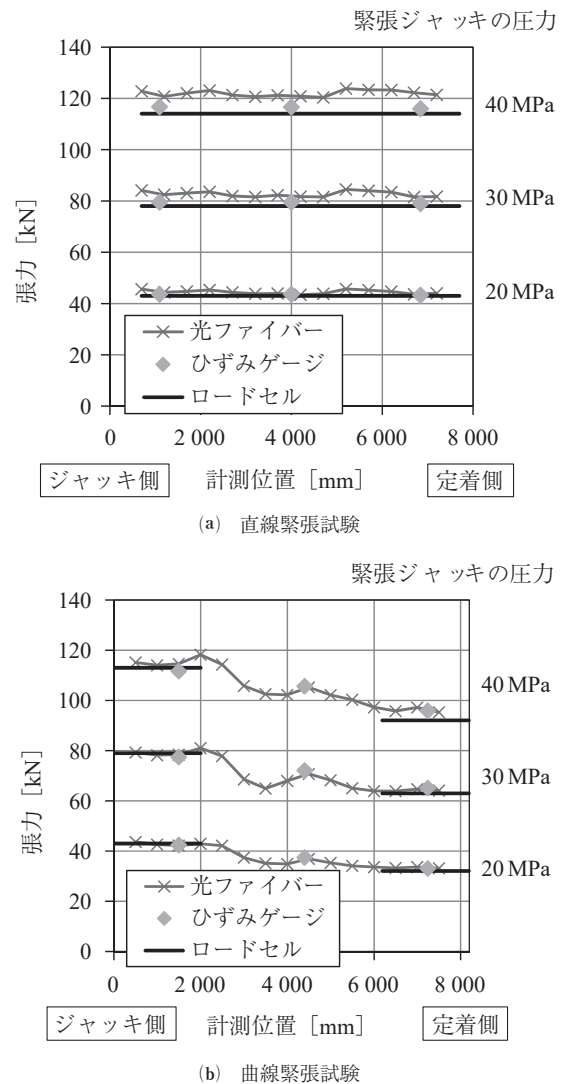


図 - 5 光ファイバー組込み式PC鋼より線緊張試験結果

た。計測精度の検証のため、図 - 4 中に示す位置のPC鋼より線表面の凸部にひずみゲージを貼り付け、両端部に設置したロードセルと併せて計測を行った。本試験に先立ち、直線状に配置した光ファイバー組込み式PC鋼より線を対象に、約60kN(応力:約433N/mm²相当)までの範囲で試験緊張を行い、その際の応力-ひずみ関係を線形近似することで見かけ上の弾性係数(221kN/mm²)を算定した。本試験で計測されたひずみデータは、この見かけ上の弾性係数を用いて張力に換算し、初期緊張時(緊張ジャッキの圧力7.5MPa)からの増分として整理した。

図 - 5 に、直線緊張試験および曲線緊張試験の結果を示す。なお、曲線緊張試験におけるロードセルの計測値は、張力が一定となる直線区間のみプロットしている。

直線緊張試験結果(図 - 5(a))を見ると、光ファイバーによる計測値はほぼ一定となっており、ひずみゲージによる計測値と比較して最大で約4%の差異が見られるが、両計測値はおおむね一致していることが分かる。また、曲線緊張試験結果(図 - 5(b))でも、光ファイバーによる計測値は、曲線区間におけるシーストとの摩擦による張力の

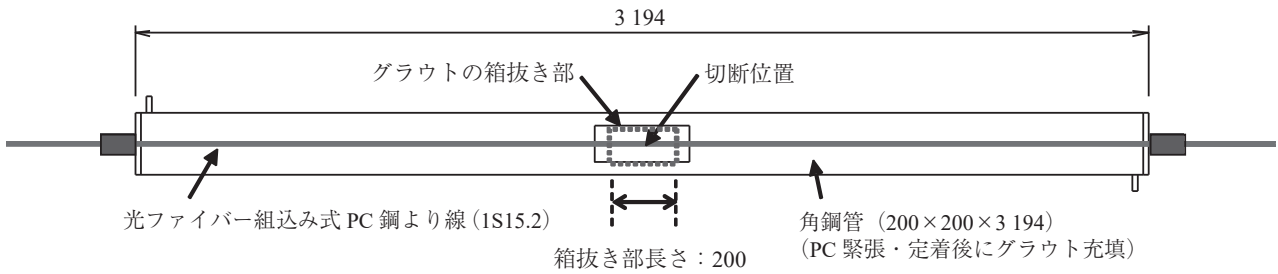


図 - 6 光ファイバー組込み式 PC 鋼より線切断試験概要 (単位: mm)

ロスを含め、ひずみゲージやロードセルによる計測値とよく一致していることが分かる。

以上より、光ファイバー組込み式 PC 鋼より線を用いることで、PC 橋梁上部工の柱頭部内ケーブルを想定した長さや曲線配置された場合でも、緊張時の光ファイバーは PC 鋼より線と一体として挙動し、ひずみ、張力分布を計測可能であることが確認された。

3.2 PC 鋼より線の破断と影響範囲の検知実験

PC ケーブルの腐食・破断が生じた際に、本計測技術によってその発生と影響範囲を検知・評価できる可能性がある。そこで、周囲にグラウトが充填された状態で光ファイバー組込み式 PC 鋼より線を切断した際のひずみ分布の変化を計測することで、その検知性能を検証した。

図 - 6 に試験概要を示す。200×200×3194 mm、板厚 16 mm の角鋼管 (SS400 材) 内に裸線タイプの 7 本より光ファイバー組込み式 PC 鋼より線 (1S15.2) を張力 200 kN で緊張後、端部を定着し、鋼管内にグラウト材を充填した。角鋼管中央の両側面には 120×300 mm の開口を設け、開口内のグラウトに長さ 200 mm の箱抜きを行うことで、PC 鋼より線の中央付近が露出される形状とした。グラウト硬化後に、PC 鋼より線の露出部内において、光ファイバーを避けながら、小型グラインダを用いて素線を 1 本ずつ切断し、ひずみ分布の変化を光ファイバーにより計測した。なお、使用したグラウト材は高流動無収縮グラウト材で、切断試験時の圧縮強度は 100 N/mm²、弾性係数は 23.1 kN/mm² である。

光ファイバー組込み式 PC 鋼より線の切断状況を写真 - 3 に、切断位置付近におけるひずみ分布の内、定着後 (切断前)、素線 2 本切断後、4 本切断後および 6 本切断後の計測結果を図 - 7 に示す。2～4 本の素線を切断した時点では、切断に伴って切断位置付近のひずみが低下しており、その影響範囲が左右それぞれ 200～300 mm 程度であることが分かる。一方、6 本の素線切断後には、切断の影響範囲が図中右方向に 700 mm 程度まで広がっており、切断位置付近におけるひずみの極小値は 4000 μ 程度まで回復している。これは、切断時の衝撃や上述したような素線の挙動によってグラウトと残存する素線との間の付着切れが進行し、残存する 1 本の素線の張力が、付着が切れた領域で平均化されたためであると考えられる。

本試験では PC 鋼より線の素線を 1 本ずつ物理的に切断しており、実際の構造物における腐食による破断を再現したものではないが、本計測技術を用いて PC ケーブル全長

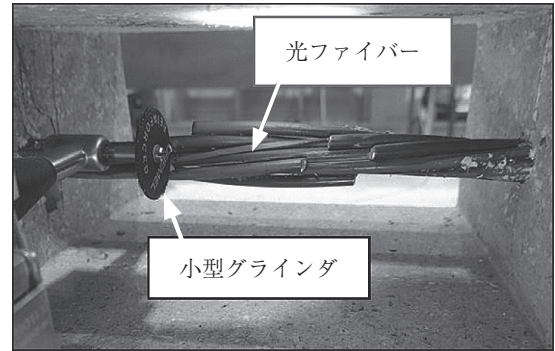


写真 - 3 切断部の状況 (素線 4 本目切断後)

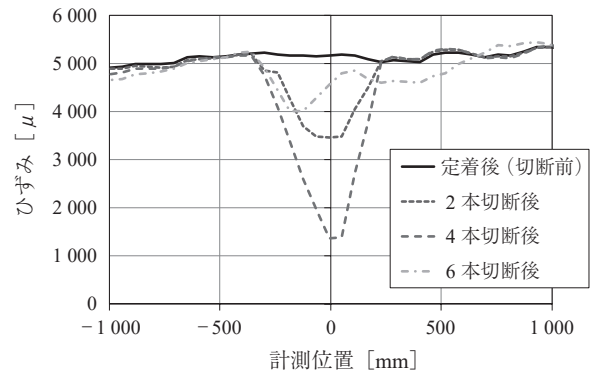


図 - 7 素線の切断によるひずみ分布の変化

にわたるひずみ分布の変動を評価することで、任意の位置における PC ケーブルの異常や影響範囲を検知できる可能性が確認された。

4. PC 橋梁上部工における計測事例

4.1 内ケーブルへの適用

国道 115 号月館高架橋上部工工事 (発注者: 国土交通省東北地方整備局)⁴⁾ の柱頭部のウェブケーブル (延長約 13 m) および P1-P2 径間の下床版ケーブル (延長約 36 m) を対象として、裸線型の光ファイバー組込み式 PC 鋼より線を含む PC ケーブル (12S15.2) を適用し、張力分布の計測を行った (図 - 8)。

まず、製作工場にて、表面に光ファイバーを設置した光ファイバー組込み式 PC 鋼より線 (写真 - 4 (a)) を現場へ搬入した。現場では、光ファイバー組込み式 PC 鋼より線を含む PC ケーブルを一括してシース内に挿入し、通常と同じ方法で定着具、緊張ジャッキを設置した。緊張前に光

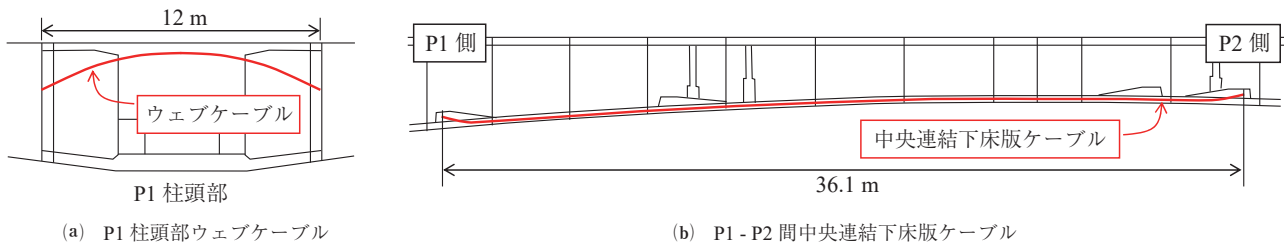


図 - 8 PC 上部工における内ケーブルへの適用

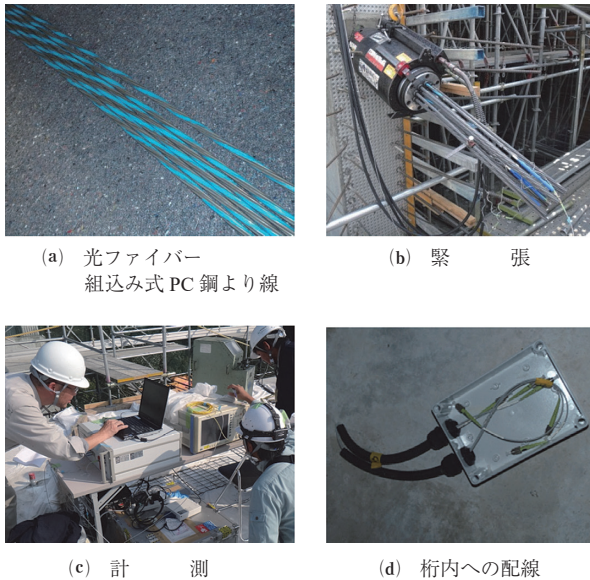


写真 - 4 内ケーブルでの施工状況

ファイバー組込み式 PC 鋼より線の端部に設けた計測用コネクタと計測機器を、配線用の光ファイバーを介して接続したのち、緊張および計測を行った（写真 - 4 (b), (c)）。緊張終了後は、光ファイバーを残して PC 鋼より線の余長を切断し、グラウトキャップを設置した。なお、緊張力の再計測を可能とするため、計測に用いた光ファイバー端部の計測用コネクタをグラウトキャップから取り出し、その先端を桁内まで延長して計測機器を再接続できるようにした（写真 - 4 (d)）。

図 - 9 に、P1 柱頭部のウェブケーブルにおける最終緊張時および定着後の張力分布を示す。図中の計算値は、最終緊張時の張力分布から評価された見かけの摩擦係数とケーブルの配置形状を用いて、緊張計算と同じ手法で算出したものである。また、設計値は、設計計算書に記載されている各断面での必要とされる張力を示したものである。

図 - 9 から全長にわたる張力の分布が計測できており、各断面における設計緊張力以上の張力が導入されていることが確認できる。曲げ角度が大きなウェブケーブルでは、緊張時には中央部に向かって張力が低減し、定着後は逆に中央部の張力が残存する傾向が示されており、張力に対する摩擦の影響が評価できることが分かる。なお、緊張時および定着後の張力の分布は、計算結果と整合しており、想定どおりに張力が導入できていることが確認できた。

図 - 10 に P1 - P2 間中央連結下床版ケーブルの計測結果

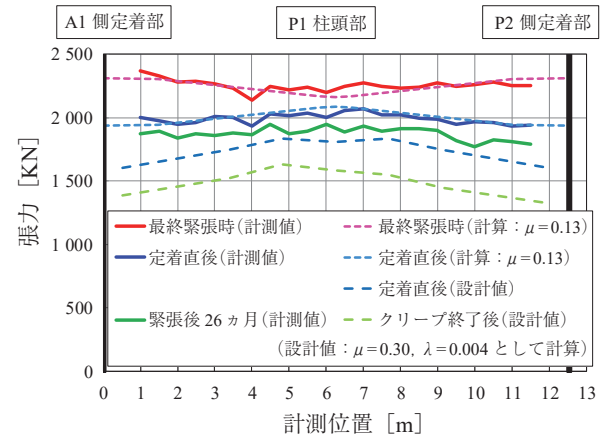


図 - 9 P1 柱頭部ウェブケーブルの計測結果

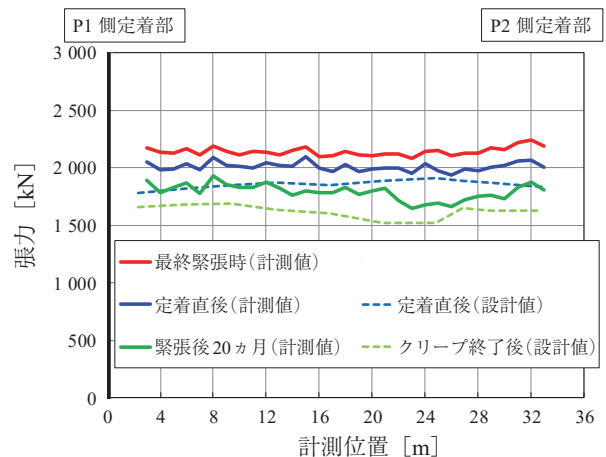


図 - 10 P1 - P2 間中央連結下床版ケーブルの計測結果

を示す。P1 柱頭部の内ケーブルの約 3 倍となる延長であるが、同様に設計緊張力以上の張力の導入が計測、評価できていることが分かる。適用した下床版ケーブルは、P1 側よりも P2 側の方が曲げ角度が小さいため、P2 側の方が摩擦による影響が小さい。計測結果でも定着に伴うセットロスの大きさや影響範囲が、P2 側の方が大きい傾向が示されており、延長の長い内ケーブルにおいても、摩擦やセットロスが張力に及ぼす影響が計測できることが確認できた。

本橋の施工完了後、供用開始直前の 2018 年 1 月に、各ケーブルから延長して桁内に残置した再計測用コネクタに計測器を接続し、再計測を行った。なお、ウェブケーブル、下床版ケーブルの施工時からの経過期間は、それぞれ約 26 ヶ月、20 ヶ月である。その結果、緊張時と同様に全長

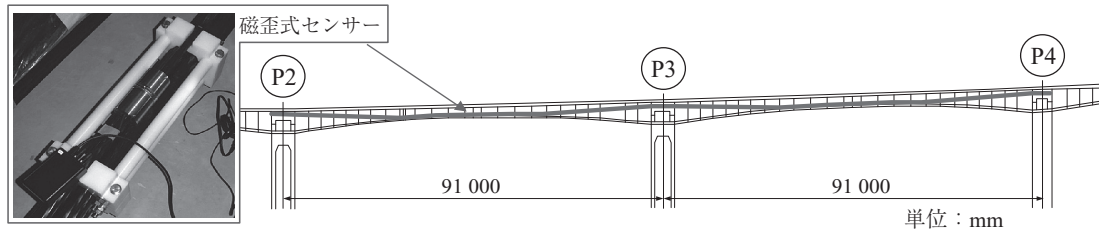


図 - 11 PC 上部工における外ケーブルへの適用

にわたる張力の分布が再計測可能であり、クリープ終了時点において必要とされる張力を全長にわたり確保していることが確認できた。

4.2 外ケーブルへの適用

国道 115 号月館高架橋上部工工事（発注者：国土交通省東北地方整備局）P2 - P4 径間の外ケーブル（19S15.2, ケーブル長：約 190 m, 図 - 11）を対象として、ECF タイプの光ファイバー組込み式 PC 鋼より線を適用し、張力分布の計測を行った。また、P2 - P3 径間の中央付近にて、磁歪式センサー¹⁾による計測を併せて行い、計測結果の比較を行った。

図 - 12 に外ケーブルでの計測結果を示す。延長が約 190 m である外ケーブルにおいても、ECF タイプの光ファイバー組込み式 PC 鋼より線によって、全長にわたる張力の分布が計測できており、各断面においてその大きさが設計緊張力よりも大きく、必要な張力が導入できていることが確認できる。また、緊張端から偏向部を通過して中央部（P3 付近）に至る過程で、摩擦によって張力が減少していく傾向も計測できている。定着後 19 ヶ月が経過した時点で再計測を実施した結果、内ケーブルと同様に全長にわたり設計値以上の張力が確保されていることが確認できた。また、図 - 13 に示す磁歪式センサーによる計測結果との比較においても、すべての計測結果において両者の結果がほぼ一致しており、光ファイバーで外ケーブルの張力を精度良く計測できることが検証できた。

5. おわりに

光ファイバー組込み式 PC 鋼より線を用いて、PC ケーブルの全長にわたるひずみ、および張力分布を計測できる技術を開発し、PC 橋梁上部工への適用を図った。本技術は、PC ケーブルの張力分布を施工時から供用時まで同一の光ファイバーで計測できる。そのため、施工時は PC ケーブルの全長にわたるプレストレスの確認による品質確保、橋梁の供用時には PC ケーブルの異常の検知や、大規模な地震など大きな外力を受けた PC 構造物の健全性の定量的な評価に活用できると考えられる。今後は、本技術の現場への適用を拡大するとともに、本技術を活用した PC 構造物の維持管理の高度化に向けた検討を進めていく予定である。

本技術は、鹿島建設(株)、住友電気工業(株)、ヒエン電工(株)で共同開発されたものである。開発にあたっては、関係各位に多大なご協力をいただいた。また、国土交通省東北地方整備局の関係者の方々には、本技術を現場へ適用するのにあたり、ご理解とご協力をいただいた。ここに深甚の

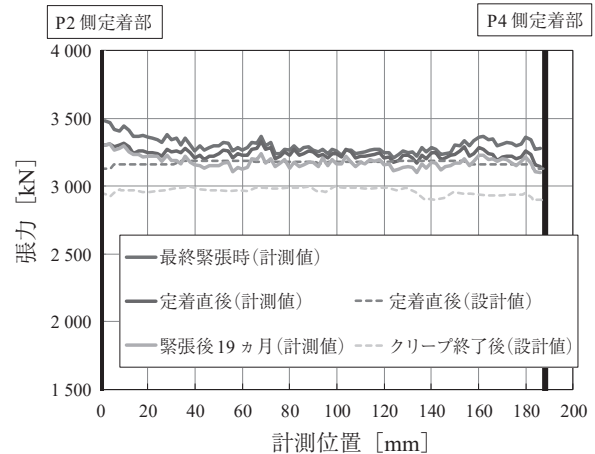


図 - 12 P2 - P4 間外ケーブル計測結果

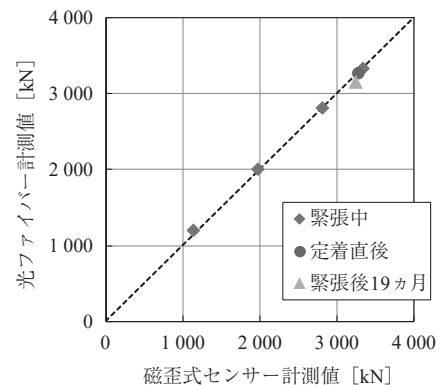


図 - 13 磁歪式センサー計測値との比較

謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 國富康志, 只熊公義, 及川雅司, 石塚 純: PC 箱桁橋における外ケーブル張力の継続計測 - 東九州自動車道平田川橋 -, 第 22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.363-365, 2013.
- 2) Leung, Christopher KY, et al: Review: optical fiber sensors for civil engineering applications, Materials and Structures, Vol.48, No.4, pp.871-906, 2015.
- 3) 土木学会: 内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線の品質規格(案)(JSCE-E 141-2018), コンクリート標準示方書【規準編】, pp.105-109, 2018.
- 4) 南雲広幸, 毛利浩二, 盛田行彦, 曾我部直樹, 今井道男, 佐藤正: 復興支援道路 月館高架橋上部工の施工, 橋梁と基礎, 2016 年 12 月号, pp.5-10, 2016.

【2020 年 2 月 28 日受付】