

光ファイバを用いた PC 緊張力の計測技術

鹿島建設(株) 正会員 ○曾我部直樹 正会員 山本 徹
 正会員 山野辺慎一 正会員 今井 道男
 正会員 大窪 一正
 住友電工スチールワイヤー(株) 正会員 松原 喜之 正会員 中上 晋志
 ヒエン電工(株) 千桐 一芳

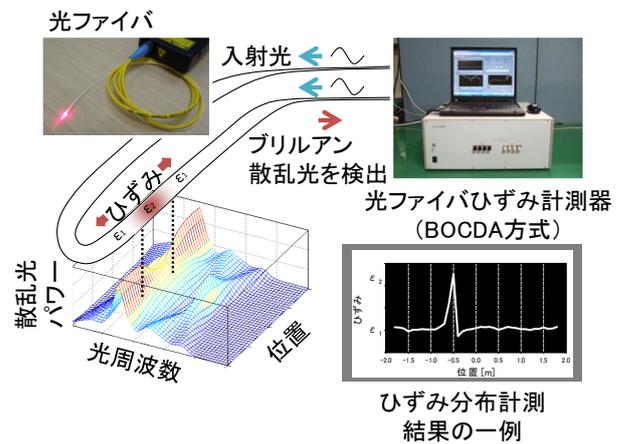
1. はじめに

PC 橋梁の品質，耐久性を確保するためには，各設計断面へ確実に PC 緊張力が導入され，供用中の変動が想定以内であることが重要である．そのために施工時における緊張管理では，PC ケーブル端部におけるジャッキ油圧と緊張材の伸び量から PC ケーブルの摩擦，および設計断面への導入力を評価する．一方，近年は，磁歪式センサーを着目する断面に設置して，緊張時および供用中の PC 緊張力を計測する技術等も開発されており，PC 緊張管理やヘルスマonitoring に活用される事例も増えつつある．

これに対し筆者らは，長スパンにわたるひずみ分布を計測可能な光ファイバによるひずみ計測技術に着目し，PC ケーブルへ適用することで PC 緊張力分布の計測を試みた．光ファイバによる PC ケーブルのひずみ計測については，勝木らが実験による検討を行っているが，実構造物に適用された例は無かった．本研究では，光ファイバを組み込んだ PC ケーブルについて各種室内試験により計測性能を確認した後，実際の PC 橋梁上部工工事において，柱頭部のウェブ・上床版ケーブルおよび中央径間の下床版ケーブルを対象とした PC 緊張時の導入力分布の計測を行った．ここでは，光ファイバによる PC 緊張力分布の計測性能の検証実験，および PC 橋梁現場における適用実績について報告する．

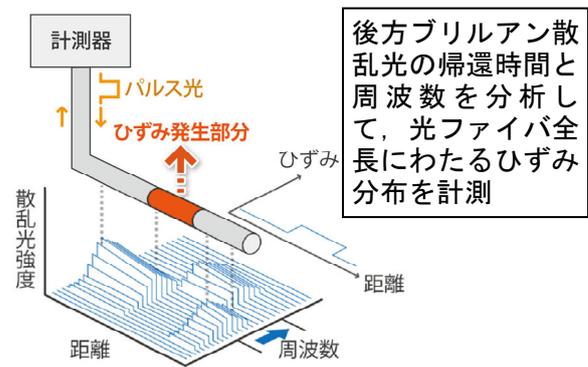
2. 光ファイバによる PC 緊張力の計測技術

光ファイバを用いたひずみ計測技術は多数実用化されたものがあるが，本研究では，光ファイバ内で対向する光の間で生じる誘導ブリルアン散乱光を利用した BOCDA 方式，およびパルス光を入射したときに観測される後方への自然ブリルアン散乱光を利用した BOTDR 方式を使用した²⁾．それぞれの計測のイメージ図および仕様を図-1 に示す．両方式共に光ファイバの



計測精度	約±50μ
位置分解能	数 cm
計測範囲	～200m (光ファイバ全長に渡り，任意の点の計測が可能)
配線	光ファイバ両端を計測器に接続

(a) BOCDA 方式



計測精度	約±50μ
位置分解能	約 1m
計測範囲	～数 km (光ファイバ全長に渡り，任意の点の計測が可能)
配線	光ファイバ片端を計測器に接続

(b) BOTDR 方式

図-1 光ファイバによるひずみ計測技術，仕様

キーワード 緊張管理，PC 緊張力，光ファイバ，維持管理

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-6707

全長にわたるひずみ分布を計測することが可能であるが、位置分解能や計測範囲、配線方法で特徴があるものである。

光ファイバ組込み式 PC ケーブルについては、裸 PC ケーブルに光ファイバを設置するタイプ（以下、裸線型と称する）と、エポキシ被覆型 PC ケーブルのエポキシ被覆内に光ファイバを埋設するタイプ（以下、ECF 型と称する）の 2 種類を開発した（図-2）。裸線型については、出荷前の PC ストランドの表面に光ファイバを接着剤により設置する。また、ECF 型については、エポキシ被覆時に光ファイバを同時に組み込むようにしている。いずれも、光ファイバはより線表面の凹部に収まるように設置されており、PC ストランド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・挿入時の接触や定着用ウェッジとの干渉による損傷が生じず、通常の PC ケーブルと同様な緊張作業の流れの中で計測を行うことが可能である。

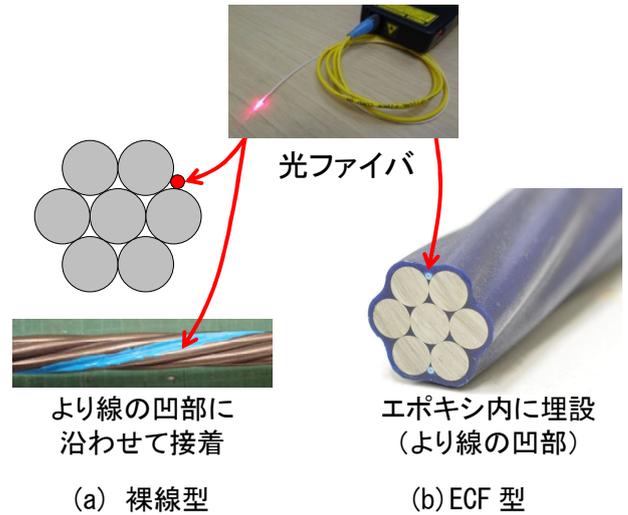
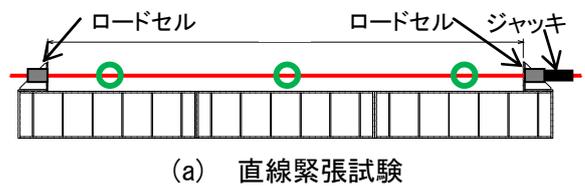
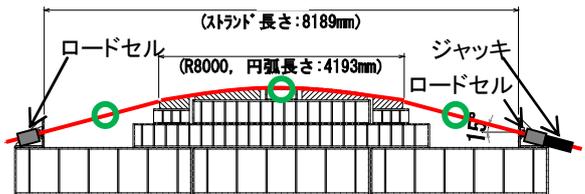


図-2 光ファイバ組込み式 PC ケーブル



(a) 直線緊張試験



(b) 曲線緊張試験

○ : ひずみゲージ貼付位置 ■ : ロードセル

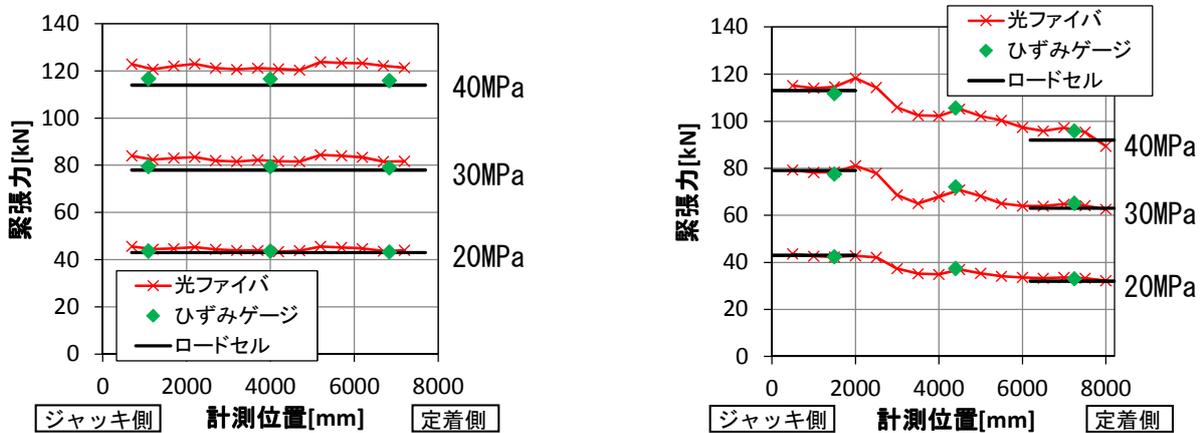
図-3 シングルストランドの緊張・計測実験

3. 計測性能の実証実験

3. 1 シングルストランドの緊張・計測実験

光ファイバ組込み式 PC ケーブルによるひずみ計測技術の基本的な計測精度の確認を目的として、シングルストランド (1S15.2) を用いた直線緊張試験、および曲線緊張試験を実施した。試験状況を図-3に示す。緊張中、所定の緊張力 (油圧) に達した時点でジャッキを固定し、光ファイバによりひずみ分布を計測した。試験に使用した光ファイバ組込み式 PC ケーブルは裸線型であり、実験では、素線の凸部に貼りつけたひずみゲージとケーブル両端部に設置したロードセルによって、ひずみ、緊張力を計測して、光ファイバによる計測値 (BOCDA 方式) との比較を行った。なお、計測データは、初期緊張時 (ポンプ圧 7.5MPa) からの増分として整理した。

図-4に実験で得られた緊張力分布の計測値を示す。光ファイバおよびひずみゲージによる緊張力の計測値は、



(a) 緊張力分布 (直線緊張試験結果)

(b) 緊張力分布 (曲線緊張試験結果)

図-4 シングルストランドの緊張計測実験結果

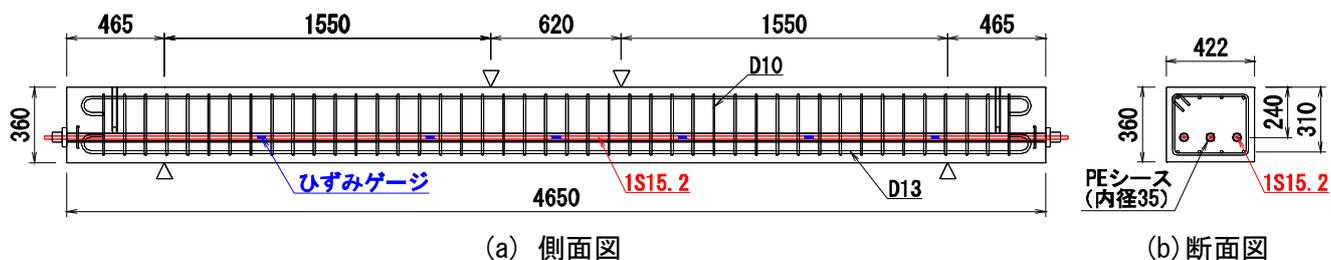


図-5 PC 梁試験体図

事前に実施した試緊張で得られた緊張力とひずみの関係を用いて換算したものである。なお、本実験の直線区間ではPCケーブルに作用する摩擦が無いいため、同区間のロードセルによる計測値は一定としてプロットした。

直線緊張試験では、光ファイバによる計測値は、全体的にばらつきも小さく、ひずみゲージによる計測値とも良く一致している。また、曲線緊張試験では、曲線部における摩擦による影響でジャッキ側から定着側にかけて緊張力が低下する傾向も含め、ひずみゲージと光ファイバの計測値が一致していることが確認できる。しかし、直線緊張試験に比べ、曲線部における光ファイバによる計測値のばらつきが大きくなっている。この原因としては、PCストランドは複数の素線が撚り合わされた構造であるため、曲げられる際に隣り合う素線間に相対的なずれが生じ、それが素線間に接着された光ファイバの計測結果に局所的に影響していること等が考えられる。

以上より、光ファイバ組込み式PCケーブルの緊張時に光ファイバがPCケーブルと一体化して挙動し、そのひずみを計測することによりPCケーブルの緊張力分布を評価できることが確認された。

3. 2 PC 梁試験体に対する曲げ荷重実験

光ファイバ組込み式PCケーブルを内ケーブルに用いたPC梁を想定し、緊張終了後の緊張力の変動に対する計測性能を検証するために、PC梁試験体に対する曲げ荷重実験を実施した。試験体は、ポストテンション方式のPC梁試験体であり、光ファイバ組込み式PCケーブルを緊張・定着した後、ポリエチレンシース内に充てんしたグラウトが硬化した後に曲げ荷重を行った。使用した光ファイバ組込み式PCケーブル（1S15.2、裸線型）は3本である。試験体形状を図-5に、使用した材料の物性値を表-1にそれぞれ示す。また、PCケーブルには図-5に示す位置にひずみゲージを設置し、光ファイバによるひずみの計測値（BOCDA方式）と比較した。

曲げ荷重実験は、5,000 kN圧縮試験機を用いて実施し、事前に計算により求めた引張縁のコンクリート応力が0 N/mm²となる荷重（55 kN）、および目視によりひび割れが確認された荷重（125kN）でそれぞれ5回ずつ繰返し荷重を行った後、終局まで単調荷重を行った。光ファイバによるひずみ計測は、繰返し荷重中は目標荷重への5回目の到達時、単調荷重中は事前に計算により求めたPCケーブルの引張応力が0.84 f_u （ f_u はミルシート記載の実引張強さ）となる荷重（267 kN）への到達時で実施した。

表-1 材料物性値

材料	降伏強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	引張強度 N/mm ²
主鉄筋 D13 SD345	380	193	543
PCケーブル 1S15.2B	1784*1	192	1962

※1：0.2%耐力

材料*2	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	割裂引張 強度 N/mm ²
コンクリート 材齢 73 日	56.5	35.9	3.80
グラウト 材齢 13 日	96.8	22.6	3.06

※2：載荷時の材齢

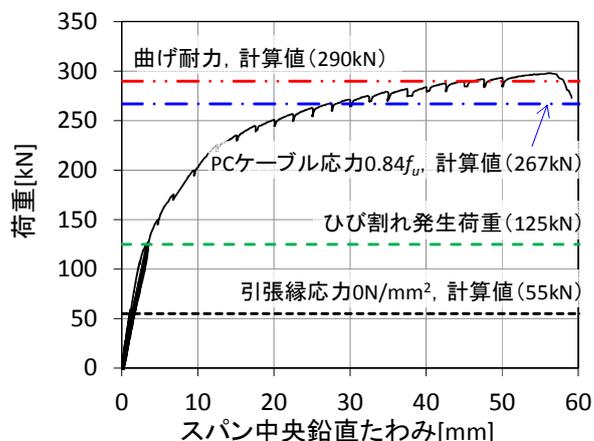


図-6 荷重-たわみ関係

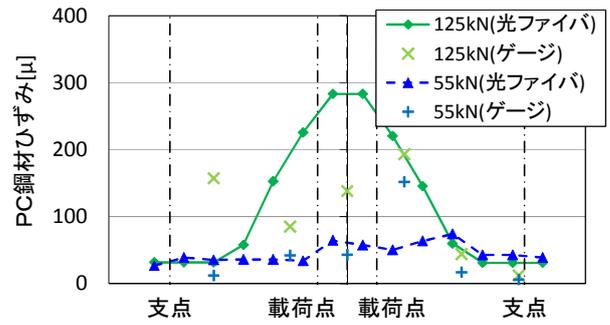
図-6に、荷重-たわみ関係を示す。表-1に示した値を用いてコンクリート標準示方書に従って算定した曲げ耐力は290 kNであったのに対し、実験により得られた最大耐力は298 kNであった。図-7に、各繰返し载荷5回目到達時、およびPCケーブルの引張応力度が $0.84f_u$ 時におけるPCケーブルのひずみ分布を示す。ひずみは、曲げ载荷開始後におけるひずみの増分を示したものである。ひび割れ発生荷重相当までの計測結果では、ひずみゲージと光ファイバによる計測結果に差が生じている。ひずみの増分が 300μ 程度であるのに対して、光ファイバの計測精度が $\pm 50\mu$ であるために、相対的な誤差が大きくなったためである。一方、PCケーブルの引張応力度が $0.84f_u$ 時の計測結果では、ひずみゲージの計測結果を補完するような光ファイバによるひずみ分布の計測結果が得られている。なお、载荷荷重293 kN、鉛直たわみ50 mmでの計測の直後、光ファイバが破断したが、最終計測時のPCケーブルひずみは緊張時のポンプ圧5MPa時からの増分で約 $11,000\mu$ であった。このことから、PC梁部材内でグラウトを充てんした状態において、光ファイバは曲げ载荷によるPCケーブルひずみの増減に追随し、そのひずみが $10,000\mu$ 程度となる領域まで計測可能であることが確認された。

硬化したグラウト内においても光ファイバによってPCケーブル全長の緊張力分布が計測できることは、ひび割れやPCケーブルの損傷による局所的な緊張力の変動の有無、位置、大きさの評価に繋げることができる。また、PC橋梁の場合、大規模な地震を経験した後の緊張力の変動を計測することで、橋梁全体の健全性を定量的に評価することも期待できる。本技術は、施工時における緊張管理での活用に加えて、定期点検や臨時点検など維持管理における計測技術としても活用できると考えられる。

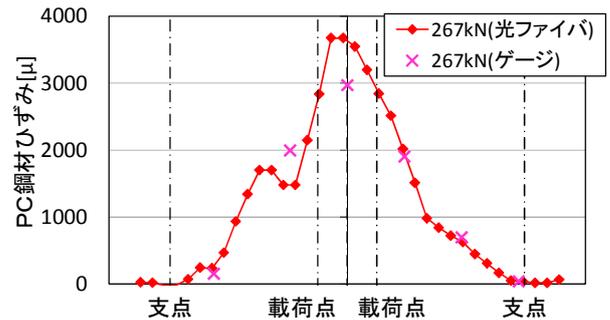
4. PC 橋梁上部工工事での実適用

4. 1 裸線型光ファイバ組込み式PCケーブルの適用

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）の柱頭部のウェブ、上床版ケーブル（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組込み式PCケーブル（12S15.2）を適用し、緊張時におけるPC緊張力分布の計測を行った（図-8、図-9）。



(a) 55kN (5 回目), 125kN (5 回目) 時



(b) 267kN (PC ケーブル応力 $0.84f_u$) 時

図-7 曲げ载荷時の PC ケーブルのひずみ分布

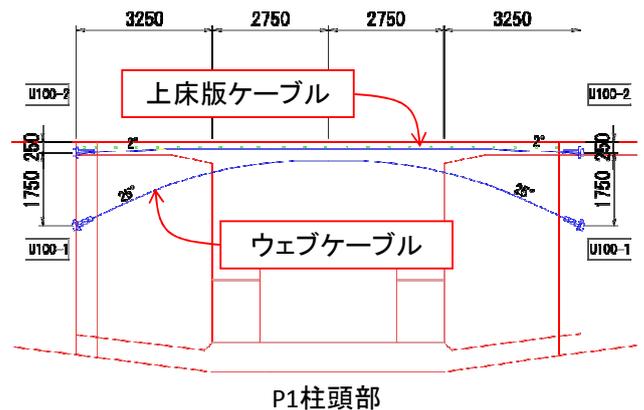


図-8 P1 柱頭部での適用ケーブル

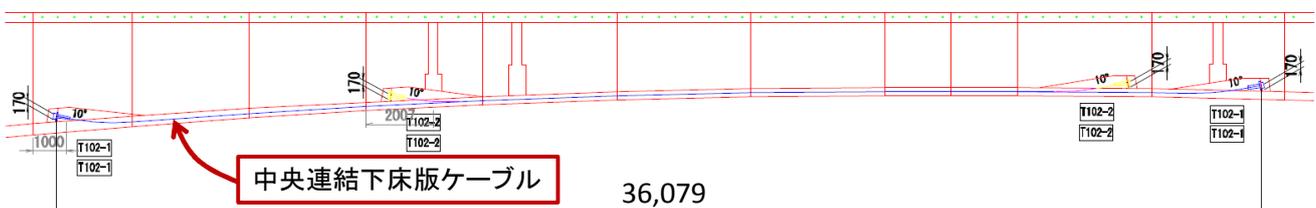


図-9 P1-P2 径間での適用ケーブル

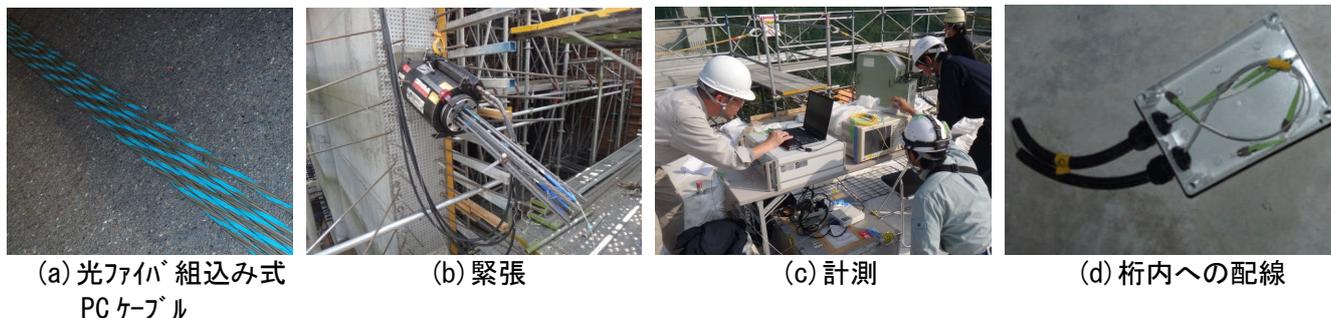
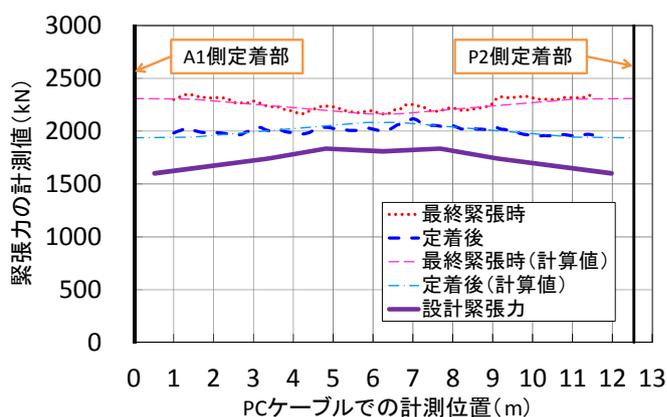


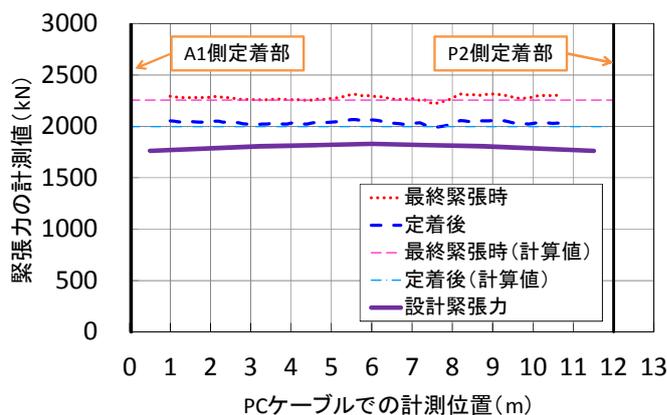
図-10 裸線型の内ケーブルへの適用状況

PCケーブルの製作工場にて、表面に光ファイバを設置した光ファイバ組込み式PCケーブル（図-10(a)）を現場へ搬入した。現場では、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PCケーブル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を介して接続した後、緊張および計測を行った（図-10(b), (c)）。緊張終了後は、光ファイバを残してPCケーブルの余長を切断し、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（図-10(d)）。

図-11, 図-12に最終緊張時および定着後の緊張力分布を、設計緊張力（設計計算書に記載された各断面で必要とされる導入緊張力）と併せて示す。延長が約13 mであるウェブ、上床版ケーブルおよび延長が約36 mの下床版ケーブルともに、緊張力の分布が計測できており、各断面において設計緊張力以上の緊張力が導入されていることが確認できる。曲げ角度が大きくなウェブケーブルでは、緊張時には中央部に向かって緊張力が低減し、定着後は逆に中央部の緊張力が残存する傾向が示されており、緊張力に対する摩擦の影響が計測、評価できることが分かる。また、下床版ケーブルでは、柱頭部の計測結果に比べると若干、ばらつきが見られるが、曲げ角度が緩やかで摩擦の影響が少ないP2側の定着部からの定着に伴うセットロス大きさや影響範囲が、P1側に比べて大きい傾向が示されており、定着時の緊張力の変動に対する摩擦の影響が計測さ



(a) ウェブケーブル



(b) 上床版ケーブル

図-11 ウェブ、上床版ケーブルでの計測結果

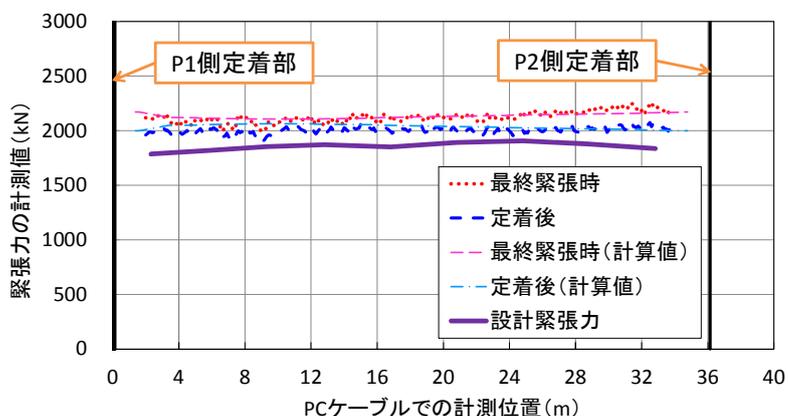


図-12 下床版ケーブルの計測結果

れている。

図-11, 図-12には, 最終緊張時の緊張力分布から評価された見かけの摩擦係数とPC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緊張力分布についても示している. 計測結果から評価された摩擦係数は, ウェブケーブルで0.13, 上床版ケーブルで0.00, 下床版ケーブルで0.08となった. 同摩擦係数を用いた計算結果は, 定着後の計測結果とも良く一致しており, 緊張計算で想定されているとおりに緊張力が導入できていることが確認できた.

4. 2 ECF型光ファイバ組込み式PCケーブルの適用

国道45号長部高架橋上部工工事(発注者:国土交通省東北地方整備局)の柱頭部上床版ケーブル(12S15.2)にECF型の光ファイバ組込み式PCケーブルを適用した. なお, 同橋では, 高耐久化を目的として内ケーブルにエポキシ被覆型PCケーブルを適用している.

ケーブルの挿入から緊張・定着までは, 前節で述べた裸線型と同様に施工した(図-13(a), (b)). 図-2に示すとおり, ECF型では, エポキシ被覆内にファイバを埋設している. そのため, 緊張終了後における再計測を可能にするために, 現場にてPCケーブルの余長部分のエポキシ被覆を除去して光ファイバを取り出した後(図-13(c), (d)), 計測用コネクタを桁内まで延長した. なお, 計測結果については, 月舘高架橋での裸線型の実績と同様に, 全長に亘る実導入力分布が計測できることを確認している. 本実績により, PC橋梁上部工工事において光ファイバ組込み式エポキシ被覆型PCケーブルを適用し, ケーブル製作から現場計測, 緊張後の随時計測までの作業が実施できることを確認した.

5. まとめ

ひずみ分布が計測可能な光ファイバをPCケーブルに組み込み, PCケーブル全長に亘る緊張力分布を計測する技術を開発した. 本技術の特徴をまとめると, 以下のとおりである.

- ・ PCケーブルの全長にわたるひずみ分布を計測可能であるため, 着目断面を含む任意の断面における実導入力や摩擦による影響を評価できる.
- ・ 緊張後に光ファイバを桁内等へ延伸し, 端部を計測機器に接続可能な状態としておくことで, 随時の再計測が可能となる. そのため, 供用中の導入力の変動やPCケーブルの異常の有無・位置の検知等, 維持管理に活用できる.
- ・ 光ファイバは電磁的ノイズに強く, 化学的に安定しており, 高い耐久性を有している. ひずみ計測技術としては, 他業種で20年以上の実績がある.

今後, 本技術がPC構造物の施工および維持管理の高度化, 効率化の一助となれば幸いである.

参考文献

- 1) 松崎, 勝木, 矢島: “光ファイバを用いたコンクリート構造物のひずみ管理に関する基礎的研究”, コンクリート工学会年次論文集, Vol.23, No.1, pp.637-642, 2001
- 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.

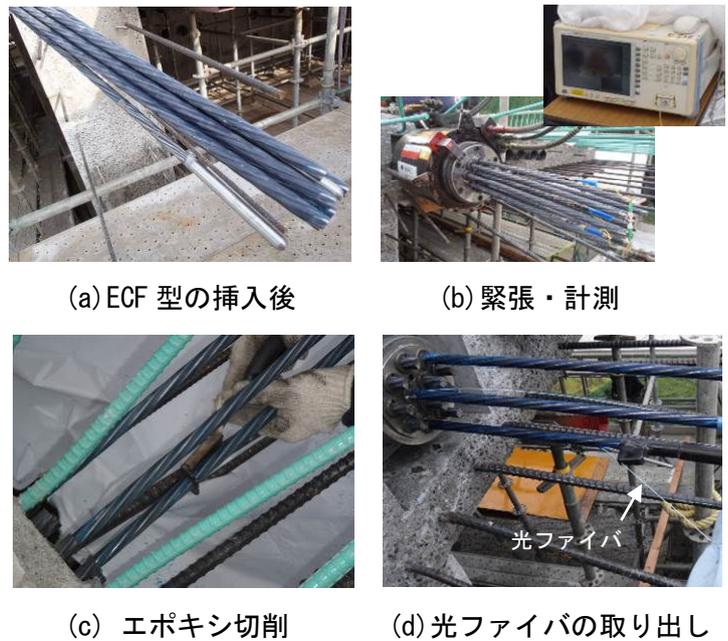


図-13 ECF 型の内ケーブルへの適用状況