

## 光ファイバーを用いたPC緊張力計測技術

鹿島建設(株)	工修	○大窪	一正
鹿島建設(株)	Ph. D.	今井	道男
ヒエン電工(株)	正会員	千桐	一芳
住友電工スチールワイヤー(株)	正会員	工修	中上 晋志

Abstract : In order to ensure performance of PC structures during the service period, PC-tension stress induced at the construction time needs to be in accordance with design. Furthermore, monitoring variation of the tension stress during the service of the structures is essential. In this regard, the authors have developed a technology in which high durability optical fiber gauges were attached on whole length of PC cables so that distribution of tension stress on the whole length of PC cable could be measured. In this paper, results of experiments using the technique as well as an application to a superstructure of a viaduct are reported. By using this measuring technique, the actual distribution of introduced tension stress was measured. It was also able to verify influences of friction.

Key words : optical fiber, pre-stressing management, maintenance management, monitoring

### 1. はじめに

PC構造物の性能を長期にわたり確保するためには、施工時において設計断面へ確実にPC緊張力が導入され、供用中の緊張力の変動が想定以内であることが重要である。そのため、一般に施工時には、PC鋼材端部におけるジャッキ油圧とPC鋼材の伸び量に基づいた緊張管理が行われる。また近年、磁歪式センサーなど、供用中のPC緊張力の変動を計測できる各種の技術も開発されている。これに対し筆者らは、高耐久で、長スパンのひずみ分布を計測可能な光ファイバーをPCケーブルに組み込み、PCケーブル全長にわたって緊張力分布を計測する技術を開発した。

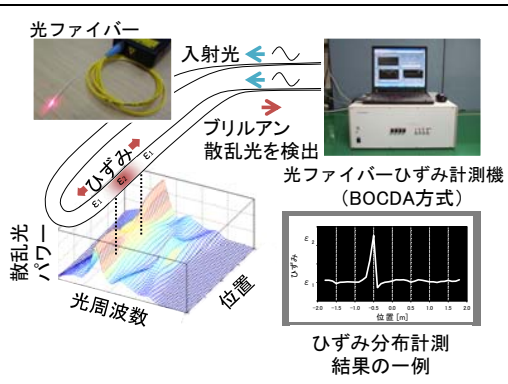
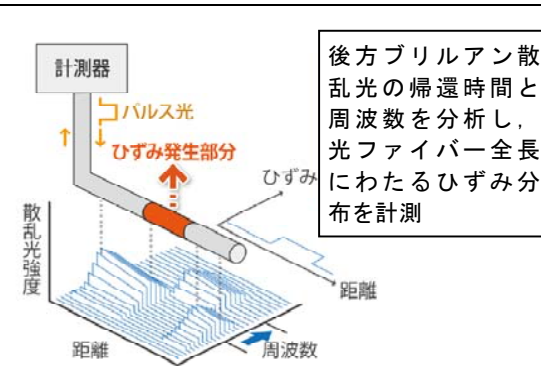
光ファイバーによるPCケーブルのひずみ計測については、勝木らが実験による検討<sup>1)</sup>を行っているが、実構造物に適用された例は無かった。そこで本研究では、光ファイバー組込み式PCケーブルを用いた各種室内試験により計測性能を確認した後、実際のPC橋梁上部工工事において柱頭部のウェブ・上床版ケーブルを対象に実適用した。本稿では、室内試験結果および実適用結果について報告する。

### 2. 光ファイバーによるPCケーブルのひずみ計測技術

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たものがあるが、本研究では、光ファイバー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<sup>2)</sup>、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<sup>2)</sup>の2種類を使用した。それぞれの計測原理のイメージ図および仕様を表-1に示す。なお、室内試験においてはBOCDA方式を、橋梁工事への実適用においてはBOTDR方式をそれぞれ用いた。

光ファイバー組込み式PCケーブルについては、裸PCケーブルに光ファイバーを設置するタイプと、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ーを埋設するタイプの2種類を開発した(図-1)。いずれも、PCケーブルの素線の凹部に収まるように光ファイバーを組み込むことで、運搬・挿入時における光ファイバーの損傷や、定着用ウェッジとの干渉による損傷を生じず、通常のPCケーブルと同様に緊張・定着可能であることを確認している。

表-1 光ファイバーによるひずみ計測原理および仕様

方式	BOCDA	BOTDR
計測原理	 <p>光ファイバーひずみ計測機 (BOCDA方式)</p> <p>ひずみ分布計測結果の一例</p>	 <p>後方ブリルアン散乱光の帰還時間と周波数を分析し、光ファイバー全長にわたるひずみ分布を計測</p>
計測精度	約 100 μ	約 100 μ
位置分解能	数 cm	約 1m
計測範囲	~200m (光ファイバー全長に渡り、任意の点の計測が可能)	~数 km (光ファイバー全長に渡り、任意の点の計測が可能)
配線	光ファイバー両端を計測器に接続	光ファイバー片端を計測器に接続

### 3. シングルストランド緊張・計測試験

#### 3. 1 実験概要

光ファイバー組込み式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-2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、光ファイバー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ー組込み式PCケーブルには、より線の凸部にひずみゲージを貼り付け、ケーブル両端部に設置したロードセルと併せ、光ファイバーによる計測値と比較を行った。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。

#### 3. 2 実験結果

図-3に実験結果 (緊張力分布の計測値) を示す。なお、光ファイバーおよびひずみゲージによる緊張力の計測値は、事前に実施した試緊張時の緊張力・ひずみのデータから、素線表面のひずみに対する見かけ上の剛性を算出し、それにひずみの計測値を乗じて算出したものである。ロードセルによる計測値については、直線区間の緊張力は一定であるとみなしてプロットした。

直線緊張試験における光ファイバーによる計測値は、ポンプ圧40MPaにおいてひずみゲージによる計

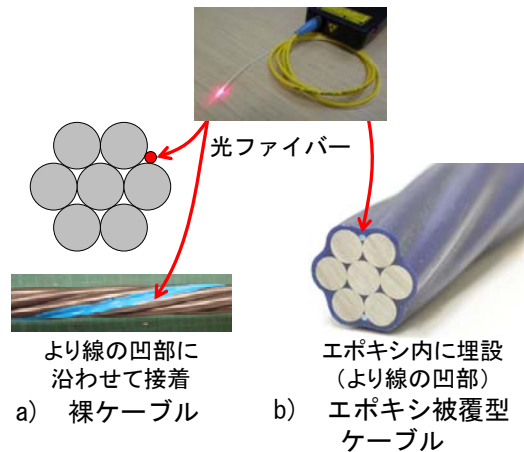
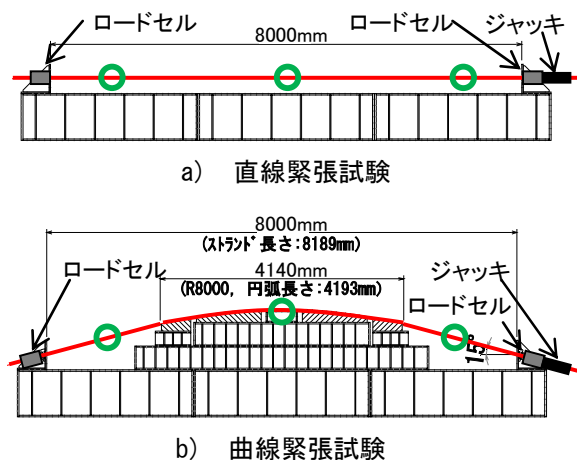


図-1 光ファイバー組込み式PCケーブル



○ : ひずみゲージ貼付位置    ■ : ロードセル

図-2 シングルストランド試験状況

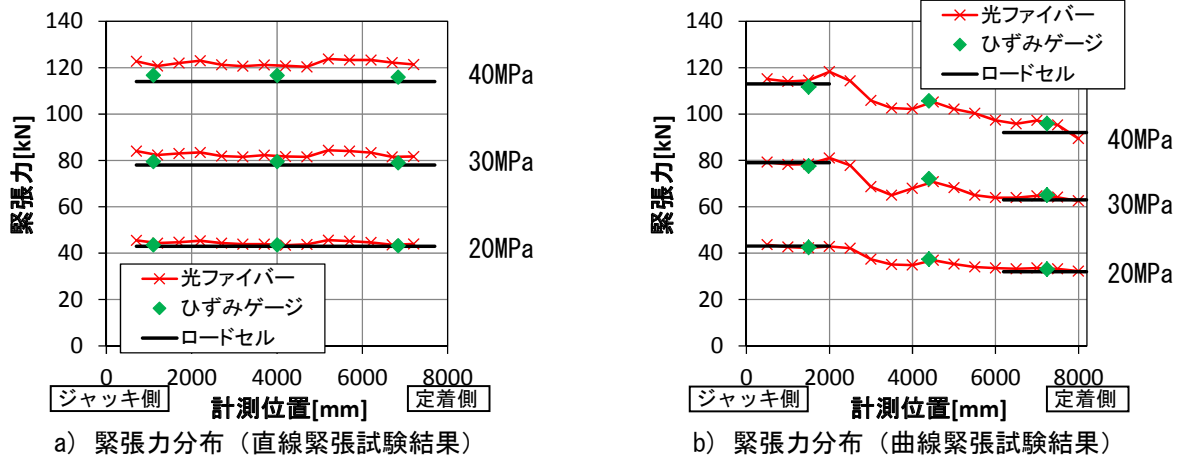


図-3 シングルストランド試験結果

測値と約4%の差異が見られるが、全体的にばらつきも小さく、良く一致している。

曲線緊張試験では、曲線部における摩擦による緊張力の低下も含め、ひずみゲージと光ファイバー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ーによる計測値のばらつきが大きい。PCケーブルが曲げられる際には、隣り合う素線間の相対的なずれなどの複雑な挙動が生じ、素線間に接着された光ファイバーに局所的に影響していることが原因として考えられる。

以上より、開発した光ファイバー組込み式PCケーブルを緊張することで光ファイバーはPCケーブルと一体化して挙動し、ひずみゲージと同程度の精度で緊張力分布を計測可能であることが確認された。

4. PC梁曲げ実験

4. 1 実験概要

供用開始後のモニタリングへの活用を想定し、グラウト充填下での緊張力変動に対する計測性能の検証を目的に、PC梁試験体の4点曲げ実験を実施した。ポステンション方式のPC梁試験体を製作し、PC緊張・定着した後、ポリエチレンシース内をグラウト充填し、グラウト硬化後に載荷を行った。使用したPC鋼材は、光ファイバー組込み式PCケーブル (1S15.2, 裸ケーブル) 3本であり、図-4に示すとおり、三角形フィラーで被覆した光ファイバーをより線の凹部に沿って接着した。試験体形状を図-5に、使用した材料の物性値を表-2, 3にそれぞれ示す。また、PCケーブルには図-4, 5に示す位置にひずみゲージを張り付けており、光ファイバーによるひずみの計測値と比較した。

曲げ載荷は、5,000 kN圧縮試験機にて行った。載荷スパンを図-5に示す。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/mm<sup>2</sup>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回ずつ繰返し載荷を行った後、終局まで単調載荷を行った。光ファイバーによるひずみ計測は、繰返し載荷中は目標荷重への5回目の到達時とし、単調載荷中は荷重25 kNずつ、またはスパン中央の鉛直たわみ2.5 mmずつとした。

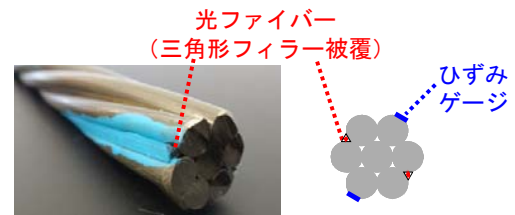


図-4 PC 梁実験用 PC ケーブル

表-2 材料物性値 (1)

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

※ 0.2%耐力。

表-3 材料物性値 (2)

材料*	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	割裂引張 強度 N/mm <sup>2</sup>
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

※ 載荷日材齢。

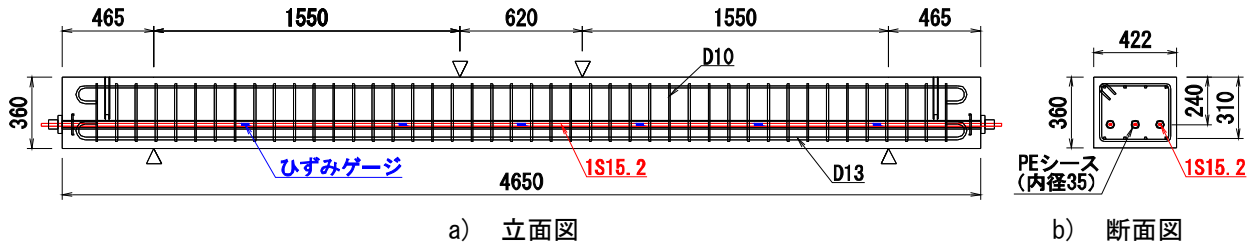


図-5 PC 梁試験体形状 (単位 : mm)

#### 4. 2 実験結果

図-6に、荷重-たわみ関係を示す。表-2, 3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, 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, および事前に計算により求めたPCケーブル応力が $0.84f_u$  (コンクリート標準示方書に規定されるトリリニアモデルの1次折れ点,  $f_u$ はミルシート記載の実引張強さ) となる荷重 (267 kN) におけるPCケーブルひずみ分布を示す。ひずみは、载荷直前の値を初期値とし、曲げ载荷によるひずみ増分として整理した。ひび割れ発生荷重相当までの計測結果 (図-7 a) ) では、光ファイバーとひずみゲージによる計測値に差異がみられるが、これはひずみ増分が $300 \mu$ 程度であるのに対し、光ファイバーによる計測精度が約 $100 \mu$ であり、相対的な誤差が大きくなったためである。一方、PCケーブル応力 $0.84f_u$ での計測値 (図-7 b) ) では、両計測値は定量的に差異が見られるが、分布の傾向は捉えられており、グラウト充填下においても光ファイバーはPCケーブルひずみの増減に追随し、PC緊張力の変動を評価可能であることが確認された。なお、载荷荷重293kN, 鉛直たわみ50mmでの計測を最後に光ファイバーが破断したが、最終計測時のPCケーブルひずみは最大で約 $11,000 \mu$  (緊張時のポンプ圧5 MPaからの増分として整理した、PC緊張によるひずみも含めた値) であり、光ファイバーにより $10,000 \mu$ 以上のひずみまで計測可能であることが確認された。

本計測システムによりPCケーブル全長の緊張力分布をモニタリングすることで、緊張力の変動や、PCケーブルの損傷の有無、および、その位置などの検知が期待できる。

### 5. PC橋梁上部工工事への実適用

#### 5. 1 裸PCケーブルタイプ

PCケーブルへの実導入緊張力の計測、評価を目的として、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) 柱頭部のウェブおよび上床版ケーブル (12S15.2, 図-8) を対象に、光ファイバー組込み式PCケーブル (裸PCケーブルタイプ) を適用し、PC緊張力分布の計測を行った。

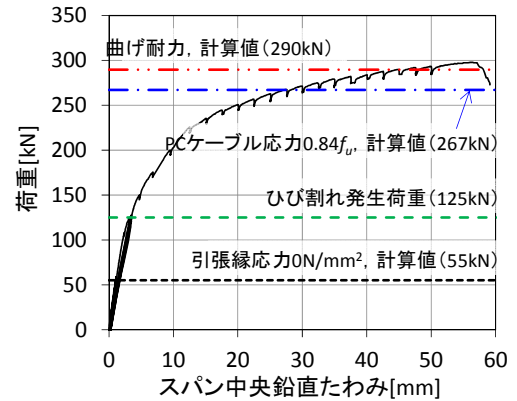
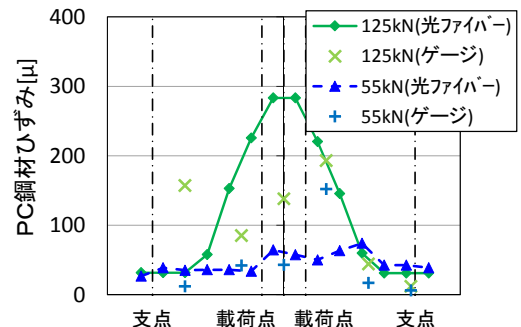
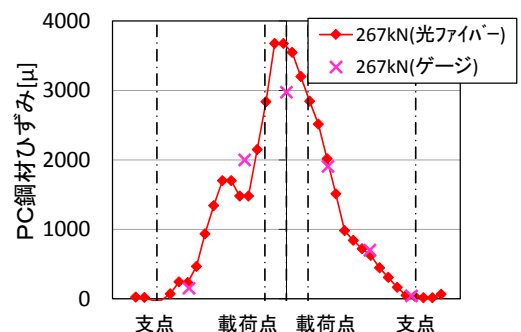


図-6 荷重-鉛直たわみ関係



a) 55kN (5 回目), 125kN (5 回目)



b) 267kN (PC ケーブル応力  $0.84f_u$ )

図-7 曲げ载荷時の PC ケーブルひずみ分布

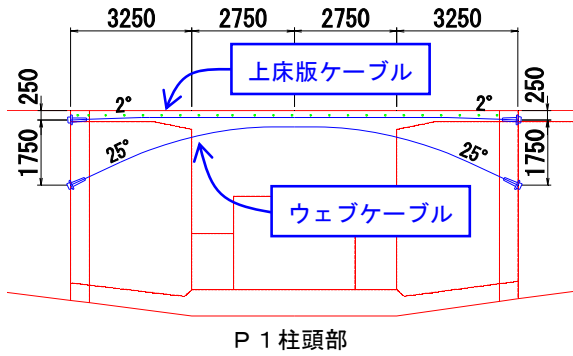


図-8 適用対象PCケーブル

工場で製作された光ファイバー組込み式PCケーブル(図-9 a)を含む12S15.2を、一括してシーす内に挿入した後、通常と同じ方法で定着具、緊張ジャッキを設置し、緊張作業および計測を行った(図-9 b), c)。緊張終了後、光ファイバーを残して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、光ファイバー一端部の計測用コネクタを桁内まで延長し、計測機器を接続できるようにした(図-9 d)。

図-10に、最終緊張時および定着後の緊張力分布を、設計緊張力(設計計算書記載の各断面で必要とされる導入緊張力)と併せて示す。ウェブ、上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適切に導入されていることが確認できる。また、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緊張力が減少し、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。

最終緊張時の計測結果を用いて、次式により計算される摩擦による緊張力のロスが、計測された緊張力分布と良く一致するように、見かけの摩擦係数 $\mu$ を逆算により求めた。なお、逆算する際は、 $\lambda/\mu=0.0133$ を定数として扱い、 $\mu \geq 0$ の範囲で求めた。

$$P_2 = P_1 \cdot e^{-\mu(\alpha + \lambda/\mu x)} \quad \text{式(1)}$$

ただし、 $P_1$ : 摩擦ロス前の緊張力 (kN),  $P_2$ : 摩擦ロス後の緊張力 (kN)  $\alpha$ : 角度変化 (rad.),  $x$ : ケーブル長 (m),  $\lambda/\mu=0.0133$  (一定),  $\mu$ : 摩擦係数

計測結果から逆算された見かけの摩擦係数 $\mu$ は、ウェブケーブルで0.13であった。上床版ケーブルはほぼ直線状に配置されており、摩擦によるロスはほとんど見られず、 $\mu=0.00$ となった。図-10に、

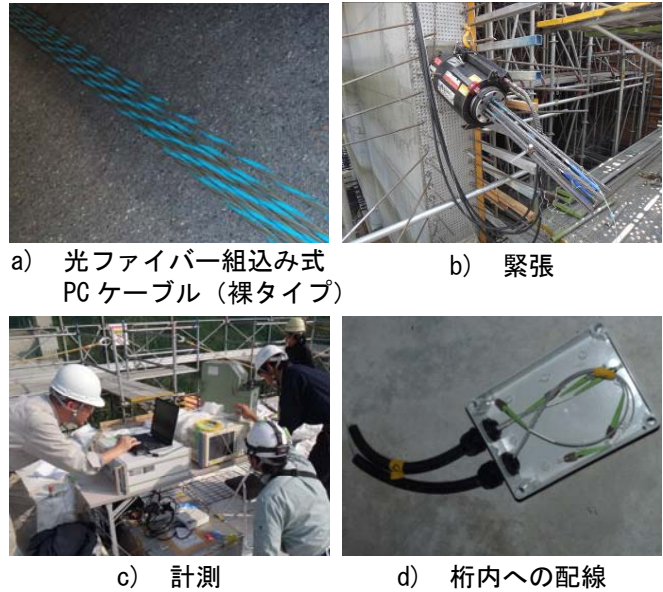


図-9 裸PCケーブルタイプ施工状況

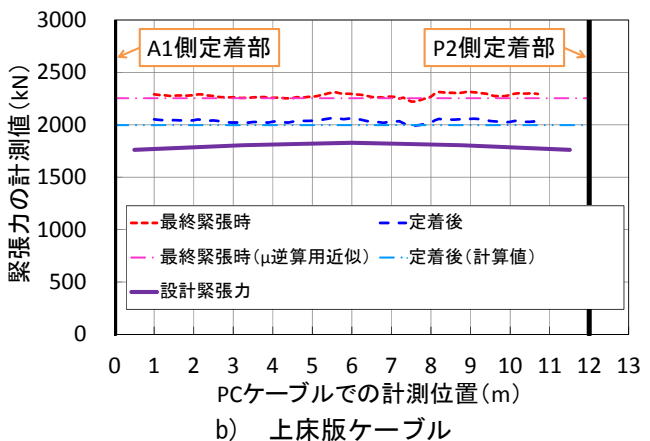
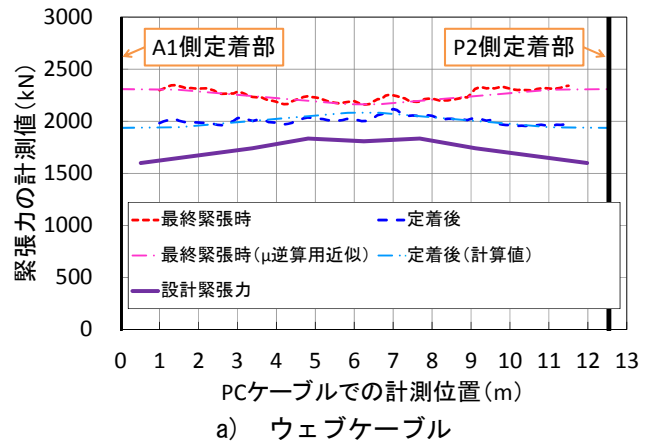


図-10 緊張力分布の計測結果

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 $\mu$ と、最終緊張時のジャッキ油圧、設計で用いたセットロス5mmを用いて、緊張計算と同じ手法で算出した定着後の緊張力分布を併せて示す。計算結果は、定着後の計測結果と良く一致しており、想定どおりに緊張力が導入されていることが確認できた。

## 5. 2 エポキシ被覆型PCケーブルタイプ

エポキシ被覆型の光ファイバー組込み式PCケーブルを用いた本システムの施工方法・実現場への適用性検証を目的に、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）に同ケーブルを適用した。なお、同橋では、PCケーブルの高耐久化を目的として、内ケーブルに対してエポキシ被覆型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PCケーブルタイプと同様に施工した（図-11 a), b)）。図-11に示すとおり、エポキシ被覆型PCケーブルでは、光ファイバーとPCケーブルの一体化、および施工中の光ファイバー保護のため、エポキシ被覆内にファイバーを埋設している。そのため、緊張終了後に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ーを取り出し（図-11 c), d)）、その後、計測用コネクタを桁内まで延長し、緊張後の長期にわたる再計測を可能とした。

本実績により、PC橋梁上部工工事において、光ファイバー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、供用期間中の長期計測までの一連の作業が実施可能であることを確認した。なお、本報告では詳細を割愛するが、裸PCケーブルタイプと同様に、実導入力の分布が計測できることを確認している。



a) 光ファイバー組込み式PCケーブル（エポキシ被覆タイプ）

b) 緊張・計測



c) エポキシ被覆表層部切削

d) 光ファイバー取出し

図-11 エポキシ被覆型PCケーブルタイプ施工状況

## 6. まとめ

高耐久で、長スパンのひずみ分布を計測可能な光ファイバーをPCケーブルに組み込み、PCケーブル全長にわたって緊張力分布を計測する技術を開発した。各種室内試験および実工事への適用により、以下のことを確認した。

- ・長スパンにわたるPCケーブルの緊張力を、ひずみゲージと同程度の精度で計測可能である。
- ・曲線部の摩擦による緊張力のロスの評価可能である。
- ・グラウト充填された内ケーブルの緊張力変動を、 $10,000\mu$ 以上のひずみまで計測可能である。
- ・裸PCケーブルタイプ、エポキシ被覆型PCケーブルタイプ共に、工場でのケーブル製作から、現場での挿入、緊張、計測、光ファイバー端部処理までの作業も含め、実際のPC橋梁上部工工事に適用可能な「計測手法」として確立した。

## 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.