

光ファイバを用いた PC 張力計測技術の開発と適用

Development and Application of PC-Tensioning Force Measurement Technology Using Optical Fiber

大 窪 一 正 今 井 道 男 曾 我 部 直 樹
戸 邊 勇 人 山 野 辺 慎 一

要 約

PC 橋梁やグラウンドアンカーなど、PC 技術を適用した構造物は、道路、鉄道といった重要な社会インフラを構成しており、施工時における品質の確保や供用中における維持管理は必須の課題である。これらの構造物では、PC ケーブルを緊張、定着させることで構造物や地盤に導入される張力が設計の前提であるため、施工時には必要な張力が確実に導入され、供用中にはその変動が設計で想定される範囲内であることが求められる。本研究では、施工時から供用中まで PC ケーブルの導入張力を任意の位置で直接計測することを目的として、光ファイバを用いた PC 張力計測システムを開発した。また、PC 橋梁上部工の内ケーブルおよび外ケーブル、グラウンドアンカーを対象として、施工時および供用中の PC ケーブルの張力分布を現場で計測できることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 光ファイバを用いた PC 張力計測技術
- III. PC 橋梁上部工への適用
- IV. グラウンドアンカーへの適用
- V. おわりに

I. はじめに

PC 構造物の品質、耐久性を確保するためには、施工時に全ての断面に対して必要な PC 張力が確実に導入され、供用中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。従来の緊張管理では、緊張ジャッキの油圧と PC ケーブルの伸びから、導入される張力を間接的に評価する手法が一般的であり、さらに施工後においては、その変動を計測する手段は限られていた。近年では、磁歪式センサを着目する箇所に設置して、緊張時および供用中の PC 張力を計測する技術などにも開発されているが、設置個所の張力しか計測できないため、PC ケーブルの全長にわたる導入力の大きさや、異常・変動の有無を検知することはできなかった。これに対し、長スパンの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 ケーブルを構成する PC 鋼より線に光ファイバを組み込むことで、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、本技術の概要と PC 橋梁上部工およびグラウンドアンカーへの適用事例について紹介する。

II. 光ファイバを用いた PC 張力計測技術

1. 光ファイバによるひずみ計測技術

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、本開発では、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⁾を使用した。計測原理のイメージ図および仕様をそれぞれ Fig.1 および Table 1 に示す。光ファイバ内に入射した光は、伝播

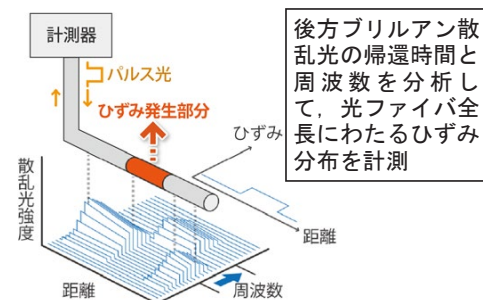


Fig.1 光ファイバによるひずみ計測 (BOTDR 方式)
(Strain Measurement by Optical Fiber, BOTDR)

Table 1 計測の仕様 (BOTDR 方式)
(Specification of Measurement, BOTDR)

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	光ファイバの方端を計測機に接続

キーワード: 光ファイバ, PC 張力, 緊張管理, 維持管理, モニタリング

Keywords: optical fiber, PC-tensioning force, prestressing management, maintenance management, monitoring

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、光ファイバ内にパルス光を入射した時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により、光ファイバの全長にわたるひずみ分布を計測できる。

2. 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線と張力分布の計測

本計測技術では、光ファイバを PC 鋼より線と一体となるように組込み、張力が作用した際に生じる光ファイバのひずみ分布を計測することで、PC 鋼より線のひずみおよび張力分布を評価するものである (Fig.2)。

光ファイバ組込み式 PC 鋼より線については、裸 PC 鋼より線に光ファイバを設置するタイプ (以下、裸線型と称する) 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 (Fig.3)。使用した光ファイバは、光ファイバ素線に、外径 0.9mm のハイトレル被覆 (裸線型用) または GFRP 被覆 (ECF 型用) を施したものである。裸線型については、出荷前の PC 鋼より線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、PC 鋼より線をエポキシで被覆する工程で、熱に強い GFRP 被覆を施した光ファイバを組み込んで製造する。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 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ウェッジとの干渉による損傷が生じず、通常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。なお、光ファイバによる張力の計測については、各種実験を行い、張力の評価において十分な計測範囲および計測精度を有することを確認している³⁾。

本計測技術の特長は、以下のとおりである。

- a. PC 鋼より線の全長にわたる張力を計測でき、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。
- b. 光ファイバを人が立ち入り可能な場所まで延伸しておくことで、随時、張力分布を再計測できる。定期的な計測による供用中の変動の評価や、PC ケーブルの異常の有無や位置の検知などに活用できる。
- c. 光ファイバは電磁ノイズに強く化学的にも安定しており、高い耐久性を有している。他分野ではひずみ計測技術として、20 年以上の実績がある。
- d. 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線は工場で作成するため、細く、折損しやすい光ファイバの現場における設置作業が不要である。また、外径や表面が通常の PC 鋼より線と変わらないため、現場での緊張作業は通常と同様に行うことができる。

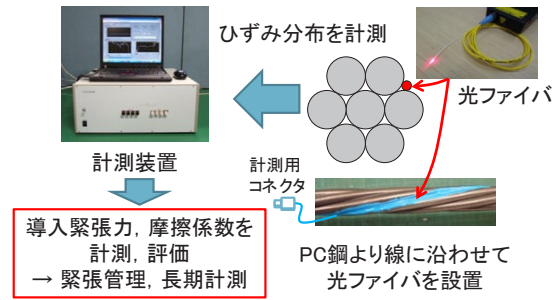


Fig.2 光ファイバによる PC 張力計測 (Tensioning Force Measurement by Optical Fiber)

タイプ	裸線型	ECF型
概要		
	裸線表面に接着剤で光ファイバを直接、接着	エポキシ被覆内に光ファイバを組み込み

Fig.3 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線 (Optical Fiber Embedded PC Strand)

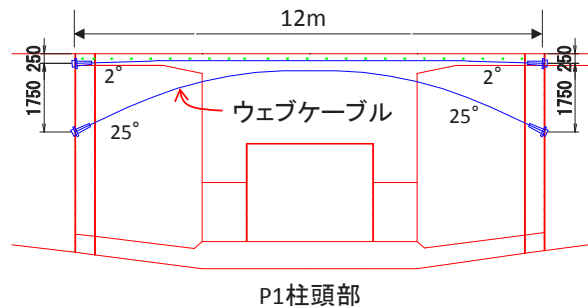


Fig.4 P1 柱頭部内ケーブルへの適用 (Application for Inner Cable of P1 Pillar Head)

III. PC 橋梁上部工への適用

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) の P1 柱頭部の内ケーブル (ウェブケーブル, 12S15.2, 延長約 13 m, Fig.4) に裸線型の光ファイバ組込み式 PC ケーブルを適用し、張力分布の計測を行った。

光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含む PC ケーブル (Photo 1 ①) を現場へ搬入した後、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、緊張および計測を行った (Photo 1 ②, ③)。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、張力の再計測を可能とするため、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 (Photo 1 ④)。

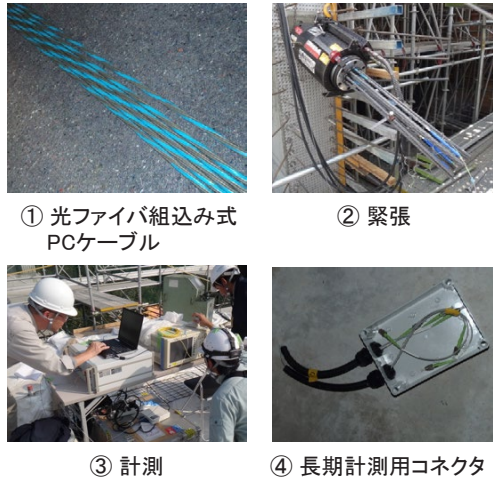


Photo 1 PC 橋梁内ケーブルへの適用状況
(Application Procedure for Inner Cable of PC-Bridge)

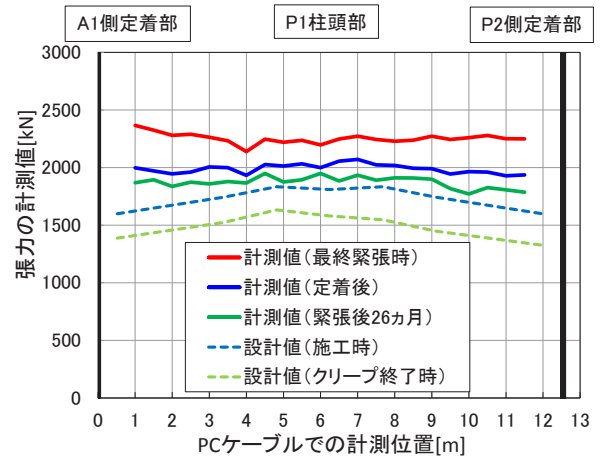


Fig.5 P1 柱頭部内ケーブルでの計測結果
(Measurement Results of Inner Cable of P1 Pillar Head)

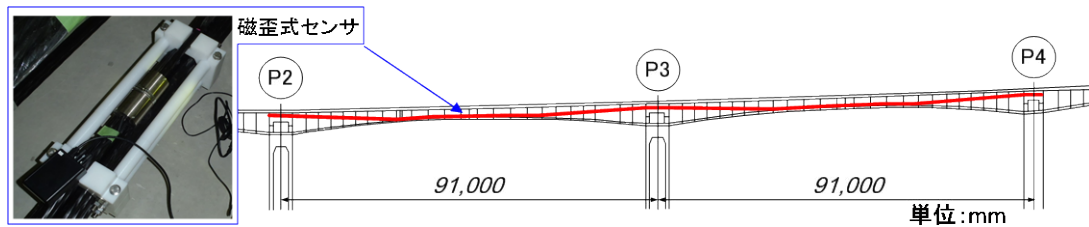


Fig.6 P2-P4 間外ケーブルへの適用
(Application for Outer Cable Between P2 and P4)

Fig.5 に、P1 柱頭部内ケーブルにおける計測結果を示す。同図には、最終緊張時、定着後および緊張から約 26 ヶ月経過後の計測結果を、施工時およびクリープ終了時における設計計算値と併せて示した。本技術により張力の分布が計測できており、各断面における設計張力以上の張力が導入されていることが確認できる。対象としたウェブケーブルは曲線配置されているが (Fig.4)、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。また、緊張後、グラウト充填を経て約 26 ヶ月が経過した時点でも問題なく再計測が可能であり、施工の進捗やクリープによる張力の減少を評価できることが確認された。

2. 外ケーブルへの適用

国道 115 号月舘高架橋上部工工事 (発注者: 国土交通省東北地方整備局) の P2-P4 径間の外ケーブル (19S15.2, 延長約 190m, Fig.6) を対象として、ECF 型の光ファイバ組込み式 PC ケーブルを適用し、PC 張力分布の計測を行った。また、P2-P3 径間の中央付近にて、磁歪式センサによる計測を併せて行い、計測結果の比較を行った。

裸線型と同様に、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含む PC ケーブルを一括してシース内へ挿入し、通常と同じ手順で定着具、緊張ジャッキを設置した。緊張ジャッキ設置後、ジャッキ端部から延びる余長部分のエポキシ被覆を除去し

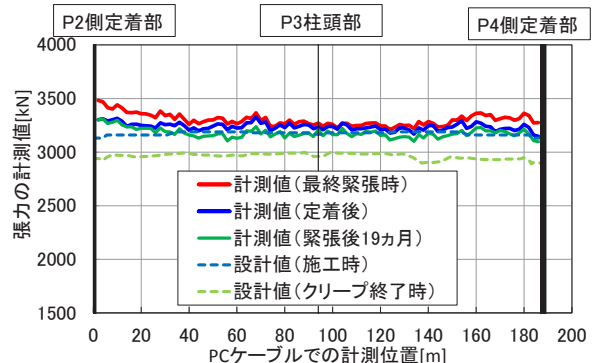


Fig.7 P2-P4 間外ケーブルでの計測結果
(Measurement Results of Outer Cable Between P2 and P4)

て光ファイバを取り出し、その端部に計測用コネクタと計測機器を接続して、緊張、計測を行った。緊張終了後、PC ケーブルの余長部分から光ファイバを取り出した後、裸線型と同様に計測用コネクタをグラウトキャップ外へ延長することにより、再計測を可能とした。

Fig.7 に、外ケーブルでの計測結果を示す。延長が約 190m である外ケーブルにおいても、ECF 型の光ファイバ組込み式 PC ケーブルによって、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、

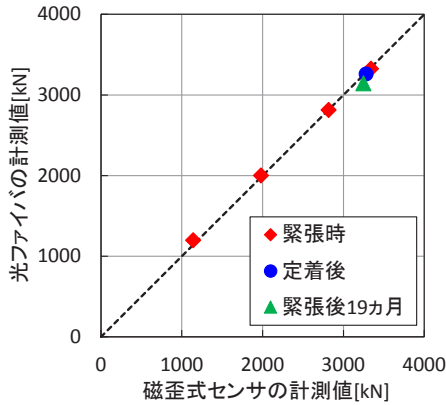


Fig.8 磁歪式センサとの比較
(Comparison with Magnetostrictive Sensor)

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。緊張後約 19 ヶ月が経過した時点で再計測を実施した結果、緊張時と同様に問題無く計測可能であることが確認できた。

Fig.8 に、P2-P3 区間中央付近に設置した磁歪式センサによる張力の計測値と、光ファイバによる計測値との比較を示す。同図には、緊張時に段階的に計測した結果と定着後、緊張後約 19 ヶ月経過時点の計測結果を示すが、両者は良く一致しており、光ファイバで外ケーブルの張力を精度良く計測できることが確認できた。

IV. グラウンドアンカーへの適用

1. 光ファイバによるグラウンドアンカーの張力計測

法面の補修・補強工事などに用いられるグラウンドアンカーは、地盤への定着機構によって摩擦型、支圧型、複合型に分類される。そのうち、今回、適用対象とした摩擦型アンカーの構造を Fig.9 に示す。摩擦型アンカーは、先端のアンカー体（グラウト）と定着地盤との間の周面摩擦力によって地盤内に定着され、PC 鋼より線を緊張材（テンドン）として緊張することでその張力を定着地盤に伝達する。アンカー頭部は、くさび定着などにより法面上に定着され、中間部は張力が変動した際に再緊張できるように、自由長部と呼ばれる周辺の地山との付着が無いアンボンド区間となっている。

グラウンドアンカーの張力は、地山の変化やアンカー体の経年劣化などにより変動し、その変動量が設計時の想定以上となると、アンカー頭部の飛び出しや法面の変状・崩壊などが生じる恐れがある。このため、グラウンドアンカーの維持管理では、供用中のアンカー張力を計測し、地山やアンカーの変状を検知することが重要である。グラウンドアンカーの張力変動を生じさせる、地山やアンカーの変状としては、以下のようなものが想定される⁴⁾。

- a. 周辺地形・地質・地下水位などの地山の変化や、地震などによる外力の作用
- b. PC 鋼より線-アンカー体グラウト間の付着力の低下

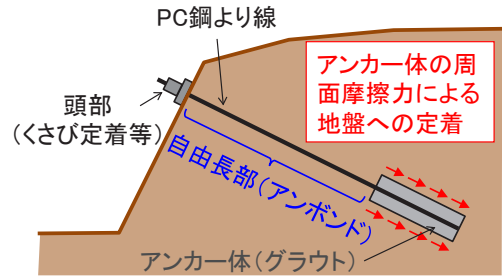


Fig.9 摩擦型グラウンドアンカーの構造
(Structure of Friction-Type Ground Anchor)

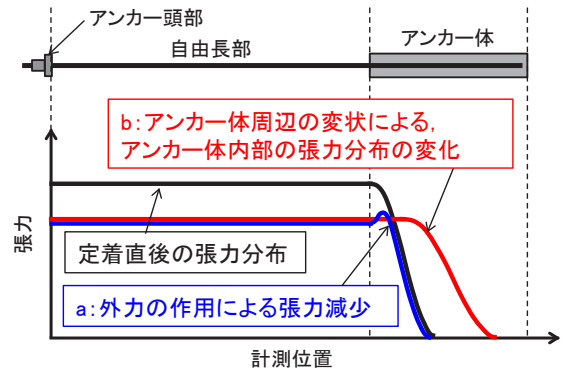


Fig.10 想定される張力分布の変化
(Assumed Fluctuation of Tensioning Force)

やアンカー体-定着地盤間の周面摩擦力の低下に伴う定着力の低下

供用期間中の地山・グラウンドアンカーにおいて、これらの変状を検知することを目的として、光ファイバを用いた PC 張力計測技術のグラウンドアンカーへの適用に向けた検討を行った。

地山やグラウンドアンカーに変状が生じた際の張力分布のイメージ図を、Fig.10 に示す。張力が減少するケースを想定した場合、その要因としては、地山の変化などによる外力の作用（上記 a）、アンカー体周辺の変状（同 b）の可能性が挙げられる。a の場合はアンカー体内部の張力分布は大きく変化することはない、b の場合は、付着力・周面摩擦力が低下することでアンカー体内部の張力分布が変化すると考えられる。グラウンドアンカーの張力を計測する従来技術としては、ロードセルを用いたモニタリングやリフトオフ試験があるが、これらの計測技術では頭部位置における張力しか計測できないため、張力の変動を計測してもその要因まで推定することは困難である。これに対し、光ファイバを用いた PC 張力計測技術では、アンカー体内部を含めたグラウンドアンカーの PC 鋼より線全長にわたる張力分布を計測できるため、上記のような分布形状の変化を検知することで、変動の要因まで推定できる可能性がある。

上記 b の要因による張力の変動が光ファイバで計測できることを確認するために、アンカー体の周面摩擦を段階的に

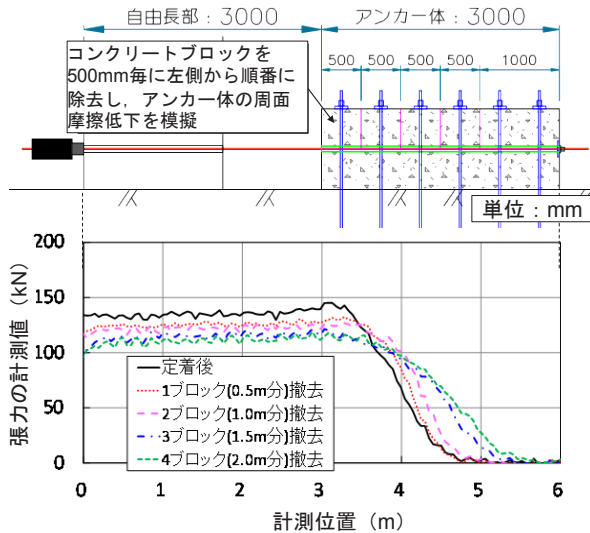


Fig.11 周面摩擦力低下模擬実験
(Friction Decrement Experiment)

低下させた状態での光ファイバによる計測実験を行った。同実験では、定着地盤をコンクリートブロックで模擬し、その内部に ECF 型の光ファイバ組込み式 PC 鋼より線をグラウンドアンカーと同じ方法で定着させ、アンカー体部分の上半分のコンクリートブロックを段階的に除去することで周面摩擦力の低下を模擬している。Fig.11 に示すようにコンクリートブロックの除去を進めることで、自由長部の張力が徐々に減少していることが分かる。また、アンカー体内部においては、張力が低下し始める点がアンカー体の先端側 (Fig.11 中、右側) に移動すると同時に、張力低下の勾配が緩やかになっている傾向が確認できる。これらは、アンカー体周辺の周面摩擦力が低下したことで、アンカー体の定着位置および定着長が変化し、それに伴いグラウンドアンカー全体の張力が減少したことを示したものであると考えられる。これらの結果から、アンカー体の周面摩擦の低下による張力分布の変化を光ファイバで計測できることが確認できた。

このように、光ファイバを用いてアンカー体内部を含めたグラウンドアンカー全長の張力分布の変化を計測することで、張力の変動だけでなく前述したような要因についても推定が可能となる。得られた結果は、再緊張の判断や増打ちアンカーの設計など、異常が発生した際の対策工の選定、設計にも有効であると考えられる。

2. 適用実績

赤谷地区溪流保全工他工事 (発注者: 国土交通省近畿地方整備局) の法面補強グラウンドアンカー全 61 本のうち、6 本 (1S15.2, 内部充填型エポキシ被覆型 PC ケーブル, 延長約 11~18m) に対して ECF 型の光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を適用した (Photo 2)。工場にて光ファイバを組み込んだ PC 鋼より線を現場へ搬入し、削孔長に応じた長さで切断した上で、通常の施工と同様にアンカー体を製作し PC 鋼よ

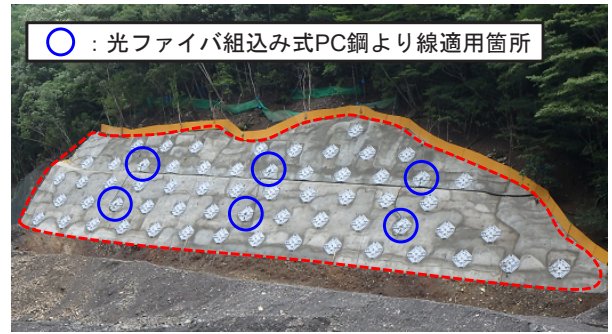


Photo 2 グラウンドアンカーへの適用
(Application for Ground Anchors)



Photo 3 長期計測用の光ファイバ配線状況
(Optical Fiber Wiring for Monitoring)

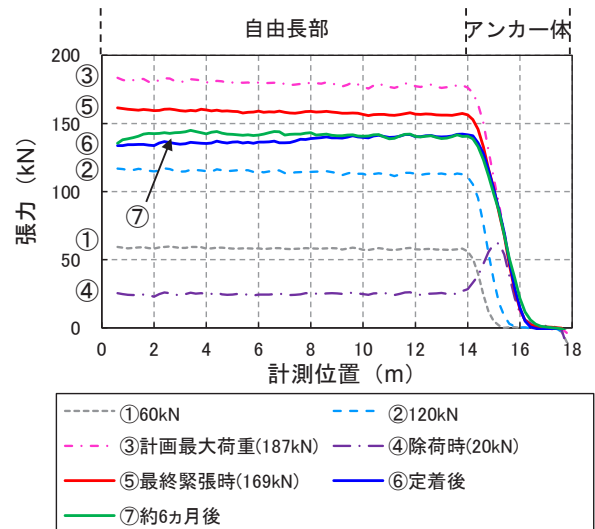


Fig.12 P2-P4 間外ケーブルでの計測結果
(Measurement Results of Ground Anchors)

り線を挿入した。グラウトの充填およびその硬化後に、PC ケーブルの端部から光ファイバの取出し作業と計測機器への接続を行った。今回の緊張作業では、一度、計画最大荷重まで緊張して、同荷重に対して安定して定着されていることを確認した後、本緊張および頭部定着部での定着を行った。なお、光ファイバによる計測は、各段階で実施した。定着後、ジャッキを撤去して、PC 鋼より線の余長の切断と長期計測用の光ファイバの接続を行い、防錆キャップを取り付けた。長期計測用の光ファイバは、安全かつ簡易に再計測できるよ

うに、防錆キャップの側面から外部へ取り出し、斜面から離れた位置にある計測用ハウスまで配線した (Photo 3)。

Fig.12に光ファイバで計測したグラウンドアンカーの張力分布を示す。同図より各緊張段階においてアンカー体内部も含めた張力分布が計測できており、除荷時において摩擦の影響でアンカー体内部に張力が残存する現象も確認できる。また、自由長部の張力がほぼ一定であるのに対し、アンカー体内部では先端に向かうにつれて徐々に張力が低下し(計測位置 14~16m の範囲)、先端側約 2m の範囲ではほぼゼロとなっていることが分かる。このことから、対象としたグラウンドアンカーでは、削孔の曲がり等に起因する PC ケーブルと周辺地盤との摩擦に伴う張力のロスが少なく、アンカー体が健全に地盤に定着されていると評価できる。また、施工後約 6 ヶ月経過した時点では、最大で 1 割程度の張力の増加が見られるが、管理基準の範囲内であり⁴⁾、アンカー体内部の張力分布にも変化が見られないことから、グラウンドアンカーとして健全であることが確認された。

本適用実績により、光ファイバを用いることで地盤内のグラウンドアンカーの張力分布を計測できることが確認された。前述のように光ファイバは高耐久であるため、長期にわたる計測に適しているほか、光ファイバを斜面下や管理用道路など、計測担当者が安全に立ち入りできる場所まで延長しておくことで簡易に再計測できるため、グラウンドアンカーや斜面の維持管理に活用できると考えられる。

V. おわりに

光ファイバを PC 鋼より線に組み込むことで、その張力分布を計測できる技術を開発し、PC 橋梁上部工ならびにグラウンドアンカーへの適用を図った。本技術は、PC ケーブル

の張力分布を施工から供用時まで同じ光ファイバで計測できる。そのため、施工時に設計断面に導入されたプレストレスを確認できることに加え、例えば大規模地震後の PC 橋梁の健全度評価や、グラウンドアンカーでの張力異常発生時の原因推定が可能となるなど、供用中における構造物の品質確保に貢献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。

謝 辞

ヒエン電工株式会社、住友電工スチールワイヤー株式会社、株式会社エスイーには、本計測技術の開発にあたり多大なご協力を頂いた。国土交通省 東北地方整備局、近畿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にあたり、多大なご理解とご協力を頂いた。ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 國富, 只熊, 及川, 石塚; 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, 2013, pp.363-365.
- 2) Leung, Christopher KY, et al; Review: optical fiber sensors for civil engineering applications, Materials and Structures, Vol.48, No.4, 2015, pp.871-906.
- 3) 大窪, 今井, 千桐, 中上; 光ファイバーを用いた PC 緊張力計測技術, 第 25 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, 2016, pp.283-288.
- 4) 土木研究所, 日本アンカー協会; グラウンドアンカー維持管理マニュアル, 2008.

Development and Application of PC-Tensioning Force Measurement Technology Using Optical Fiber

Kazuma Okubo, Michio Imai, Naoki Sogabe, Hayato Tobe and Shinichi Yamanobe

Structures using prestressed concrete technology, such as PC bridges and ground anchors, are used for important road and railway infrastructure. For PC structures, it is essential to ensure the quality at the time of construction and to conduct appropriate maintenance during the service period. In these structures, the design assumes the use of PC-tensioning force. Therefore, the necessary PC-tensioning force must be reliably introduced during construction, and fluctuation of the force during the service period must be within the range assumed in the design. In this study, we developed a technology for measuring PC-tensioning force using optical fiber, in order to directly measure the force along the PC cable. By using the technology during the actual construction of a PC bridge (inner cable and outer cable) and ground anchors, it was confirmed that the technology could measure the distribution of PC-tensioning force during both the construction and service period.