

エポキシ被覆型光ファイバー組込み式PC鋼より線の開発と適用

鹿島建設(株) 正会員 工修 ○大窪 一正
 鹿島建設(株) 正会員 Ph.D. 今井 道男
 住友電工スチールワイヤー(株) 正会員 工修 中上 晋志
 (株)エスイー 早川 道洋

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, a method measuring the distribution of PC tensioning forces using optical fiber, which is applicable to manage stresses in PC structures at construction time as well as monitor stresses during the service life, has been developed by the authors. This paper presents an application of the method to measure stresses of epoxy-coated strands used in an external cable of PC bridge. It was revealed that the stress distribution could be measured over the whole length of about 180m long cable. In addition, by applying this method to measurement of ground anchors in a laboratory test, it was suggested that decrease of friction around of the anchors could be detected.

Key words : optical fiber, ground anchor, maintenance management, monitoring

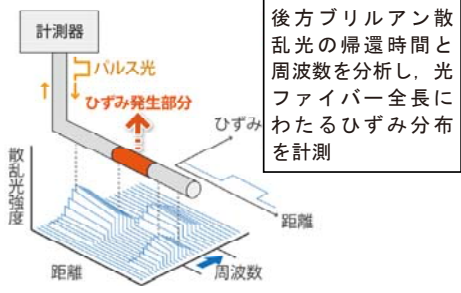
1. はじめに

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、供用中における緊張力の変動が想定範囲内であることが重要である。筆者らは、長スパンのひずみ分布を計測可能な光ファイバーをPC鋼より線に組み込み、PC鋼より線の全長にわたる緊張力分布を計測できる技術を開発し、各種室内試験によりその計測性能を確認するとともに、PC橋梁上部工のPCケーブルへ適用を進めてきた¹⁾。ここでは、内部充填型エポキシ被覆PC鋼より線を対象とした光ファイバーによるPC緊張力計測技術の開発と、PC橋梁上部工における外ケーブルへの実適用、およびグラウンドアンカーへの適用に向けた検討について報告する。

2. 光ファイバーを用いたPC緊張力計測技術

本計測技術は、緊張時にPC鋼より線と一体化した光ファイバーに生じるひずみ分布を計測し、全長にわたるPC緊張力の分布を評価する技術である¹⁾。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、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²⁾を使用した。計測原理のイメージ図および仕様を表-1に示す。

表-1 光ファイバーによるひずみ計測原理・仕様

方式	BOTDR
計測原理	 <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
位置分解能	約 1m
計測範囲	～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	光ファイバー片端を計測器に接続

光ファイバー組込み式PC鋼より線は、通常のPC鋼より線の表面に光ファイバーを貼り付けたタイプ（裸線型）と、内部充填型エポキシ被覆PC鋼より線の被覆内に光ファイバーを埋設したタイプ（エポキシ被覆型（図-1））の2タイプを開発している。両タイプとも、PC鋼より線の素線の谷部に収まるように光ファイバーを配置しており、運搬・挿入時における接触や定着用ウェッジとの干渉による損傷を受けず、通常のPC鋼より線と同様に緊張・定着可能である。今回対象としたエポキシ被覆型は、光ファイバーをエポキシ被覆内に埋設したものであるが、これによりエポキシ被覆型PC鋼より線が有すべき防食性能が損なわれていないことについても、ピンホール試験や破断試験により事前に確認している（写真-1）。

本計測技術の特長を以下にまとめる。

- ・PC鋼より線の全長にわたる緊張力を計測可能であるため、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。
- ・光ファイバーを、人が立ち入り可能な場所まで延伸しておくことで、随時、導入力を再計測することができ、供用中の導入力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。
- ・光ファイバーは電磁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。
- ・光ファイバー組込み式PC鋼より線は工場製作であり、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PC緊張作業を通常と同様に行うことができる。

3. PC橋梁外ケーブルへの実適用

PC橋梁外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）P2-P4径間の外ケーブル（19S15.2、ケーブル長：約180m）を対象に、エポキシ被覆型の光ファイバー組込み式PC鋼より線を適用し、PC緊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³⁾による計測を併せて行い、計測精度の比較を行った。

3.1 施工

工場で作成されたエポキシ被覆型光ファイバー組込み式PC鋼より線3本を含む19S15.2ケーブルを、一括してシース内に挿入した後、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（写真-2 a））。緊張終了後、PC鋼より線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、配線用光ファイバーを接続して計測用コネクタを桁内の底版付近まで延長し、緊張後の長期にわたる再計測を可能とした（写真-2 b）～d））。

3.2 計測結果

外ケーブルのPC緊張力計測結果を図-2に示す。延長約180mの外ケーブル全長にわたって緊張力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、摩擦によって緊張力が減少してい

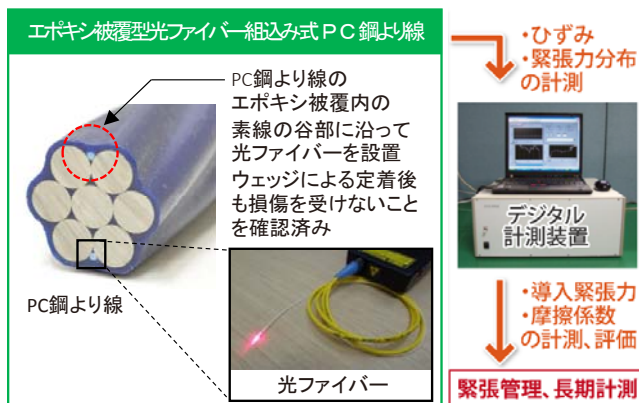


図-1 エポキシ被覆型光ファイバー組込み式PC鋼より線による緊張力の計測



写真-1 エポキシ被覆型光ファイバー組込み式PC鋼より線の品質確認試験状況

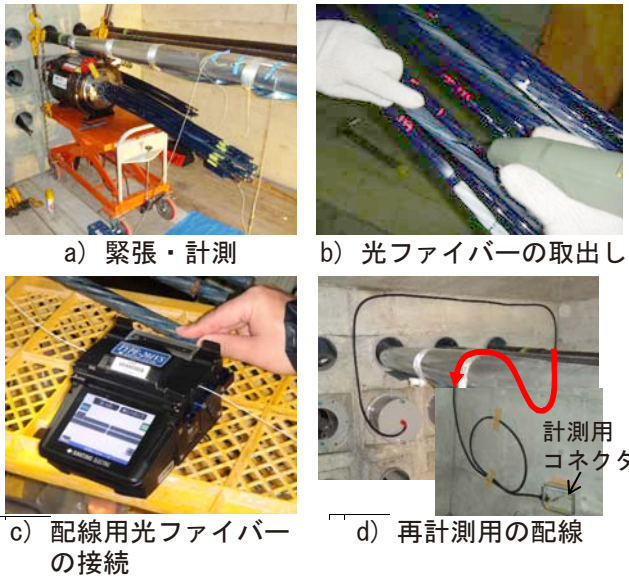


写真-2 PC 橋梁外ケーブルでの施工状況

く傾向も計測できている。さらに、所定の緊張力まで緊張した状態（最終緊張時）に対して、定着後にはセットロスによるケーブル端部での緊張力の低下が確認できる。

P2-P3径間中央付近に設置した磁歪式センサによる緊張力の計測値と、光ファイバーによる計測値との比較を図-3に示す。両者は良く一致しており、エポキシ被覆型PC鋼より線のエポキシ被覆内に埋設した光ファイバーは、PC鋼より線と一体化して挙動し、実施工において緊張力を精度良く計測できることが確認された。

また、施工後約150日が経過した時点で再計測を実施し、緊張時と同様に問題無く計測可能であることを確認した。

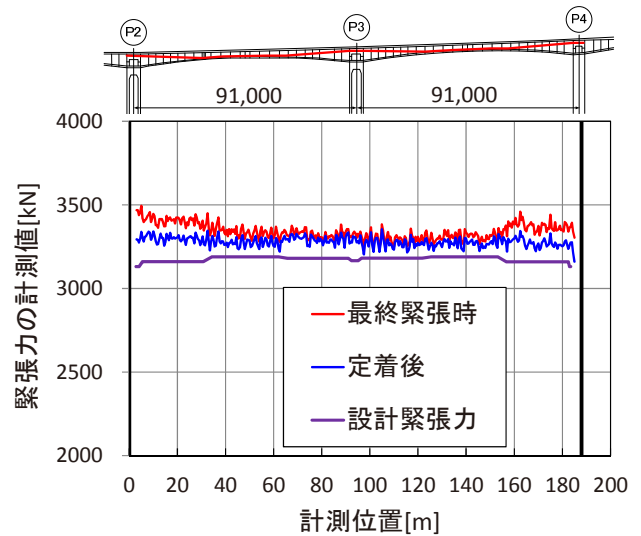


図-2 外ケーブルでの緊張力分布計測結果

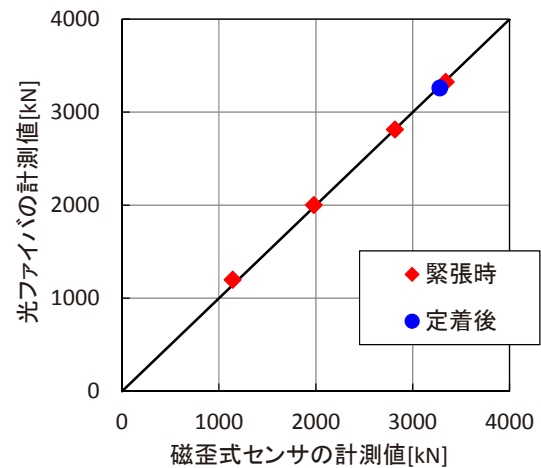


図-3 磁歪式センサとの計測結果比較

4. グラウンドアンカーへの適用に向けた検討

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、摩擦型アンカーの構造を図-4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、緊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、中間部は自由長部と呼ばれるアンボンド区間となっている。

グラウンドアンカーの緊張力は、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においては、供用中のアンカー緊張力を計測し、地山やアンカーの変状を検知する必要がある⁴⁾。グラウンドアンカーの緊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。

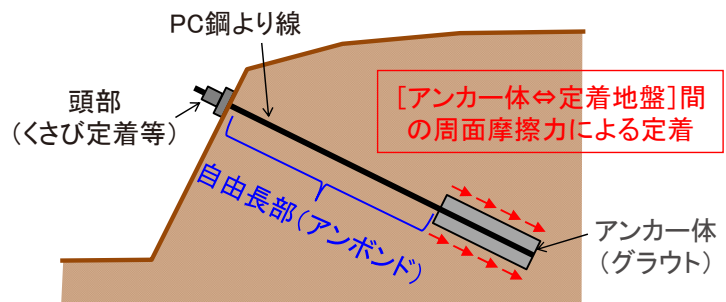


図-4 摩擦型グラウンドアンカーの構造 (イメージ図)

- ① 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
- ② PC鋼より線とアンカー体グラウトとの間の付着力の低下
- ③ アンカー体グラウトと定着地盤との間の周面摩擦力の低下

本研究では、供用中の地山・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、光ファイバーを用いたPC緊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。

4. 1 グラウンドアンカーの緊張力計測における従来技術と課題

グラウンドアンカーの緊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、ロードセルはそれ自体の耐久性が低く、リフトオフ試験には大掛かりな緊張用資材や足場が必要となる上、法面上での作業となるため作業性・安全性が低いという課題がある。一方、光ファイバーは電磁ノイズなどに強く化学的に安定した材料であるため、供用期間中の長期にわたる計測に適している。また、前述したPC橋梁への適用と同様、施工時（緊張・定着後）に光ファイバーを法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けば、随時の再計測を行うことが可能となる。

地山やグラウンドアンカーに変状が生じた際の緊張力分布のイメージ図を図-5に示す。緊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①）、アンカー体周辺の変状（同②、③）の可能性が考えられる。①の場合はアンカー体内部の緊張力分布は大きく変化することはないが、②・③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緊張力分布が変化すると考えられる。

従来の計測技術であるロードセルやリフトオフ試験では、アンカー頭部位置における緊張力しか計測することができないため、緊張力の減少を計測しても、その要因まで推定することは困難である。これに対し、光ファイバーを用いたPC緊張力計測技術では、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緊張力分布を計測できるため、上記のようなアンカー体内部の分布形状の変化を評価することで、変動の要因まで推定できる可能性がある。

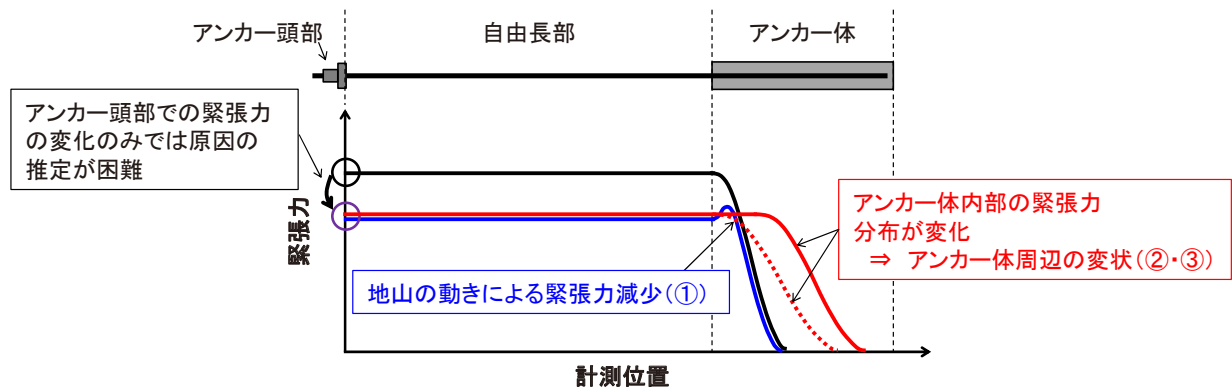


図-5 地山・アンカーの変状による緊張力分布の変化（イメージ図）

4. 2 周面摩擦力低下模擬試験

(1) 試験概要

光ファイバーを用いたPC緊張力計測技術によって、アンカー体周辺の変状を検知可能かどうかを確認することを目的として、アンカー体を模擬した試験体による計測試験を行い、検知性能を検証した。本試験では、反力床に固定したコンクリートブロック内部にアンカー体を拘束し、このブロックを分割して撤去していくことによって拘束力を徐々に解放し、アンカー体および定着地盤が健全な状態から周面摩擦力が徐々に低下する現象を模擬した。

図-6に、試験体形状を示す。コンクリートブロックは、ビニールシートや型枠材を用いて、図-6に示す位置で分割して打設した。コンクリートブロックには、内径65mmの鋼製スパイラルシースにて

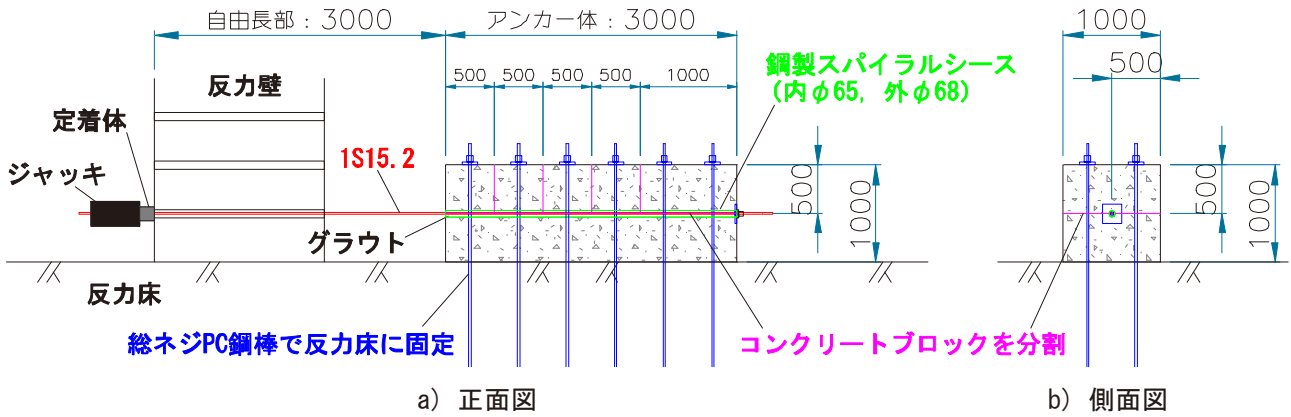


図-6 試験体形状 (単位: mm)

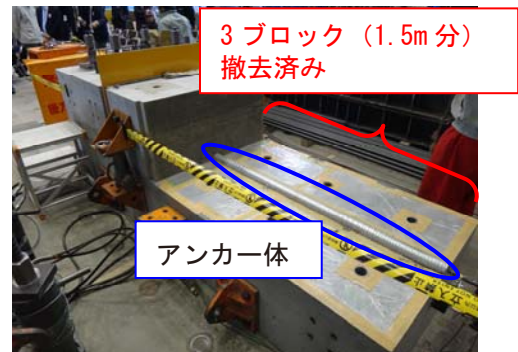
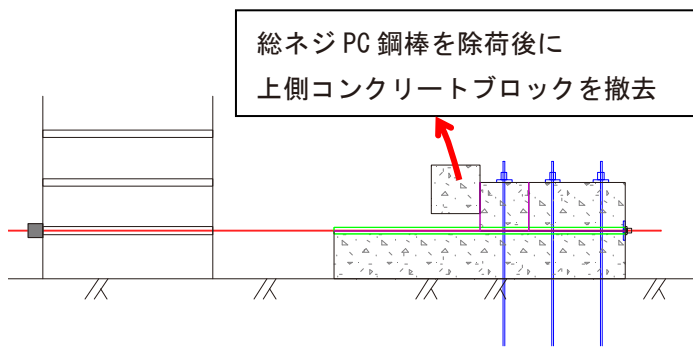


図-7 周面摩擦力低下模擬試験状況 (3ブロック目撤去時の例)

箱抜きを設けておき、コンクリート硬化後の箱抜き内に、アンカー体スペーサー (外径59mm) を取り付けエポキシ被覆型光ファイバー組込み式PC鋼より線 (1S15.2) を挿入後、グラウトを充填し、アンカー体を製作した。グラウトの配合は、通常アンカー体グラウトの配合と同等 (早強セメント使用, W/C=49.5%) とし、グラウト材齢12日で試験を実施した。試験時のコンクリートおよびグラウトの物性値を表-2に示す。グラウト硬化後に、総ネジPC鋼棒を用いてコンクリートブロックを反力床に固定し、PC鋼より線を緊張、反力壁に定着した。

表-2 材料物性値

材料	試験時 材齢	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	19日	53.2	31.7	—
グラウト	12日	59.2	13.4	1.92

試験は、1ブロック分ずつ総ネジPC鋼棒を除荷し、上側のコンクリートブロックを撤去することで、アンカー体グラウトと定着地盤との間の周面摩擦力が徐々に低下する現象を模擬した (図-7)。1ブロック (長さ: 500mm) 撤去するごとに光ファイバーを用いて緊張力分布を計測し、最終的に4ブロック (合計長さ: 2,000mm) 撤去する間の緊張力分布の変化を確認した。

(2) 試験結果

図-8に、周面摩擦力低下模擬試験により得られた、PC鋼より線の緊張力分布を示す。コンクリートブロックの撤去を進めることで、自由長部の緊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、緊張力が低下し始める点がアンカー体の先端側 (図-8中、右側) に移動すると同時に、緊張力低下の勾配が緩やかになっている様子が確認できる。これらは、図-5で示した想定と一致する計測結果であり、アンカー体周辺の拘束の解放により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緊張力が減少したことを示したものであると考えられる。

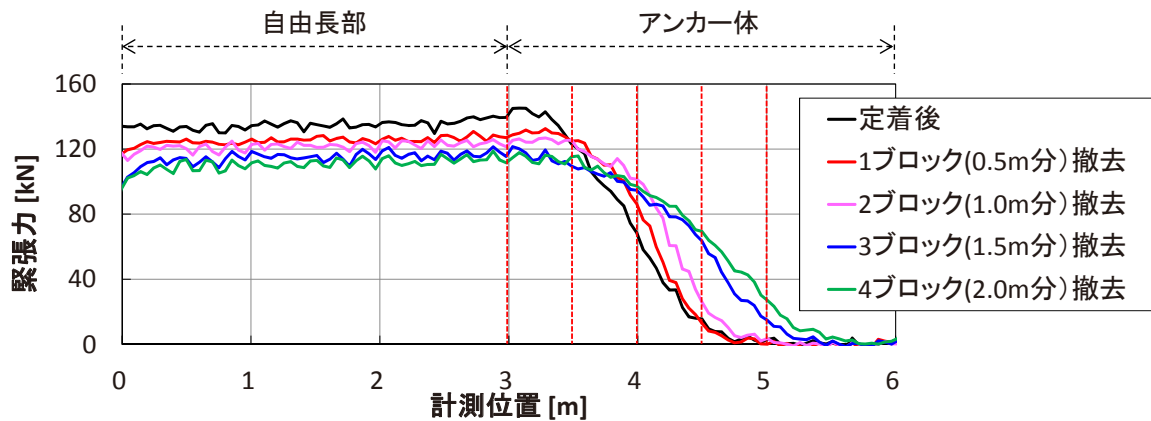


図-8 周面摩擦力低下模擬試験結果

以上より、光ファイバーを用いることで、グラウンドアンカーのアンカー体内部の緊張力分布とそ
 の変化を計測できることが確認できた。供用中のグラウンドアンカーにおいて同様の計測を行い、ア
 ンカー体内部も含めた緊張力分布の変化を評価することで、グラウンドアンカーや定着地盤に生じて
 いる変状やその要因を検知できる可能性が示された。なお本試験では、自由長部側から順に周面摩擦
 力が低下する現象を模擬したが、アンカー体先端側から周面摩擦力の低下が生じたり、PC鋼より線と
 グラウトとの間の付着力の低下が生じたりした場合にも、対応する位置での緊張力分布の変化を、本
 計測技術により検知できると考えられる。

5. まとめ

エポキシ被覆型光ファイバー組込み式PC鋼より線を開発し、光ファイバーを用いたPC緊張力計測技
 術をPC橋梁外ケーブルに実適用し、PC緊張力分布の計測を行った。また、本計測技術のグラウンドア
 ンカーへの適用に向けて、アンカー体グラウトと定着地盤との間の周面摩擦力低下を模擬した室内試
 験を実施し、アンカー体周辺の変状に関する検知性能の検証を行った。本研究により得られた結論を
 以下に示す。

- ・延長約180mのPC橋梁外ケーブル全長にわたって、摩擦により緊張力が減少する傾向も含め、緊張力
 分布を計測可能であることを確認した。またその計測値は、磁歪式センサによる計測値と良く一致
 しており、実施工において緊張力分布を精度良く計測できることを実証した。
- ・光ファイバーによる計測をグラウンドアンカーに適用することで、アンカー体周辺の変状による緊
 張力の低下やアンカー体内部の緊張力分布の変化を計測可能であることを確認した。

今後、グラウンドアンカーや定着地盤の経年劣化、変状に関する検知性能の検証など、引き続き適
 用に向けた検討を行う。また、実構造物における長期計測性能の確認を行うなど、モニタリング技術
 としての確立に向けた開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 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, pp. 283-288, 2016
- 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) 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 一東九州自動車道平田川橋一,
 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
- 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