

## 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

鹿島建設(株) 正会員 博(工) ○曾我部 直樹  
 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: For prestressed concrete structures, it is important to apply and to maintain a required loading force to a tendon. To monitor the force along the tendon, an optical fiber sensor-embedded strand was developed and was applied mainly to prestressed concrete bridges. Embedding optical fiber sensor can always measure strain distribution, thus, it can measure force along the whole length of a tendon both during construction and in-service. Prestressed ground anchors also tendon structures, and monitoring of anchor load due to a landslide or a deteriorated bonded grout is critical for secure earth structures. Deploying the sensor-embedded strand to ground anchor structures, force distribution along an anchor is successfully measured in pilot application. Additionally, it can be confirmed that the occurrence and reason of the force variation is estimated through experimental investigations.

Key words : Optical fiber, Ground anchor, Maintenance management, Monitoring

### 1. はじめに

PC構造物では、導入されるプレストレスが設計の前提であるため、施工時にPCケーブルによって必要な張力が確実に導入され、供用中の変動が想定される範囲内であることが重要である。これに対し、施工時から供用中までのPCケーブルの張力分布を計測できる光ファイバを用いたPC張力計測技術(図-1)を開発し、PC橋梁を対象として適用を進めてきた<sup>1)</sup>。一方、PCケーブルを緊張して斜面を補強するグラウンドアンカーでは、斜面内のすべり面の発生やその位置、地盤内における定着力の変化

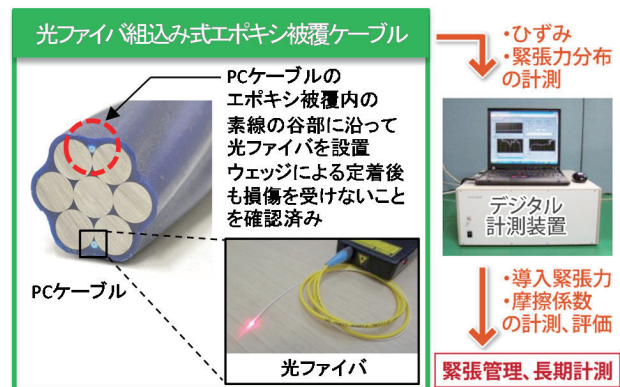


図-1 光ファイバを用いたPC張力計測技術

などを検知することが維持管理において有用であり、本技術によりPCケーブル全長における張力を測定することでそれらを実現できる可能性がある。ここでは、本技術のグラウンドアンカーへの展開を目的として実施した各種検討と、現場での適用実績について述べる。

## 2. 光ファイバを用いたPC張力計測技術とグラウンドアンカーへの適用

### 2.1 光ファイバを用いたPC張力計測技術

光ファイバにパルス光を入射した時に観測される後方ブリルアン散乱光の帰還時間と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することができる。本計測技術では、光ファイバをPCケーブルの製造時にケーブル素線の谷部に収まる位置に組み込み、一体化させた光ファイバ組込み式PCケーブルを用いて、図-1に示す計測装置でケーブル全長の張力分布を計測する。なお、

本技術については、今までにPC橋梁上部工の内ケーブルや外ケーブルに適用して張力分布の計測を行い、施工時における導入張力の確認や、維持管理における張力分布の変動の有無、大きさの評価に活用している<sup>1)</sup>。

## 2. 2 グラウンドアンカーへの適用

グラウンドアンカーは、斜面内にPCケーブルを挿入して、緊張、定着させることで地すべりを抑止する対策工である。PCケーブルの張力によって斜面に作用する圧縮力の大きさが抑止効果の前提となるため、その維持管理においては張力の変動の有無やその大きさを計測し、設計で想定されている範囲の変動であるかを評価することが重要である。しかし、グラウンドアンカーで実用化されている張力計測技術は、頭部定着部でのロードセルによる計測やリフトオフ試験のように、地表に露出した部分で張力を計測するものであり、地中部のアンカーの状態を直接的に判断できる方法は確立されていなかった。

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図-2に示す。張力分布が変動する要因としては、地山の変化、外力の作用などによるすべり面の発生(図-2中(1))やアンカー体周辺の変状(図-2中(2))が考えられる<sup>2)</sup>。(1)の場合は、アンカー体内部の張力分布が大きく変化することなく自由長部の張力の大きさが変化したり、張力分布の一部にすべり面のせん断ずれに伴う局所的な乱れが生じたりすることが想定される。また、(2)の場合は、定着地盤の劣化や風化でアンカー体の定着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。つまり、供用中におけるグラウンドアンカー全長の張力分布を本技術によって計測できれば、張力変動の有無だけでなく、分布形状の変化からその要因が特定でき、対策工の選定や設計にも活用できると考えられる。たとえば、張力の減少が確認された際には、アンカー体内部の張力分布の変化からアンカー体の健全性を評価して、健全である場合は増引き、不具合が想定される場合にはより深い定着地盤へのグラウンドアンカーの増打ちを行うなどの対策の選定に反映できる可能性がある。

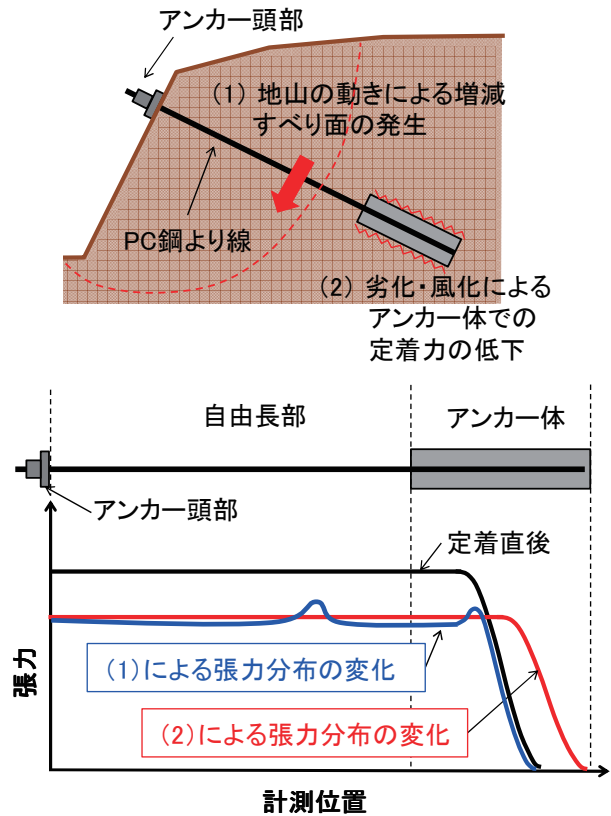


図-2 グラウンドアンカーの変状と張力分布

## 3. グラウンドアンカーを想定した計測性能の確認実験

### 3. 1 すべり面に対する検知性能確認実験

すべり面位置で生じるグラウンドアンカーの張力、ひずみの変化を光ファイバで計測することで、すべり面の有無および位置を検知できることを検証するために、すべり面を模擬した計測実験を実施した。計測実験では、グラウンドアンカーの周辺地盤とすべり面を、隙間を設けて設置した二基のRCブロックで模擬した(図-3)。すべり面下方の不動地盤は図-3中の「固定側ブロック」(長さ 1,995mm)とし、すべり面上方の移動土塊は「載荷側ブロック」(長さ 5,000mm)で模擬している。両ブロックの間には5mmの間隔を設けて「載荷側ブロック」の右端部をピン支持し、左端部(固定側ブロックと接する左側)においてジャッキにより鉛直下向きに荷重を載荷することで、両ブロック間にすべり面を模擬した一面せん断ずれを生じさせた。実際の地すべりでは、すべり面が生じる付近の地盤は礫混

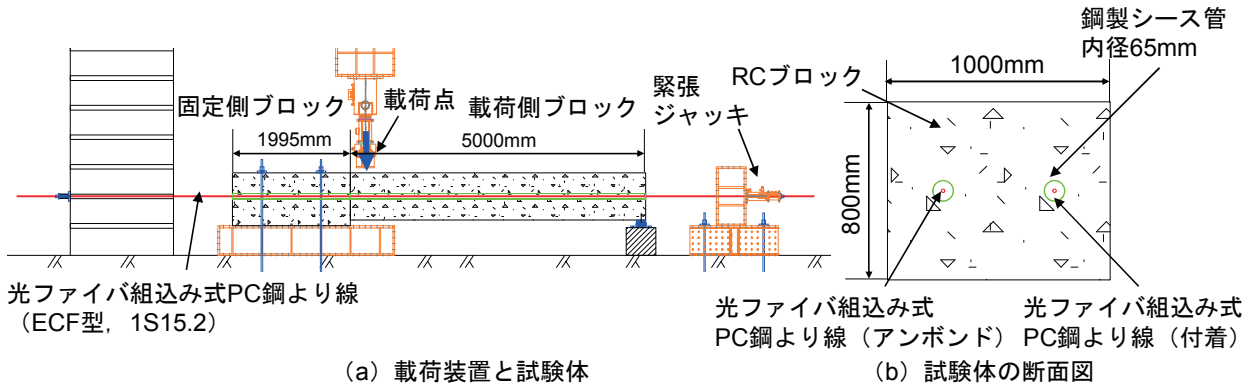


図-3 すべり面の検知性能確認実験の概要

じりの土砂や軟岩など、完全な剛体でないことが多いが、本試験ではグラウンドアンカーの周囲がRCブロックで拘束された条件において、緊張材に局所的なせん断が作用した際のひずみ分布を計測することとした。グラウンドアンカーに使用する緊張材として、1S15.2の光ファイバ組込み式エポキシ被覆PC鋼より線を想定し、同PC鋼より線を固定側、载荷側の両ブロックのシース管内(φ65mm)を貫通するよう2本配置して緊張した。1本はグラウンドアンカーの自由長部にすべり面が生じることを想定して、PC鋼より線の周囲に数mm程度の空隙を設けたアンボンドとし、もう一方はPC鋼より線の周囲にグラウトを充てんして全長を地盤に付着させたものとした。試験では、2~3mmずつ段階的にせん断ずれ変位を増加させ、同時に光ファイバによる計測を行うことでせん断ずれ発生時のひずみ分布の変化を評価した。

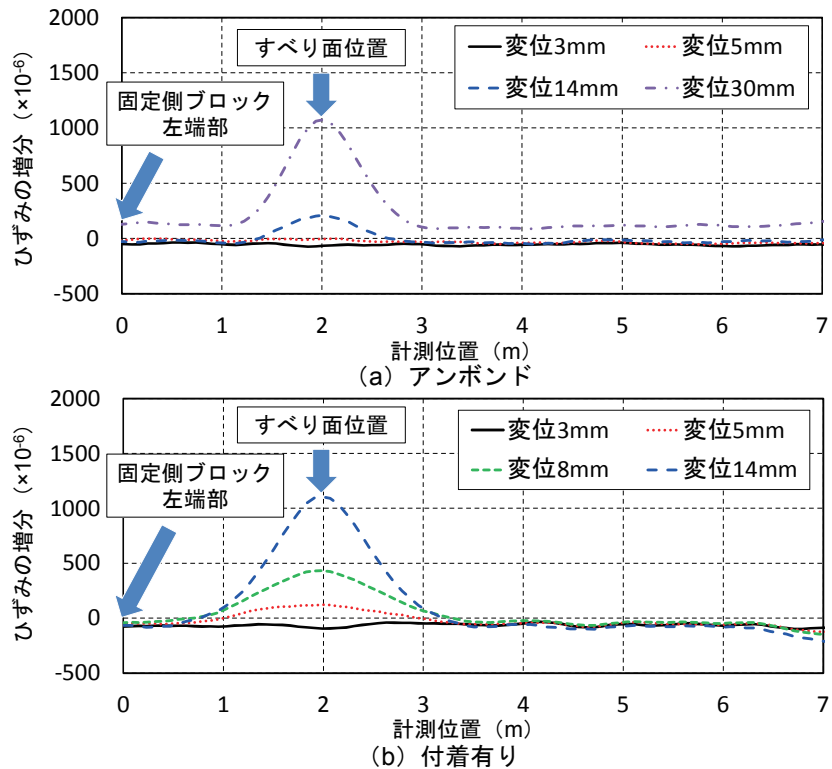


図-4 せん断ずれに伴うひずみの増分の計測結果

光ファイバで計測したひずみ分布について、せん断ずれ変位毎に抜粋して比較した結果を図-4に示す。同図からせん断ずれ変位の増加に伴い、すべり面の位置におけるひずみが局所的に増加していることが分かる。このことから、光ファイバでグラウンドアンカーのひずみ分布の変化を計測することで、すべり面の有無とその位置を検知できる可能性が確認できた。ただし、ひずみ分布に変化が生じるせん断ずれ変位の大きさについては、2本のPC鋼より線で相違があった。アンボンドとしたPC鋼より線では、せん断ずれ変位が11mm程度まではひずみ分布には大きな変化がなく、14mmを超えた段階からせん断ずれが生じている位置のひずみが増加した。一方、周辺地盤と付着させたPC鋼より線では、せん断ずれ変位が5mm程度の段階ですべり面位置におけるひずみの増加が検知されていた。これは、PC鋼より線の付着が無い場合、せん断ずれが小さい段階では、すべり面におけるPC鋼より線のひずみが

分散されるためであり、付着の有無が検知性能に影響を及ぼすことを示す結果であると考えられる。

### 3. 2 アンカー体の周面摩擦力の低下に対する検知性能確認実験

アンカー体内部を含むグラウンドアンカーの張力、ひずみ分布の変化から、アンカー体周辺の変状、とくに定着力の低下を光ファイバによる計測で検知できることを確認するために、定着地盤およびアンカー体を模擬した試験体による計測実験を行った。実験の概要および計測結果を図-5に示す。試験体は、アンカー体周辺の定着地盤を、複数の分割可能なRCブロックで模擬したものである。RCブロックの中心には、延長方向に内径65mmのシース管を設置して、PC鋼より線をシース管の中心に固定するためのアンカー体スペーサー（外径59mm）を取り付けた1S15.2の光ファイバ組込み式エポキシ被覆PC鋼より線をコンクリート硬化後に挿入した。そののち、RCブロックを反力床に総ネジPC鋼棒を緊張して固定させた状態で、PC鋼より線の周囲にグラウトを充填、硬化させることでアンカー体を製作して、PC鋼より線を緊張、定着することで張力を導入した。なお、グラウトの配合は、通常の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%）とした。計測試験は、左側から1ブロック分（長さ：500mm）ずつ固定用の総ネジPC鋼棒を除荷し、上側のRCブロックを段階的に撤去することで、アンカー体と定着地盤との間の周面摩擦力が徐々に低下する状況を再現した。1ブロック分の撤去が完了する毎に光ファイバを用いて張力分布を計測し、最終的に4ブロック（合計長さ：2,000mm）撤去する間の張力分布の変化を確認した。

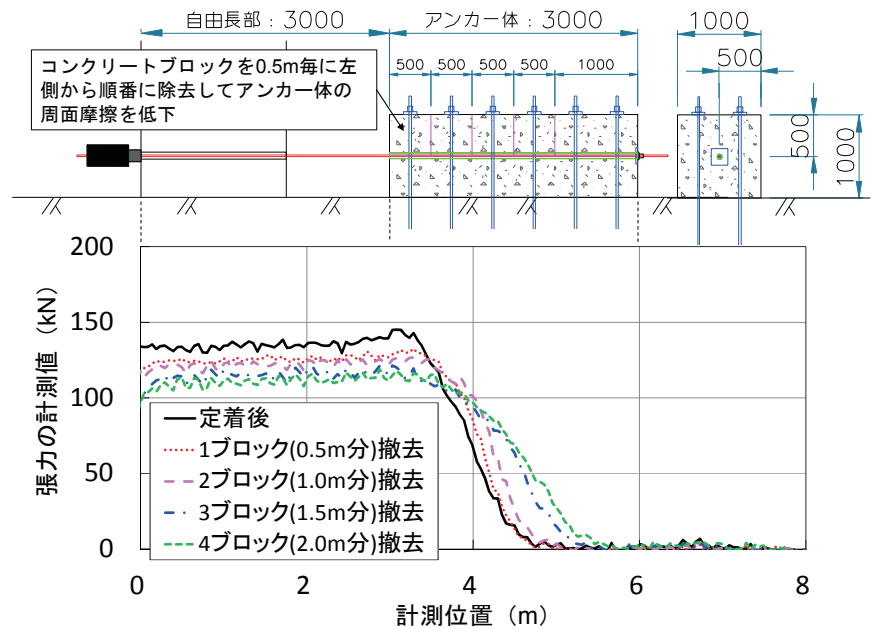


図-5 アンカー体の周面摩擦力低下の検知性能実験および結果

図-5下に示す張力分布の計測結果から、RCブロックの撤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、アンカー体内部では、張力が低下し始める点がアンカー体の先端側（図-5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。これらの傾向は、図-2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張力が減少したことを示したものであると考えられる。以上より、本技術を用いることで、アンカー体の周面摩擦力の低下に伴う張力分布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張力分布の変化を評価することで、張力の変動の有無だけでなくその要因を検知できる可能性が得られた。

図-5下に示す張力分布の計測結果から、RCブロックの撤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、アンカー体内部では、張力が低下し始める点がアンカー体の先端側（図-5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。これらの傾向は、図-2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張力が減少したことを示したものであると考えられる。以上より、本技術を用いることで、アンカー体の周面摩擦力の低下に伴う張力分布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張力分布の変化を評価することで、張力の変動の有無だけでなくその要因を検知できる可能性が得られた。

## 4. グラウンドアンカーへの実適用

### 4. 1 適用工事の概要と施工方法

グラウンドアンカーの張力分布の計測、評価を目的として、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, アンカー体長さ 4m) に対して光ファイバ組込み式エポキシ被覆 PC 鋼より線を適用した (写真-1)。

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に切断した上で, 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 (写真-2)。今回の緊張作業では, 一度, 計画最大荷重まで試験緊張を行い, 同荷重に対して安定して定着されていることを確認して除荷した後, 定着具を設置して本緊張および頭部定着部での定着を行った。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を行う場所まで光ファイバを延長するための延長用光ファイバの接続を行い, 防錆キャップを取り付けた。延長用光ファイバは, 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, 斜面から約 100m 離れた位置にある計測用ハウス内まで配線した (写真-3)。なお, 光ファイバによる計測は, 試験緊張の各段階と 20kN まで除荷した時点, および本緊張の最終緊張時, 定着後に行った。また, 施工後約 6 ヶ月経過した時点で再計測を行った。

#### 4. 2 計測結果

計測結果の一例を図-6に示す。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, PCケーブルとグラウトとの付着が無い自由長部 (計測位置0~14mの範囲) の張力がほぼ一定となっていること, 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, 削孔の曲がりなどに起因する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, 設計で想定される範囲内であり<sup>2)</sup>, アンカ

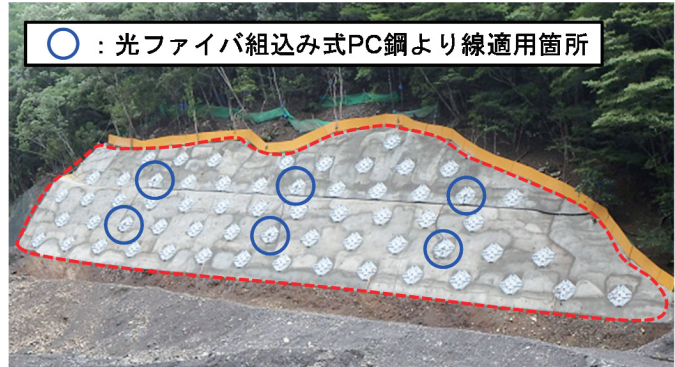


写真-1 適用対象のグラウンドアンカーと適用箇所



①エポキシ被覆からの光ファイバ取出し



②計測用コネクタの接続



③緊張・計測

写真-2 施工状況

斜面から離れた屋内まで計測用光ファイバを配線

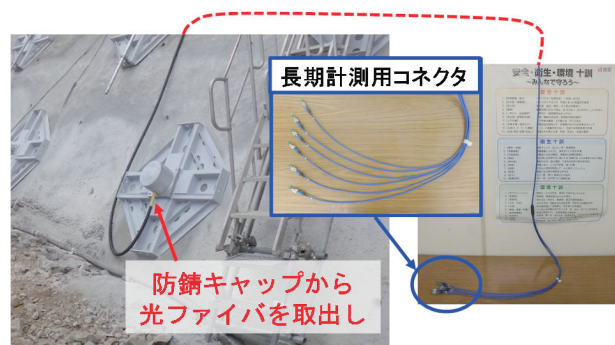


写真-3 再計測用の配線状況

一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。

今回の現場適用により、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。光ファイバは高耐久であるため、供用期間中の長期にわたる計測に適している。また、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

ておけば、随時の再計測を簡易に行うことが可能となるため、グラウンドアンカーや斜面の維持管理に本技術を活用できると考えられる。とくに、長期にわたる供用期間中において、アンカー体や定着地盤の劣化・風化による抜け出しなどが発生した際には、アンカー体内部の張力分布が変化することが想定されるため、本技術によってそのような異常を検知できると考えられる。

### 5. まとめ

光ファイバを用いたPC張力計測技術を、グラウンドアンカーへ適用することを目的として、計測性能の確認実験および現場適用を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- ・グラウンドアンカーの緊張材に光ファイバ組込み式PC鋼より線を適用し、アンカー体を含む全長のひずみ、張力分布の変化を計測することで、斜面内におけるすべり面の有無と位置、およびアンカー体における定着力の変状を検知できる可能性がある。
- ・実際のグラウンドアンカーにおいて、本技術によって緊張時および緊張後、長期間経過した時点におけるグラウンドアンカー全長の張力分布が計測可能であることを確認した。

本技術は、グラウンドアンカー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ことが特徴である。そのため、施工時はアンカー体の健全性や摩擦の有無の確認による品質確保、供用時は張力分布のモニタリングに基づく健全性の評価に、本技術を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共に、グラウンドアンカーの維持管理における本技術の効果的な活用方法の検討を進めていく予定である。

最後に、本技術の現場への適用にあたり、近畿地方整備局の関係者の方々には、多大なご理解とご協力をいただいた。また、本論文で報告した計測性能の確認実験における光ファイバの計測では、沖電気工業(株)の関係者の方々にご協力いただいた。ここに深甚の謝意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) たとえば、大窪，今井，千桐，中上：光ファイバを用いた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) 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。

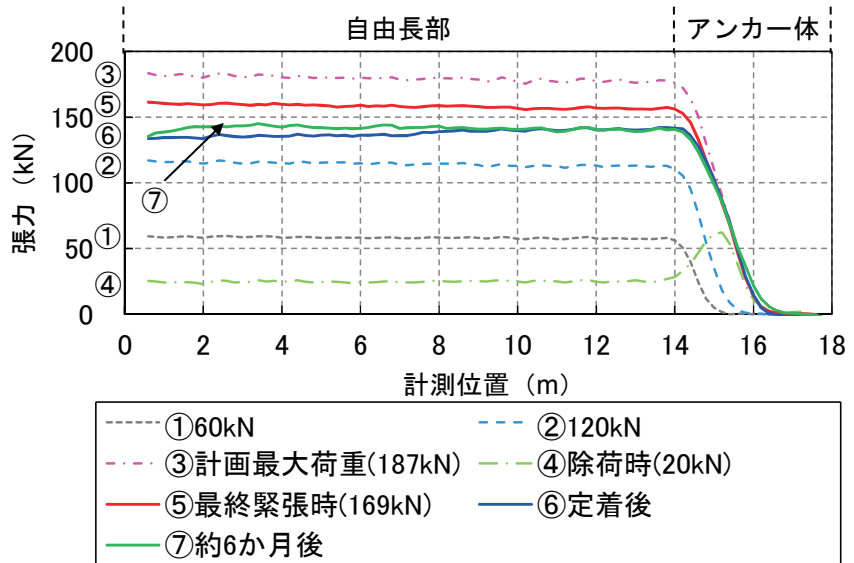


図-6 計測結果の一例