

光ファイバを用いたグラウンドアンカーの張力計測技術

曾我部 直 樹・羽 田 匡 彦・早 坂 洋 太

土留め工や地すべり防止などに用いられるグラウンドアンカーでは、様々な要因によってPCケーブルの張力が変動する可能性がある。そのため、グラウンドアンカーによる補強効果を維持するためには、供用期間中の張力変動の有無やその大きさ、発生位置を検知して、適切な対策を行うことが必要となる。しかしながら、従来技術ではアンカー頭部での荷重計測のみで管理せざるを得ないという課題があった。これに対して、光ファイバを活用してPCケーブルの全長にわたる張力分布を計測できる技術を開発し、グラウンドアンカーへの適用を進めてきた。本稿では、光ファイバを用いたグラウンドアンカーの張力計測技術の概要、適用実績について紹介する。

キーワード：グラウンドアンカー，光ファイバ，張力分布，維持管理，連続計測

1. はじめに

グラウンドアンカーは、地盤内にPCケーブルを挿入して、緊張、定着させることで地すべり等を抑止する対策工である。PCケーブルの張力によって地盤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、地中部を含めた全長にわたる張力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。これに対し、筆者らは光ファイバによってPCケーブルの全長にわたる張力分布を計測できる技術を開発し、グラウンドアンカーへの適用を進めてきた^{1), 2)}。本稿では、光ファイバを用いたグラウンドアンカーの張力計測技術の概要、および掘削工事における仮設用グラウンドアンカーの張力変動を、本計測技術で連続計測した事例について紹介する。

れたものがあるが、本計測技術では、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³⁾を使用する。計測原理のイメージ図および仕様の一例を図-1および表-1に示す。光ファイバ内に入射した光は、伝播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で、光ファ

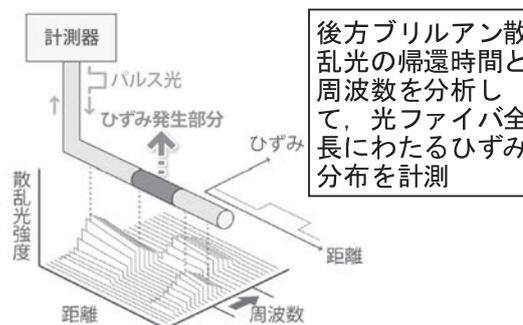


図-1 光ファイバによるひずみ計測 (BOTDR方式)

表-1 計測の仕様 (BOTDR方式の一例)

| | |
|-------|----------------------------------|
| 計測精度 | 約± 20 ~ ± 50 μ |
| 空間分解能 | 約 1 m |
| 計測範囲 | ~ 5 km 光ファイバ全長にわたり、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 |

2. 光ファイバを用いたグラウンドアンカーの張力計測技術

(1) 光ファイバを用いたPC張力計測技術

光ファイバを用いたひずみ計測技術は多数実用化さ

イバの全長にわたるひずみ分布を計測できる。光ファイバによるひずみ計測技術は、機械設備のモニタリング等、他業種において20年以上の実績がある。また、土木分野においても、橋梁主桁のひび割れ検知や斜面表層崩壊のモニタリング等での適用実績がある。

本計測技術では、光ファイバをPC鋼より線に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(図-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種類を開発している(図-3)。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、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、各種実験等¹⁾を行い張力の評価において十分な計測性能を有していることを確認している。

本計測技術の特長を以下にまとめる。

- ① PC鋼より線の全長にわたる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。
- ② 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、張力分布を再計測することができ、定期的な計測により、供用中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。
- ③ 光ファイバは電磁ノイズに強く化学的に安定しており、高い長期耐久性を有している。
- ④ 光ファイバ組込み式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。

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¹⁾。

(2) グラウンドアンカーへの適用

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、複合型などに分類される。これらのうち、最も多用されている摩擦型グラウンドアンカーは、法面上から地山を斜めに削孔して tendon を挿入し、その先端にアンカー体を設けて地山に定着させ、緊張することで、想定すべり面に圧縮力を作用させて地すべりを抑止する(図-4)。そのため、Tendonとして光ファイバ組込み式PC鋼より線を含むPCケーブルを用いることで、アンカー体内部を含めたグラウンドアンカーの全長にわたる張力分布を計測することが可能となる。

供用期間中のグラウンドアンカーでは、腐食による tendon の破断の他、周辺の地形改変や地質の風化・劣化、グラウトの劣化・強度低下など様々な原因による残存する張力の変動が想定される。Tendonに、腐

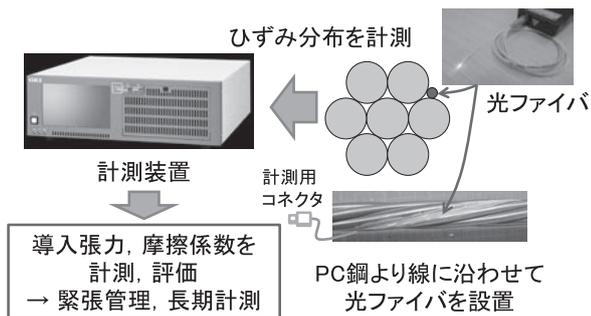


図-2 光ファイバによるPC張力計測

| 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 |

図-3 光ファイバ組込み式PC鋼より線

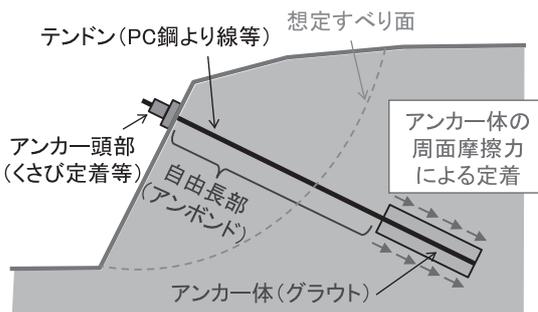
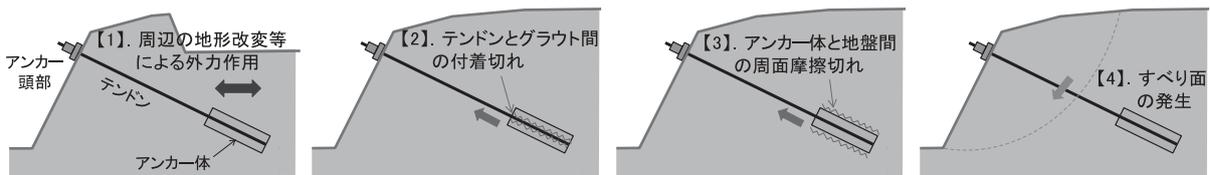
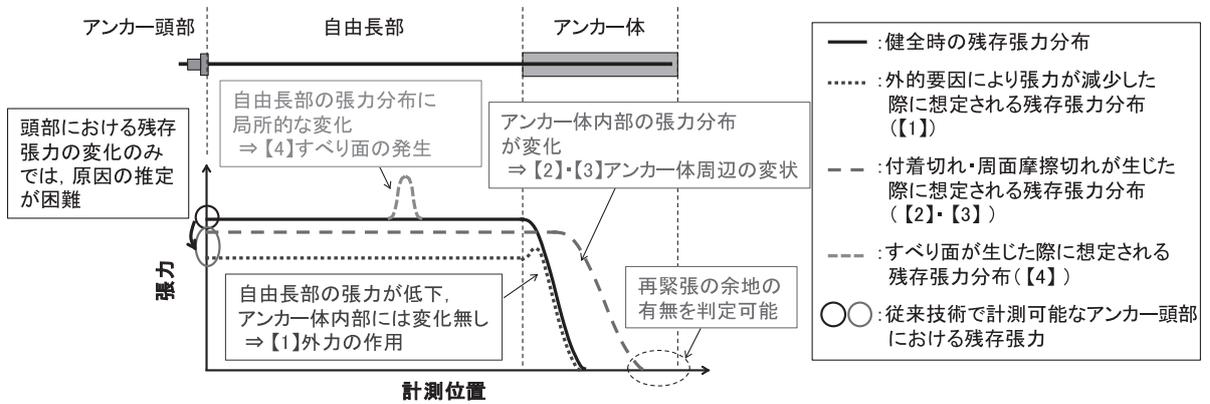


図-4 摩擦型グラウンドアンカーの概要



図一5 摩擦型グラウンドアンカーで想定される変状



図一6 変状発生時に想定される張力分布の変化

食破断などの異常・損傷が生じた際には、テンドン内のひずみ分布が変化し、本計測技術によってそれを検知できると考えられる。この他、地上部での目視調査などでは検知できない、テンドンの張力の変動に影響することが想定される地中における変状として、以下のようなものが挙げられる(図一5)。

- 【1】 地下水位の変動や周辺の地形改変、地震など、何らかの外的要因の作用
- 【2】 テンドンとアンカー体グラウト間の付着切れ
- 【3】 アンカー体グラウトと地盤間の周面摩擦切れ
- 【4】 すべり面の発生

上記【1】～【3】による張力の変動が設計での想定以上になると、テンドンの破断やアンカー体からのテンドンの引抜け、地盤からのアンカー体の引抜けを生じ、アンカー頭部の飛び出し・落下などに至る可能性がある。また、【4】のすべり面の発生は、地すべり力に対して抵抗力が不足していることを意味しており、法面の崩壊を防ぐためには適切な対策工を講じる必要がある。

上記【1】～【4】の変状が生じた際に想定される張力分布の変化のイメージを、図一6に示す。例えば、外的要因の作用によって張力の低下が生じていた場合(【1】)は、アンカー体周辺が健全であればその内部における分布は変化しないものと考えられる。このような場合には、再緊張による張力の回復が可能と判断できる。一方、アンカー内部におけるテンドンの付着切れやアンカー体の周面摩擦切れによる引抜けが生じていた場合(【2】・【3】)は、自由長部の張力が低下するほか、アンカー体内部ではその先端の方向へ張力が伝

播するように分布が変化すると考えられる。特に、張力の伝播範囲がアンカー体先端まで到達してしまう場合には、再緊張を行えるだけの定着性能がアンカー体に残されておらず、グラウンドアンカーの増打ちなどの対策工を講じる必要があると判断できる。また、すべり面が発生した場合(【4】)は、すべり面の発生箇所周辺のみに局所的な分布の変化が生じることが想定される。なお、アンカー体部の変状(【2】・【3】)やすべり面の発生(【4】)に伴う張力分布の変化を、本計測技術で検知できることについては、室内実験などで検証を行っている²⁾。

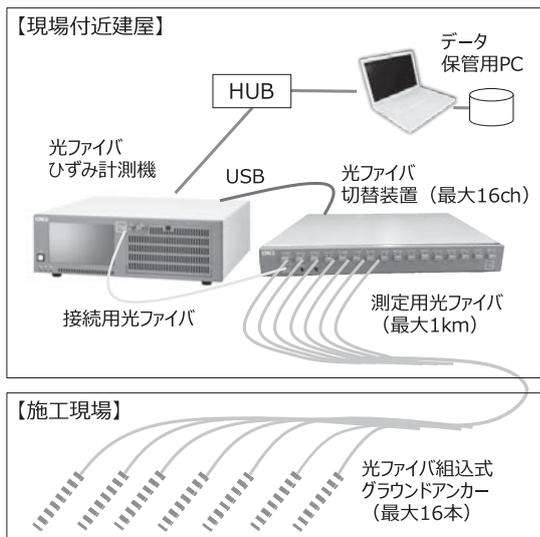
以上のような供用中におけるグラウンドアンカー全長の張力分布の変化を本計測技術によって計測することで、張力変動の有無だけでなく、分布形状の変化からその要因が特定でき、対策工の選定や設計にも活用できると考えられる。

(3) 連続計測システム

光ファイバによるグラウンドアンカーの張力分布を計測する際には、計測器械に光ファイバ組込み式PC鋼より線から延伸する光ファイバを直接、接続する必要がある。また、光ファイバによるひずみ分布の計測器械は、ロードセルやひずみゲージ等の計測器械に比べて高価であるため、複数台を常設することが困難なケースが多い。そのため、施工中における緊張作業時、および施工後の再計測時には、その都度、計測器械を持ち込むことが多く、計測したタイミングに応じたデータしか得ることができなかった。一方、グラウン

ドアンカーの張力分布を連続的に計測できれば、環境の変化に応じた変動をリアルタイムで把握することが可能となる。例えば、大雨や地震の前後における張力分布を比較してグラウンドアンカーや補強された斜面の健全性を評価することで、災害時におけるインフラの使用の可否の判断や、復旧方法の検討に活用できる可能性がある。

そこで、図一七に示すように光ファイバの切替装置を介することで、複数のグラウンドアンカーの張力分布を、1台の計測機で常時計測できるシステムを考案した。本システムでは、切替装置を計測器械で制御することにより、複数のグラウンドアンカーの張力を約20秒間隔で連続的に計測することが可能である。光ファイバは、最大で約5kmまで延長することができるため、広範囲に設置された多くのグラウンドアンカーの張力分布を測定することができる。また、データ保管用PCに収録したデータをクラウド上に転送することで、遠隔地からのモニタリングも可能となる。



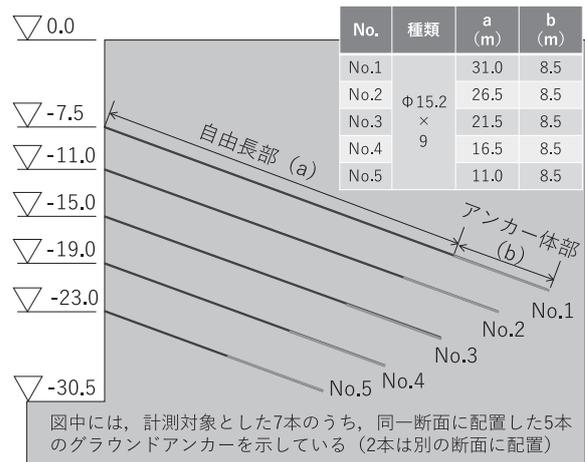
図一七 連続計測システムの概要

3. グラウンドアンカーへの適用実績

(1) 適用条件および計測手順

本計測技術および連続計測システムの実証を目的として、掘削工事における仮設用グラウンドアンカーへ適用した。計測対象としたグラウンドアンカーは7本であるが、図一八にはそのうちの5本について示している。それぞれのグラウンドアンカーは、掘削の進捗に応じて、上部から順番に設置、緊張されている。

現場での施工、計測状況について、写真一に示す。工場にて光ファイバを組み込んだPC鋼より線（ECF



図一八 計測対象としたグラウンドアンカーの諸元



写真一 施工、計測状況

型)を含むPCケーブルを現場へ搬入し、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て削孔内へ挿入した。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を取出し計測機器へ接続して、緊張時および定着直後の張力分布を計測した。その後、光ファイバを連続計測システムの切替装置まで延伸し、同システムによる連続計測を開始した。連続計測は、それぞれのグラウンドアンカーを緊張して定着させた後、1時間に1回の頻度で行った。

(2) 計測結果

計測システムについては、2019年9月に実装した後、2020年1月時において問題なく稼働しており、7本のグラウンドアンカーの張力分布を計測できていることが確認できた。

計測した結果のうち、計測期間中における自由長部の張力の増加が確認されたNo.5について、緊張時か

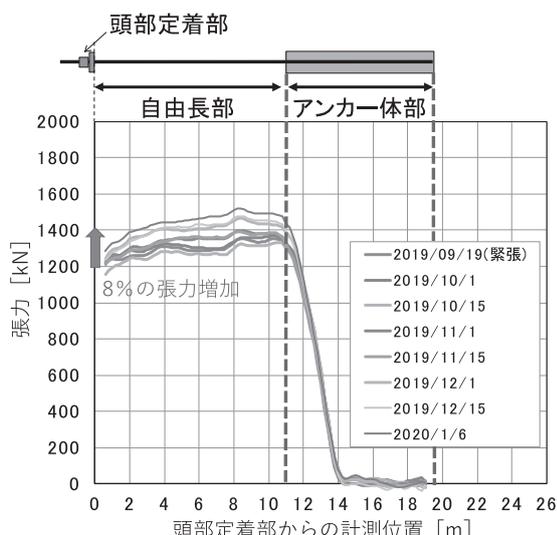


図-9 No.5の計測結果

ら約半月毎の張力分布を図-9に示す。全ての計測結果において、テンドンであるPCケーブルがアンボンドであり摩擦の影響が少ない自由長部では張力が比較的、一定であるのに対し、アンカー体部では緊張側からアンカー体の中央付近にかけて、張力が徐々に低下している状況が確認できる。これは、テンドンの張力がアンカー体を通じて地山に伝達しているためであり、導入された張力に対して想定どおりにグラウンドアンカーが地山に定着されていることを示す結果である。このようなアンカー体部における張力の減少の度合いから、アンカー体の周面摩擦力を土層毎に推定できる可能性がある。経時的な変化としては、9月19日に緊張した後、掘削の進展に伴い11月頃から自由長部の張力が増え始め、1月の時点で緊張時に比べて約8%程度の増加が確認できる。一方、アンカー体部の張力分布は、自由長部の張力の増加に拘わらず変化が小さいことから、地山への定着は緊張時の状態を維持していることが分かる。以上より、No.5については張力が増える傾向にあるものの、仮設用グラウンドアンカーとして健全であると判断できた。なお、その他のグラウンドアンカーについては、No.5よりも張力の増加が小さかったことを確認している。

4. 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、グラウンドアンカーへの適用を図った。また、複数のグラウンドアンカーの張力分布を、1台の計測器械で連続的に計測できるシステムを構築して、仮設用グラウンドアンカー

を対象としてその実用性を実証した。本計測技術は、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、施工時はテンドンに導入された張力の確認による品質確保、供用時はテンドンの異常や張力分布の変動の計測、評価によるグラウンドアンカーや補強された斜面の健全性の評価に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、本技術を活用したグラウンドアンカーや補強された斜面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

光ファイバを用いたグラウンドアンカーの張力計測技術については、住友電気工業(株)、ヒエン電工(株)、(株)エスイーと鹿島建設(株)で共同開発したものである。関係各社の関係者の方々には、本技術の開発、適用にあたり、多大なご協力をいただいた。ここに深甚の謝意を表する次第である。

JCMA

《参考文献》

- 1) 大窪一正, 今井道男, 曾我部直樹, 中上晋志, 千桐一芳, 二羽淳一郎: 緊張管理・維持管理に適用可能な光ファイバを用いたPC張力分布計測技術の開発, 土木学会論文集E2, Vol.76, No.1, pp.41-54, 2020.
- 2) 大窪一正, 今井道男, 曾我部直樹, 戸邊勇人, 中上晋志, 早川道洋, 二羽淳一郎: 光ファイバを用いた引張り力分布計測技術のグラウンドアンカーへの適用, 土木学会論文集A1, Vol.76, No.1, pp.126-138, 2020.
- 3) Leung, Christopher KY, et al: Review: optical fiber sensors for civil engineering applications, Materials and Structures, Vol.48, No.4, pp.871-906, 2015.
- 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.

【筆者紹介】



曾我部 直樹 (そがべ なおき)
鹿島建設(株) 技術研究所
上席研究員



羽田 匡彦 (はねだ ただひこ)
沖電気工業(株) 社会インフラソリューション事業部
課長代理



早坂 洋太 (はやさか ようた)
リテックエンジニアリング(株) 技術本部
技術長