

# 張力モニタリングが可能なSmART ストランド

“SmART Strand” Prestressing Steel Strand with Optical Fiber Sensor for Tension Monitoring

中上 晋志\*  
Shinji Nakaue

大島 克仁  
Katsuhito Oshima

及川 雅司  
Masashi Oikawa

西野 元庸  
Motonobu Nishino

松原 喜之  
Yoshiyuki Matsubara

山田 真人  
Masato Yamada

「SmART ストランド」(スマートストランド)は鋼材本体に作用する張力を測定するためのセンサを備えたPC鋼より線である。SmART ストランドは張力測定用センサとして光ファイバが内蔵されており、光ファイバを用いたひずみ計測技術を用いることによりその全長にわたる張力の分布を計測することが可能である。プレストレストコンクリートやグラウンドアンカーにおいては、構造物にプレストレスを与えるPC鋼材の張力を正確に管理、モニタリングできることが構造物の品質向上や維持管理において非常に重要である一方、従来技術では張力計測が可能な箇所が限定されており、ケーブル全体の長期的なモニタリングが困難であるという課題があった。SmART ストランドはPC鋼より線の全長における張力を把握し、施工完了後も計測可能な技術を提供する。本稿ではSmART ストランドを用いた張力計測技術ならびにSmART ストランドの構造、その適用例について報告する。

SmART strand is a prestressing steel strand equipped with an optical fiber sensor to accurately measure the tension along with the entire length of the prestressing steel cable. For prestressed concrete structures and ground anchors, it is important to ensure that the required tension of prestressing steel cable is provided and maintained. In order to directly evaluate the tension of the prestressing cable during the installation and use, a new measuring method using SmART strand has been developed. SmART strand can be used for the maintenance of prestressed concrete structures and ground anchors, as well as their stress control.

キーワード：PC鋼より線、光ファイバ、張力分布計測、モニタリング

## 1. 緒 言

プレストレストコンクリート<sup>\*1</sup>(以下、PC)構造がその性能を発揮するためには、緊張材であるPC鋼材に所定の張力が導入され、構造物の供用期間中も健全に維持されていることが重要である。しかしながら、PC鋼材の張力管理は緊張施工時においてPC鋼材端部に設置する緊張機器(油圧ジャッキ)の油圧とPC鋼材の緊張伸び量から管理する限りであり、構造物内に曲線的に配置されるPC鋼材の各位置の張力を正確に把握するのが困難であった。また施工完了後に張力を長期にモニタリングする手法が確立されていないのが現状である。

また、グラウンドアンカー<sup>\*2</sup>においては周辺の地形改変やアンカー体の風化・劣化などの原因によりPC鋼材の残存張力が変動することが知られている<sup>(1)</sup>。過度な変動はアンカー体の抜けやPC鋼材の破断、地すべりの抵抗力の低下を生じさせ、最終的に斜面・構造物の崩壊やアンカー頭部の飛び出し・落下などの重大な事象を引き起こす懸念があり、PC鋼材の異常・変状を早期に発見し、効果的な対策を実施することが求められる<sup>(2)</sup>。しかしながら、地中内の張力分布を測定することができないのが現状であり、かつその変動要因についても正確に推定することは困難である。

これらの課題を解決し得る技術として、筆者らは光ファ

イバ組込み式PC鋼より線「SmART ストランド」を用いたPC鋼より線の張力分布計測・維持管理技術を開発した。本計測技術により、コンクリート構造内や地盤内に埋設されたPC鋼より線の任意の位置における張力の変動やPC鋼より線の異常およびその影響範囲を検知・評価することが可能となる。ガラスを主成分とする光ファイバは腐食などの経年劣化に対し高い耐久性を持つ材料であり、さらに、計測用の光ファイバを測定者がアクセスしやすい場所まで延長しておくことによって随時の再計測を安全に行うことが可能になるなど、構造物の維持管理のための長期モニタリングに適した計測技術とも言える。

本稿では本計測技術およびSmART ストランドについて概説する。加えて、本計測技術の適用事例を紹介する。

## 2. 光ファイバを用いたPC鋼より線の張力計測技術

### 2-1 光ファイバを用いたひずみ計測技術

本計測技術では主に Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (以下、BOTDR) 方式(表1)を用いて計測する。BOTDR方式は光ファイバ内に入射した光に対し発生する散乱光のうち、入射光と逆方向に進み計測器に帰還する散乱光(後方散乱光、図1)を利用する。後方散乱

光のうちブリルアン散乱光と呼ばれる成分は入射光の周波数とは異なるピーク周波数を示し、そのシフト量は散乱光が生じた位置のひずみ量と温度に依存するという特性を有する(図2)。また光ファイバ端部から光を入射してから後方散乱光が計測器に帰還するまでの時間は後方散乱光が生じた位置までの長さに対応する帰還時間における周波数特性を解析し、温度依存による周波数シフトを適切に補正することにより、任意の位置に生じているひずみを計測することができる。このひずみ計測をSmART ストランドと組み合わせることにより、PC鋼より線の張力分布計測が可能となる。

表1 BOTDR方式によるひずみ計測の仕様

計測方式	BOTDR
計測精度	約±50μ
最小計測間隔	約5cm
空間分解能	約1m
計測範囲	～数km*
計測時間	約3分/回
光ファイバ	シングルモード

\*光ファイバ全長にわたり任意の点の計測が可能

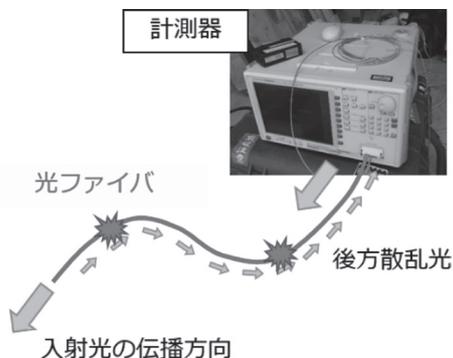


図1 BOTDR方式における光の伝播イメージ

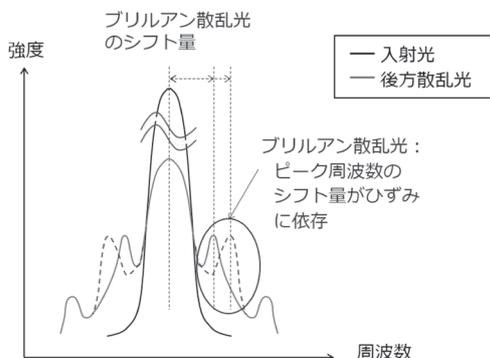


図2 光ファイバによるひずみ計測の原理

## 2-2 光ファイバ組込み式PC鋼より線 [SmART ストランド]

### (1) SmART ストランドの概要

光ファイバを用いたひずみ分布計測技術によりPCケーブル(PC鋼材を1本、または複数本を一つの緊張材として使用したもの)の全長にわたる張力分布を計測するため、今回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んだPC鋼より線「SmART ストランド」を開発した。

今回開発したECF型SmART ストランド(写真1)は内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線(Epoxy Coated and Filled strand, 以下、ECFストランド)に光ファイバを組み込んだPC鋼より線であり、PC橋の外ケーブル<sup>\*3</sup>に使用される標準型のほか、標準型にポリエチレン(以下、PE)被覆を施し耐候性を向上した二重防食仕様のPE被覆型、グラウトやコンクリートとの付着性能を付与するためエポキシ樹脂被覆表面に珪砂を埋め込んだ付着型、主にグラウンドアンカーで使用する緊張区間のみアンボンド化するためのシース付き付着型など、各用途に応じた被覆仕様に対応可能である。

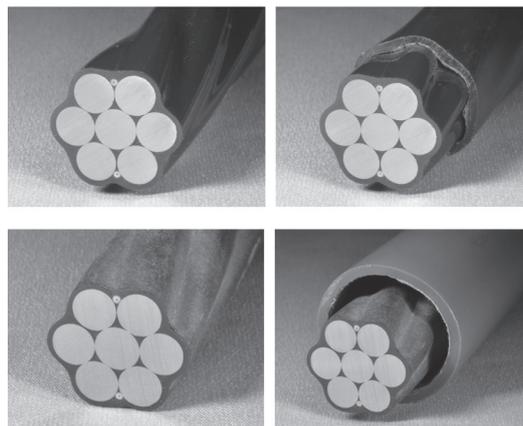


写真1 ECF型SmART ストランド  
(左上:標準型、右上:PE被覆型、  
左下:付着型、右下:PEシース付き付着型)

SmART ストランドは光ファイバをPC鋼より線の2つの側線の谷間に沿って全長にわたり組み込み、樹脂被覆内に光ファイバを埋め込むことにより被覆樹脂と共にPC鋼より線に密着し一体化している(図3)。そのため、PC鋼より線の各位置における緊張伸びに対する光ファイバの伸びが安定的に追従する。外径は汎用の同種PC鋼より線と同様であり、汎用のPC鋼より線をそのままSmART ストランドに置き換えることが可能である。また光ファイバが谷部の空間内に収まっており、かつ堅牢なエポキシ樹脂被覆に保護されているため、接触による光ファイバの折損や潰れ

のリスクが極めて低く、PCケーブルの結束・運搬・コンクリート構造への挿入・緊張など一連の工程においても従来通りの作業が可能である。なお、PC鋼より線を緊張状態でコンクリート構造物へ保持するための定着具（写真2）の設置個所において、PC鋼より線表面へのくさび内面の歯の噛込みが光ファイバに届かないため通光性を阻害せず、緊張施工完了後も定着部の先から光ファイバを計測器に接続し計測を行うことが可能であることも確認している。

なお、本稿では主にECF型について紹介するが、樹脂被覆のないPC鋼より線に接着樹脂にて光ファイバを組み込んだ「裸線型」も開発している。



図3 光ファイバの組込みイメージ

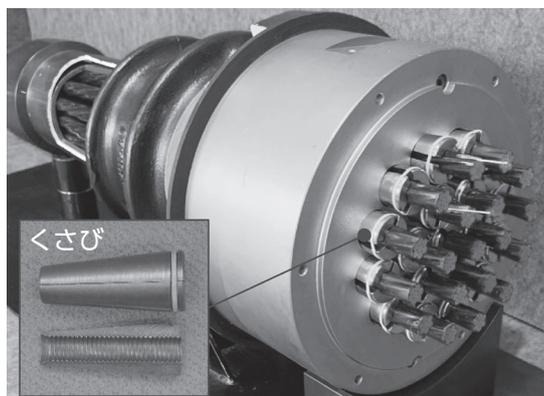


写真2 定着具（くさび定着）の例

## (2) SmART スtrandの機械的性能

SmART スtrandの機械的性能を表2に示す。ECF型は呼び径15.2mmと15.7mm、裸線型は15.2mmがラインナップされている（2020年10月現在）。ECF型の15.2mmについては土木学会規準（案）JSCE-E141<sup>(3)</sup>に準拠する。15.7mmはより高強度タイプのPC鋼より線であり、JIS G 3536で規定される7本よりPC鋼より線（SWPR7BL）と比較し約1.28倍の高強度特性を持ち、近年PC橋梁を中心に広く採用されているPC鋼より線である。15.7mmの機械的性能は「高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指

針」<sup>(4)</sup>に準拠する。裸線型15.2mmの機械的性能についてはSWPR7BLに準拠する。

ECF型は土木学会規準（案）JSCE-E141に基づくエポキシ樹脂被覆の防食性能を確認する品質管理試験をすべて満足し、通常のECFストランドと遜色ない防食性能を有する。その一例として、被覆密着性の試験結果を写真3に示す。被覆密着性試験は鋼より線を小径で屈曲した際に被覆の亀裂、密着不良がないことを確認したものである。評価は目視による確認に加え、放電検査方式のピンホール検査器を用いた確認も実施している。

表2 SmART スtrandの主な機械的性能

タイプ	ECF型		裸線型
	普通強度	高強度	普通強度
呼び径	15.2mm	15.7mm	15.2mm
0.2%永久伸びに対する試験力	≥222kN	≥285kN	≥222kN
最大試験力	≥261kN	≥335kN	≥261kN
伸び	≥3.5%	≥3.5%	≥3.5%
リラクセーション	≤2.5% ≤6.5%	≤6.5%	≤2.5%
エポキシ樹脂被覆厚	400~1200μm <sup>*1</sup> 400~900μm <sup>*2</sup>		—

※1 1断面内の各クラウン部

※2 1断面の全クラウン部（6箇所）の平均値



写真3 曲げ試験時のピンホール検査（ECF型）

## (3) 光ファイバとPC鋼より線の一体性

SmART スtrandについて、光ファイバとPC鋼より線の一体性を確認するため、引張試験機を用いてSmART スtrandを段階的に緊張し、各段階のひずみ計測を行った。図4にその結果の一例を示す。サンプルの長さは約1.2mであり、長さ中央付近でのひずみの値を抽出しプロットしている。サンプル中央付近にひずみゲージを貼り付け計測したひずみ値を比較対象とした結果、SmART スtrandの計測結果と良く一致し、光ファイバとPC鋼より線が一体的な挙動を示すことが確認された。

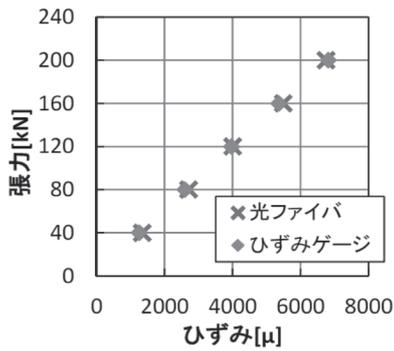


図4 ひずみ計測結果の一例 (ECF型15.2mm)

#### (4) 張力分布への換算方法

光ファイバで計測されるのはひずみ分布であるため、その結果から張力結果をPC鋼より線の張力へ換算することが必要である。7本より線の側線は螺旋状に配置されているため、鋼より線全体の軸ひずみ量に比べ側線の軸方向のひずみ量が異なることを確認しており、本計測技術では予め見かけ上の弾性係数を評価し、その結果から張力への換算を行っている。この換算方法を用いた張力分布計測については、直線および曲線配置での緊張計測試験を実施し、その妥当性を確認している<sup>(5)</sup>。

### 3. 実構造物での適用

#### 3-1 PC橋梁上部工工事への適用

本計測技術について実際のPC構造物への適用性を検証するため、PC橋の上部工工事の各種PCケーブルにSmARTストランドを適用し計測を行った。その一例として、P1柱頭部の内ケーブル<sup>\*3</sup> (図5、図6) およびP2~P4間の外ケーブル (図7、図8) の計測結果を示す。ケーブルは通常のケーブルの施工と同じ手順で定着具、油圧ジャッキを設置し緊張を行った。P1柱頭部内ケーブルには15.2mm裸線型SmARTストランドが、P2~P4間外ケーブルには15.2mmECF型SmARTストランド (標準型) が使用されている。一例として、写真4にP1柱頭部内ケーブルの緊張施工および計測状況を示す。いずれのケーブルにおいても全長の張力分布が計測されており、摩擦による張力損失や定着時のくさびのめり込みによるPCケーブルの伸びの解消による張力損失の影響も計測されている。全長にわたり設計上必要な張力を上回っていることが確認された。また、それぞれ26ヶ月、19ヶ月後に再度計測を行い、問題なく計測が可能であることが確認されている。

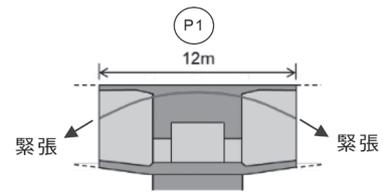


図5 計測対象のケーブル配置 (P1柱頭部内ケーブル)

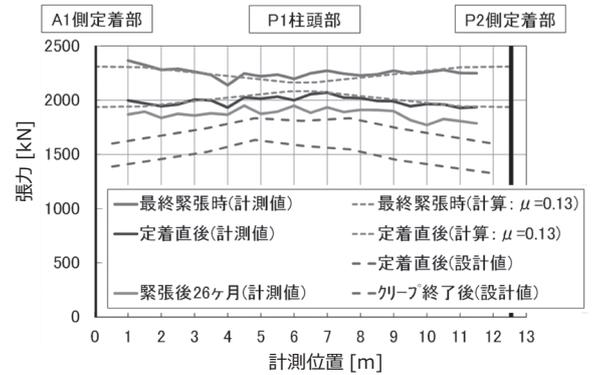


図6 計測結果 (P1柱頭部内ケーブル)

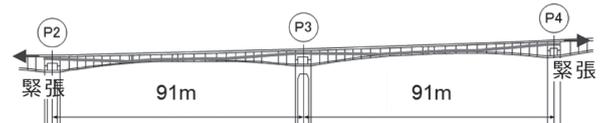


図7 計測対象のケーブル配置 (P2~P4間外ケーブル)

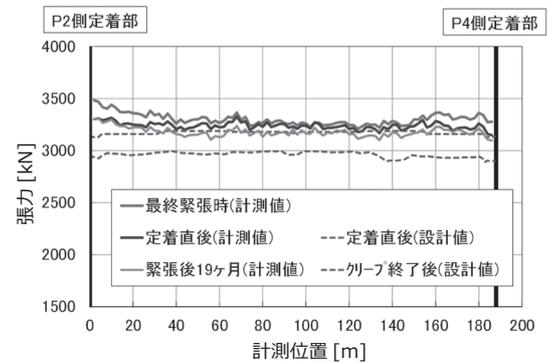


図8 計測結果 (P3~P4間外ケーブル)



緊張用油圧ジャッキ 接続用光ファイバ 計測器

写真4 緊張施工および計測状況の一例

### 3-2 グラウンドアンカーへの適用

本計測技術のグラウンドアンカー工事への適用性を検証するため、法面補強へのグラウンドアンカー施工へ適用し計測を行った(写真5)。本施工には15.2mmECF型SmARTストランド(PEシース付き付着型)を使用した。その結果の一例を図9に示す。アンカー体部の自由長側2m(12~14m)で緊張力を支持し、端部まで張力が伝達しておらず、アンカー体部分に張力を伝達する自由長部では張力がほぼ一定となっており、設計上想定された張力分布であることが確認された。



写真5 グラウンドアンカー工事における計測状況

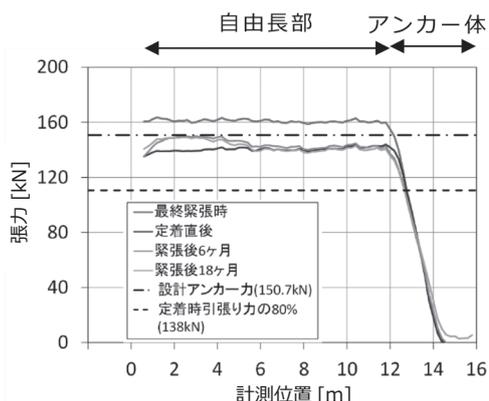


図9 計測結果の一例(グラウンドアンカー)

緊張施工後6ヶ月および18ヶ月後にも再計測を行い、健全な状態を保持していることが確認された。なお、グラウンドアンカーへの適用にあたっては別途、アンカー体の抜けや地滑りなどの変状のモデル実験も行っており<sup>(6)</sup>、張力分布形状からの原因分析の可能性についても検討を進めている。

## 4. 技術研究会の設立

本計測技術を対象とする技術研究会「SmART ストランド張力センサ技術研究会」が設立された。2020年10月現在、建設会社を中心に28社が研究会に参画しており、当社

は本研究会の事務局を担当する。本研究会では本計測技術を用いたPCケーブルの施工・維持管理技術の普及・高度化を目指し活動を行っている。

## 5. 結 言

SmART ストランドを用いたPC鋼より線の張力分布計測技術を開発し、PC橋梁およびグラウンドアンカーにも適用され、その有効性を確認した。

本計測技術は従来困難であったコンクリート内や地盤内を含む任意の位置におけるPCケーブル張力の確認を可能とするものであり、計測結果から推定される変状に応じて対策工を適切に選定・設計可能にするなど、維持管理の高度化に資する技術であると期待される。

## 6. 謝 辞

SmART ストランドおよび本計測技術の開発、適用にあたり鹿島建設(株)、ヒエン電工(株)、(株)エスイーの関係者の方々には多大なご協力を頂いた。ここに深甚の謝意を表する。

## 用語集

### ※1 プレストレストコンクリート (PC)

PC鋼材を緊張材として用い、その緊張力によりコンクリートを予め締め上げる(プレストレスを与える)ことで、ひび割れ発生やひび割れ幅を抑制するコンクリート構造であり、道路橋や鉄道橋、円筒形タンク、建築構造物などに広く用いられている。

### ※2 グラウンドアンカー

PC鋼材を緊張状態で安定地盤に定着し、表層にプレストレスを伝達させるシステムで、法面・斜面安定や地滑り防止、山留壁の安定、地下構造物の浮き上がり防止など、多くの用途に用いられている。

### ※3 外ケーブル、内ケーブル

PC橋で用いられるPCケーブルのうち、コンクリート内にケーブルが配置されるものを内ケーブル、コンクリートの外部(例えば中空コンクリートの内部空間など)に配置されるものを外ケーブルと呼ぶ。

・SmART Strand、SmART ストランドは鹿島建設(株)、住友電気工業(株)の商標です。

参 考 文 献 -----

- (1) 地盤工学会、グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説 (2020)
- (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)
- (3) 土木学会、エポキシ樹脂被覆を用いた高機能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針 (案) (2010)
- (4) 社団法人 プレストレストコンクリート技術協会、高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針 (2011)
- (5) 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)
- (6) 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)

執 筆 者 -----

中上 晋志\* : 特殊線事業部 主査



大島 克仁 : 特殊線事業部 グループ長



及川 雅司 : 特殊線事業部 グループ長



西野 元庸 : 特殊線事業部 グループ長



松原 喜之 : 特殊線事業部 部長



山田 真人 : フェロー  
特殊線事業部 担当技師長



\*主執筆者