

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	光ファイバを用いた張力分布計測技術の開発とPCケーブルおよびグラウンドアンカー tendon への適用
Title(English)	
著者(和文)	大窪一正
Author(English)	Kazumasa Okubo
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4180号, 授与年月日:2020年10月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:二羽 淳一郎,岩波 光保,竹村 次朗,佐々木 栄一,千々和 伸浩
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4180号, Conferred date:2020/10/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

光ファイバを用いた張力分布計測技術の開発と
PC ケーブルおよびグラウンドアンカーテンドンへの適用

2020 年 10 月

大窪 一正

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 本論文の構成	3
1.4 第1章の参考文献	5
第2章 既往の技術および研究	6
2.1 PC 構造物の緊張管理・維持管理	6
2.2 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理	11
2.3 光ファイバを用いたひずみ計測技術	14
2.4 本研究の位置付け	19
2.5 第2章の参考文献	21
第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認	23
3.1 概要	23
3.2 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の開発	25
3.2.1 使用材料および組込み方法	25
3.2.2 品質の確認	28
3.2.3 張力への換算	29
(1) 温度補正係数	
(2) 見かけの弾性係数	
3.3 計測性能確認試験	34
3.3.1 要素試験	34
(1) 試験概要	
(2) 試験結果	
3.3.2 実構造物を想定した引張試験	36
(1) 試験概要	
(2) 試験結果	
3.4 まとめ	45
3.5 第3章の参考文献	46

目次

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用	47
4.1 光ファイバを用いた計測技術の適用性	47
4.2 PC 構造物を想定した計測性能確認試験	48
4.2.1 PC 梁試験体曲げ試験	49
(1) 試験概要	
(2) 試験結果	
4.2.2 PC 鋼より線切断試験	54
(1) 試験概要	
(2) 試験結果	
4.3 実構造物への適用試験	60
4.3.1 実施工現場における計測手順	61
4.3.2 PC 高架橋内ケーブル・外ケーブルへの適用試験	63
(1) 計測の概要	
(2) 緊張時の計測結果	
(3) 施工後の再計測結果	
4.3.3 PC 高架橋内ケーブル (ECF タイプ) への適用試験	74
(1) 計測の概要	
(2) 緊張時の計測結果	
4.4 まとめ	77
4.5 第4章の参考文献	79
第5章 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理への適用	80
5.1 光ファイバを用いた計測技術の適用性	80
5.2 グラウンドアンカーを想定した計測性能確認試験	83
5.2.1 テンドンの引抜けに対する検知性能の確認試験	83
(1) 試験概要	
(2) 試験結果	
(3) 付着応力度の推定	
5.2.2 アンカー体の引抜けに対する検知性能の確認試験	89
(1) 試験概要	
(2) 試験結果	
(3) 付着応力度の推定	
5.2.3 すべり面の発生に対する検知性能の確認試験	97
(1) 試験概要	
(2) 試験結果	
5.3 実構造物への適用試験	103

目次

5.3.1 実施工現場における計測手順	103
5.3.2 法面補強用アンカー工への適用試験	105
(1) 計測の概要	
(2) 緊張時の計測結果	
(3) 施工後の再計測結果	
5.3.3 仮設用グラウンドアンカー工への常時計測適用試験	112
(1) 計測の概要	
(2) 常時計測結果	
5.4 まとめ	114
5.5 第5章の参考文献	116
第6章 結論および今後の課題	117
6.1 結論	117
6.2 今後の課題	119

発表論文一覧

謝 辞

第1章 序論

1.1 研究の背景

プレストレストコンクリート（以下、PC）構造技術は、引張りに弱いコンクリートに予め圧縮応力（プレストレス）を作用させておくことにより、コンクリートへのひび割れの発生やひび割れ幅を抑制することのできる技術であり、道路橋や鉄道橋、円筒形タンクなどに広く用いられている。プレストレスの効果を適切に発揮するには、設計において必要とされたプレストレスが確実に導入され、供用期間中の長期にわたり維持されていることが求められる。

PCケーブルを緊張する際には、内ケーブルではシース管内を、外ケーブルでは偏向管内をケーブルがスライドするため摩擦力が作用し、ジャッキによりPCケーブル端部に作用させた張力は摩擦力によるロスが生じながら構造物躯体の内部に伝達されていくこととなる^{1.1)}。緊張・定着後には、次ブロック以降のコンクリートの打設やPC緊張などの施工による影響、供用期間中には、コンクリートのクリープや乾燥収縮の他、各種荷重の作用などによりプレストレスが変動することが想定される^{1.1)}。また、内ケーブルにおけるグラウトの充填不良などに起因してPC鋼材が腐食・破断する事例が国内でも報告されており^{1.2)}、海外では落橋に至った事例もある^{1.3)}。

PC構造物施工時の緊張管理においては、シース管や偏向管内の摩擦係数を仮定し、ジャッキにより作用させる張力とPCケーブルの伸び量を計測しながら、設計断面に導入されるプレストレス量を間接的に評価する方法が一般的である^{1.4)}。しかし、多数の曲線部を有するような複雑に配置されたケーブルの場合には各断面に導入されるプレストレス量を正確に評価することが難しいこと、緊張時のみに適用される管理方法であり、ケーブル端部を定着してジャッキを取り外した後は張力の変動を計測できないことなどが課題と言える。近年では、任意の位置に設置して、施工時から供用期間中まで継続して張力を直接計測することが可能な磁歪式センサ^{1.5)}も実用化されているが、センサを設置した箇所のみしか計測できないといった課題がある。また、供用期間中にPCケーブルの異常を検知する計測・検査技術としては、漏洩磁束法^{1.6)}や放射線透過法^{1.7)}による非破壊での破断検査技術などの適用実績がある。

PCケーブルの腐食・破断が確認された場合には、外ケーブル補強や炭素繊維プレートを緊張材として用いた補強^{1.8)}などが行われるが、これらの補強工法の設計においては、PCケーブルの腐食・破断によるプレストレス量の減少量やその影響範囲などを適切に評価することが求められる。減少量や影響範囲を過小評価した場合には補強が不十分となることが懸念され、逆に過大評価した場合には過度のプレストレスが導入されることになり、非経済

第1章 序論

的であるだけでなくコンクリートの許容応力度に対して過剰なプレストレスが導入される危険性も生じる。これに対し、磁歪式センサは上述したようにセンサを設置した箇所での張力しか計測できないため、PCケーブルの定着長以上離れた箇所で生じた異常を検知することができない。漏洩磁束法や放射線透過法では任意の位置で生じた異常を検知することが可能であるものの、破断に伴ってプレストレスが変動した範囲やその変動の大きさを評価することは不可能である。

PC 構造物におけるケーブルと同様に、PC 鋼より線を緊張材として使用する技術として、グラウンドアンカーがある。グラウンドアンカーは、テンドンと呼ばれる緊張材として PC ケーブルを用い、作用させた張力を、アンカー体を介して定着地盤に伝達させるシステムであり、法面・斜面の安定や地すべり防止、山留め壁の安定、地下構造物の浮き上がり防止などに広く用いられている。設計上求められるグラウンドアンカーの性能を確実に発揮するためには、所定の張力が導入、地盤に伝達され、供用期間中の長期にわたり維持されていることが重要である。

供用期間中には、周辺の地形改変や地下水位の変動、アンカー体グラウトの風化・劣化などの要因により、残存張力が変動することが知られている^{1.9)}。設計時の想定を上回る張力の過度な変動は、アンカー体の引抜けやテンドンの破断、地すべりへの抵抗力の喪失などを生じさせ、最終的には斜面・構造物の崩壊やアンカー頭部の飛出し・落下などの重大な事象に至る可能性がある。このため、グラウンドアンカーの維持管理においては、アンカーの異常・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ている^{1.10)}。

グラウンドアンカーの施工時には、施工数量の5%以上かつ3本以上を対象とした適正試験、および残り全数を対象とした確認試験を実施し、アンカーの設計・施工が適切に行われ、アンカー体が確実に定着されていることを確認した後に、本緊張・定着を行うこととされている^{1.9)}。供用期間や構造物の条件に応じて、設計アンカー力の1.10倍～1.25倍を上限として、確認試験では1サイクル、適正試験では多サイクル（一般的には5サイクル以上）の緊張と除荷を行う。

供用期間中の維持管理は、点検、健全性調査および対策工からなる。日常点検や定期点検、豪雨や地震後の異常時点検などによって異常や変状が認められた際には、その原因を分析して対策工の必要性を判断するための健全性調査が行われる。健全性調査では、アンカー頭部およびその背面の詳細調査や防錆キャップ内部の防錆油の品質確認試験など、地上部においては目視を中心とした調査を行う。地中部の変状が疑われる際には、超音波探傷試験によるテンドンの探傷や、リフトオフ試験による残存張力の計測などが行われる^{1.11)}。また、アンカー頭部に予め荷重計を設置することで残存張力の経時変化をモニタリングすることも可能である^{1.12)}。

残存張力の変動が確認された場合には、既存のアンカーの再緊張や緊張力緩和、追加のアンカーの施工などの対策工が行われるが^{1.10)}、適切な対策工の選定・設計を行うためには、

張力の変動量に加え、アンカー体の健全性を適切に評価することが重要となる。アンカー体グラウトや定着地盤の風化・劣化などにより、既に必要な定着力が失われている場合には、再緊張を行うことにより引抜けが生じてしまう危険性が生じるためである。

これに対し、従来の残存張力計測技術では、アンカー頭部における残存張力しか計測することができない。このため、アンカー頭部における変動が計測されたとしても、アンカー体内部を含む地中の変動を確認することはできず、その原因やアンカー体の健全性を推定するには、アンカー頭部周辺や地山全体の調査結果などと併せて総合的に判断する必要がある。また、リフトオフ試験では法面上で油圧ジャッキを用いた緊張作業を行う必要があり、足場を含めた多くの資機材が必要であることに加えて作業の安全性の面でも課題があると言え、頻繁な計測を行うことは難しい。一方、荷重計を用いたモニタリングに関しては、屋外の厳しい使用環境に長期間晒されることとなるため、荷重計自体が10年程度で使用できなくなるケースも多い。このような背景から、グラウンドアンカー維持管理マニュアル^{1.10)}においても、耐久性に優れ、計測が容易で、アンカー深部のテンドンの状態を確認できる計測技術が必要であるとされている。

1.2 研究の目的

前節で述べたように、PC構造物においては、施工時の緊張管理では構造物内部の任意の位置に導入されるプレストレス量を確認でき、供用期間中の維持管理では任意の位置に生じたケーブル破断などの異常を検知するとともに、その異常に伴うプレストレスの変動の範囲や大きさを評価可能な計測技術が求められている。グラウンドアンカーにおいても、供用期間中の長期にわたり使用可能で、容易に、地中のアンカー体の健全性を確認できる計測技術が必要とされている。

そこで本研究では、これらの課題に応えることを目的とし、既に実用化されている全長にわたるひずみ分布を計測可能な光ファイバセンサを応用し、PCケーブルやグラウンドアンカーテンドンとして用いられるPC鋼より線の張力分布を計測する技術を開発した。各種室内試験によりその計測性能を確認すると共にPC構造やグラウンドアンカーへ適用した際の効果について検証した後、実際の工事に適用し、本計測技術の有用性を確認した。

本論文では、開発した張力分布計測技術の概要、計測性能確認試験の結果や、実工事への適用試験について述べる。

1.3 本論文の構成

第1章では、本研究の背景及び目的、本論文の構成について述べた。

第2章では、PC構造物およびグラウンドアンカーにおける緊張管理や維持管理の従来技術や既往の研究についてまとめ、本研究の位置付けについて述べる。

第3章では、本研究で開発した計測技術について述べると共に、室内試験にて確認した基本的な計測性能について述べる。

第1章 序論

第4章では、PC 構造物への適用を想定した、緊張管理・維持管理への適用性の検証、および実際の PC 橋梁上部工工事への適用試験について述べる。

第5章では、グラウンドアンカーへの適用を想定した、緊張管理・維持管理への適用性の検証、および実際のグラウンドアンカー工事への適用試験について述べる。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめると共に、今後の課題について述べる。

図 1.3-1 に本論文の構成を図示する。

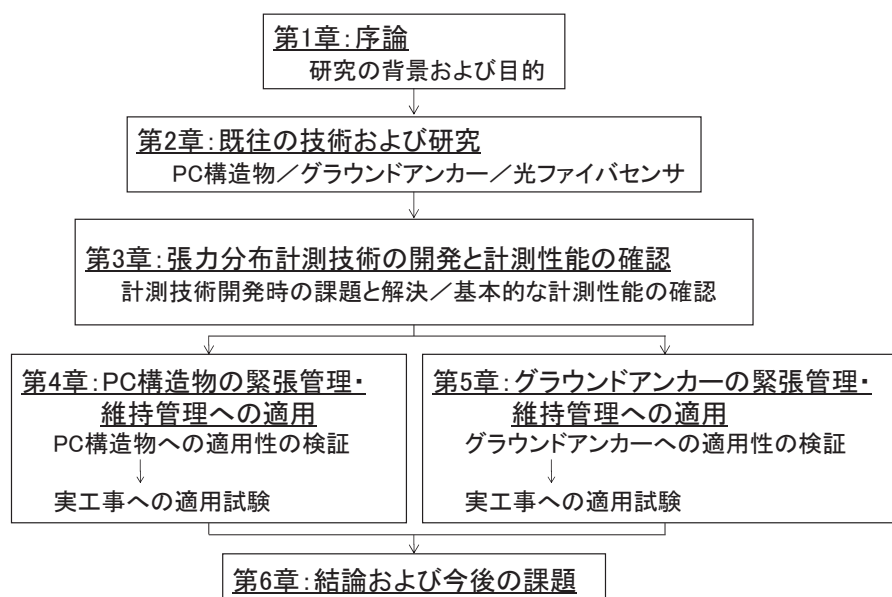


図 1.3-1 本論文の構成

1.4 第 1 章の参考文献

- 1.1) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2017.
- 1.2) 宮下孝，小林憲一，加藤久紀，島津美砂子：妙高大橋の PC ケーブル損傷に伴う外ケーブル補強と今後の維持管理について，国土交通省北陸地方整備局 事業研究発表会論文，2012.
- 1.3) Woodward, R.J. and Williams, F.W.: Collapse of Ynys-y-Gwas bridge, West Glamorgan., Proc. of the Institution of Civil Engineers, Vol.84, No.4, pp.635-669, 1988.
- 1.4) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2017.
- 1.5) 國富康志，只熊公義，及川雅司，石塚純：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，pp.363-365，2013.
- 1.6) 廣瀬誠，青木圭一，宮川豊章：漏洩磁束法によるポストテンション実橋における PC 鋼材破断調査，第 23 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.467-470，2014.
- 1.7) 大島義信，宇佐美惣，石田雅博，土橋克宏，上坂充：可搬型高出力 X 線による PC 桁内部の可視化実験，土木技術資料，Vol.57, No.9, pp.34-37, 2015.
- 1.8) 安森浩，濱田譲，小林朗，葛目和弘：コンクリート構造物の炭素繊維プレート緊張材による補強と適用，コンクリート工学，Vol.44, No.10, pp.27-34, 2006.
- 1.9) 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，2012.
- 1.10) 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.
- 1.11) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーのリフトオフ試験方法に関する検討，土木学会論文集 C, Vol.67, No.4, pp.558-568, 2011.
- 1.12) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーの残存引張り力のモニタリング手法に関する検討，土木学会論文集 C, Vol.68, No.3, pp.547-563, 2012.

第2章 既往の技術および研究

本章では、PC 構造物およびグラウンドアンカーにおける緊張管理や維持管理の従来技術や既往の研究、および光ファイバを用いたひずみ計測に関する既往の技術・研究についてまとめる。

2.1 PC 構造物の緊張管理・維持管理

PC 構造物においてプレストレスの効果が適切に発揮されるには、設計において必要とされたプレストレスが、施工時に確実に導入され、供用期間中の長期にわたり維持されていることが求められる。このため、施工時には適切な緊張管理によってプレストレスが確実に導入されたことを確認する必要がある、供用期間中には、定期点検などによって PC ケーブルの健全性や残存プレストレス量を確認することが、適切かつ経済的な維持管理に繋がる。

現在一般的に行われている施工時の緊張管理手法、およびこれまでに実用化されてきた、PC ケーブルの健全性確認や残存プレストレス量計測に関する技術を以下にまとめる。

ジャッキ油圧とケーブル伸び量に基づく緊張管理

本章では、ポストテンション方式の内ケーブルへのプレストレス導入時における緊張管理手法について述べる。

PC 構造物においては、想定される曲げモーメントの分布などに対して必要な位置に効率的にプレストレスを導入するため、曲線状に配置された PC ケーブルが多く用いられる（図 2.1-1）。この時、曲線配置されたシース管と PC ケーブルとの間の摩擦や、定着時にくさびの刃が鋼より線表面に食い込むまでにケーブルが内側に引き込まれること（セット）によって、PC ケーブルに導入される張力は一様にはならず、図 2.1-2 に示すような分布を示す^{2.1)}。さらに、ケーブルの緊張・定着後にも、次ブロック以降の施工による影響や、コンクリートのクリープや乾燥収縮によるプレストレスのロスなどが想定されるため、これらを考慮して、施工時に十分な張力を PC ケーブルに導入する必要がある。

ここで、摩擦による張力のロスは式 2.1-1 により計算され、定着時のセットによるロスは、定着前後の張力分布図に囲まれる面積 A_{ep} （図 2.1-2 参照）が式 2.1-2 を満たすように決定される^{2.1)}。設計時の計算で用いる摩擦係数 μ 、 λ やセット量 Δl は、シース管の材質や形状、PC ケーブルの種類などに応じて規定されている。

$$P_2 = P_1 \times e^{-(\mu\alpha + \lambda x)} \quad \text{式 2.1-1}$$

$$A_{ep} = E_{PC} \times A_{PC} \times \Delta l \quad \text{式 2.1-2}$$

ただし、 P_2 ：摩擦ロス後の張力（kN）、 P_1 ：摩擦ロス前の張力（kN）、

μ : 角度変化 1rad.あたりの摩擦係数, α : 角度変化 (rad.),
 λ : PC ケーブルの単位長さあたりの摩擦係数, x : ケーブル長 (m),
 A_{ep} : 図 2.1-2 に示した定着前後の張力分布図に囲まれる面積 (N・mm),
 E_{PC} : PC 鋼材の弾性係数 (N/mm²), A_{PC} : PC 鋼材の断面積 (mm²),
 Δl : セット量 (mm)

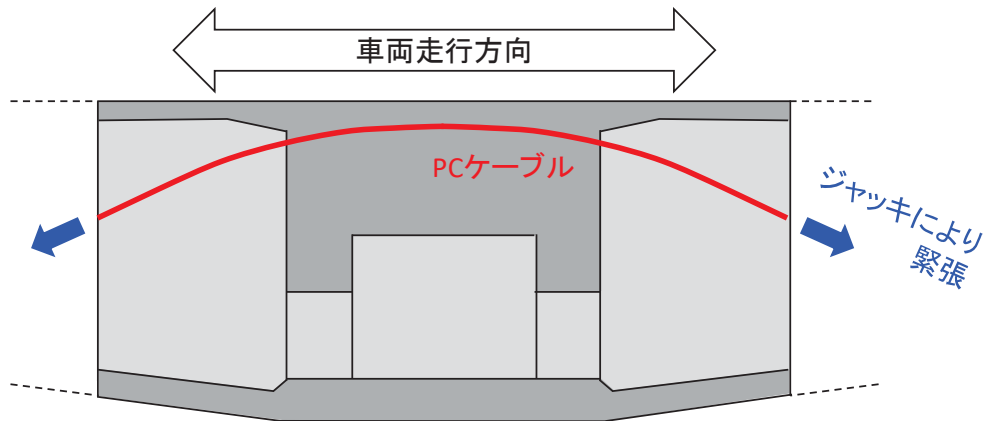


図 2.1-1 PC ケーブルの曲線配置の例 (PC 橋梁柱頭部)

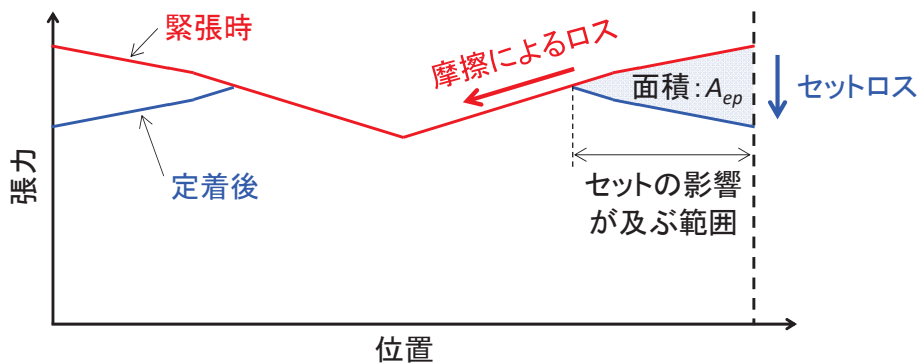


図 2.1-2 曲線配置された PC ケーブルに導入される張力分布のイメージ

このような PC 構造物に対し、従来の緊張管理においては、ジャッキにより作用させる張力と PC ケーブルの伸び量から、各断面に導入されるプレストレス量を間接的に評価する方法が一般的であった^{2.2)}。これは、計測された作用張力とケーブル伸び量（正確には、純粋なケーブルの伸び量に、シース管内でのケーブルの移動やコンクリートの弾性変形による影響を含めた計測値）との関係から摩擦係数を逆算し、得られた値が設計で仮定した摩擦係数から一定のばらつきの範囲内に収まっていることを確認することによって、設計で想定したとおりのプレストレス量の分布が導入されていると判断する、という考えである。具体的な手法を図 2.1-3 および以下に示す。試験緊張結果から得られた見かけの弾性係数と、任

第2章 既往の技術および研究

意の2つの値を仮定された摩擦係数 μ_A と μ_B （例えば、0.4と0.2など）から計算された、所定のプレストレス量に相当する張力とケーブル伸び量を求め、緊張管理図にプロットする（図2.1-3中、A点およびB点）。緊張中、張力とケーブル伸び量の関係を緊張管理図にプロットし、A点とB点を結ぶ直線（引止め線）に達した時点で、緊張を終了、定着する。計測された張力と伸び量の傾きから実際の摩擦係数を求め、許容範囲内に収まっていることを確認する。

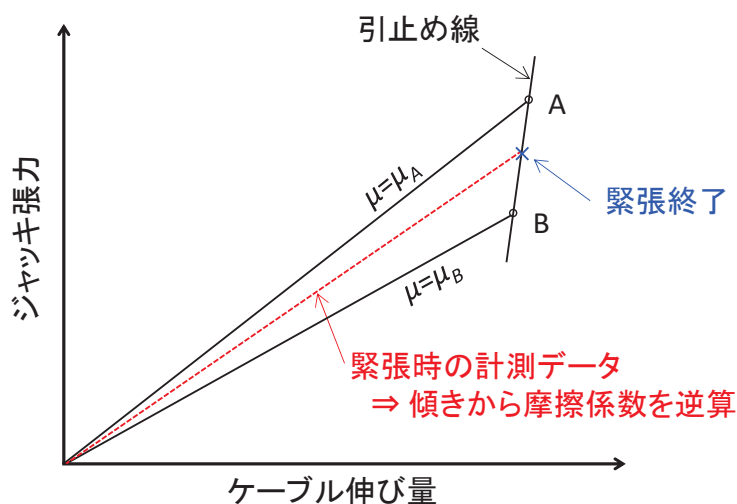


図 2.1-3 PC ケーブルの緊張管理図

（コンクリート標準示方書【施工編】，解説 図 10.5.1 参照）

以上のようなPC構造物における従来の緊張管理手法は、多数の材料試験・施工試験などの結果に基づいて規定されており、また多数の実績もあることから、一般的には十分な精度と信頼性のある手法であると言える。しかしこの手法は、PCケーブル端部に作用させる張力とPCケーブル全体の伸び量から、構造物内部の各断面に導入されるプレストレス量を間接的に評価する方法であり、例えば多数の曲線部を有するような複雑に配置されたPCケーブルなどの場合には、正確な評価が難しいことが課題と言える。また、ジャッキを撤去して以降は張力の変動を計測できないこともまた、本手法の課題である。

磁歪式センサを用いた張力計測

鋼材は、張力を加えられた際に磁気特性が変化するという性質がある。この特性を利用し、PC鋼より線に作用している張力を計測することを可能としたのが、磁歪式センサである^{2,3)}。磁歪式センサは、PCケーブル端部に作用させる張力しか直接計測することができないジャッキ油圧とケーブル伸び量に基づく従来の緊張管理と異なり、PCケーブルの延長上の任意の位置に取り付け、その位置における張力を直接計測することができる。また、緊張時の計測に加え、センサ内に内蔵した乾電池などの動力によって供用期間中の長期にわたり継続

的な計測を行うことも可能である。PCケーブルの配置後にセンサを取り付ける際や、データ回収時にパソコンを接続する際などにアクセスが容易な、外ケーブルに用いられることが多い。図 2.1-4 に、磁歪式センサの外ケーブルへの取り付け状況の例を示す。



図 2.1-4 磁歪式センサの外ケーブルへの取り付け状況の例

磁歪式センサの計測精度は、鋼材の最大緊張力の $\pm 5\%$ とされている。例えば7本よりのPC鋼より線 S15.2 (SWPR7BL) であれば、最大緊張力は 200kN であるため計測誤差は $\pm 10\text{kN}$ となる。

國富ら^{2.3)}は、PC箱桁橋の外ケーブルを対象に、緊張時およびその後3年間にわたり、磁歪式センサを用いた張力の継続的な計測を行っている。その結果、センサ設置位置において必要な張力が設計時の計算どおり導入されていること、その張力が施工後も設計時の管理範囲内で適切に維持されていることが、磁歪式センサによって直接計測・評価可能であることを確認している。

以上のように磁歪式センサは、PCケーブル延長上の任意の位置で、緊張時から供用期間中にかけて、張力を直接計測することができる計測技術であり、特に外ケーブルの緊張管理・維持管理において有効な計測技術であると言える。しかし、コンクリート躯体内に埋設したシース管内に挿入される内ケーブルに適用するには、コンクリートに切欠きを設けることなどが必要となる。また内ケーブルはグラウト材との付着によって躯体と一体化されるため、センサ設置箇所からPCケーブルの定着長以上離れた位置での破断などは検知できないことなどが課題と言える。

漏洩磁束法による PC 鋼材破断の検知

漏洩磁束法は、PC鋼材が強磁性体であることを利用し、永久磁石によって着磁されたPC鋼材周囲の磁束密度分布波形（磁束密度－鋼材長手方向位置）を計測することで、PC鋼材の健全性を判定する手法である^{2.4)}。検査装置は、検査対象となるPC鋼材を長手方向に磁

第2章 既往の技術および研究

化するための永久磁石を内蔵した磁石ユニットと、コンクリート表面における磁束密度を計測するための磁気計測ユニットからなる。PC鋼材が健全であれば、着磁によってN極となった鋼材片端からS極となった他端まで、磁束密度は単調減少するはずである。しかし、鋼材に破断が生じていると、その破断面から磁束が漏洩することで中間的にS極とN極が発生し、磁束密度は極小値・極大値を持つような分布波形を示す。よって、対象が既設の構造物であっても、磁石ユニットによってコンクリート表面からPC鋼材を着磁し、周囲の磁束密度分布波形を計測することで、PC鋼材の破断の有無を検知することが可能となる。

廣瀬ら^{2.4)}は、PC鋼材の破断を模擬した室内試験によって検知性能を確認した後に、既設PC橋梁におけるPC鋼材の非破壊調査を実施している。対象とした橋梁は、供用40年以上が経過した海岸線に位置するポストテンション方式のPCT桁橋で、コンクリートの浮きや剥離があり、PC鋼材破断を伴うような激しい腐食が確認されている。調査の結果、PC鋼材は鋼製シース管内に配置されているが、漏洩磁束法によってPC鋼材の破断の有無を明瞭に判定でき、またその検知された破断箇所は、はつり調査の結果と一致していることを確認している。

このように漏洩磁束法は、施工時に特にセンサなどを設置していない既設のPC構造物に対しても、非破壊でPC鋼材の破断の有無を検知できる技術である。ただし、多段配置されたPC鋼材への調査が困難であることや、破断を検知したとしてもその影響範囲は評価できないことが課題である。

放射線透過法によるPC鋼材破断の検知

放射線透過法は、コンクリート構造物に対してX線を照射して躯体内部を可視化する技術である。これにより、PC構造物内部のグラウト未充填区間やPC鋼材の腐食による減肉量の測定、鋼材破断の有無の検知などが期待される。大島ら^{2.5)}は、従来よりも高出力のX線発生装置を開発し、供用を終えて撤去されたPCT桁橋を対象とした撮像試験を実施している。その結果、厚さ159mmのウェブや最大厚さ350mmのフランジにおいても内部を可視化することが可能であり、コンクリート内部の9mmおよび13mmの鋼材径の差異を明確に区別可能であることを確認している。

本技術は、施工時に特にセンサなどを設置していない既設のPC構造物に対しても、非破壊で調査が可能であり、鋼材破断など構造特性への大きな影響がまだ出ていない段階においても、グラウト未充填区間や鋼材の減肉量を計測できるなどの利点がある。しかし一方で、比較的規模の大きな装置を要することや、漏洩磁束法と同様、破断を検知したとしてもその影響範囲の評価は困難であることなどが課題である。

応力解放法による残存プレストレス量の推定

応力を受けている物体が、溝状の切り込みを入れたことなどによって周辺から切り離されると、作用していた応力が解放され、変形が元に戻ろうとするようなひずみの変化が生じ

る。この挙動を利用して、もともと作用していた応力を推定する手法が応力解放法である^{2.6)}。鋼構造の分野で行われている穴あけ法^{2.7)}や岩盤力学の分野で行われるオーバーコアリング法^{2.8)}をコンクリートに応用したもので、PC 構造物のコンクリート表面に作用している残存プレストレス量の調査などに用いられる。測定対象となるコンクリート表面にひずみゲージを（一般的にはロゼッタ状に）貼り付け、その周囲を切り欠くことによって応力を開放し、その時のひずみの変化量と、別途計測したコンクリートの弾性係数から作用していた応力を推定するものである。

樋口ら^{2.6)}は、鉄筋かぶりまでの範囲内での切り欠き深さをパラメータとして、FEM 解析や要素試験によって切り欠き後のコンクリート表面周りのひずみ分布の変化を検証し、応力解放法による応力の推定精度を評価している。また肥田ら^{2.9)}は、海岸近傍に位置し既にコンクリートの浮き・剥離等の変状が顕在化している既設 PCT 桁橋を対象に、応力解放法による残存プレストレス量の推定を試み、設計時の想定よりもプレストレス量が失われていることを確認している。

本技術は、施工時に特にセンサなどを設置していない既設の PC 構造物に対しても適用が可能である。また、コンクリート表面にどれだけの圧縮応力が作用しているか、ということが PC 構造物のひび割れ制御において重要となるが、その作用応力そのものを推定可能な技術である。ただし、一般的に既設構造物のコンクリート表面には乾燥収縮が生じているが、乾燥収縮の影響を適切に除去する方法が確立されていないこと、非破壊検査ではなく、調査時に比較的多くの資機材や作業を要することなどが課題と言える。

2.2 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理

グラウンドアンカーにおいては、緊張材のことを「テンドン」、テンドンに作用する張力のことを「引張り力」と表記するのが一般的なため、以下、本論文内のグラウンドアンカーに関する記述においてはこれらの表記を用いる。

法面補強などを行った際、設計上求められるグラウンドアンカーの性能が適切に発揮され、法面崩壊やアンカー頭部の飛出し・落下などを防止するには、施工時に所定の引張り力が導入、地盤に伝達され、供用期間中の長期にわたり維持されていることが求められる。このため、施工時には適切な緊張管理によって、アンカー体が健全に定着され、引張り力が確実に導入・伝達されたことを確認する必要がある。供用期間中には、定期点検などによってテンドンやアンカーの健全性や、残存引張り力を確認することが重要である。

現在一般的に行われているグラウンドアンカー施工時の緊張管理手法、および残存引張り力計測に関する技術を以下にまとめる。

ジャッキ油圧とテンドン伸び量に基づく緊張管理（適正試験・確認試験）

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。これらの内、摩擦型グラウンドアンカーの構造イメージを図 2.2-1 に示すが、いず

れのタイプにおいても、グラウンドアンカー tendon は、周囲の地盤に定着されるアンカー体の内部と、シーズによって周囲との間の付着が切られた状態（アンボンド）の自由長部とに分けられる^{2.10)}。

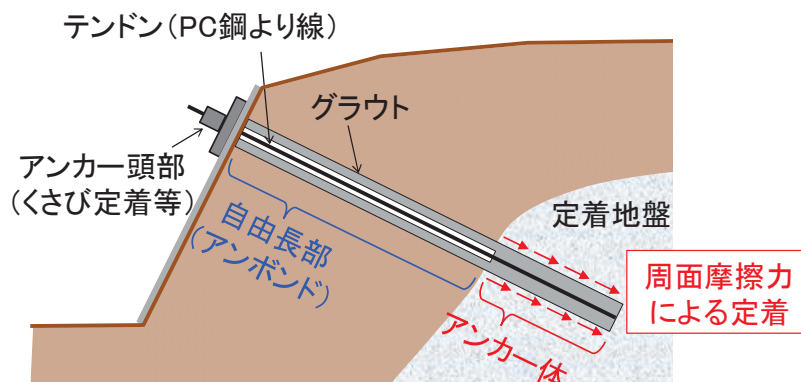


図 2.2-1 摩擦型グラウンドアンカーの構造のイメージ

グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説^{2.10)}では，グラウンドアンカー施工時には，アンカー本数の5%以上かつ3本以上を対象とした適正試験，および残り全数を対象とした確認試験を実施し，アンカーの設計・施工が適正に行われ，アンカー体が確実に定着されていることを確認した後に，本緊張・定着を行うこととしている。供用期間や構造物の条件に応じて，設計アンカー力の1.10倍～1.25倍（表 2.2-1）を上限として，確認試験では1サイクル，適正試験では多サイクル（一般的には5サイクル以上）の緊張と除荷を行う。

表 2.2-1 グラウンドアンカーの分類と試験時の計画最大荷重

構造物の種類	供用期間	分類	試験時の計画最大荷重
特殊な条件下にある構造物	—	ランク A	$1.25T_d^{*}$
一般の構造物	2年以上		
	2年未満	ランク B	$1.10T_d^{*}$

※ T_d ：設計アンカー力

試験中は荷重および変位量の計測を行い，試験結果を用いて，設計アンカー力に対して安全かどうか，荷重－変位量曲線が適切かどうか，などの項目から設計・施工が適正であるか否かの判定を行う。前者については，設計アンカー力以上に設定された最大荷重に対して引抜けが生じないこと，後者については，設計上の理論伸び量に対して±10%以内を許容範囲として判定を行うこととしている。

図 2.2-2 に，確認試験で得られた緊張管理図（荷重－変位量曲線）の例を示す。ここで，設計上の理論伸び量に対して適性試験・確認試験で得られた変位量が小さい場合には，自由

長部内の付着が適切に切られていないなどの異常が想定される。逆に、試験で得られた変位量が大きい場合には、地盤の変形量が想定より大きいことやアンカー体の抜出しなどの異常が想定される。

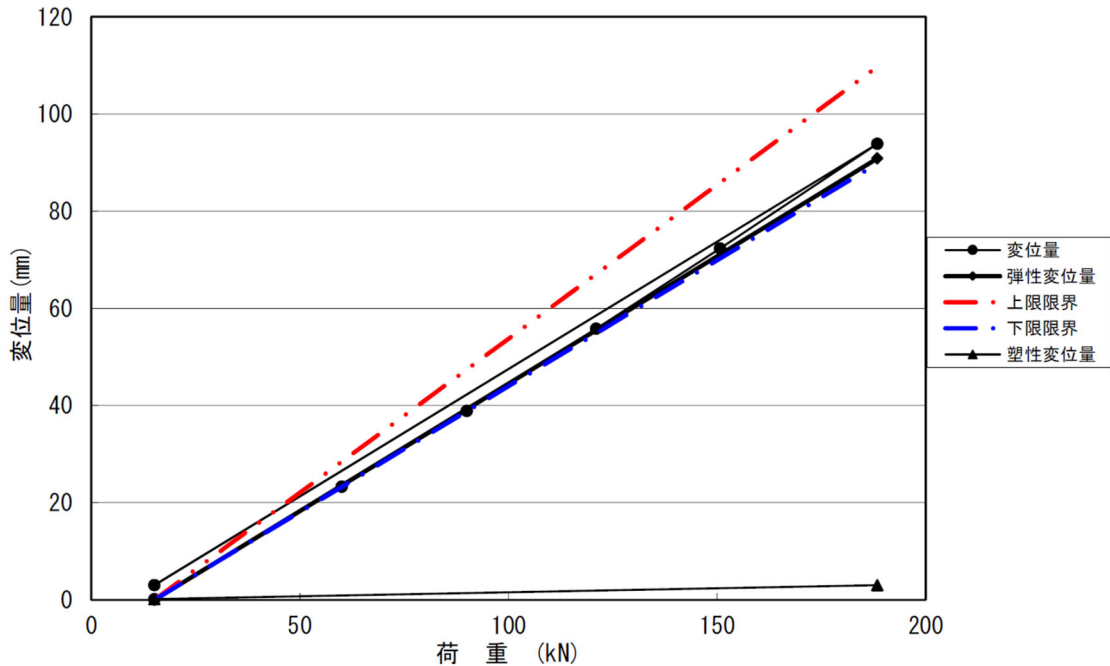


図 2.2-2 確認試験時の緊張管理図（荷重－変位量曲線）の例

以上のように、従来のグラウンドアンカーの緊張管理手法によって、施工時において設計アンカー力に対して安全に定着されているかどうかを確認することができる。しかし、アンカー体内部の状態自体は不明であり、引抜けに対する余裕度などは確認することができない。

リフトオフ試験による残存引張り力の計測

リフトオフ試験は、アンカー頭部のテンドン余長部に油圧ジャッキを設置して引張り荷重を載荷し、アンカー頭部の定着具が支圧板から離れ始める荷重を計測することで残存引張り力を計測する試験である。同試験は、アンカー頭部の定着タイプの違いによって試験方法（使用するジャッキや載荷方法、定着具変位の計測方法など）が異なるが、藤原ら^{2.11)}はこれらの試験方法の違いが計測結果に与える影響について検証を行っている。その結果から、1サイクルの予備載荷を行った後に2サイクル目を本載荷として計測すること、定着具が実際に支圧板から離れ始める荷重ではなく荷重－変位曲線から変曲点を求め（リフトオフ前後の直線勾配の交点）荷重を読み取ること、使用するジャッキの種類（テンションバーの使用の有無）を考慮した評価を行うことなどを提案している。

第2章 既往の技術および研究

本技術は、施工時に特にセンサなどを設置していない既設のグラウンドアンカーに対しても適用が可能で、残存引張り力を精度良く計測可能な技術である。しかし、アンカー頭部における残存引張り力しか計測することができないため、仮に残存引張り力の変動が計測されたとしても、アンカー体内部など地中の状況を確認することはできず、変動の原因やアンカー体の健全性を推定するには、アンカー頭部周辺や地山全体の調査結果などと併せて総合的に判断する必要がある^{2.12)}。また、法面上で油圧ジャッキを用いて引張り荷重の載荷を行う必要があるため、足場や油圧ポンプ、ジャッキなど多くの資機材が必要であることに加え、作業時の安全性の面でも課題があると言える。

荷重計による残存引張り力のモニタリング

グラウンドアンカーの残存引張り力のモニタリング手法として、アンカー頭部の定着具と支圧板との間に荷重計（センターホールロードセルなど）を設置し、常時計測を行う手法がある。藤原ら^{2.13)}は、種類の異なる定着タイプや荷重計を対象とした比較試験を行い、荷重計自体の温度特性に加えアンカー頭部構造が持つ温度特性なども計測結果に影響している可能性を示すと共に、経年劣化した荷重計の機能検定試験や交換を行う技術を開発している。

本技術は、常時の引張り力モニタリングが可能であり、計測時には特別な資機材は不要であるなどの利点がある。しかし、リフトオフ試験同様、アンカー頭部における残存引張り力しか計測することができず、変動が生じた際の原因推定には、その他の調査結果などと併せて総合的な判断を行う必要がある。また、荷重計は屋外の厳しい使用環境に長期間晒されることとなるため、10年程度で使用できなくなるケースも多く^{2.12)}、その場合はリフトオフ試験と同様に一度アンカー頭部に引張り荷重を載荷してリフトオフさせた上で、荷重計を交換する必要がある。この交換作業には油圧ジャッキなど多くの資機材が必要であることに加え、作業時の安全性の面でも課題があると言える。

2.3 光ファイバを用いたひずみ計測技術

前章で述べたとおり、本研究では、全長にわたるひずみ分布を計測することが可能な光ファイバセンサを応用し、PC ケーブルやグラウンドアンカーテンドンとして用いられる PC 鋼より線の張力分布を計測可能な技術を開発した。近年では、既に光ファイバを使用したひずみ計測技術が多数実用化されており、土木分野における適用も進められている^{2.14)}。光ファイバの破断時の伸び性能は 30,000 μ 程度であり^{2.15)}、ガラスを主成分としているため電氣的・化学的に安定しており、供用期間中の長期にわたる計測に適した高耐久の材料であると言える。ひずみ計測技術として、PC 構造物におけるコンクリート表面のひび割れ検知を目的として 10 年以上にわたって長期計測が続けられている事例もある^{2.16)}。

本節では、本計測技術で用いた方式を始めとした、光ファイバによるひずみ計測に関する既往技術・研究についてまとめる。併せて、それらをコンクリート補強材のひずみ計測やグ

ラウンドアンカーのモニタリングに適用することを目的とした既往の研究事例について紹介する。

分布型ひずみセンサの計測原理

本研究では、Brillouin Optical Correlation Domain Analysis（以下、BOCDA）方式および Brillouin Optical Time Domain Reflectometer（以下、BOTDR）方式の2種類のひずみ計測センサを使用した。いずれも、通信用に用いられる一般的な光ファイバを計測器に接続するだけで、ファイバ全長にわたるひずみ分布を計測可能な技術である。以下、これらの計測原理について概説する。

計測器から光ファイバに光を入射すると、ファイバ内の各点から散乱光と呼ばれる光が発生し、その一部（後方散乱光）は入射光の伝搬方向とは逆方向に進み、計測器に帰還する（図 2.3-1）。この後方散乱光には、入射光の周波数とは異なる周波数成分がいくつか含まれる。その内の一つ、ブリルアン散乱光と呼ばれる成分は、ピーク周波数のシフト量（入射光の周波数との差）が、散乱光が生じた位置のファイバのひずみ量と温度に依存するという特性を持つ（図 2.3-2）^{2.17)}。ここで、光ファイバ端部から光を入射してから後方散乱光が戻るまでの帰還時間は、後方散乱光が生じた位置までの長さに比例する。よって、計測器から光を入射して以降の後方散乱光を連続的に記録し、計測対象位置までの光ファイバ長さに対応する帰還時間における周波数特性を解析することにより、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。この原理に基づいたひずみ計測技術が、BOTDR 方式である。一方 BOCDA 方式では、光ファイバの両端部を計測器に接続し、両端から光を入射させることによって光ファイバ内部で入射光を衝突させ、その時発生するブリルアン散乱光を記録・解析することによりひずみを計測する。その際、両端から入射する光の周波数に変調を施すことによって、入射光が衝突する位置をコントロールし、任意の位置で、かつ高い空間分解能での計測が可能となる^{2.18)}。

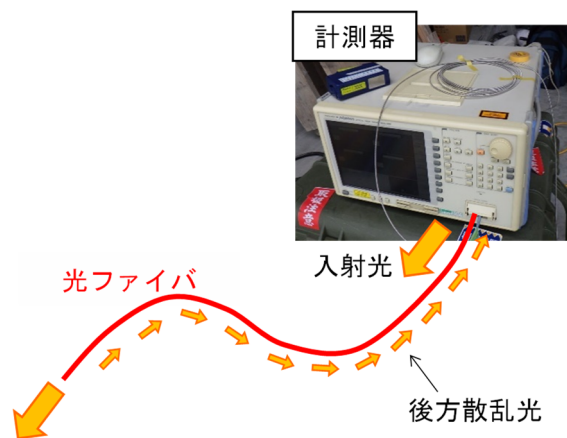


図 2.3-1 光ファイバからの後方散乱光

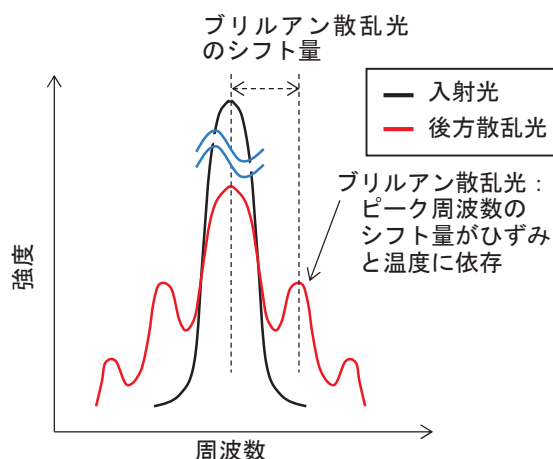


図 2.3-2 ブリルアン散乱光の特性

BOCDA 方式および BOTDR 方式のひずみ計測の仕様を表 2.3-1 に示す。両者はいずれも多数の実績のある技術であり^{2.14)}、表 2.3-1 に示した計測精度や空間分解能は、既にひずみ計測技術として確認されているものである^{2.19)}。なお、表内に示す「空間分解能」とは、その区間の平均値としてひずみが計測されることを意味しており、通常のひずみゲージにおけるゲージ長に相当する値である。例えば、BOTDR 方式において計測間隔を 5cm とした場合、(計測精度の違いはあるが) 約 1m の長さのひずみゲージをラップさせながら 5cm ピッチで貼り付けて行うのと同等の計測となる。この時得られる計測データは、実際のひずみ分布に約 1m の長さでの移動平均をかけたものに相当するため、1m 以内の局所的なひずみの変動は過小評価されてしまう。その反面、BOTDR では数 km の長さまでの計測が可能であり、大規模な構造物や部材における全体的な挙動の把握に適した計測技術であると言える。一方 BOCDA 方式は、計測範囲は 200m までと比較的短い、高い空間分解能での計測が可能であり、コンクリートのひび割れ発生など、局所的な現象の検知や評価に適している。

なお、BOCDA 方式における最小計測間隔や空間分解能は、両端から入射する光に与える変調周波数に依存する。一方、BOTDR 方式における最小計測間隔は光ファイバ内を透過する光の速度と計測器受光部のサンプリング性能に、空間分解能は入射するパルス光の幅に依存する^{2.16)}。

表 2.3-1 光ファイバによるひずみ分布計測の仕様

方式	BOCDA	BOTDR
計測精度 ^{2.19)}	約±50 μ	約±50 μ
最小計測間隔 ^{2.19)}	数 cm	約 5cm
空間分解能 ^{2.19)}	数 cm	約 1m
計測範囲	～200m (光ファイバ全長にわたり、 任意の点の計測が可能)	～数 km (光ファイバ全長にわたり、 任意の点の計測が可能)
計測時間	約 5 分/回*	約 3 分/回
使用する 光ファイバ	偏波保持ファイバ	シングルモードファイバ または、偏波保持ファイバ
配線	光ファイバ両端を計測器に接続	光ファイバ片端を計測器に接続

※計測点数による。

前述したとおり、ブリルアン散乱光のピーク周波数のシフト量はひずみと温度に依存するため、供用期間中の再計測やモニタリングなど、以前の計測から温度が変化している条件での計測結果には温度変化の影響が含まれる。温度変化の影響の補正方法については、次章で述べる。

FBG センサの計測原理

Fiber Bragg Grating (以下、FBG) センサは、光ファイバの任意の位置に、屈折率が異なる部分を格子状に形成(回折格子)したものである。この回折格子は、計測器から広帯域光を入射すると、格子間隔に対応した特定の波長の光のみを選択的に反射する特性を持つ。このため、外力の作用などによって光ファイバにひずみが生じると格子間隔が変化し、それに伴って反射光の波長も変化するため、その波長の変化量を解析することによってセンサ部のひずみを計測することが可能となる^{2.20)}。

FBG センサの計測精度は±4 μ 程度と、ブリルアン散乱光を使用した分布型センサと比較して非常に高精度であり、また 50Hz 以上の周波数での動的計測も可能である^{2.21)}。予めセンサ部を形成した光ファイバを用い、通常のひずみゲージと同様にセンサ部を対象物に貼り付けて計測を行う。1本の光ファイバ内に複数箇所のセンサ部を設け、同時に計測が可能であることなどの利点がある。

FBG センサは予め測定点を決定してプレート状のセンサ部を形成し、対象物に1点ずつ貼り付ける必要がある。このため、PC ケーブルやグラウンドアンカー tendon、コンクリート表面など、ある程度の長さや広さにわたる分布を計測する場合には、前述したブリルアン散乱光を使用した分布型センサの方がより適していると言える。

歩道橋 PC 桁のひび割れ検知への適用事例

今井ら^{2.16)}は、BOCDA 方式の分布型ひずみセンサを使用し、10年間の長期にわたる、PC

第2章 既往の技術および研究

橋梁のひび割れモニタリングを行っている。対象とした橋梁は、超高強度繊維補強コンクリートを使用した外ケーブル方式の3径間連続PCラーメン橋（歩道橋）で、中央支間の主桁下面に、エポキシ樹脂を用いて光ファイバを全面接着している。

実橋梁への適用に先立ち、超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC梁試験体を製作して曲げ載荷試験を実施し、試験体下面に接着した光ファイバによるひび割れ検知性能の確認を行っている。その結果、マイクロ스코プによって観察された幅0.014mmの微細なひび割れも検知可能であることを確認している。

また、実橋梁への適用の結果として、計測開始から10年間経過後も光ファイバに外観上の大きな変化は見られなかった。ひずみ計測結果のばらつきにも顕著な経年変化は見られず、設計プレストレス量に応じたコンクリートのクリープひずみの計算値と同傾向のひずみ変化が計測されていることから、構造物との付着も十分に確保され、10年間の長期にわたり問題無く計測が行われていたことが確認されている。

コンクリート補強材への適用検討事例

松崎ら^{2,22)}は、PC鋼より線およびアラミドロッドに光ファイバセンサを組み込み、BOTDR方式によるひずみ計測を試みている。材料単体での緊張試験の後、同材料を引張補強材として用いたRC梁の曲げ試験を行い、ひずみ分布の変化を計測している。PC鋼より線へは、より線の凹部に沿って螺旋状にエポキシ樹脂で光ファイバを張り付けており、アラミドロッドには、断面中央に埋設したSUS管内に光ファイバを挿入してエポキシ樹脂で固定している。両試験の結果より、光ファイバは補強材と一体化して挙動しひずみ分布を精度良く計測可能であることを確認している。

PC鋼より線への光ファイバの組込み方法は、次章で述べる、本研究で行った裸線タイプのPC鋼より線への組込み方法と同様であるが、松崎らの研究は、RC部材の補強材のひずみを計測することを目的としており、PC構造物の緊張管理や維持管理を目的としたものではない。また、同研究は実験的な検討に留まっており、光ファイバを組み込んだPC鋼より線の実用化を想定した詳細な検討や、同材料を実構造物に適用した事例は未だ無い。

グラウンドアンカーモニタリングへの適用検討事例

光ファイバの高い耐久性を活かした計測技術として、光ファイバセンサをグラウンドアンカーのモニタリングに適用する試みもなされている。塩谷^{2,23)}は、アンカー頭部の支圧板にFBG方式のひずみセンサを埋設し、残存引張り力を計測する技術を開発している。また、張ら^{2,24)}は、FBG方式のひずみセンサをグラウンドアンカー tendon に貼り付け、地山内部における残存引張り力の計測を試みている。

いずれも、高い耐久性や、法面から離れた安全な位置まで接続用光ファイバを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となることなど、光ファイバセンサの特性を活かした長期モニタリングに適した計測技術であると言える。

しかし、塩谷が開発した技術は、従来の荷重計と同様アンカー頭部における残存引張り力しか計測することができない。また、張らの試みも、アンカー頭部背面付近(法面から約1m)の1点での計測に留まっており、得られる情報はアンカー頭部における計測と同様である。これらはいずれも、アンカー体内部を含む地中深部のテンドンの状態を確認できるものではなく、残存引張り力の変動が生じた際にも、計測結果のみからその原因を推定することは困難であると言える。

2.4 本研究の位置付け

前節までに述べたように、従来のPCケーブル緊張管理技術においては、ジャッキによりPCケーブル端部に作用させる張力とPCケーブルの伸び量を計測し、設計断面に導入されるプレストレス量を間接的に評価する方法が一般的である。このため、多数の曲線部を有するような複雑に配置されたケーブルの場合には正確な評価が難しいことが課題と言える。PC構造物の維持管理技術においては、磁歪式センサをPCケーブル延長上の任意の位置に設置して張力の変動を直接計測することが可能であるものの、特に内ケーブルにおいてはセンサを設置した箇所の張力しか計測できないなどの課題がある。また、漏洩磁束法や放射線透過法などの破断検査技術も開発されているが、破断を検知したとしてもその影響範囲の評価は困難であり、適切な補強工法の選定や設計を行うには十分とは言えない。

一方、グラウンドアンカーの緊張管理技術においても、PCケーブルの緊張管理と同様に、アンカー頭部に作用させる引張り力とテンドンの伸び量からアンカー体が地盤内に定着されていることを確認するが、アンカー体内部の状況は不明であり、引抜けに対する余裕度などは確認できない。グラウンドアンカーの維持管理技術においては、従来技術はいずれもアンカー頭部付近における残存引張り力しか計測することができず、センサの耐久性や計測時の作業性などにも課題がある。このため、グラウンドアンカー維持管理マニュアル^{2.12)}においても、耐久性に優れ、計測が容易で、アンカー深部のテンドンの状態を確認できる計測技術が必要であるとされている。

また、光ファイバを用いたひずみ計測技術の土木分野における適用例の多くは、RC構造物の補強材のひずみ分布計測や、コンクリート表面のひび割れ発生検知を目的としたものであった。

これらに対して、本研究で開発した「光ファイバを用いた張力分布計測技術」は、PCケーブルやグラウンドアンカーテンドンに作用する張力の分布を光ファイバにより計測する初の試みである。これにより、緊張管理時においては、PC構造物内の任意の位置における導入プレストレス量やアンカー体内部の定着状況などを直接確認することが可能となり、維持管理においては、PCケーブルの任意の位置に生じる異常の検知やその影響範囲の評価、アンカー体周辺など地山内で生じる変状の推定が可能となると考えられる。これらの優位性によって、本計測技術はPC構造物やグラウンドアンカーの緊張管理・維持管理の高度化への貢献が期待できる。なお、前節で述べたとおり本計測技術では、既に実用化され適用実

第2章 既往の技術および研究

績のある光ファイバセンサ（BOCDA 方式および BOTDR 方式）を使用する。本研究では、同センサを PC 鋼より線へ組み込む方法や、計測結果の処理方法を開発するとともに、結果に基づく評価方法や実構造物への適用性を検証した。

2.5 第 2 章の参考文献

- 2.1) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2017.
- 2.2) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2017.
- 2.3) 國富康志，只熊公義，及川雅司，石塚純：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，pp.363-365，2013.
- 2.4) 廣瀬誠，青木圭一，宮川豊章：漏洩磁束法によるポストテンション実橋における PC 鋼材破断調査，第 23 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.467-470，2014.
- 2.5) 大島義信，宇佐美惣，石田雅博，土橋克宏，上坂充：可搬型高出力 X 線による PC 桁内部の可視化実験，土木技術資料，Vol.57，No.9，pp.34-37，2015.
- 2.6) 樋口嘉剛，神田亨，三木千壽：コンクリート部材中の応力推定法，土木学会論文集 No.585/V-38，pp.11-18，1998.
- 2.7) 坂野昌弘，黒岩正夫，西村俊夫：穴あけ法による残留応力の測定，土木学会第 38 回年次学術講演会，I，pp.323-324，1983.
- 2.8) 岡行俊，平松良雄：歪または変形測定値からの岩盤内応力の決定，日本工業会誌，Vol.84，No.957，pp.7-14，1968.
- 2.9) 肥田研一，上島睦，永吉竜二，高橋洋一，松田浩：削孔によるコア周辺の開放応力測定法を用いた PCT 桁橋の残存プレストレス量の推定，土木学会第 62 回年次学術講演会 第 V 部門，pp.121-122，2007.
- 2.10) 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，2012.
- 2.11) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーのリフトオフ試験方法に関する検討，土木学会論文集 C，Vol.67，No.4，pp.558-568，2011.
- 2.12) 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.
- 2.13) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーの残存引張り力のモニタリング手法に関する検討，土木学会論文集 C，Vol.68，No.3，pp.547-563，2012.
- 2.14) Leung, Christopher, K.Y. et al.: Review: optical fiber sensors for civil engineering applications, *Materials and Structures*, Vol.48, No.4, pp. 871-906. 2015.
- 2.15) 山田裕介，中島和秀，倉嶋利雄：通信用光ファイバの強度保証と破断特性評価技術，*NEW GLASS*，Vol.27，No.106，pp.3-6，2012.
- 2.16) 今井道男，一宮利通，露木健一郎，早坂洋太，太田伸之：光ファイバセンサによる 10 年間の PC 橋梁ひび割れモニタリング，土木学会論文集 A1，Vol.75，No.1，pp.17-25，2019.
- 2.17) Nikles, M., Thevenaz, L. & Robert, P. A.: Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers, *Journal of Lightwave Technology*, 15(ARTICLE), pp.1842-1851, 1997.
- 2.18) Song, K.Y., et al.: Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution

第2章 既往の技術および研究

- based on Brillouin optical correlation domain analysis and beat lock-in detection scheme, Optical Fiber Sensors, Optical Society of America, 2006.
- 2.19) Hartog, A.H.: An introduction to distributed optical fibre sensors, CRC Press, 2018.
- 2.20) Morey, W.W., Dunphy, J.R. & Meltz, G.: Multiplexing fiber bragg grating sensors, Fiber and Integrated Optics, Vol.10, pp.351-360, 1991.
- 2.21) 小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一: FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016, 2003.
- 2.22) 松崎謙太郎, 勝木太, 矢島哲司: 光ファイバを用いたコンクリート構造物のひずみ管理に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.637-642, 2001.
- 2.23) 塩谷智基: 道路インフラの維持管理に資する先端技術研究開発への取組み, 京都大学技術士会会報, 第5号, pp.1-4, 2017.
- 2.24) 張満良, 前田泰男, 中居寛司, 岡崎正弘: 光ファイバーセンサーを用いたグラウンドアンカー緊張力の計測について, 第37回地盤工学研究発表会, pp.2243-2244, 2002.

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

本章では、「光ファイバを用いた張力分布計測技術」開発時の課題やその解決方法についてまとめると共に、基本的な計測性能を確認した室内試験の概要と結果を述べる。

3.1 概要

本研究で開発した「光ファイバを用いた張力分布計測技術」は、全長にわたるひずみ分布を計測可能な光ファイバセンサを PC 鋼より線に組み込み、計測されたひずみ分布に基づいて張力分布を評価するものである。図 3.1-1 に本技術の概要を示す。

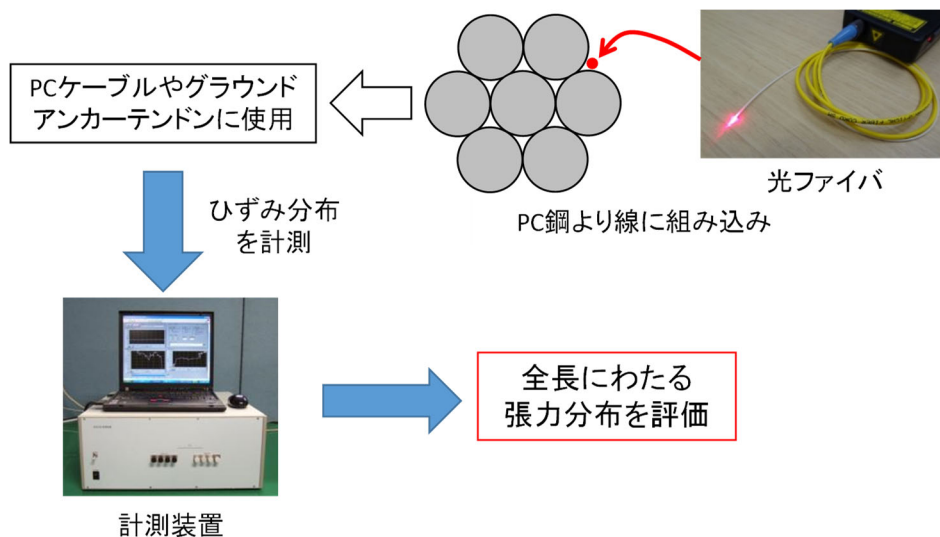


図 3.1-1 光ファイバを用いた張力分布計測技術の概要

前章で述べたとおり、本技術では、Brillouin Optical Correlation Domain Analysis（以下、BOCDA）または Brillouin Optical Time Domain Reflectometer（以下、BOTDR）の2種類のひずみ計測センサを使用可能である。BOCDA 方式および BOTDR 方式のひずみ計測の仕様を表 3.1-1 に再掲する。表内に示す「空間分解能」とは、その区間の平均値としてひずみを計測することを意味しており、通常のひずみゲージにおけるゲージ長に相当する値である。

BOTDR 方式は、空間分解能が低く局所的なひずみの変動が過小評価されてしまう反面、数 km の長さまでの計測が可能であり、大規模な構造物や部材における全体的な挙動の把握に適した計測技術であると言える。また、光ファイバの計測器への接続が片端だけで済み、計測時間も比較的短いなど、現場での取扱いが容易である。一方 BOCDA 方式は、計測範囲

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

は 200m までと比較的短いですが、高い空間分解能での計測が可能であり、局所的な現象の検知や評価に適している。

本章および第4章で述べる計測性能確認試験においては、空間分解能が高く、ひずみゲージによる計測値との比較などの詳細な検証が可能な BOCDA を使用した。一方、第4章で述べる PC 橋梁上部工の実工事への適用試験においては、適用した PC ケーブルの長さや現場での取扱い性能を考慮し、BOTDR を使用した。また、第5章で述べるグラウンドアンカーへの適用においては、地盤内に埋設されるテンドン先端側からは光ファイバを計測器に接続することが不可能であるため、計測性能確認試験も含め、計測器への接続が片端だけで良い BOTDR を使用した。

なお、表 3.1-1 に示すとおり、ひずみの計測精度はいずれの方式においても $\pm 50\mu$ である。実際の PC 橋梁やグラウンドアンカーでは、ケーブルやテンドンを 4,000~6,000 μ 程度まで緊張するのが一般的であるため、 $\pm 50\mu$ の計測精度は、実工事において導入されるひずみの $\pm 1\%$ 程度に相当する。

表 3.1-1 光ファイバによるひずみ計測の仕様

方式	BOCDA	BOTDR
計測精度 ^{3.1)}	約 $\pm 50\mu$	約 $\pm 50\mu$
最小計測間隔 ^{3.1)}	数 cm	約 5cm
空間分解能 ^{3.1)} (ゲージ長に相当)	数 cm	約 1m
計測範囲	~200m (光ファイバ全長にわたり、 任意の点の計測が可能)	~数 km (光ファイバ全長にわたり、 任意の点の計測が可能)
計測時間	約 5 分/回*	約 3 分/回
使用する 光ファイバ	偏波保持ファイバ	シングルモードファイバ または、偏波保持ファイバ
配線	光ファイバ両端を計測器に接続	光ファイバ片端を計測器に接続

※計測点数による。

ここで、光ファイバはガラスを主成分としており、電氣的・化学的に安定した高耐久な材料である。また、特に BOTDR 方式のひずみ計測であれば、表 3.1-1 に示すように数 km にわたる光ファイバでの計測が可能のため、再計測用の光ファイバを安全な場所まで延長しておくことにより、随時の再計測を容易に行うことが可能となる。これらの特徴から、光ファイバは、PC 構造物やグラウンドアンカーの維持管理のための計測技術に適した材料であると言える。

3.2 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の開発

本研究では、PC 構造物で用いる PC ケーブルやグラウンドアンカーテンドンの全長にわたる張力分布を計測・評価するために、これらを構成する PC 鋼より線に光ファイバセンサを組み込むこととした（以下、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線と称する）。この際の要求性能、課題は以下のとおりであった。

- ・ PC 鋼より線の全長にわたり、光ファイバセンサを一体化させる
- ・ 運搬中や施工中の光ファイバセンサの損傷を防止する
- ・ 本来の PC 鋼より線としての品質を阻害しない

3.2.1 使用材料および組込み方法

対象とした PC 鋼より線は、PC 橋梁用のケーブルやグラウンドアンカーテンドンとして広く用いられている 7 本よりの PC 鋼より線 S15.2 で、主に内ケーブルとして使用される裸 PC 鋼より線（以下、裸線タイプと称する）と、主に外ケーブルやグラウンドアンカーテンドンとして使用される内部充填型エポキシ樹脂被覆（ECF）PC 鋼より線（以下、ECF タイプと称する）の 2 種類である。PC 鋼より線 S15.2 の仕様を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 PC 鋼より線 S15.2 の仕様^{3.2)}

規格	SWPR7BL
標準径	15.2mm
公称断面積	138.7mm ²
0.2% 永久伸びに対する荷重	222kN 以上
引張荷重	261kN 以上
伸び	3.5% 以上
単位質量	1.101kg/m

光ファイバは、中心部のコアとその周囲を覆うクラッドの二層構造となっており、両者の屈折率の違いから境界面で全反射が生じることによって、光がコア内に閉じ込められたまま伝搬される。コアとクラッドはガラスを主成分とした細い繊維状の素材のため、非常に脆弱である。このため、通信用などに用いられる市販の光ファイバは、コアとクラッドの損傷を防止するために、周囲に保護被覆が施されているのが一般的である。本研究では、PC 鋼より線に組み込む光ファイバとして、表 3.2-2 に示す 3 種類を比較、検証した。

表 3.2-2 光ファイバの比較

No.	クラッド外径	保護被覆材料	保護被覆外径
1	0.125mm	UV 硬化樹脂	0.25mm
2	0.125mm	難燃ポリエステルエラストマー (ハイトレル)	0.90mm
3	0.125mm	ガラス繊維被覆ポリエステル樹脂 (GFRP)	0.90mm

検証の結果、0.25mmUV 硬化樹脂被覆の光ファイバは、強度が不十分であり比較的簡単に折れてしまうことが確認されたため、PC 構造物やグラウンドアンカーなどの施工現場での使用には不向きであると判断した。よって、裸線タイプには、0.90mm ハイトレル被覆の光ファイバを使用することとした。ECF タイプには、後述するように、PC 鋼より線にエポキシ樹脂による被覆を施す過程で被覆内に光ファイバを埋設することとしたため、樹脂を硬化させる際の高温に耐えられるよう、耐熱性の高い 0.90mm GFRP 被覆の光ファイバを使用することとした。

PC 鋼より線は、1 本のより線のみで使用されることもあるが、複数本のより線を束ねて使用されることが多い。さらに、例えば PC 構造物の内ケーブルでは、コンクリート躯体内に埋設されたシース管に挿入されるため、束ねられた PC 鋼より線同士やシース管との間で擦れ合うことが想定される。また、PC 鋼より線を緊張・定着する際には、ケーブル端部やアンカー頭部においてくさびの刃をより線表面やエポキシ樹脂被覆に食い込ませて定着させる、くさび定着方式が広く用いられている。このような条件においても、光ファイバを損傷させることなく作業可能とするためには、隣り合う PC 鋼より線やシース管と接触せず、定着時にもくさびの刃が届かない位置に、光ファイバを組み込む必要があった。

そこで、図 3.2-1 に示すとおり、PC 鋼より線表面における素線間の凹部に光ファイバを組み込むこととした。この際、定着時にもくさびの刃が届かないように、定着後のくさびの内径よりも内側に配置した。これにより、いずれのタイプも、外径は通常の PC 鋼より線と変わりが無く、運搬やシース管内などへの挿入作業、緊張・定着作業などを通常と同じ手順で施工可能である。

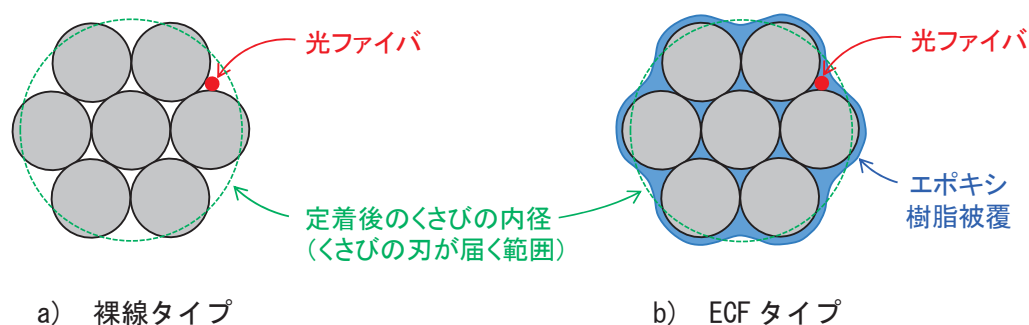


図 3.2-1 光ファイバの組込み位置

完成した光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を、図 3.2-2 に示す。裸線タイプにおいては、素線間の凹部内に、エポキシ被覆鉄筋等で一般的に使用されているエポキシ樹脂塗膜材を接着剤として塗布し、光ファイバを接着した。ECF タイプにおいては、その製作過程において、素線間の凹部内に光ファイバを組み込んだ上からエポキシ樹脂被覆を施すことでエポキシ樹脂内に埋設させた。このように、エポキシ被覆鉄筋や通常の ECF 鋼より線といった、いずれも多数の使用実績のある材料で用いられているものと同程度のエポキシ樹脂素材を使用しているため、これらの材料と同等程度の耐久性があるものと考えられる。ただし、最近の研究事例として、エポキシ樹脂の強度が水分の影響を受けるという報告もあるため^{3.3)}、今後の動向を注視し、必要に応じて耐久性の検証を行う。

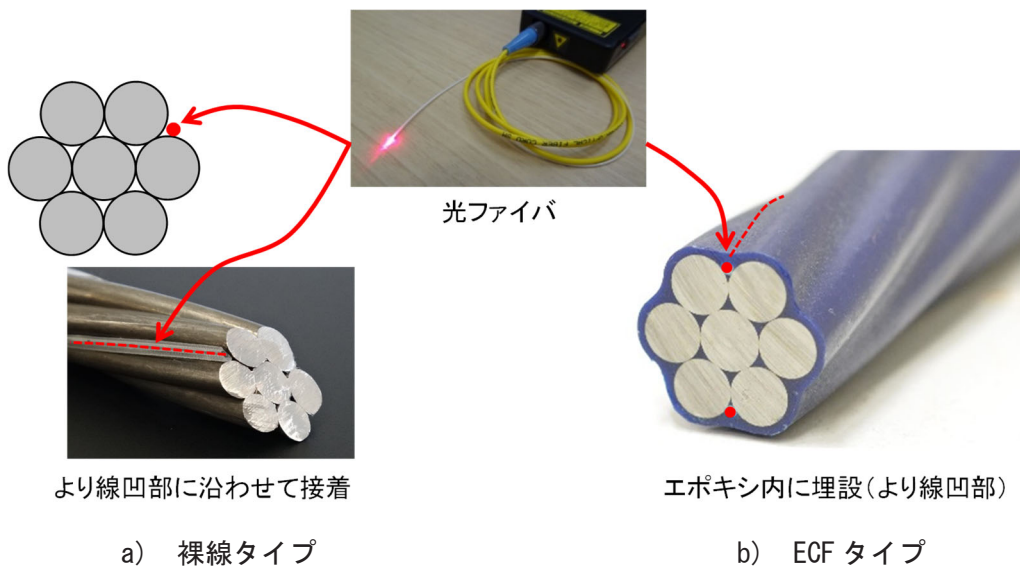


図 3.2-2 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線

前章で述べたとおり、光ファイバを用いた分布型ひずみセンサは、土木分野においては、RC 部材の補強材やコンクリート表面に貼り付け、ひずみ分布の計測やひび割れ検知を目的とした適用がなされてきた。ここで、光ファイバは細い繊維状の素材であるため、伸び変形には追従するが、圧縮変形が作用した際には、たわみやヨレが生じてしまい、貼り付けた計測対象物との間に浮きができて一体性が損なわれ、正確に計測することができない。このため、圧縮方向のひずみを計測するためには、対象物に貼り付ける際に予め光ファイバに張力をかけておく必要があり、そのための治具や作業手順が煩雑であった。これに対し本計測技術では、PC 構造物・グラウンドアンカーのいずれにしても、光ファイバを組み込まれた PC 鋼より線には、初めに十分な張力を作用させることが前提であり、供用期間中に張力に変動が生じたとしても、圧縮が作用することは想定していない（万が一、施工時に導入した張力が完全に失われて圧縮力が作用しているような状況であれば、正確な計測を行うまでもなく、大規模な補修・補強が必要であると判断できる）。よって、PC 鋼より線に組み込む際に

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

光ファイバが撓まない程度の張力をかけておけば十分である点も、本計測技術の利点と言える。

また、施工中や供用期間中に光ファイバが損傷してしまうことに備え、計測用センサとしての冗長性を持たせるために、1本のPC鋼より線に2本以上のファイバを組み込むことや、複数のPC鋼より線を束ねたマルチストランドケーブルの場合には、2本以上のPC鋼より線に光ファイバを組み込んでおくことなども可能である。

3.2.2 品質の確認

光ファイバ組込み式PC鋼より線を建設用材料として使用するためには、光ファイバを組み込んだことによって、本来のPC鋼より線としての品質を阻害していないことを確認する必要がある。7本の素線からなる鋼材自体には何らの加工も加えていないことから、断面積や0.2%耐力、引張強度などの材料特性には影響が無いと言えるため、ここでは、定着時の性能、およびECF鋼より線の防食性能を確認した結果について述べる。

光ファイバ組込み式PC鋼より線1本の一端をくさび式定着体により定着し、他端から油圧ジャッキを用いて200kN（ $0.9 P_y$ 相当、 P_y :0.2%永久伸びに対する荷重）で緊張した。試験の状況、および一度定着を行った後にくさびを取り外した、PC鋼より線の写真（裸線タイプの例）を図3.2-3に示す。

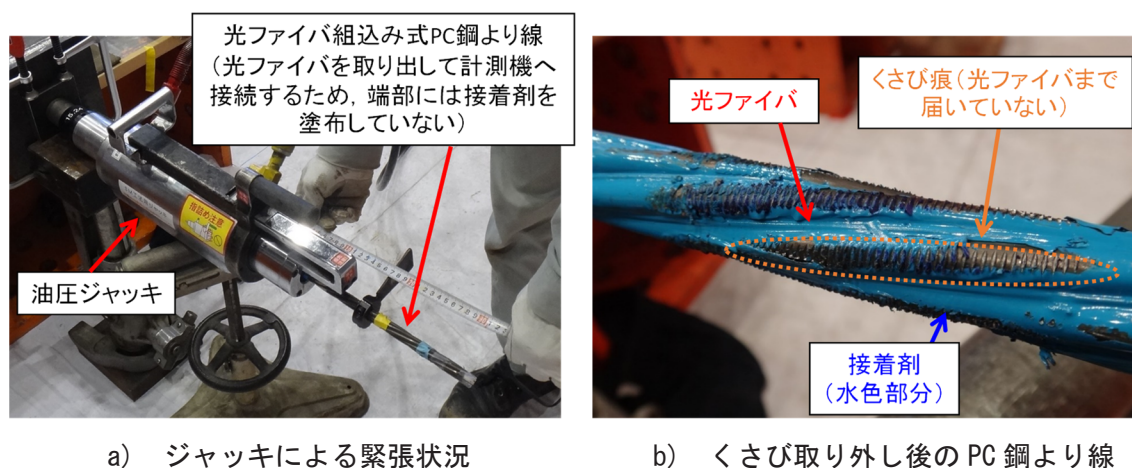
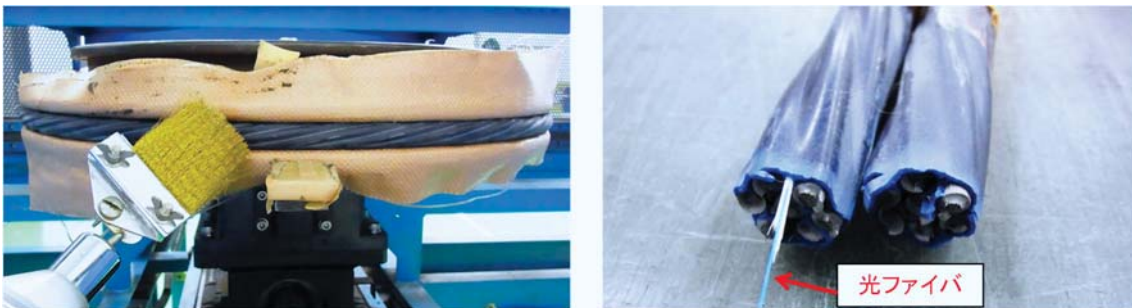


図 3.2-3 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の定着性能確認試験（裸線タイプ）

図 3.2-3 b) より、定着を行った後の PC 鋼より線の表面にはくさびの刃が食い込んだ痕が確認できるが、刃が滑って複数個所に食い込んだような形跡は見られない。またくさび痕は光ファイバには到達しておらず、光ファイバも損傷していない。これらの結果から、組み込まれた光ファイバの存在は定着性能に影響せず、また、くさびによって光ファイバを損傷させることもなく、通常どおりに緊張・定着が可能であることが確認された。なお、ECF タイプについても同様に、光ファイバを損傷させることなく通常どおりに緊張・定着が可能で

あることを確認している。

ECF 鋼より線のエポキシ樹脂被覆は、素線を水や酸素に接触させないことにより防食性能を高めることを目的として施されており、その防食性能を担保するための品質確認試験が規定されている^{3,4)}。ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を対象にピンホール試験および引張破断試験を行い、光ファイバをエポキシ樹脂被覆内に埋設させていることがエポキシ被覆と鋼より線との一体性を阻害せず、通常の ECF 鋼より線と同等の性能であることを確認した(図 3.2-4)。なお、ピンホール試験とは、エポキシ内部の鋼より線とエポキシ表面との間に電圧をかけ、通電しないことを確認することでエポキシ被覆に穴(ピンホール)が無いことを確認する試験である。引張破断試験とは、ECF 鋼より線を引張破断させた際に、エポキシ樹脂被覆が飛散せずに鋼より線に付着していることを確認する試験である。いずれも、コンクリート標準示方書【規準編】^{3,4)}により規定された、通常の ECF 鋼より線の品質確認試験として一般的に行われている試験である。



a) ピンホール試験

b) 引張破断試験

図 3.2-4 ECF タイプ光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の品質確認試験状況

以上のとおり、素線間の凹部内に光ファイバを組み込んだ「光ファイバ組込み式 PC 鋼より線」は、本来の PC 鋼より線としての品質が損なわれておらず、また、光ファイバを損傷させることなく通常と同じ手順で施工可能であることが確認された。

3.2.3 張力への換算

光ファイバを用いた張力分布計測技術では、分布型光ファイバセンサによって計測されたひずみを張力に換算して評価を行う必要がある。しかし張力への換算に際しては、計測結果に含まれる温度変化の影響を補正する方法、および螺旋状に組み込まれた光ファイバで計測したひずみを軸方向の応力に換算する方法が課題であった。これらの課題を解決するために設定した、温度補正係数、および見かけの弾性係数について以下に述べる。

(1) 温度補正係数

前章で述べたとおり、BOCDA 方式および BOTDR 方式で利用するブリルアン散乱光のピ

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

ーク周波数のシフト量はひずみ量と温度に依存する。施工時の緊張管理のように温度変化が無いとみなせる短時間での計測に際しては、計測結果をそのままひずみ分布として評価することが可能であるが、供用期間中の再計測やモニタリングなどにおいては、計測結果には温度変化の影響が含まれるため、補正を行う必要がある。ここで、散乱光の内のラマン散乱光と呼ばれる成分は、ピーク周波数のシフト量が、散乱光が生じた位置の温度のみに依存するという特性がある（図 3.2-5）。この特性を利用し、光ファイバ全長にわたる温度分布を計測する技術も実用化されている^{3,5)}。本計測技術においては、ひずみ分布計測と併せてラマン散乱光を利用した温度分布計測を行い、その計測結果を用いて温度による影響を補正することとした。

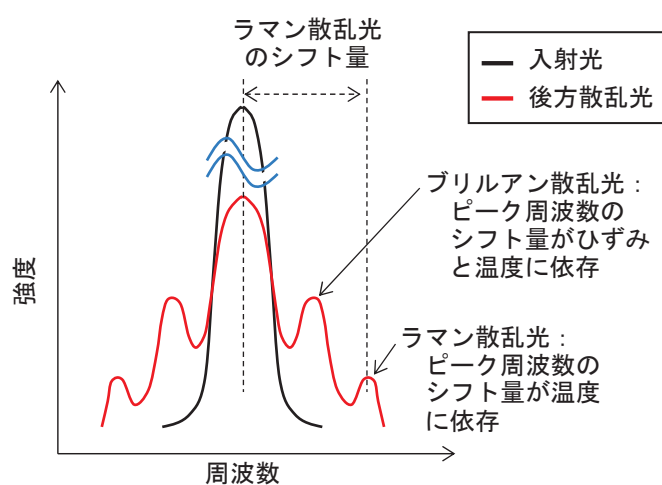


図 3.2-5 ラマン散乱光の特性

ブリルアン散乱光の周波数シフト量に含まれる温度変化の影響を確認するため、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を恒温槽に入れ、 $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$ の範囲で静的に 5 回繰り返し温度変化させた状態での BOTDR 方式による計測、およびラマン散乱光を用いた温度計測を行った。試験対象としたのは、長さ 2.0m の ECF タイプ光ファイバ組込み式 PC 鋼より線であり、計測された分布データの内、中央付近約 0.6m の範囲の平均値を代表として用いた。ラマン散乱光を用いた温度計測の精度確認のため、熱電対による温度計測を併せて行っている。

ラマン散乱光および熱電対による温度計測結果の比較を、図 3.2-6 に示す。両計測結果はよく一致していることから、ラマン散乱光を用いた計測により、温度分布を精度良く計測できることが確認された。

次に、BOTDR 方式によるひずみ計測の出力値と、ラマン散乱光による温度計測結果との関係を図 3.2-7 に示す。図より、温度変化の繰返しによる影響は見られず、良好な線形関係を示していることが確認できる。同図を線形近似することにより、温度補正係数 k ($= 28.9 \mu^{\circ}\text{C}$) を算定した。

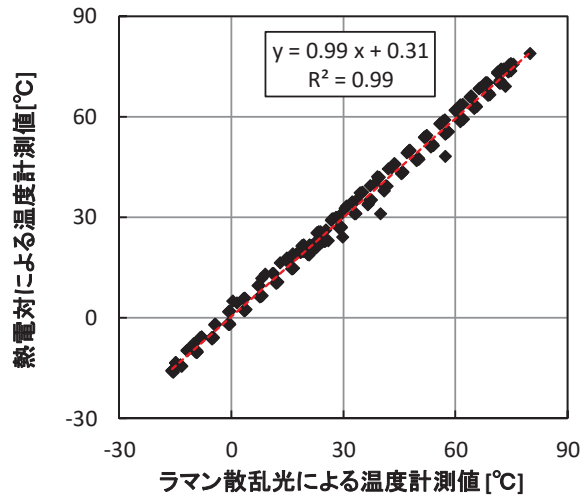


図 3.2-6 温度計測結果の比較

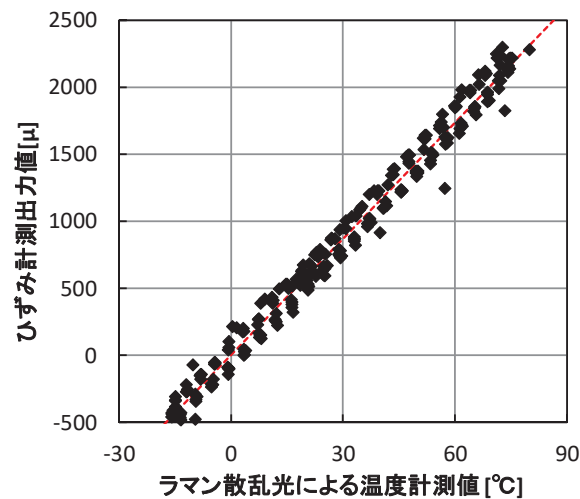


図 3.2-7 ひずみ計測出力値と温度との関係

供用期間中の再計測やモニタリングなど、基準となる計測を行ってからの温度変化が生じている場合には、温度補正係数 k を用いて次式により補正を行うこととした。

$$\Delta \varepsilon_{t-0,i} = (\varepsilon_{mea_{t,i}} - \varepsilon_{mea_{0,i}}) - k(T_{t,i} - T_{0,i}) \quad \text{式 3.2-1}$$

ただし、 $\Delta \varepsilon_{t-0,i}$: 計測点 i における時刻 0 から t までのひずみ変化、

$\varepsilon_{mea_{t,i}} / \varepsilon_{mea_{0,i}}$: 計測点 i における時刻 $t/0$ でのひずみ計測結果、

$T_{t,i} / T_{0,i}$: 計測点 i における時刻 $t/0$ での温度計測結果

なお、次章以降で述べる実工事への適用試験において計測された中で、最大の温度変化は 30.3°C、導入時の張力に対する温度補正の割合は約 17%であった。

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

ここで、温度影響確認試験においては、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の変形を拘束せずに計測を行っている。よって、図 3.2-7 に示した計測結果には、PC 鋼より線の温度ひずみが含まれる。このため、本結果および式 3.2-1 を用いて補正を行うことによって、温度ひずみも併せてキャンセルされることとなる。

本試験では、上記のとおり 5 回の温度変化繰返しにおける再現性は確認できているが、ロットの材料を使用しての再現性は確認できていない。ただし、PC 鋼より線や光ファイバなど、同じ構成材料を用いる条件であれば、大きな違いはないと考えられる。そこで本研究では、次章以降で述べる実工事への適用において、再計測結果に対して温度補正を行う際には、本試験で得られた上記の温度補正係数 $k=28.9\mu\text{}/\text{C}$ を用いることとした。今後、より正確な温度補正を行うためには、裸線タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線に対しても温度影響確認試験を行い、補正係数を確認する必要がある。また、使用する材料や光ファイバの組込み方法などを大きく変更する場合にも、再度試験を行い、温度による影響の違いを確認する必要がある。

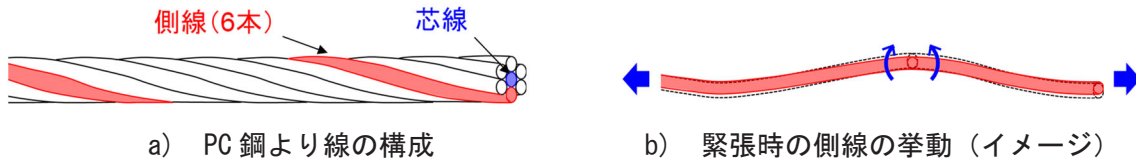
(2) 見かけの弾性係数

光ファイバセンサを用いて計測されるのはひずみ分布であるため、計測結果から張力分布を評価するためには、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線による計測値（温度補正を行う場合は、式 3.2-1 による補正後の値）を、PC 鋼より線の張力へ換算する必要がある。ここで、鉄筋や PC 鋼棒のように単一の素材のひずみを張力へ換算する場合には、弾性範囲内であれば素材の弾性係数と断面積を乗じればよい。しかし、S15.2 などの 7 本よりの PC 鋼より線は、図 3.2-8 a) に示すように中央の直線状の素線（芯線）と、芯線を螺旋状に取り囲む 6 本の素線（側線）とから構成されている。螺旋状の側線は、張力が作用した際には直線状になろうとして内側に絞られるような挙動をすることから、軸引張応力だけではなく、外側に向けて引張応力が低下するような曲げ応力も同時に作用すると考えられる（図 3.2-8 b)）。このため、PC 鋼より線の表面、側線間の凹部に沿って組み込まれた光ファイバで計測されたひずみ値を、引張試験における標点間の伸びに基づいて評価された弾性係数を用いて張力に換算するのは不適切であると考えられる。そこで、緊張時における PC 鋼より線表面のひずみの挙動を確認するため、PC 鋼より線 S15.2 を対象に三次元 FEM 解析を実施した。

7 本よりの鋼より線の断面を約 4,600 要素に分割し、長さ 663.3mm（よりピッチの 3 倍相当）をモデル化した。材料の弾性係数は $200\text{kN}/\text{mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とした。素線同士の接触点は滑りを許容し、摩擦係数 0.1 を設定した。モデル端部の断面の内、一方の変位を拘束し、他方に 0.1% の軸方向ひずみに相当する 0.6633mm の強制軸方向変位を与えた場合のひずみ分布を三次元 FEM 解析により求めた。なお解析には、構造解析ソフト「LS-DYNA」を用いた。

図 3.2-9 に、三次元 FEM 解析により得られた、モデル内の中央断面付近における軸方向ひずみ分布を示す。図より、側線においては、外表面付近よりも中央付近の方が大きな引張

ひずみが生じており、軸引張応力の他に図 3.2-8 b) で想定したような内側引張の曲げ応力が作用していることが確認できる。芯線中央付近における軸引張ひずみと比較して、側線外表面のひずみは最大で 11% 程度小さな値となった。



a) PC 鋼より線の構成 b) 緊張時の側線の挙動 (イメージ)

図 3.2-8 7 本より PC 鋼より線の構成と緊張時の挙動

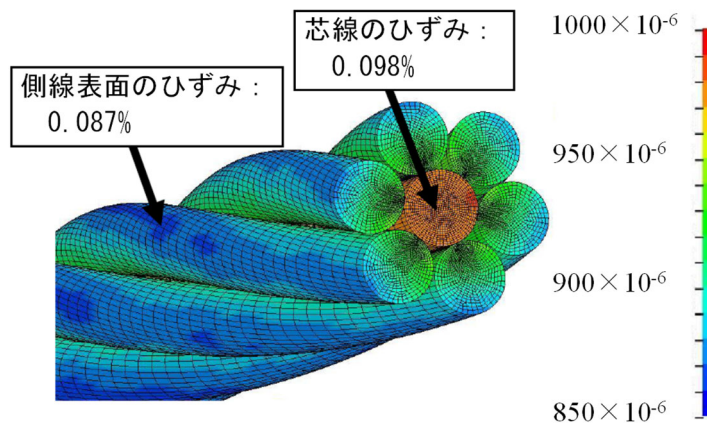


図 3.2-9 7 本より PC 鋼より線の軸方向ひずみ分布 (FEM 解析結果)

この結果から、張力の作用によって生じる PC 鋼より線の軸方向ひずみと比較して、光ファイバによって計測されるひずみは小さな値となると考えられる。よって、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線によって計測されるひずみ分布から張力分布へ換算する際には、通常の緊張計算で用いられるような、引張試験における標点間の伸びから得られる弾性係数を用いることは適切でないと言える。このため本計測技術では、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含む PC ケーブル (またはグラウンドアンカーテンドン) に作用させた張力と、光ファイバで計測されるひずみとの相関関係を表す「見かけの弾性係数」を用いることとした。つまり、ひずみ計測値 (温度補正を行う場合は補正後の値) に PC ケーブルまたはグラウンドアンカーテンドンの見かけの弾性係数 $E_{PC_{eq}}$ および有効断面積 A_{PC} を乗じることで、張力分布に換算することとした。

$$PC_i = \varepsilon_i \times E_{PC_{eq}} \times A_{PC} \quad \text{式 3.2-2}$$

ただし、 PC_i : 計測点 i における張力、

ε_i : 計測点 i におけるひずみ計測値 (温度補正を行う場合は補正後の値)

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

見かけの弾性係数は、式 3.2-2 に示すとおり、螺旋状の光ファイバに沿って計測されたひずみを鋼より線軸方向の応力に換算するための係数であり、ローカルなひずみと応力の関係を表す鋼材としての弾性係数（一般的に、 200kN/mm^2 ）とは異なるものである。

ここで、上述した FEM 解析においては7本の素線全体に対して一様にひずみを与えているが、実際には鋼より線の外周からくさびで挟み込んで張力を作用させるため、側線と芯線との間に滑りが生じて引張りひずみが一様には入らないなど、より複雑な挙動が想定される。このため、図 3.2-9 に示した FEM 解析結果から見かけの弾性係数を求めることは適切ではない。よって、実験や実施工で実際に使用する PC 鋼より線において、試験緊張時などに作用させる張力と、光ファイバで計測されるひずみとの相関係数から見かけの弾性係数を求めることとした。

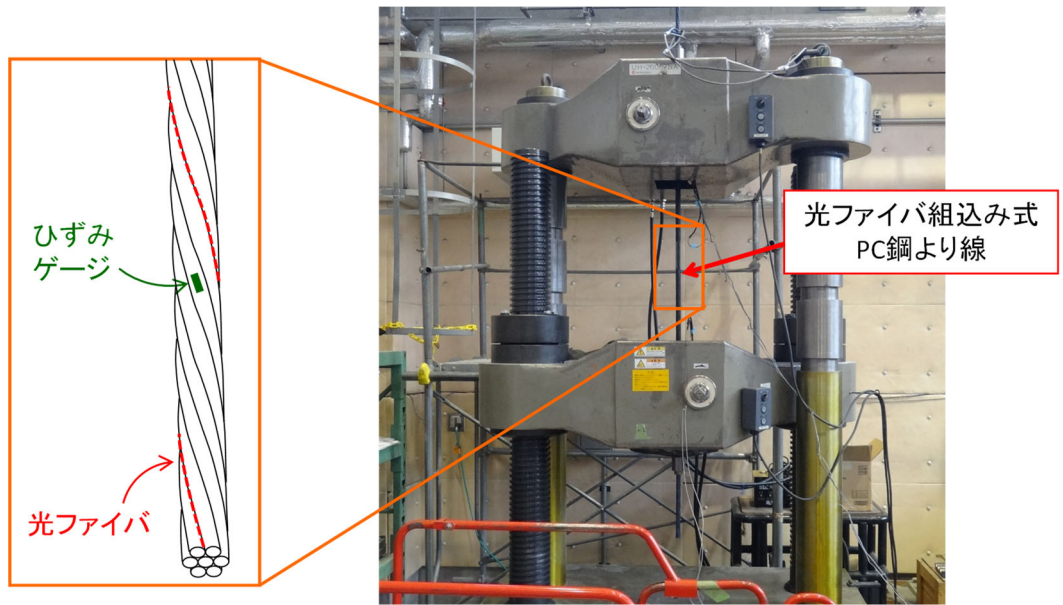
3.3 計測性能確認試験

前節で述べたように、本計測技術では、PC 鋼より線表面における素線間の凹部内に組み込んだ光ファイバセンサによりひずみ分布を計測し、その結果に基づいて張力分布を評価する。このため、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線において、光ファイバが PC 鋼より線と滑ることなく一体となって挙動し、ひずみ分布を計測可能であることを確認する必要がある。そこで、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線単体の引張試験を行い、基本的な計測性能を確認した。

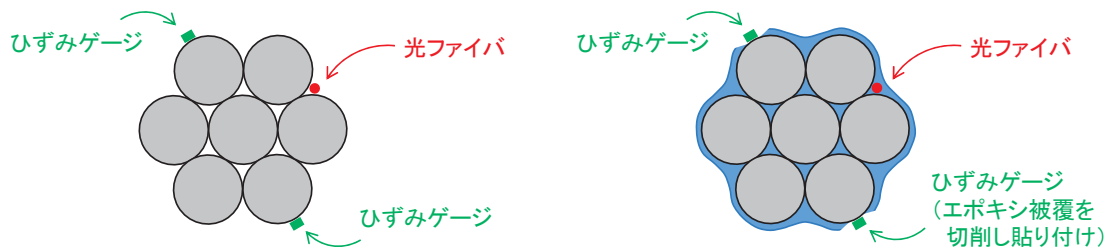
3.3.1 要素試験

(1) 試験概要

裸線タイプおよび ECF タイプの2種類の光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を対象に、要素試験として、長さ約 2.0m のサンプルを用いた引張試験を行った。試験概要を図 3.3-1 に示す。定着具間の長さを約 1.2m として両端をくさび定着し、2,000kN 万能試験機を用いて最大 200kN ($0.9 P_y$ 相当、 P_y : 0.2% 永久伸びに対する荷重) の張力を載荷した。計測は張力を 40kN 増加させるごとに行い、BOCDA 方式によるひずみ分布計測と併せ、供試体の長さ中央付近に貼り付けたひずみゲージによる計測値、および試験機の荷重計の出力値を記録した。ひずみゲージは、図 3.3-1 b), c) に示すように PC 鋼より線表面の凸部に貼り付けており、ECF タイプにおいては、長さ約 1cm の範囲のエポキシ樹脂被覆を切削して側線の表面を露出させた上で貼り付けた。



a) 試験状況



b) 裸線タイプ PC鋼より線断面図

c) ECFタイプ PC鋼より線断面図

図 3.3-1 光ファイバ組込み式 PC鋼より線要素試験概要

(2) 試験結果

要素試験により計測された、張力とひずみの関係を図 3.3-2 に示す。なお、光ファイバによる計測値は、供試体中央付近の長さ約 60cm の範囲の計測値の平均値として、ひずみゲージによる計測値は、対角線上に貼り付けた 2 枚のひずみゲージの計測値の平均値として示した。ここで、PC 鋼より線の長さ 60cm は、よりピッチの 2.7 倍に相当する。計測結果は、約 1kN の張力が作用している状態でのひずみ計測値を初期値として、そこからのひずみの増分として整理した。

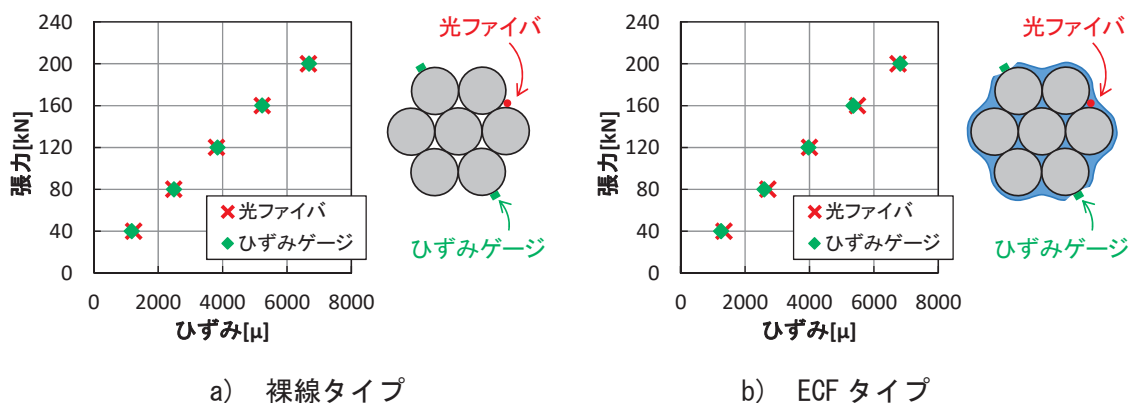


図 3.3-2 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線要素試験結果

図 3.3-2 より、計測された張力とひずみはほぼ線形関係を示しており、光ファイバとひずみゲージの計測結果は良く一致していることが確認できる。この結果から、裸線タイプではエポキシ系接着剤を介して、ECF タイプではエポキシ樹脂被覆を介して、それぞれ光ファイバが PC 鋼より線に接着され、両者が滑らずに一体として挙動することが確認された。

ここで、本試験では両計測結果が非常に良好に一致しているが、光ファイバとひずみゲージは異なる位置（PC 鋼より線表面の凹部および凸部）に貼り付けているため、図 3.2-9 に示した FEM 解析の結果からすれば、異なる計測結果となることが想定される。計測結果が一致した明確な原因は不明であるが、接着剤や光ファイバの被覆の挙動などが影響しているものと考えられる。なお、本計測技術を実際に使用する際には、前節で述べたとおり、実際に使用する PC 鋼より線における張力と計測値の関係から見かけ上の弾性係数を求めるため、これらの影響を受けずに（これらの影響も含めて補正して）張力を評価することが可能である。

3.3.2 実構造物を想定した引張試験

(1) 試験概要

前項で述べたように、長さ約 2.0m のサンプルを用いた引張試験によって、裸線タイプおよび ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線において、いずれも光ファイバと PC 鋼より線が一体として挙動することが確認された。次に、実際の構造物に近い構成の PC ケーブルでの計測性能を確認するため、1 本の PC 鋼より線（以下、シングルストランドケーブル）が PC 橋梁で想定される長さや曲線配置された状態、および PC 橋梁やグラウンドアンカーで多く用いられる、複数の PC 鋼より線を束ねた状態（以下、マルチストランドケーブル）での引張試験を実施した。

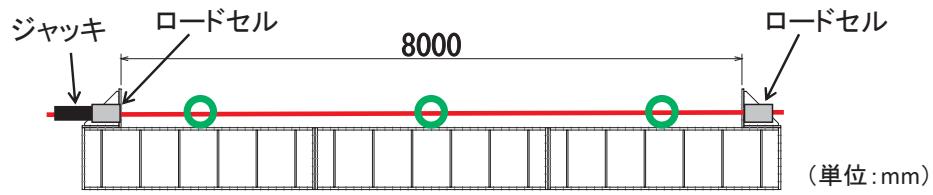
シングルストランドケーブル引張試験概要

図 3.3-3 に試験概要を示す。裸線タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いたシン

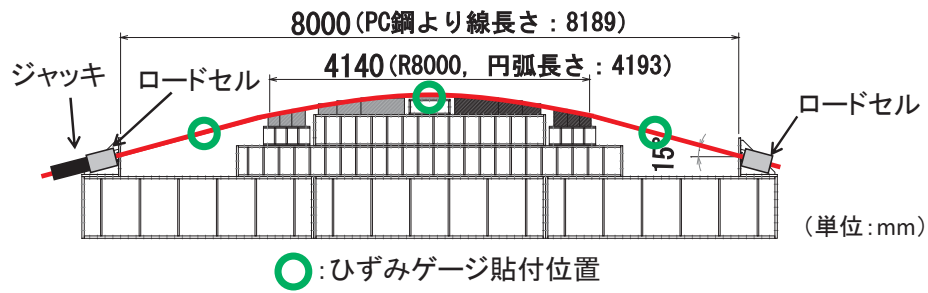
グルストランドケーブル 1S15.2 を対象に、定着板間の距離 8,000mm で直線状に配置したものの、および PC 橋梁上部工の柱頭部におけるウェブケーブルを想定し、曲げ半径 8,000mm で曲線状に配置したものの 2 ケースで試験を実施した。反力床上に固定したフレームにシングルストランドケーブルの片端を定着し、もう一端を、同フレームから反力を取りながら油圧ジャッキで緊張した。曲線引張試験では、鋼製スパイラルシースを所定の曲げ半径となるようにフレーム上に設置し、シース内にシングルストランドケーブルを挿入した。なお、試験中にシースが変形、移動しないよう、鋼製スパイラルシースの周囲にモルタルを打設し、固定した。

緊張は、最大 141kN (ポンプ油圧：40MPa) まで行い、所定の緊張力に達するごと (ポンプ油圧 10MPa ごと) にジャッキを固定し、BOCDA 方式によるひずみ分布計測を行った。計測精度の検証のため、PC 鋼より線の凸部にひずみゲージを貼り付け、両端部に設置したセンターホールロードセルと併せて計測を行った。計測位置は図 3.3-3 に示した。

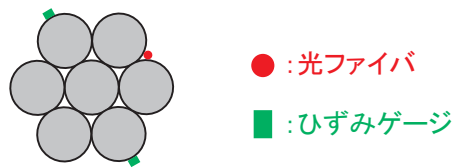
計測結果は、見かけの弾性係数を用いて張力に換算し、初期緊張時 (ポンプ油圧 7.5MPa) からの増分として整理した。見かけの弾性係数は、本試験に先立ち実施した試験緊張時の計測結果から算定した値、 221kN/mm^2 を用いた。試験緊張は、直線状に配置したシングルストランドを対象に、約 60kN (応力：約 433N/mm^2 相当) までの範囲で実施した。なお、試験緊張を行った張力の範囲では、光ファイバとひずみゲージの計測値に有意な差は見られなかったため、両計測値に対して同じ弾性係数を用いることとした。



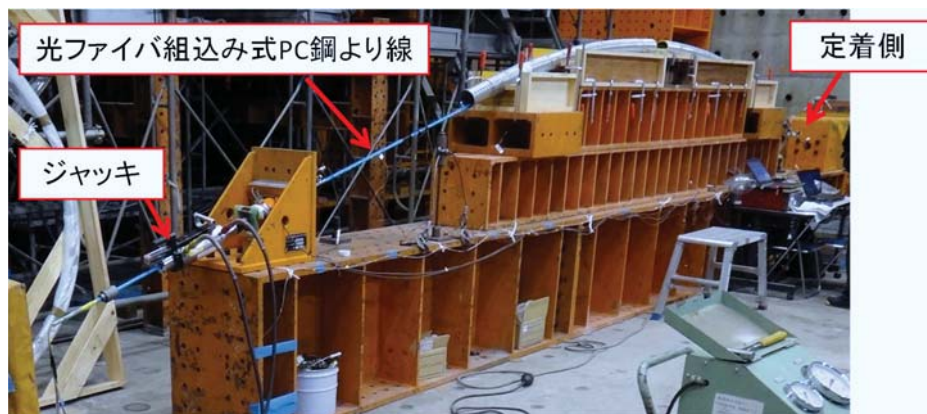
a) 直線引張試験



b) 曲線引張試験



c) シングルストランドケーブル断面図



d) 試験実施状況（曲線引張試験）

図 3.3-3 シングルストランドケーブル引張試験概要

マルチストランドケーブル引張試験概要

実際の PC 橋梁やグラウンドアンカーにおいて、設計上大きな張力の導入が求められる場合には、PC 鋼より線を複数本（例えば 3 本や 12 本、19 本など）束ねたマルチストランドケーブルが広く用いられている。本計測技術のマルチストランドケーブルへの適用性を検証するため、図 3.3-4 に示すマルチストランドケーブル引張試験を実施した。試験対象は 7 本より PC 鋼より線を 12 本束ねた 12S15.2 で、その内 2 本に裸線タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いている。図 3.3-4 に示すとおり、定着板間の距離 3,990mm で直線状に配置し、マルチストランド用ジャッキを用いて 12 本の PC 鋼より線を一括で緊張した。PC 鋼より線は、内周側の 3 本と外周側の 9 本に分けられるが、それらの内、それぞれ 1 本ずつに光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を配置した（図 3.3-4 b））。

緊張は最大 2,192kN ($0.7P_u$ 相当, P_u : 引張強度) まで行い、緊張中に適宜ジャッキを固定し、BOCDA 方式によるひずみ分布計測を行った。計測結果は初期緊張時(ポンプ油圧 5MPa)からの増分として整理し、ポンプ油圧から算出したジャッキ張力と比較した。

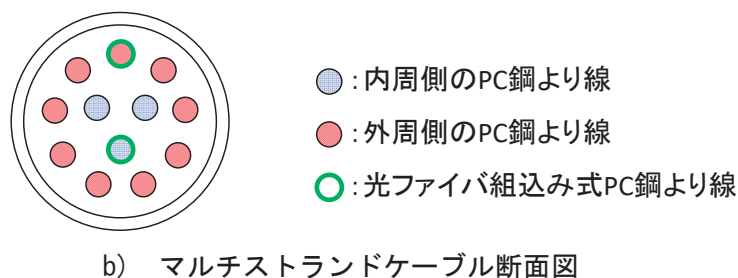
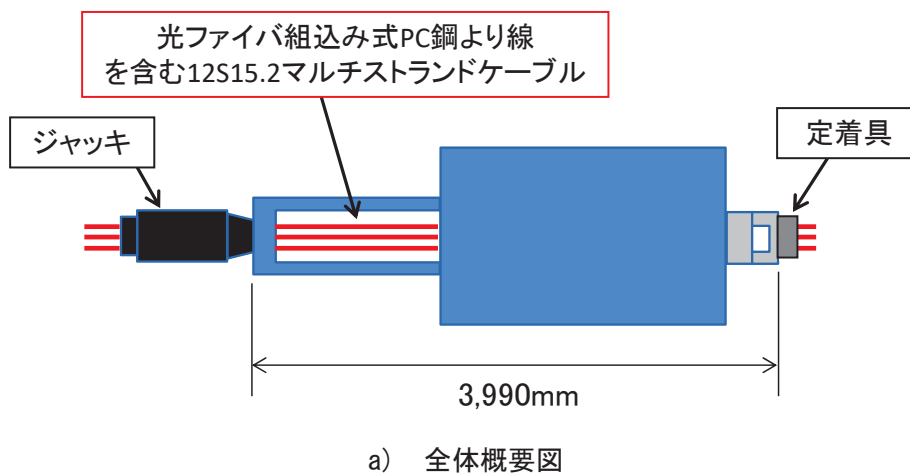
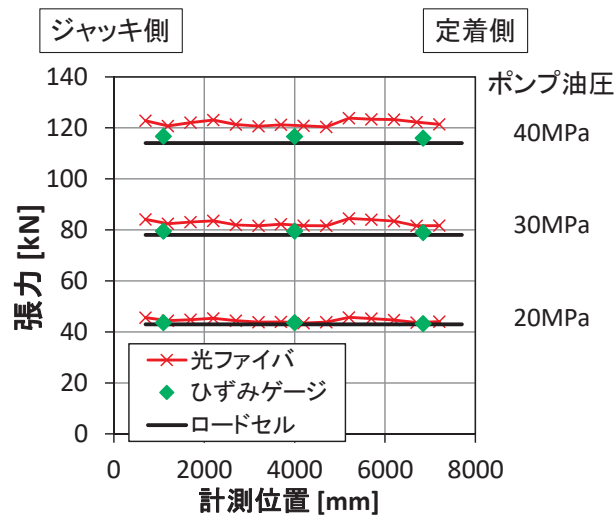


図 3.3-4 マルチストランドケーブル引張試験概要

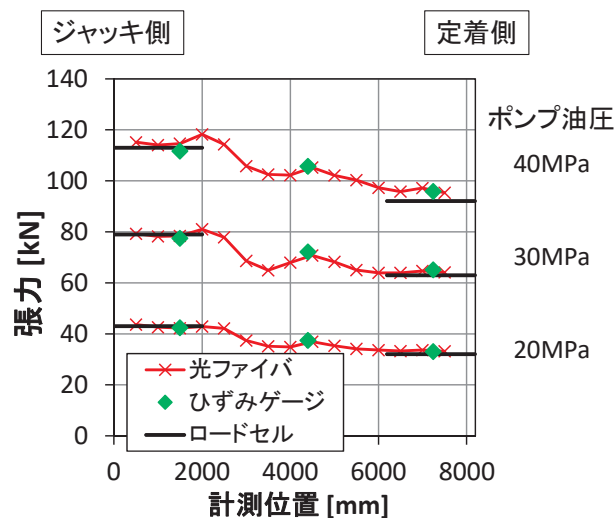
(2) 試験結果

シングルストランドケーブル引張試験結果

直線引張試験および曲線引張試験により得られた張力分布の計測結果を図 3.3-5 に示す。なお、曲線引張試験におけるロードセルの計測値は、張力が一定となる直線区間のみにプロットしている。図 3.3-6 には、ジャッキにより与えた張力に対する計測結果の履歴について、ひずみゲージによる計測値と、直近の測定点における光ファイバによる計測値の比較を示す。直線引張試験の結果には、除荷中の計測結果も併せて示している。なお、縦軸の値は、ジャッキ側のロードセルによる計測値とした。



a) 直線引張試験



b) 曲線引張試験

図 3.3-5 シングルストランドケーブル引張試験結果（張力分布）

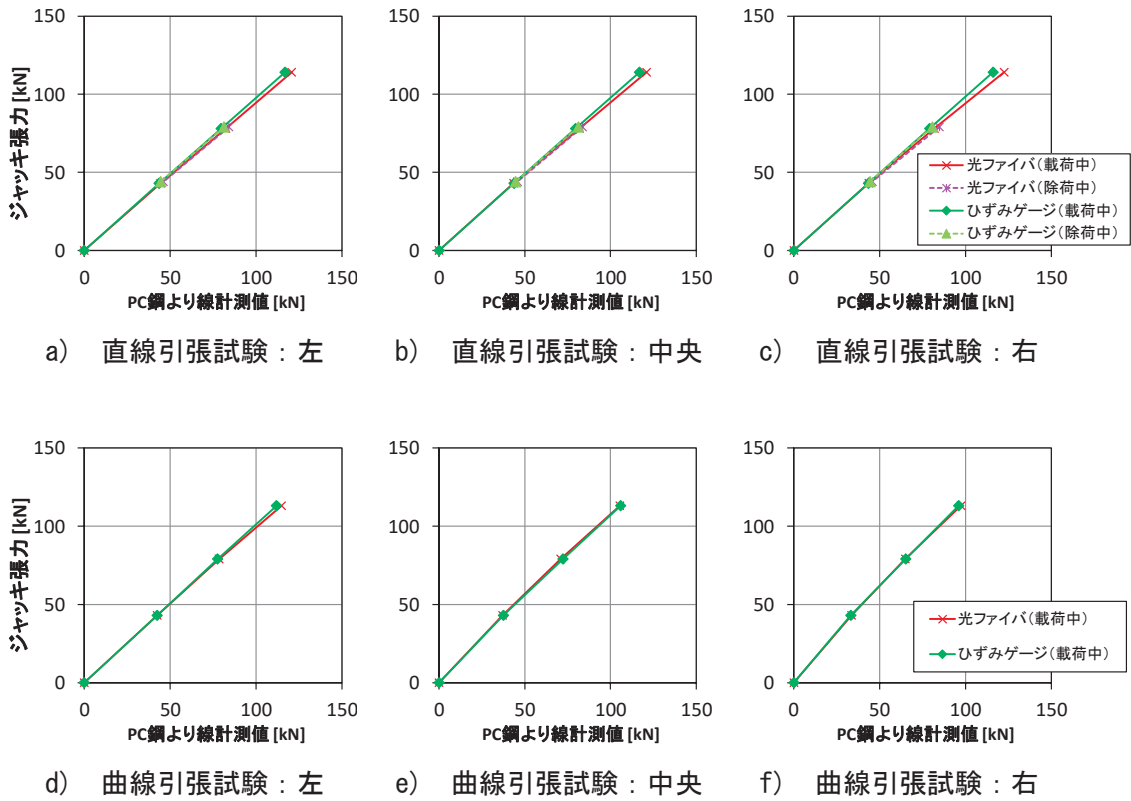


図 3.3-6 シングルストランドケーブル引張試験結果 (張力の履歴)

図 3.3-5 a) より、直線配置されたシングルストランドケーブルにおける光ファイバによる計測値はほぼ一定となっており、ひずみゲージによる計測値と比較して最大で約 4% の差異が見られるが、両計測値はよく一致していることがわかる。なお、図 3.3-6 a)～c) から明らかなように、特に約 80kN (ポンプ油圧: 30MPa) での計測以降、張力が大きくなるにつれて両計測値の差異がより大きくなっている。ここで本試験では、約 60kN までの張力で行った試験緊張結果から算定した見かけの弾性係数 (221kN/mm²) を用いて張力への換算を行っているが、この見かけの弾性係数の算定精度がやや低かったことが、張力の増大に応じて計測値間の差異が大きくなった原因と考えられる。実際の施工においては、本緊張を行う張力レベルまでの試験緊張結果などから見かけの弾性係数を求めることにより、張力の計測精度を向上できると考えられる。また、図 3.3-6 a)～c) に示した除荷中の計測結果は、載荷中の計測結果と非常に良く一致しており、本試験で載荷した 140kN までの範囲において、緊張によって光ファイバと PC 鋼より線との間で滑りなどが生じることなく、精度良く計測可能であることが確認できる。

図 3.3-5 b) および図 3.3-6 d)～f) より、曲線配置されたシングルストランドケーブルにおける光ファイバによる計測値は、曲線区間におけるシースとの摩擦による張力のロスを含め、ひずみゲージやロードセルによる計測値とよく一致している。ただし、曲線区間に

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

おける光ファイバによる計測値には比較的大きなばらつきが見られた。ここで、PC鋼より線が曲げられた際には、螺旋状に巻かれた側線は、曲線の内側と外側を交互に通過することから曲げによる圧縮応力と引張応力を交互に受けることとなり、隣り合う2本の側線間には側線軸方向の相対的なズレが生じる（図3.3-7）。この相対的なズレによって、側線間の凹部に組み込まれた光ファイバにファイバ軸方向の局所的なせん断力が作用したことが、計測値のばらつきの原因と考えられる。ただしこのばらつきは計測値の10%程度であり、また計測値の定性的な傾向はよく一致していることから、実務上十分な精度を有しているものと判断した。ここで、2.3 光ファイバを用いたひずみ計測技術で述べたとおり、光ファイバセンサによる計測は、光ファイバ延長上における各点で生じる後方散乱光を分析することにより行う。よって、各点における計測は互いに独立しており、上記のような局所的な力の作用によるばらつきは、その他の点における計測結果には影響しないものといえる。

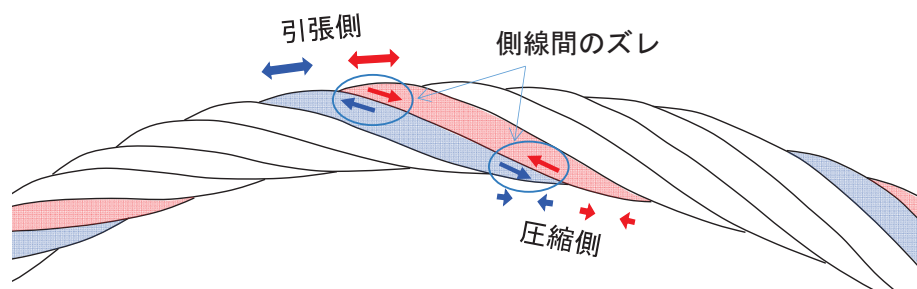
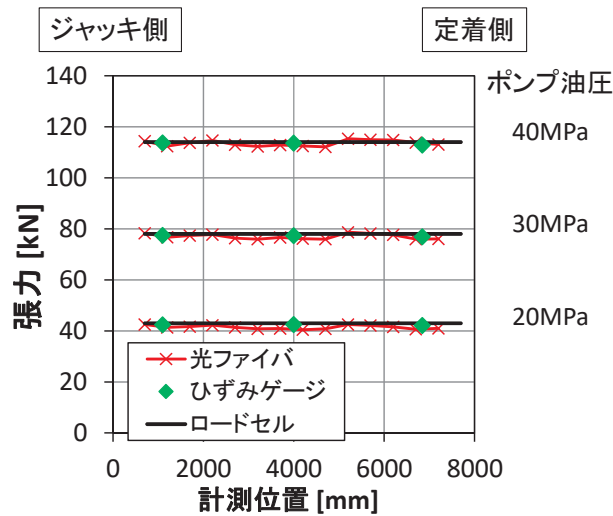
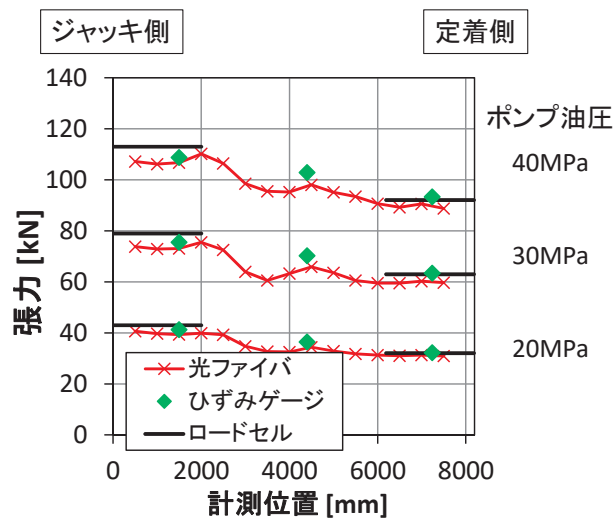


図 3.3-7 曲線配置された PC 鋼より線の挙動

なお、参考までに、最終的な張力である 141kN までの計測結果を用いて見かけの弾性係数を算定し、張力に換算した結果を図 3.3-8 に示す。光ファイバおよびひずみゲージによる計測値に対する見かけの弾性係数は、それぞれ 205kN/mm^2 および 215kN/mm^2 である。この結果より、曲線引張試験結果における定量的な値のばらつきは残るものの、本緊張を行う張力レベルまでの計測結果から見かけの弾性係数を算定することによって、張力分布の計測精度を向上可能であることが確認できる。



a) 直線引張試験



b) 曲線引張試験

図 3.3-8 シングルストランドケーブル引張試験結果（見かけの弾性係数再評価）

マルチストランドケーブル引張試験結果

光ファイバにより計測されたひずみ分布は、ケーブル長さ方向中心付近、約 1.5m の範囲における平均値を算出し、見かけの弾性係数および 12S15.2 マルチストランドケーブルの断面積を用いて張力に換算した。見かけの弾性係数には、シングルストランドケーブル直線引張試験の張力 141kN までの計測結果を用いて算定した値 205kN/mm^2 を用いた。ポンプ油圧から算定したジャッキ張力と計測値との関係を図 3.3-9 に示す。

内周側、外周側いずれの計測値も、作用させたジャッキ張力と比較してやや小さめの値を示した。最終緊張時における、内周側および外周側の計測値とジャッキ張力との差異はそれぞれ 7.2%、3.1%であるが、いずれの差異もジャッキ張力の増加に応じて一定の比率で大き

第3章 張力分布計測技術の開発と計測性能の確認

くなっているわけではなく、約 1,200kN（初期緊張時からの増分としての値）以降ではほぼ一定値となっている。これは、ケーブル長さが約 4m と短いため、緊張開始前の PC 鋼より線ごとのたわみ量（サグ）の差の影響が大きかったことが原因と考えられる。つまり、緊張開始前のたわみが大きかった PC 鋼より線は、その他のものと比較して実際の伸び量が小さくなるため、張力が小さくなる。実構造物においては、シングルストランドケーブル引張試験で想定した長さ約 8m の PC 橋梁柱頭部ケーブルのように、本試験と比較してケーブル全長は十分長くなることが想定される。ケーブル長が長くなれば、緊張開始前のたわみ量の差異の影響は相対的に小さくなり、より高精度での計測が可能になると考えられるが、ケーブル長が短い場合には注意する必要がある。本論文では、次章で述べる実際の PC 橋梁上部工事への適用試験において、十分な長さを有するマルチストランドケーブルにおける計測結果についての考察を行う。

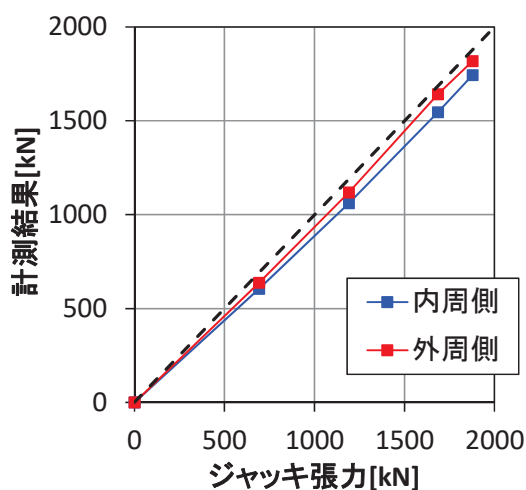


図 3.3-9 マルチストランドケーブル引張試験結果

以上より、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いることで、光ファイバと PC 鋼より線とが滑らずに一体として挙動してひずみを計測可能であること、実際の構造物で想定される長さや曲線配置された場合、複数の PC 鋼より線が束ねられた場合においても、実務上十分な精度で張力分布を計測可能であることなどが確認された。

なお、本章で述べた試験では、BOCDA 方式によって数 cm の空間分解能での計測を行った。ここで、空間分解能が低いと局所的な変動が過小評価されることが考えられる。しかし、PC 構造物やグラウンドアンカーの緊張管理・維持管理においては、PC ケーブルやアンカー tendon の断面全体に軸方向に導入される張力の分布を評価すべきであり、図 3.3-7 に示したような曲げによる付加的な圧縮応力や引張応力、側線間のずれによる局所的な力の影響などは排除することが望ましい。よって、PC 鋼より線のよりピッチが 221.1mm であること、実構造物における PC ケーブルやアンカー tendon の長さが 10m 程度から数 100m

に及ぶことを考慮すれば、本計測技術の実構造物への適用においては、約1mの空間分解能で平均ひずみを計測するBOTDR方式の方が適切であると考えられる。

3.4 まとめ

本章では、「光ファイバを用いた張力分布計測技術」開発時の課題やその解決方法、およびその基本的な計測性能を確認した室内試験について述べた。本章のまとめを以下に示す。

- 1) 裸線タイプおよびECFタイプの2種類の光ファイバ組込み式PC鋼より線(7本より、S15.2)を開発した。いずれも通常と同じ手順で施工可能であり、くさび定着を行っても光ファイバを損傷させずに計測が可能である。またECFタイプにおいて、光ファイバを組み込むことによってもエポキシ被覆と鋼より線との一体性は阻害されず、通常のECF鋼より線と同等の防食性能を有する。
- 2) BOCDA方式またはBOTDR方式による計測結果に対し、必要に応じて温度分布計測結果などを用いた温度補正を行い、見かけの弾性係数を用いて張力に換算して張力分布を評価する方法を確立した。
- 3) 裸線タイプおよびECFタイプのいずれも、光ファイバはPC鋼より線に接着され、両者が滑らずに一体として挙動する。
- 4) 実際の構造物で想定される長さや曲線配置された場合でも、シースとの間の摩擦によるロスを含め、実務上十分な精度で張力分布を評価可能である。
- 5) ケーブル長が約4mと短いマルチストランドケーブルを用いた試験では、計測したPC鋼より線の位置によって張力の計測結果にばらつきが見られたが、これは緊張開始前のPC鋼より線ごとのたわみ量の差の影響と考えられる。ケーブル長が長ければ、たわみ量の差の影響は相対的に小さくなると考えられるが、ケーブル長が短い場合には注意する必要がある。
- 6) 光ファイバは高い耐久性を有する材料であり、さらに、再計測用の光ファイバを安全な場所まで延長しておくことにより、随時の再計測を容易に行うことが可能になるなど、PC構造物やグラウンドアンカーの維持管理のための計測技術に適した材料である。

3.5 第3章の参考文献

- 3.1) Hartog, A.H.: An introduction to distributed optical fibre sensors, CRC Press, 2018.1.2
- 3.2) JIS G 3536 : PC 鋼線及び PC 鋼より線, 2014.
- 3.3) 山崎大輔, 岩波光保 : 表面の微小領域の物性・組成変化に着目した補修用接着剤の耐久性評価, 土木学会論文集 E2, Vol.76, No.2, pp.119-129, 2020.6.
- 3.4) 土木学会 : 内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線の品質規格 (案) (JSCE-E 141-2018), コンクリート標準示方書【規準編】, pp.105-109, 2018.
- 3.5) 和田史生 : ラマン散乱を用いた光ファイバーの温度測定, 応用物理, 60 巻, 1 号, pp.68-69, 1991.

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用

本章では、本研究で開発した計測技術を PC 構造物へ適用することを想定し、緊張管理・維持管理への適用性を検証した室内試験の結果、および実際の PC 橋梁上部工工事へ適用した結果について述べる。なお本章では、ポストテンション方式の PC 構造物について述べるが、本計測技術はプレテンション方式の構造物においても同様の効果が期待できると考えられる。

4.1 光ファイバを用いた計測技術の適用性

PC 構造物内部の PC ケーブルは、想定される外力に対して必要な位置に効率的にプレストレスを導入するため、一般的に曲線状に配置される（図 4.1-1）。この時、2.1 PC 構造物の緊張管理・維持管理で述べたとおり、シース管と PC ケーブルとの間の摩擦によるロスや、定着時にくさびの刃が鋼より線表面に食い込むまでにケーブルが内側に引き込まれることによるロス（セットロス）によって、PC ケーブルに導入される張力は一様にはならず、図 4.1-2 に示すような分布を示す。緊張・定着後には、次ブロック以降の施工による影響、供用期間中長期にわたるコンクリートのクリープや乾燥収縮の他、各種荷重の作用などによりプレストレスが変動することが想定される^{4.1)}（図 4.1-2）。さらに、内ケーブルにおけるグラウトの未充填箇所などが存在すると、雨水が浸入し、PC 鋼材の腐食や破断も起こり得る^{4.2)}。

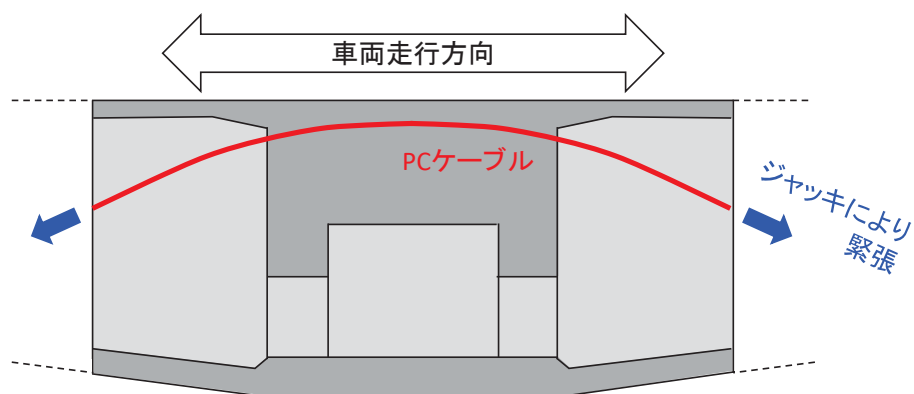


図 4.1-1 PC ケーブルの曲線配置の例 (PC 橋梁柱頭部)

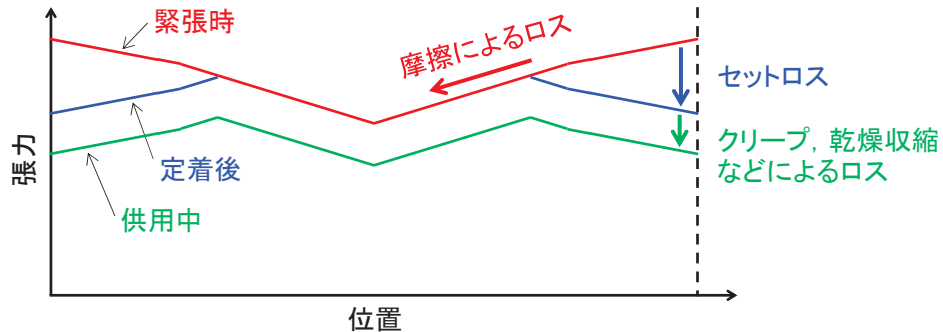


図 4.1-2 曲線配置された PC ケーブルに導入される張力分布のイメージ

このような PC 構造物に対し、従来の緊張管理においては、シース管や偏向管内の摩擦係数を仮定し、ジャッキにより作用させる張力と PC ケーブルの伸び量を計測しながら、設計断面に導入されるプレストレス量を間接的に評価する方法が一般的であった^{4.3)}。しかし、複雑に配置されたケーブルの場合には各断面に導入されるプレストレス量を正確に評価することが難しいこと、定着後の張力の変動を計測できないことなどが課題と言える。近年では、施工時から供用期間中まで継続して張力を直接計測することが可能な磁歪式センサ^{4.4)}や、非破壊で PC ケーブルの破断を検査する漏洩磁束法^{4.5)}や放射線透過法^{4.6)}などが実用化されているが、それぞれ、設置されたセンサから離れた箇所で生じた異常は検知することができない、PC ケーブルの破断を検知したとしても、破断に伴ってプレストレスが変動した範囲やその変動の大きさを評価することは不可能である、といった課題がある。

これらの課題に対し、本研究で開発した、光ファイバを用いた張力分布計測技術を適用することにより、施工時には各断面に導入されるプレストレス量を直接評価することが可能となり、供用期間中にはプレストレス量の変動や PC ケーブルの破断を検知し、その影響範囲まで評価することが可能となるなど、緊張管理・維持管理の高度化への貢献が期待される。

4.2 PC 構造物を想定した計測性能確認試験

PC ケーブル緊張時において、摩擦によるロスを含む張力分布を評価可能であることは前章で述べた計測性能確認試験により確認された。本節では、緊張・定着後の張力変動や PC ケーブルの破断を再現した室内試験により、本計測技術を PC 構造物の維持管理に適用することを想定した、張力変動に対する計測性能、およびケーブル破断に対する検知性能を検証する。

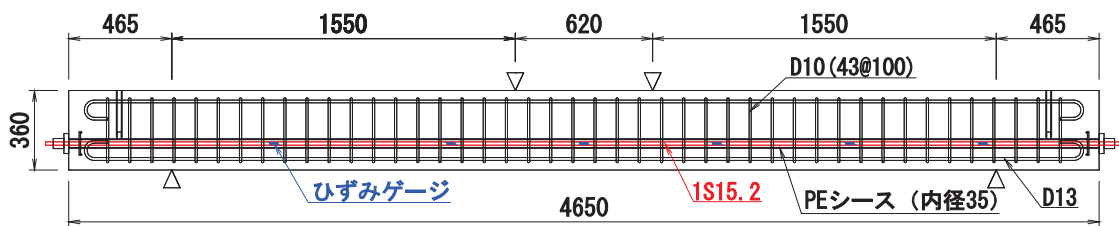
なお本節で述べる試験においては、空間分解能が高く詳細な検証が可能な BOCDA 方式のひずみ計測を使用した。

4.2.1 PC 梁試験体曲げ試験

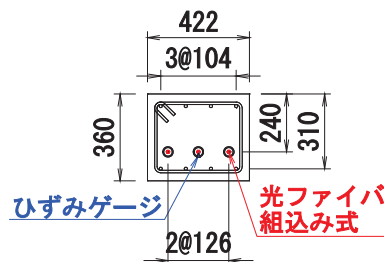
(1) 試験概要

PC 構造物内部において、外力の作用による PC 張力の変動が計測可能であることを確認するため、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を緊張材として用いた PC 梁試験体の曲げ載荷試験を実施した。

試験体は、ポストテンション方式の PC 梁試験体とした。図 4.2-1 に試験体概要図を、表 4.2-1、4.2-2 に使用した材料の物性値を示す。なお、使用したコンクリートの粗骨材最大寸法は 20mm である。緊張材は、裸線タイプの 7 本より PC 鋼より線を用いたシングルストランドケーブル (1S15.2) を 3 本とし、その内の 1 本を光ファイバ組込み式 PC 鋼より線とした (図 4.2-1 b))。残りのシングルストランドケーブルの内の 1 本には、PC 鋼より線の凸部にひずみゲージを貼り付けており (図 4.2-1)、光ファイバによる計測値との比較を行った。ケーブル 1 本あたりの導入張力は、緊張時の許容張力^{4,7)}である 200kN とし、緊張・定着した後、ポリエチレンシース内に高流動無収縮グラウト材を充填し、グラウト硬化後に載荷を行った。なお、計測されたケーブルのひずみから算定した、定着直後の 1 本あたりの有効張力は 164kN であり、このときの梁底面におけるプレストレス量は 6.2N/mm^2 であった。



a) 側面図



b) 断面図

図 4.2-1 PC 梁試験体概要図 (単位 : mm)

表 4.2-1 PC 梁試験体材料物性値 (1)

材料	断面積 mm ²	弾性係数 kN/mm ²	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
主鉄筋 D13, SD345	126.7	193	380	543
せん断補強 鉄筋 D10, SD345	71.33 [*]	—	345~440 [*]	490~ [*]
PC 鋼より線 1S15.2B	138.7	192	1784 ^{**}	1962

* 規格値

** 0.2%耐力

表 4.2-2 PC 梁試験体材料物性値 (2)

材料(材齢 [*])	弾性係数 kN/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	割裂引張強度 N/mm ²
コンクリート 材齢 73 日	35.9	56.5	3.80
グラウト 材齢 13 日	22.6	96.8	3.06

※ 載荷日材齢

試験体はテフロン支承を用いて単純支持し、5,000kN 圧縮試験機を用いて 4 点曲げ載荷を行った。載荷状況を図 4.2-2 に示す。事前に弾性計算によって求めた引張縁のコンクリート応力が 0N/mm²となる荷重 (55kN)、および目視によって曲げひび割れの発生が確認された荷重 (125kN) をそれぞれ上限値とした繰返し載荷を 5 回行った後、終局まで単調載荷を行った。載荷中は、載荷荷重、スパン中央の鉛直変位、およびシングルストランドケーブルのひずみを計測した。光ファイバによるひずみ計測は、繰返し載荷中は 5 回目の目標荷重到達時に、単調載荷中は荷重 25kN またはスパン中央鉛直変位 2.5mm 増加するごとに行った。なお、繰返し載荷中のひずみ計測においては、計測時間の短縮のため、計測間隔を広げて計測点数を少なく設定した。

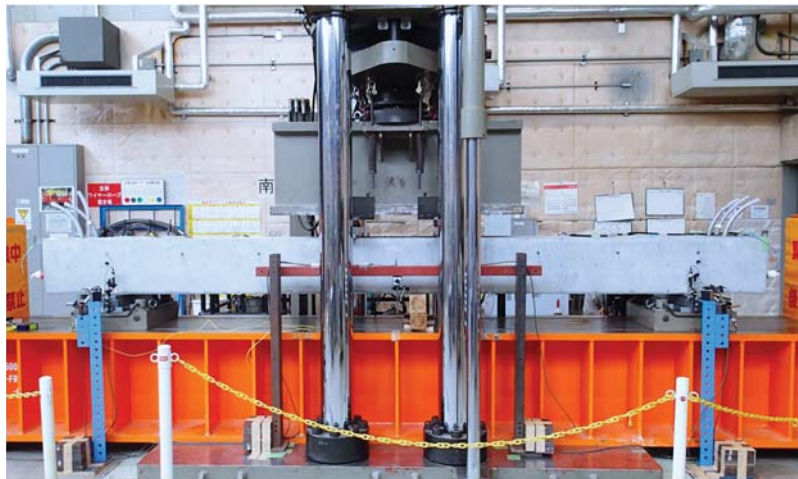


図 4.2-2 PC 梁試験体の曲げ試験载荷状況

(2) 試験結果

図 4.2-3 に、PC 梁試験体曲げ試験により得られた荷重－変位関係を示す。図中には、表 4.2-1、4.2-2 に示した使用材料の物性値を用いてコンクリート標準示方書^{4.1)}に従って算定した、曲げ耐力 (290kN) および PC ケーブルの応力が $0.84f_u$ (コンクリート標準示方書に規定される PC 鋼材のトリリニアモデルにおける 1 次折れ点の応力、 f_u は引張強度) に達する荷重 (267kN) を併せて示した。曲げひび割れ発生後、荷重の増加に伴い主鉄筋および PC ケーブルが順に降伏し、等曲げ区間内のコンクリート上部に曲げ圧壊が生じて荷重が低下した。実験で得られた最大荷重は、計算上の曲げ耐力とほぼ同等の 298kN であった。

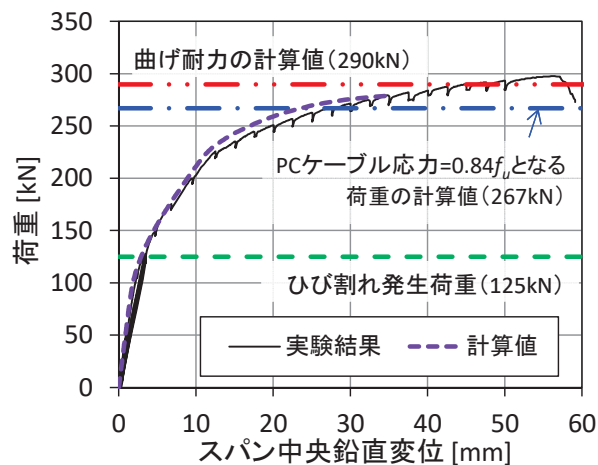


図 4.2-3 荷重－変位関係

目視で曲げひび割れの発生が確認された荷重 (125kN) への繰返し载荷 5 回目の到達時、および PC ケーブルの応力が $0.84f_u$ に達する荷重の計算値 (267kN) におけるひずみ分布の計測結果を、図 4.2-4 a), b) にそれぞれ示す。なお計測結果は、载荷直前の値を初期値と

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用

した曲げ荷荷によるひずみの増分として整理した。また、本試験では PC ケーブルの降伏以降まで計測を行っているため、張力への換算を行わず、ひずみの計測値のまま示している。図中には、光ファイバおよびひずみゲージによる計測結果と併せ、鋼材とコンクリートの完全付着（平面保持）を仮定した PC ケーブルのひずみ分布の計算結果を示した。ひずみ分布の計算に用いた物性値のモデルは、コンクリート標準示方書^{4.1)}に準拠した上で、使用材料の実際の物性値（表 4.2-1, 4.2-2）に合わせて以下のように設定した。

コンクリートの引張応力は無視し、圧縮に対する応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書に従い図 4.2-5 a) に示す放物線+直線モデルとした。ただし、初期剛性が表 4.2-2 に示した静弾性係数と一致するよう、式 4.2-1 に示す定数 (0.002618) を用いた。圧縮鉄筋および引張鉄筋の応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書に従い図 4.2-5 b) および式 4.2-4 に示すバイリニアモデルとした。PC ケーブルの応力-ひずみ曲線は、使用した PC 鋼より線の引張試験で得られた値をそのまま用いた（図 4.2-5 c)）。図 4.2-3 には、これらの仮定を用いた計算により得られた荷重-変位関係を示すが、計算値は実験結果とよく一致している。

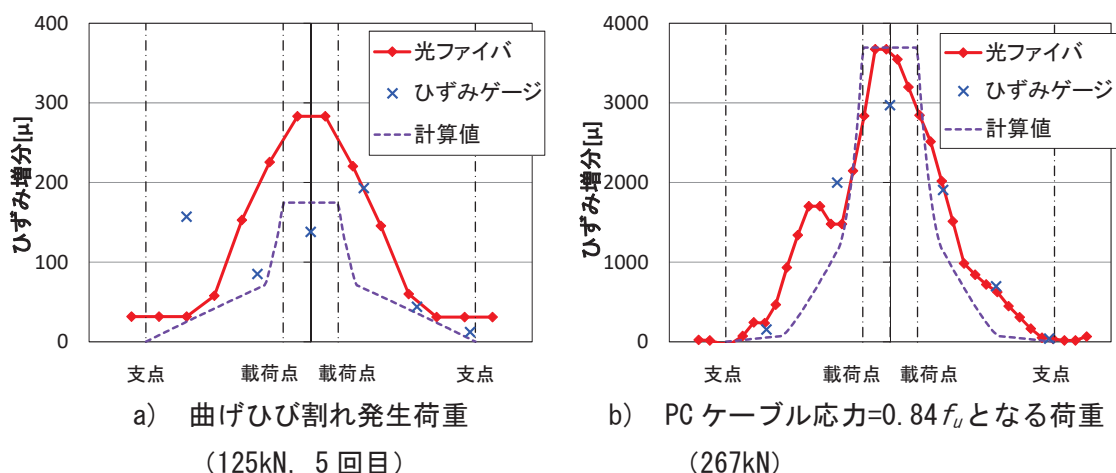


図 4.2-4 PC ケーブルひずみ分布の計測結果

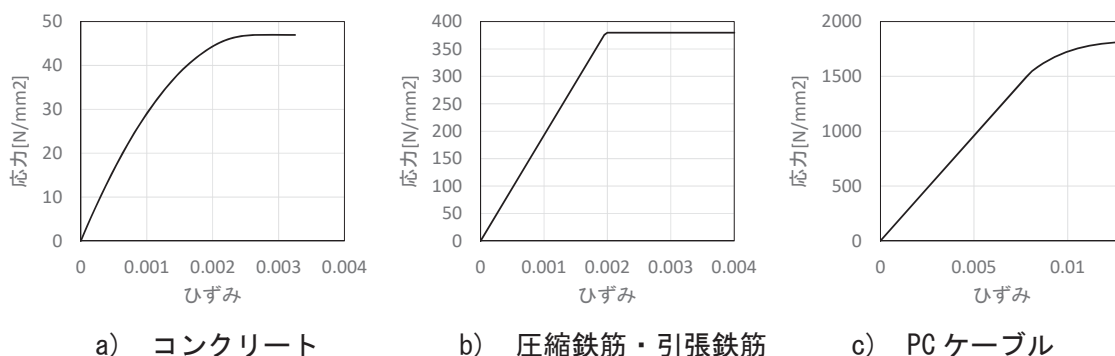


図 4.2-5 ひずみ分布の計算に用いた応力-ひずみ曲線

コンクリートの応力-ひずみ曲線 (圧縮)

$$\sigma'_c = \begin{cases} k_1 f'_c \times \frac{\varepsilon'_c}{0.002618} \times \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002618}\right) & , 0 \leq \varepsilon'_c \leq 0.002618 \\ k_1 f'_c & , 0.002618 < \varepsilon'_c \leq \varepsilon'_{cu} \end{cases} \quad \text{式 4.2-1}$$

$$k_1 = 1 - 0.003 f'_c \leq 0.85 \quad \text{式 4.2-2}$$

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_c}{30000}, \quad 0.0025 \leq \varepsilon'_{cu} \leq 0.0035 \quad \text{式 4.2-3}$$

ただし、 σ'_c : コンクリート圧縮応力 (N/mm²), f'_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)
 ε'_c : コンクリート圧縮ひずみ, ε'_{cu} : コンクリートの終局ひずみ

圧縮鉄筋および引張鉄筋の応力-ひずみ曲線

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \times \varepsilon_s & , \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ys} \\ f_{ys} & , \varepsilon_{ys} \leq \varepsilon_s \end{cases} \quad \text{式 4.2-4}$$

ただし、 σ_s : 鉄筋応力 (N/mm²), E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm²)
 ε_s : 鉄筋ひずみ, ε_{ys} : 鉄筋の降伏ひずみ, f_{ys} : 鉄筋の降伏強度 (N/mm²)

曲げひび割れ発生荷重 (125kN) においては、光ファイバによる計測値とひずみゲージによる計測値、および計算値との間に差異が見られた (図 4.2-4 a)。ひずみゲージによる計測値との差異の原因としては、それぞれの計測を異なる PC ケーブルに対して行ったため、シース管内のグラウトのひび割れ位置や、それに伴う PC ケーブルとグラウトとの付着切れなどの条件が異なっていたことが考えられる。計算値との差異の原因としては、計算ではひび割れの発生位置や付着切れ、コンクリートに作用する引張応力が考慮されていないこと、計測結果は 5 回目の繰返し載荷後の値であるためひび割れの影響が進んでいたことなどが考えられる。また、発生しているひずみ増分は 300 μ 程度以下と小さく、光ファイバによる計測精度が約 $\pm 50 \mu$ ^{4,8)} であることから、誤差が相対的に大きくなったことも要因と考えられる。以上の結果から、現時点の計測性能では、本計測技術による PC ケーブルの張力分布計測結果からコンクリートのひび割れ発生を検知することは難しいと言える。ひび割れ発生を検知には、今後より高分解能・高精度の光ファイバセンサの開発が期待されるが、現時点では、コンクリート表面に貼り付けた光ファイバによる計測が有効である。

PC ケーブルの応力が 0.84 f_u となる荷重 (267kN) では、スパン中央付近において光ファイバによる計測値はひずみゲージによる計測値と比較してやや大きな値を示しているものの、両計測結果の分布の傾向はよく一致している (図 4.2-4 b)。また、計測結果と計算値とを比較すると、スパン中央付近や図中右側のせん断スパン内では、光ファイバによる計測結果が計算値とよく一致していることがわかる。一方、図中左側のせん断スパン内では、光ファイバによる計測結果に計算値と乖離した値の増減が見られる。これは、コンクリートやグラウトのひび割れによって局所的に PC ケーブルのひずみが増加しているものと考えられるが、計算においてはひび割れや付着切れの影響は考慮されていないため、上記のようなひず

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用

みの増減を表現できておらず、計測結果との間に定量的な差異が生じているためと考えられる。以上のように、計測結果と計算値を比較すると、定量的な差異は見られるものの、定性的にはよく一致していると言える。

前述のとおり、本試験では BOCDA 方式による高分解能の計測を行った。このため、上記のようなコンクリートやグラウトのひび割れによる局所的な PC ケーブルのひずみの増加が捉えられていると言える（図 4.2-4 b）。実構造物などにおいて BOTDR 方式の計測を行った場合には、空間分解能が約 1m と低いため、このようなひび割れに伴う局所的な変動の計測は難しいと考えられる。

本試験では、載荷荷重 293kN、スパン中央鉛直変位 50mm での計測を行った後に光ファイバが破断したが、最終計測時のひずみの計測値（PC ケーブル緊張によるひずみも含めた値）は最大で約 11,000 μ であった。なお、ブリルアン散乱光を利用したひずみ計測センサの計測可能範囲は、実用上 -2,000 μ ～15,000 μ 程度とされている。

以上より、緊張・定着後にシース管内にグラウト充填された PC 部材内部においても、光ファイバは PC 鋼より線と一体として挙動し、外力の作用によるひずみや張力の変動を計測することが可能であり、その計測範囲は PC 鋼より線が降伏した後の 10,000 μ 以上であることが確認された。

4.2.2 PC 鋼より線切断試験

(1) 試験概要

PC 構造物の供用期間中に本計測技術を用いた張力分布の再計測を行うことによって、グラウトの未充填などに起因した PC ケーブルの腐食による破断が発生した際に、破断の発生やその影響範囲を検知・評価できる可能性がある。そこで、周囲にグラウト材が充填された条件下で、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の切断を行い、検知性能を検証した。

図 4.2-6 に試験概要を示す。試験対象は裸線タイプの 7 本より光ファイバ組込み式 PC 鋼より線（1S15.2）とし、200×200×3,194mm、板厚 16mm の角鋼管（SS400 材）内にて張力 200kN で緊張後、端部を定着し、鋼管内に高流動無収縮グラウト材を充填した。角鋼管中央の両側面には 120×300mm の開口を設け、開口内のグラウトに長さ 200mm の箱抜きを行うことで、PC 鋼より線の中央付近が露出される形状とした。試験体の製作状況を図 4.2-7 に示す。なお、写真内の PC 鋼より線表面の水色に見える箇所は、光ファイバ組込みのために塗布したエポキシ樹脂接着剤である。

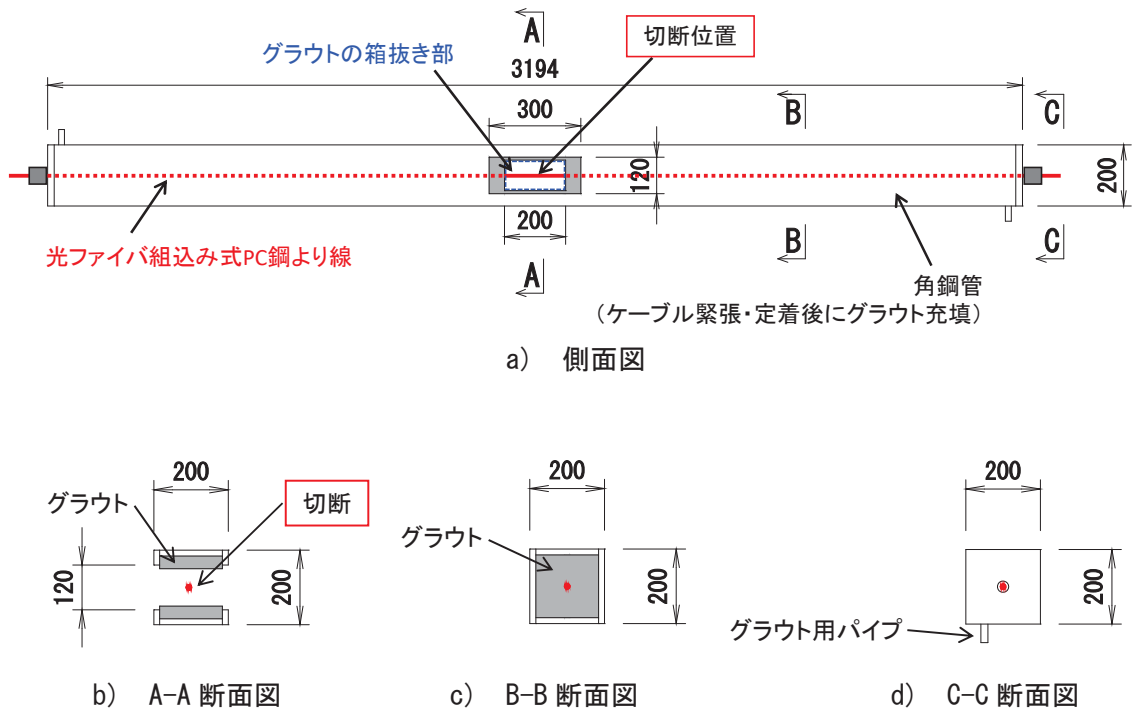


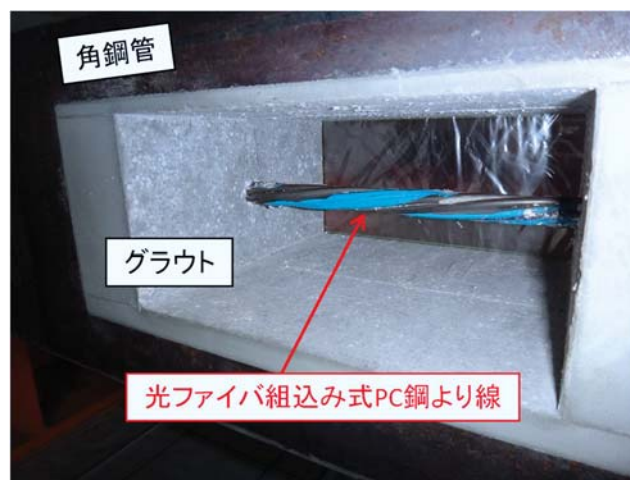
図 4.2-6 PC 鋼より線切断試験概要図 (単位 : mm)



a) 角鋼管内で緊張された光ファイバ組込み式 PC 鋼より線



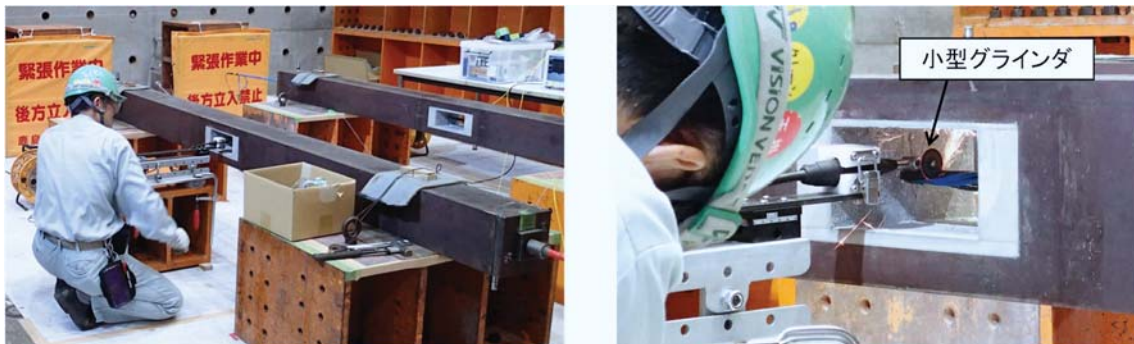
b) 角鋼管開口付近のグラウト用型枠



c) 露出された PC 鋼より線

図 4.2-7 PC 鋼より線切断試験 試験体製作状況

グラウト硬化後に、PC 鋼より線の露出部分において、光ファイバを避けながら、小型グラインダを用いて素線を 1 本ずつ切断し（図 4.2-8）、ひずみ分布の変化を光ファイバにより計測した。最終的に 7 本全ての素線を切断したが、7 本目の素線切断時に光ファイバも切断されたため、ひずみ計測は 6 本目の素線切断後までとした。なお、切断試験時のグラウト材の圧縮強度は 100N/mm^2 、弾性係数は 23.1kN/mm^2 である。



a) 全景

b) 近景（グラウト箱抜き部周辺）

図 4.2-8 PC 鋼より線切断試験状況

(2) 試験結果

切断位置付近におけるひずみ分布の内、切断前、素線 2 本切断後、4 本切断後および 6 本切断後の計測結果を図 4.2-9 に示す。また、素線 2 本、4 本、6 本および 7 本切断後の PC 鋼より線の状況と、素線 4 本切断後の素線の挙動のイメージ図を、図 4.2-10、4.2-11 にそれぞれ示す。図 4.2-11 には、素線 4 本目までの切断の順番と、光ファイバの位置のイメージも併せて示している。素線 2 本の間の凹部に組み込まれていた光ファイバは、接する素線の内の 1 方を切断（2 本目）した時点で接着が剥がれ、素線とは独立して挙動していた。図 4.2-9 より、2～4 本の素線を切断した時点では、切断に伴って切断位置付近のひずみが低下しており、その影響範囲が左右それぞれ 200～300mm 程度であることがわかる。これは、素線を 1 本ずつ切断していくと、切断された素線を外側に押し出しながら、残存する素線が内側に絞り込まれるように挙動したことにより（図 4.2-11）、露出している範囲において螺旋状の側線および光ファイバの長さが短くなることによって、局所的な張力、および光ファイバのひずみが低下したためと考えられる。またグラウト内部においては、周辺のグラウトによって変形が拘束されるため、7 本よりの鋼より線の形状が維持されていたと考えられるが、ひずみが低下している 200～300mm 程度の範囲において、グラウトとの付着切れが生じていたと言える。

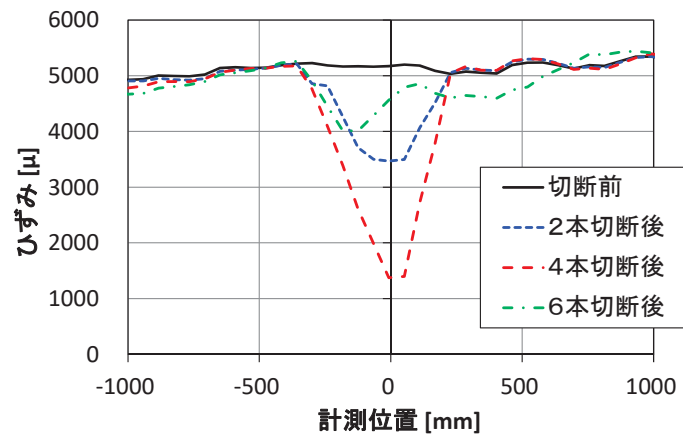


図 4.2-9 PC 鋼より線切断試験結果

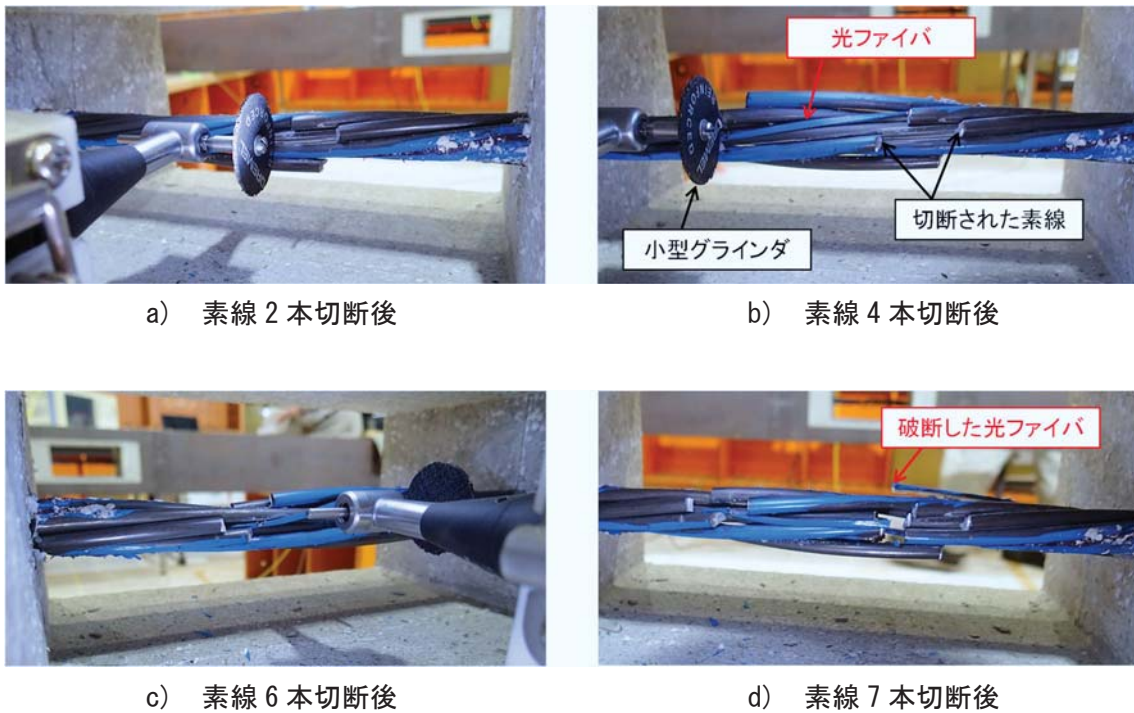


図 4.2-10 素線切断後の PC 鋼より線の状況

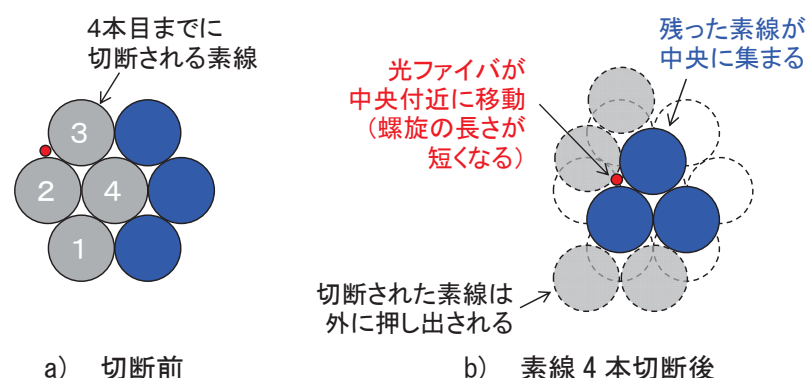


図 4.2-11 切断時の素線と光ファイバの挙動イメージ図（断面図）

6本の素線切断後には、切断の影響範囲が図中右方向に700mm程度まで広がっており、切断位置付近における極小値は $4,000\mu$ 程度まで回復している（図4.2-9）。ここで、切断前後におけるひずみの変化量を切断位置から左右1.0mの範囲で積分（光ファイバの伸び量の変化を計算）したところ、4本切断後から6本切断後にかけて、 -1.22mm から -0.56mm と回復していたことが確認された。よって、6本切断後の計測結果に見られるひずみ分布の変化は、グラウトとの間の付着切れが進行し、付着切れした範囲でひずみが平均化されたことに加え、切断された素線が外側に押し出される際に光ファイバも押し出されることによって伸ばされていたことなどが原因と考えられる。また、6本切断後の付着切れ範囲は左右非対称となり、図中右方向に広がっている。図4.2-6に示す通り、本試験は左右対称の試験体を用いて行ったが、試験体の右下側からグラウトを充填する際、未充填を防止するために試験体左端を10cm程度上げて傾けた状態とした。このため、より線に沿って浮上する気泡やブリージングが箱抜き用発泡スチロールの右側に塞ぎ止められるなど、箱抜き部左右のわずかな差異が付着切れに影響した可能性が考えられる。また、計測結果から確認された付着切れの範囲は、素線を6本切断した時点で範囲が広い右側においても700mm程度であり、7本よりPC鋼より線の設計用の定着長 65ϕ （988mm）より小さな値であった。

ここで、本試験ではBOCDA方式による高分解能（数cm）のひずみ分布計測を行っている。BOTDR方式による計測を行った場合には、空間分解能が約1.0mと低いため、図4.2-9に見られるような局所的な変動は過小評価されてしまうと考えられる。そこで、BOTDR方式で計測していた場合の計測性能を疑似的に検証するため、BOCDAによる計測結果に1.0mの長さの移動平均処理を行った結果を、図4.2-12に示す。元のひずみ分布計測値（図4.2-9）と比較して、勾配はなだらかになり、変動のピーク値は過小評価されているものの、長さ約1.5mの範囲で最大2割程度のひずみの減少が確認できる。実構造物においても、2割程度の減少であれば有意な変動として検出でき、またコンクリートのクリープなどの影響であれば、部材全体など、より広範囲の変動が想定されるため、十分区別が可能と考えられる。よって、BOTDR方式を用いた場合も、BOCDA方式と比較してPCケーブル破断の検知性能は劣るものの、検知は可能であると考えられる。

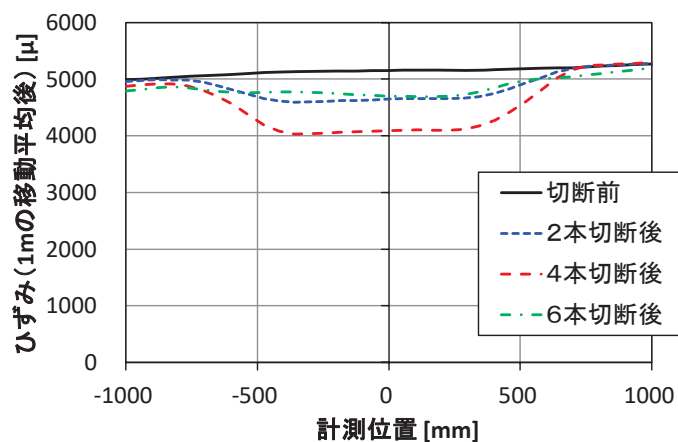


図 4.2-12 移動平均処理後のひずみ分布

本試験では PC 鋼より線の素線を 1 本ずつ物理的に切断しており、実際の構造物における腐食による PC ケーブルの破断を直接再現したものではない。実際には、グラウト未充填部などに雨水が浸入し、腐食による PC ケーブルの減肉が徐々に進展して破断に至る。その際の腐食は複数の素線や PC 鋼より線で同時に進行し、また破断時の挙動も、グラウト未充填部の大きさや PC 鋼より線の本数などにも影響されて非常に複雑になると想定される。よって、本試験で観察された挙動や計測されたひずみ分布の変化が、実際の構造物でそのまま再現されるとは考えにくい。しかし、実構造物においても、定期的な計測などによって分布の変化を捉えることで異状の有無やその影響範囲を検知できる可能性が、本試験結果から示されたと言える。

また、次章で本計測技術の適用性について述べるグラウンドアンカーにおいても、地下水の影響などによるテンドンの破断は生じ得るため、事前に破断の兆候を検知可能であれば維持管理上のメリットが大きい。グラウンドアンカーの自由長部では、周囲のグラウトとの付着が切られているため、本試験とは状況が異なるものの、本計測技術を用いて定期的な計測を行うことによって破断の兆候を検知できるものと考えられる。

4.3 実構造物への適用試験

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 橋梁上部工工事の各種 PC ケーブルに光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を適用し、張力分布の計測を行った。実工事への適用試験によって確立された施工現場での作業手順、および確認された計測性能について以下に述べる。

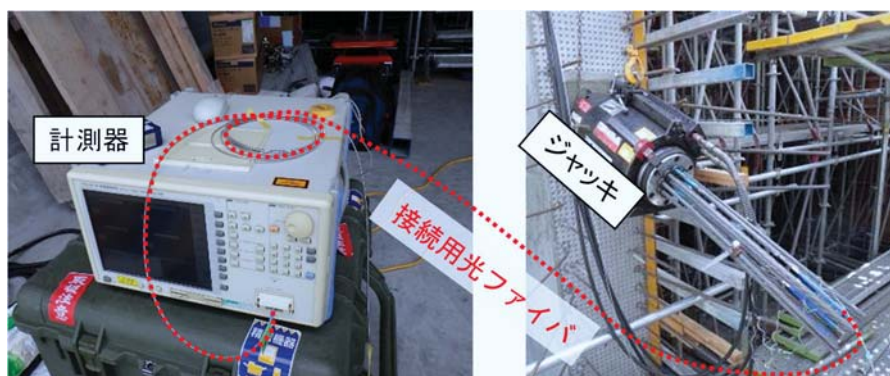
なお、本節で述べる実工事への適用においては、光ファイバの計測器への接続が片端だけで良く長距離の計測が可能（表 2.3-1 参照）なことから、現場での取扱いが容易である BOTDR 方式のひずみ計測を使用した。ここで、BOTDR 方式による計測は BOCDA 方式と

比較して空間分解能が低い（表 2.3-1 参照）。3.3 計測性能確認試験で述べたように、空間分解能が低いと局所的な変動が過小評価されることが考えられるが、PC 構造物の緊張管理・維持管理においては、PC ケーブルの断面全体に対して軸方向に導入される張力を評価すべきであり、ケーブルの曲げによる付加的な応力など局所的な影響は排除することが望ましい。よって、PC 鋼より線のよりピッチが 221.1mm であること、実構造物における PC ケーブルの長さが 10m 程度から 100m 以上に及ぶことを考慮し、実構造物への適用においては、約 1m の空間分解能で平均ひずみを計測する BOTDR 方式の方が適切であると考えられる。

4.3.1 実施工現場における計測手順

実工事への適用試験によって確立した、PC 橋梁上部工工事現場における施工時の緊張・計測作業の状況を図 4.3-1 に示す。工場で作成された、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含むマルチストランドケーブルを一括してシース内または桁内に挿入し、定着具、緊張用ジャッキを設置した。なおこの際、実構造物での施工においても、3.2 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の開発で述べた想定のとおり、光ファイバを傷つけることなく通常と同じ手順で作業可能であることを確認した。ジャッキ後方の余長部分の光ファイバを計測器に接続した後、緊張・計測を行った（図 4.3-1 a）。ここで、1 回の計測時間は約 3 分間である。緊張作業中の各荷重段階において、ジャッキの油圧弁を閉じてストロークを固定した状態で計測を行っている。

緊張・定着完了後には、光ファイバの余長をグラウトキャップに設けた孔から取り出し、桁内まで延長して再計測用コネクタを残置した（図 4.3-1 b）。対象とする PC ケーブルが ECF タイプの場合、光ファイバをエポキシ樹脂被覆内に埋設しているため、余長部分のエポキシ樹脂を除去して光ファイバを取り出してから、計測器や再計測用コネクタに接続した。



a) 緊張・計測



b) グラウトキャップからの取出しおよび再計測用コネクタの残置

図 4.3-1 PC 橋梁上部工工事への適用状況

緊張時の計測は、一定の張力ごと（例えば、ジャッキ油圧 10MPa ごと）、最終緊張時、および定着後に行った。計測開始前と終了後に外気温、もしくはラマン散乱光による光ファイバの温度分布を計測した。

計測されたひずみ分布に、PC ケーブルの見かけの弾性係数 $E_{PC_{eq}}$ および有効断面積 A_{PC} を乗じ、張力分布に換算した（式 4.3-1）。この時、見かけの弾性係数は、油圧ジャッキにより作用させた張力と、摩擦の影響が小さいジャッキ近傍におけるひずみ計測結果との相関から算定した。

$$PC_i = \varepsilon_i \times E_{PC_{eq}} \times A_{PC} \quad \text{式 4.3-1}$$

ただし、 PC_i ：計測点 i における張力、 ε_i ：計測点 i におけるひずみ計測値

再計測時には、上述した再計測用コネクタを残置した場所まで計測器および電源設備を運搬して接続し、ひずみ分布および温度分布を計測した（図 4.3-2）。なお、本節で述べる適用試験においては再計測用コネクタを桁内に残置したが、施工時に長距離の延長用光フ

ファイバを用いて、よりアクセスが容易な位置（道路管理施設の屋内など）に残置しておくことによって簡便に再計測できるようにすることも可能である。第3章で述べたとおり、ブリルアン散乱光を用いた BOTDR 方式による計測結果は、ひずみ変化だけでなく温度変化による影響も含む。このため、再計測結果に対しては、施工時からの温度変化に温度補正係数 k ($=28.9 \mu/\text{°C}$) を乗じた値を差し引くことによって温度補正 (式 4.3-2) を行った後、式 4.3-1 により張力分布に換算した。

$$\Delta \varepsilon_{t-0,i} = (\varepsilon_{\text{mea}_t,i} - \varepsilon_{\text{mea}_0,i}) - k(T_{t,i} - T_{0,i}) \quad \text{式 4.3-2}$$

ただし、 $\Delta \varepsilon_{t-0,i}$ ：計測点 i における施工時（時刻 0）から再計測時（時刻 t ）までのひずみ変化、

$\varepsilon_{\text{mea}_t,i} / \varepsilon_{\text{mea}_0,i}$ ：計測点 i における時刻 $t/0$ でのひずみ計測結果、

$T_{t,i} / T_{0,i}$ ：計測点 i における時刻 $t/0$ での温度計測結果

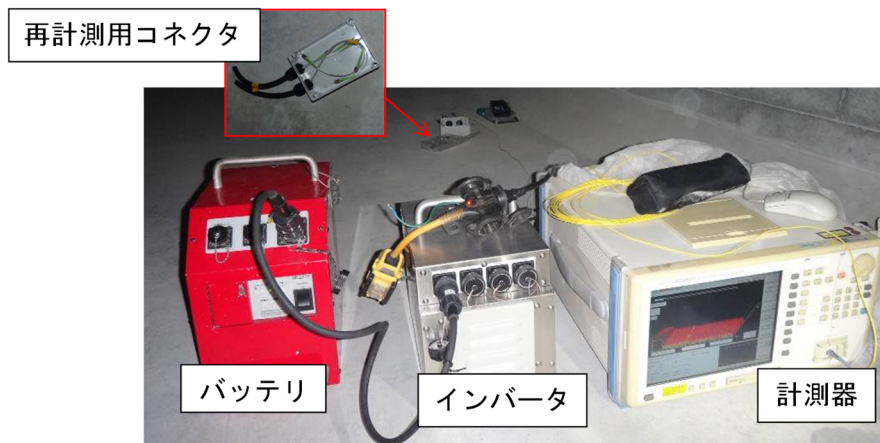


図 4.3-2 再計測状況

4.3.2 PC 高架橋内ケーブル・外ケーブルへの適用試験

実際の PC 高架橋における計測性能を確認することを目的に、ポストテンション方式の内ケーブル（裸線タイプ）および外ケーブル（ECF タイプ）に本計測技術を適用した。また、対象橋梁においては、磁歪式センサ^{4.4)}による計測が計画されていたため、計測結果の比較による精度検証を行った。

(1) 計測の概要

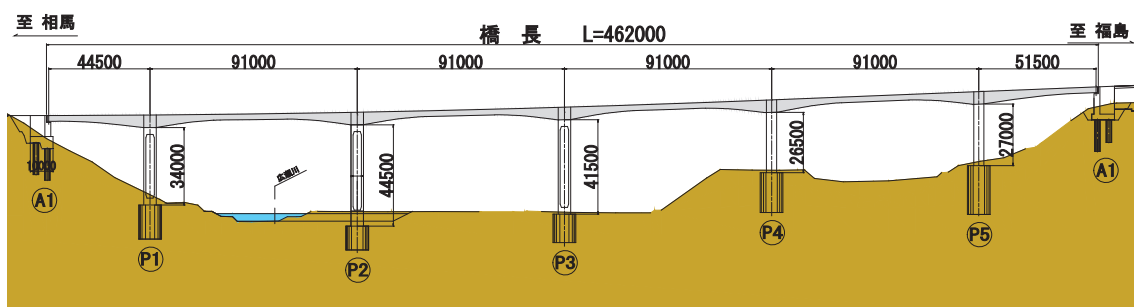
国道 115 号 月館（つきだて）高架橋上部工工事^{4.9)}（発注者：国土交通省東北地方整備局）の各種 PC ケーブルに光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を適用し、張力分布の計測を行った。月館高架橋の位置図、全体一般図、全景写真を図 4.3-3 に示す。また、橋梁諸元は以下のとおりである。

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用

- ・ 工事場所：福島県伊達市月舘町御代田字扶桑畑地内
- ・ 構造形式：P C 6 径間連続ラーメン箱桁橋
- ・ 橋長：462m
- ・ 支間長：44.5m + 4@91.0m + 51.5m
- ・ 幅員：12.8m

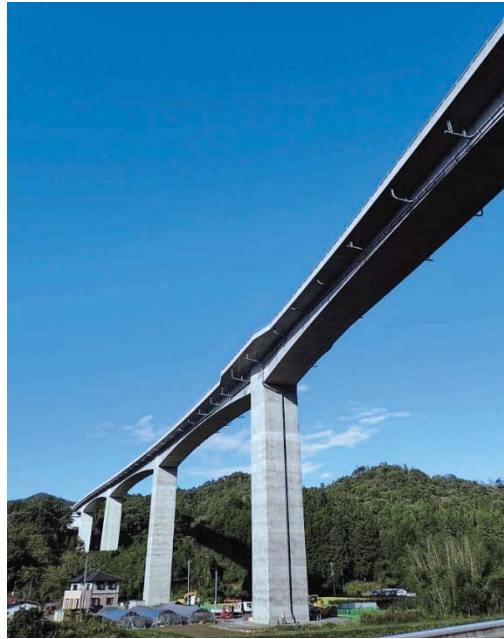


a) 位置図



b) 全体一般図

図 4.3-3(1) 月舘高架橋の概要



c) 全景写真

図 4.3-3(2) 月館高架橋の概要

適用対象としたのは、図 4.3-4 に示す P1 柱頭部上床版ケーブル、P1 柱頭部ウェブケーブル、P1-P2 間連結下床版ケーブル、および P2-P4 間外ケーブルである。いずれも橋軸方向の PC ケーブルであり、両端からジャッキを用いて緊張を行った。内ケーブルである上床版ケーブル、ウェブケーブルおよび下床版ケーブルには、裸線タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含む 12S15.2 マルチストランドケーブルを、外ケーブルには ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含む 19S15.2 ECF マルチストランドケーブルを用いた。なお、P2-P4 間外ケーブルにおいては、マルチストランドケーブルを構成する 19 本の PC 鋼より線の内の 3 本に光ファイバを組み込んで計測を行い（図 4.3-4 d）、また図 4.3-4 c) に示す位置にて磁歪式センサ^{4.4)}による計測を併せて実施し、それぞれ計測結果の比較を行った。

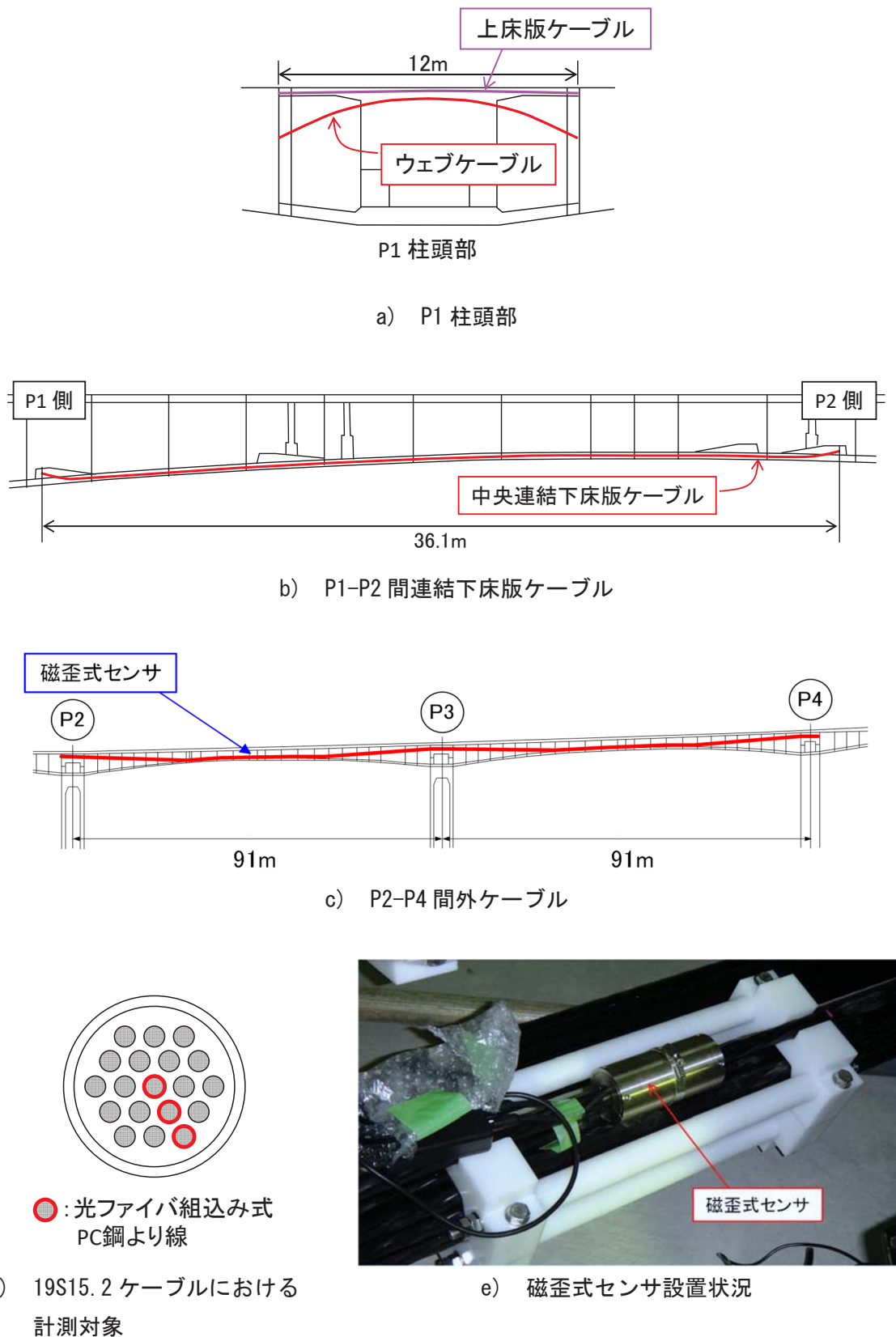
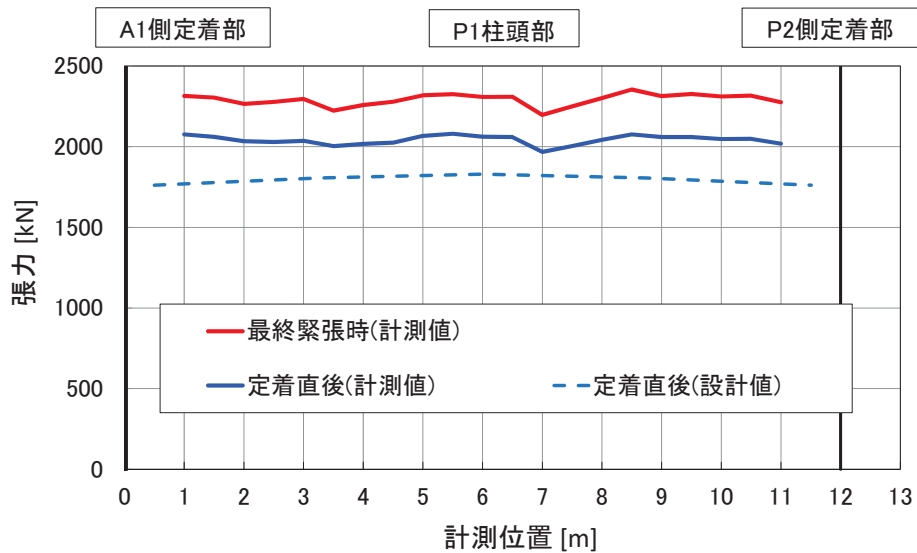


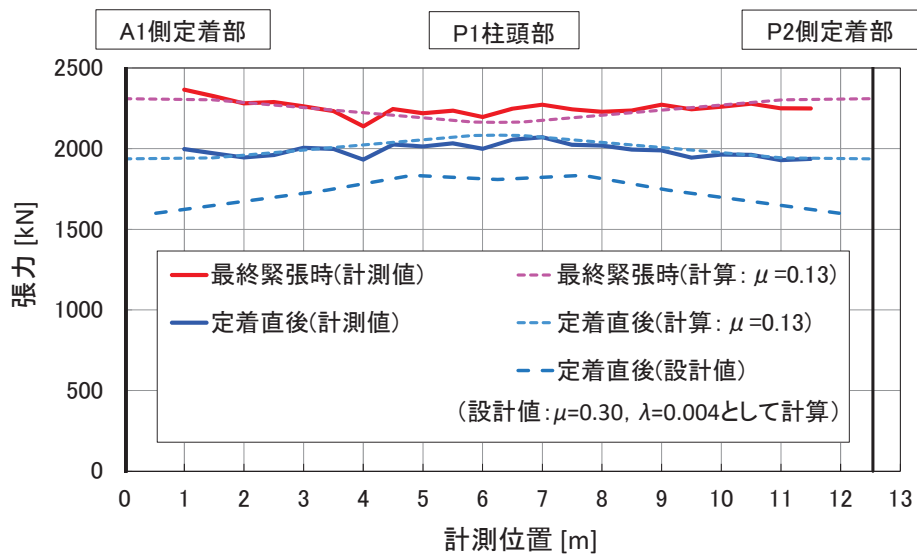
図 4.3-4 月館高架橋上部工工事における適用対象ケーブル

(2) 緊張時の計測結果

各ケーブルにおいて計測された、最終緊張時および定着直後の張力分布を図 4.3-5 に示す。図中には、設計で必要とされる定着直後の導入張力の分布を、「定着直後（設計値）」として併せて示した。

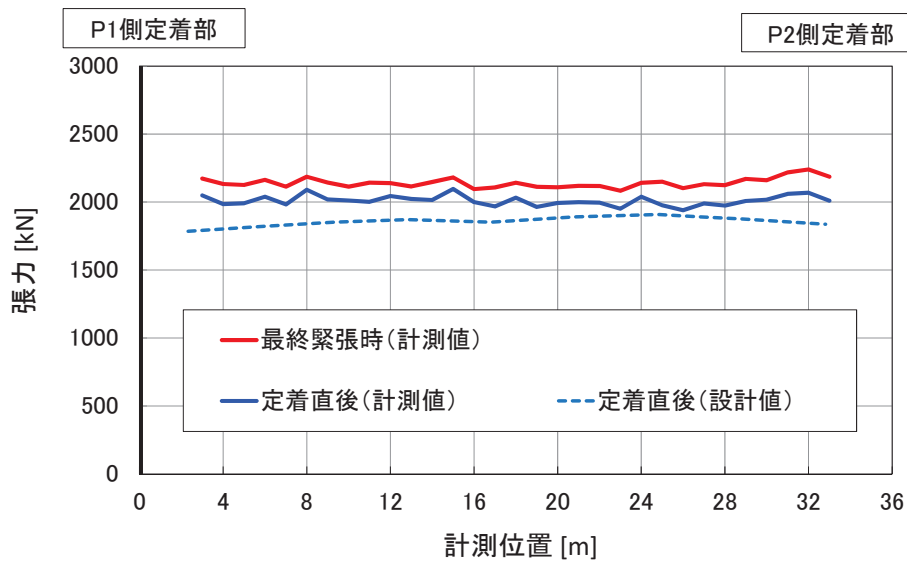


a) P1 柱頭部上床版ケーブル

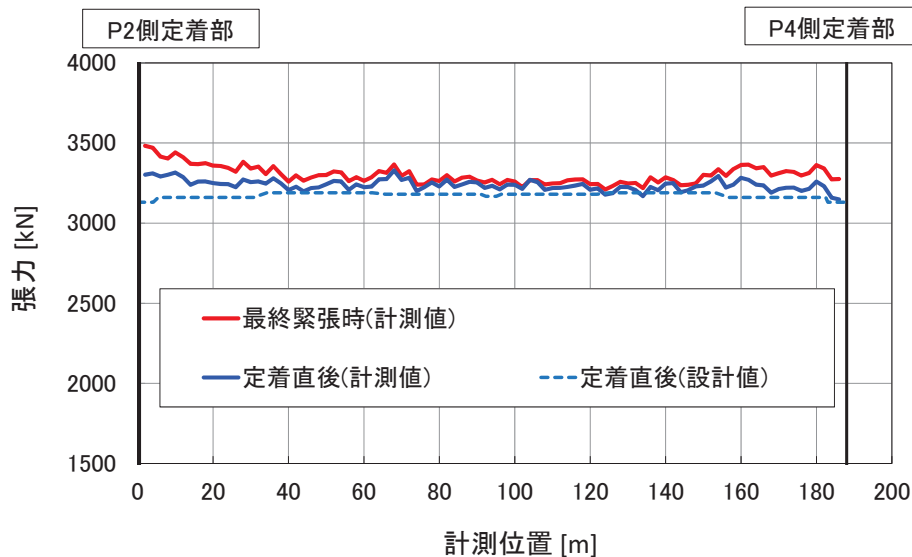


b) P1 柱頭部ウェブケーブル

図 4.3-5(1) 月館高架橋上部工工事における緊張時の計測結果



c) P1-P2 間連結下床版ケーブル



d) P2-P4 間外ケーブル

図 4.3-5(2) 月館高架橋上部工工事における緊張時の計測結果

いずれのケーブルにおいても、摩擦ロスや定着時のセットロスの影響を含め、最長 180m 以上のケーブル全長にわたる張力分布が計測されており、各断面で設計値以上の張力が導入されていることが確認できる。特に、曲げ角度の大きな P1 柱頭部ウェブケーブルにおいては、最終緊張時にはケーブル中央部に向かって張力が減少し、セットロス発生後である定着直後には逆に中央部の張力が端部と比べて残存する傾向が示されており、PC ケーブルとシース管との間の摩擦による顕著な影響が確認できる。この P1 柱頭部ウェブケーブルの最終緊張時の計測結果を用いて、式 4.3-3 により計算される摩擦ロス^{4.1)}が計測結果と一致す

るように、摩擦係数 μ を逆算した。なおこの際、 λ/μ (=0.0133) は定数として扱った。

$$P_2 = P_1 \times e^{-\mu(\alpha + \frac{\lambda}{\mu}x)} \quad \text{式 4.3-3}$$

ただし、 P_2 ：摩擦ロス後の張力 (kN)、 P_1 ：摩擦ロス前の張力 (kN)、
 α ：角度変化 (rad.)、 x ：ケーブル長 (m)、 μ ：摩擦係数

計測結果から逆算された摩擦係数 μ の値は、0.13であった。この時の張力分布の計算値を、「最終緊張時 (計算： $\mu=0.13$)」として図 4.3-5 b) に示している。また、この μ の値、最終緊張時のジャッキ油圧、および設計で用いる定着具の引込み量 5mm^{4.7)}を用いて、緊張計算と同じ手法で算出した張力分布を、「定着直後 (計算： $\mu=0.13$)」として図 4.3-5 b) に併せて示した。PC ケーブルの定着時には、定着具が躯体内側に引き込まれて PC ケーブルの伸び量が小さくなることで、端部から一定の範囲で張力が低下するセットロスが生じるが、その低下量や影響範囲は PC ケーブルとシース管との間の摩擦の影響を受ける。図 4.3-5 b) に示した結果から、最終緊張時の計測結果から逆算して評価した摩擦係数 μ を用いた定着直後の計算結果は、張力の分布形状および値が、定着直後の計測結果とよく一致していることがわかる。この結果より、最終緊張時の計測結果を用いて評価した摩擦係数は、定着時のセットロスを評価する上で妥当であり、本計測技術によって得られる張力分布形状から摩擦係数を精度良く評価できることが確認された。

なお、定着直後の計測結果に着目すると、P1 柱頭部における 2 本の内ケーブル (図 4.3-5 a), b)) では設計値に対して余裕度が大きく、P1-P2 間連結下床版ケーブル (図 4.3-5 c)) や P2-P4 間外ケーブル (図 4.3-5 d)) では比較的余裕度が小さい。これらの図に示す「定着直後 (設計値)」は、設計上最低限必要な値を示したものであり、実際に導入した張力に対する再現計算の結果ではない。実構造物の施工においては、この「設計値」を確実に上回るためにある程度の余裕を持って緊張力を導入しており、その余裕分は、ケーブルの長さや配置形状に応じて設定されるため、ケーブルによって異なる。

図 4.3-5 d) に示した P2-P4 間外ケーブルの計測結果は、19 本の PC 鋼より線の内の 3 本で計測した結果の平均値である。図 4.3-6 に、3 本の光ファイバ組込み式 PC 鋼より線での計測結果の比較を示す。PC 鋼より線によって僅かなばらつきの差があるものの、3 本の計測結果およびそれらの平均値は、同様の傾向を示していることが確認できる。特に中心の PC 鋼より線での計測結果が、平均値に最も近い値を示していることから、マルチストランドケーブルの場合においても、中心に近い PC 鋼より線 1 本での計測で実務上十分な精度で計測が可能であると言える。

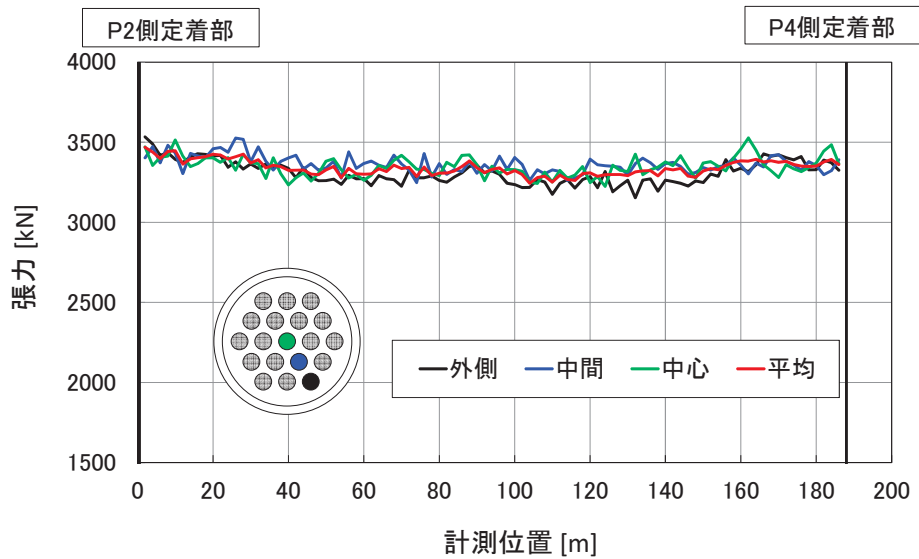


図 4.3-6 マルチストランドケーブルにおける PC 鋼より線ごとの計測値の比較 (P2-P4 間外ケーブル)

図 4.3-7 に、P2-P4 間外ケーブルにおける光ファイバ計測値と磁歪式センサ計測値との比較を示す。なお、光ファイバ計測値は、3 本の光ファイバ組込み式 PC 鋼より線での計測結果の平均値であり、磁歪式センサ設置箇所的前後 1m の範囲の平均として示した。緊張中の各段階、最終緊張時、定着直後、および後述する再計測結果（緊張後 19 ヶ月経過時）のいずれにおいても、両計測結果はよく一致しており、本計測技術によって張力を精度良く計測できていることが確認された。

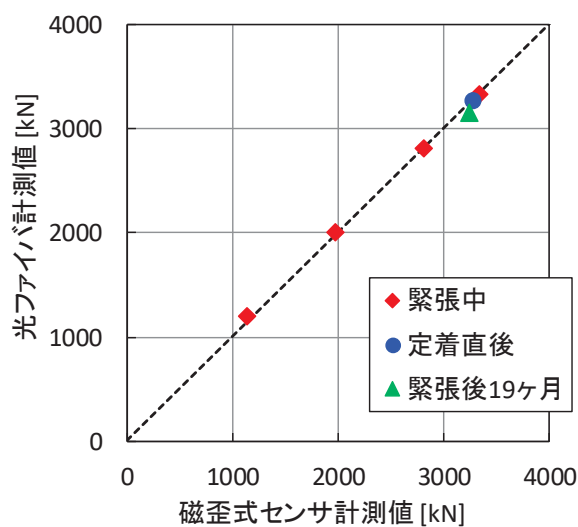
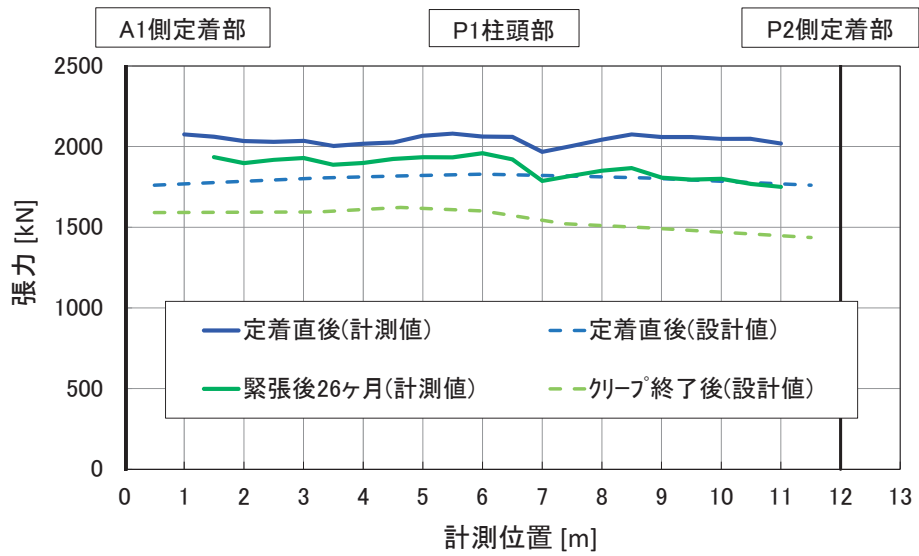


図 4.3-7 磁歪式センサ計測値との比較 (P2-P4 間外ケーブル)

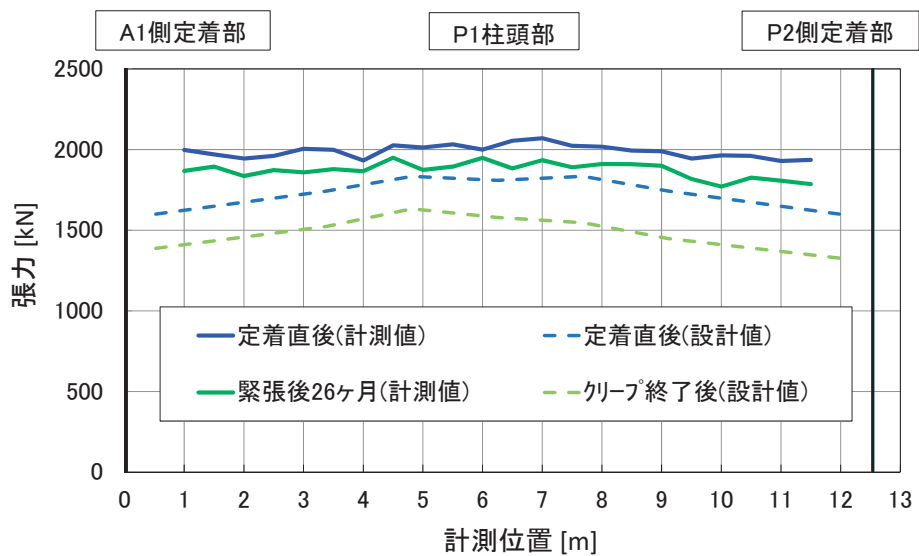
以上のように、実際の PC 構造物の施工においても、本計測技術を用いて PC ケーブル全長にわたる導入張力の分布を計測でき、全断面において設計張力以上の張力が導入されていることを直接確認可能であることが明らかとなった。また、計測結果を用いて、PC ケーブルとシース管との間の摩擦係数を評価できる可能性が示された。

(3) 施工後の再計測結果

本橋の施工完了後、供用開始直前に、各ケーブルから延長して残置した再計測用コネクタに計測器を接続し、再計測を行った。P1 柱頭部上床版ケーブルおよびウェブケーブル、P1-P2 間連結下床版ケーブル、P2-P4 間外ケーブルの施工時からの経過期間は、それぞれ約 26 ヶ月、20 ヶ月、19 ヶ月である。各ケーブルの再計測結果を、クリープ終了後の時点において設計上必要な張力分布と併せて図 4.3-8 に示す。施工から最長で 2 年以上が経過していたが、問題無く再計測可能であることが確認できた。

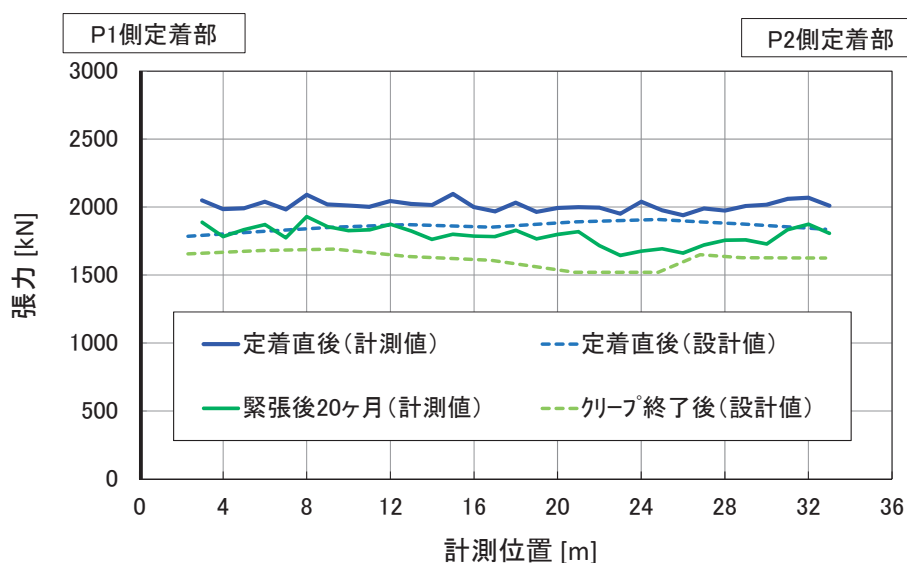


a) P1 柱頭部上床版ケーブル

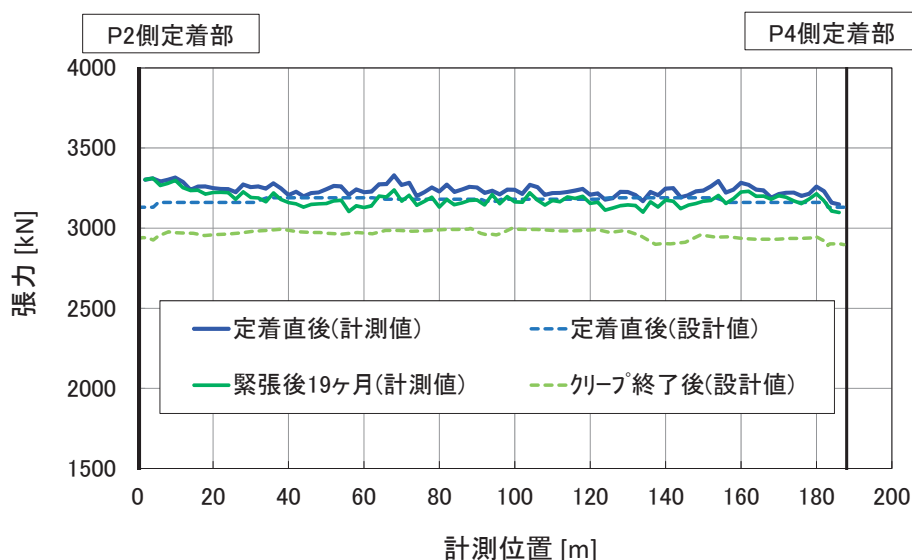


b) P1 柱頭部ウェブケーブル

図 4.3-8(1) 月館高架橋上部工事における施工後の再計測結果



c) P1-P2 間連結下床版ケーブル



d) P2-P4 間外ケーブル

図 4.3-8(2) 月館高架橋上部工工事における施工後の再計測結果

いずれのケーブルにおいても、再計測結果は定着直後と比較して張力が低下している様子が確認できる。これは、各ケーブルの緊張・定着後に行われた施工（次ブロック以降のコンクリート打設、PC ケーブル緊張など）や、コンクリートのクリープ、乾燥収縮などの影響と考えられる。特に P1-P2 間連結下床版ケーブルにおいては、P2 側の方が張力の低下量が大きい傾向が確認できるが（図 4.3-8 c）、これは、当該ケーブルの後に緊張された下床版ケーブルや外ケーブルによるプレストレス導入の影響などによって、弾性変形やクリープによる張力低下が左右非対称になったものと考えられる。この傾向は、同図中に併せて示

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用

した「クリープ終了後（設計値）」にも見られ、設計で想定したとおりの張力の変動が計測できているものと考えられる。いずれのケーブルにおいても、まだクリープは終了していない段階であると考えられるが、各断面において設計上必要な値に対してまだ十分な余裕を有していることが確認できる。

以上のように、本計測技術によって施工終了後から長期にわたる張力の変動を正しく評価できる可能性が示された。

4.3.3 PC 高架橋内ケーブル（ECF タイプ）への適用試験

前項の事例では、裸線タイプの内ケーブル、および ECF タイプの外ケーブルへの適用性を検証した。続いて、ECF タイプの内ケーブルに本計測技術を適用し、計測性能の検証を行った。

(1) 計測の概要

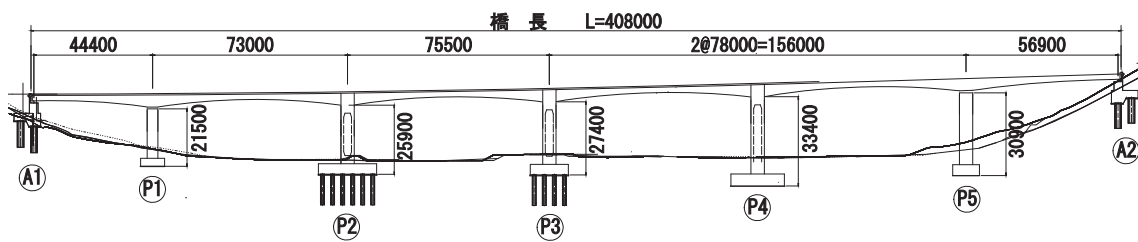
国道 45 号 長部（おさべ）高架橋上部工工事^{4.10}（発注者：国土交通省東北地方整備局）の内ケーブルに光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を適用し、張力分布の計測を行った。長部高架橋の位置図、全体一般図、全景写真を図 4.3-9 に示す。また、橋梁諸元は以下のとおりである。本橋は、図 4.3-9 a) に示すように海岸線近くに位置しているため、通常よりも高耐久な構造とすることを目的に、コンクリート躯体内に埋設される内ケーブルにも ECF タイプの PC ケーブルが用いられている。

- ・ 工事場所：岩手県陸前高田市気仙町上長部地内
- ・ 構造形式：P C 6 径間連続ラーメン箱桁橋
- ・ 橋長：408m
- ・ 支間長：44.4m + 73.0m + 75.5m + 2@78.0m + 56.9m
- ・ 幅員：12.0m

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用



a) 位置図



b) 全体一般図



c) 全景写真

図 4.3-9 長部高架橋の概要

適用対象としたのは図 4.3-10 に示す P2 柱頭部上床版ケーブルで、ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含む 12S15.2ECF マルチストランドケーブルを用い、張力分布の計測を行った。当該ケーブルは橋軸方向の内ケーブルであり、両端からジャッキを用いて緊張を行った。なお本橋では、施工後に再計測用コネクタは残置しておらず、施工時のみの計測を行った。

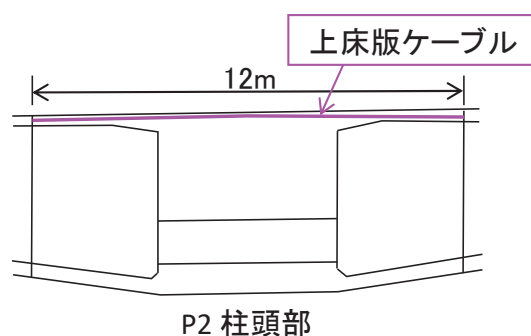


図 4.3-10 長部高架橋上部工事中における適用対象ケーブル
(P2 柱頭部上床版ケーブル)

(2) 緊張時の計測結果

P2 柱頭部上床版ケーブルで計測された、最終緊張時および定着直後の張力分布を図 4.3-11 に示す。図中には、設計で必要とされる定着直後の導入張力の分布を、「定着直後（設計値）」として併せて示した。図より、導入された張力はケーブル全長にわたりほぼ一定値であり、各断面で設計値以上の張力が導入されていることが確認できる。適用したケーブルは長さが短く曲げ角度も小さいため、PC ケーブルとシース管との間の摩擦の影響が非常に小さかったと考えられる。また、前項で述べた月館高架橋における計測結果と比較して、定着時のセットロス（最終緊張時から定着直後までの減少分）の値が大きいことが確認できる。これは、裸線タイプの PC 鋼より線と比較して、ECF タイプの PC 鋼より線ではエポキシ樹脂被覆にくさびの刃が食い込むまでの間のセット量が大きいためと言える。

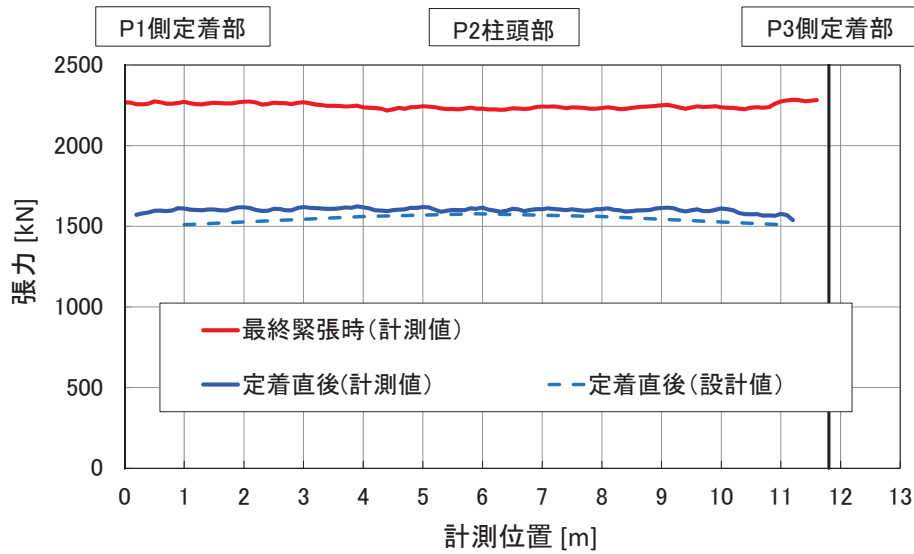


図 4.3-11 長部高架橋上部工工事における緊張時の計測結果
(P2 柱頭部上床版ケーブル)

4.4 まとめ

本章では、光ファイバを用いた張力分布計測技術を PC 構造物へ適用することを想定した室内試験、および実際の PC 橋梁上部工工事へ適用した結果について述べた。本章のまとめを以下に示す。

- 1) PC ケーブル周囲にグラウト充填された PC 部材内部においても、光ファイバは PC 鋼より線と一体として挙動し、外力の作用によるひずみや張力の変動を PC 鋼より線の降伏後まで計測することが可能である。
- 2) 本計測技術を用いて PC ケーブル全長にわたるひずみ分布の変動を評価することによって、任意の位置における PC ケーブル破断などの異常およびその影響範囲を検知できる可能性が確認された。
- 3) 実際の PC 橋梁上部工工事においても、本計測技術を用いて PC ケーブル全長にわたる導入張力の分布を精度良く計測し、全断面において設計張力以上の張力が導入されていることを直接確認可能であることが確認された。また、計測結果を用いて、PC ケーブルとシース管との間の摩擦係数を評価できる可能性が示された。
- 4) 複数本の PC 鋼より線を束ねたマルチストランドケーブルにおいても、中心に近い PC 鋼より線 1 本に光ファイバを組み込み計測することで、実務上十分な精度での計測が可能である。ただし、第 3 章で述べたとおり、ケーブル長が極端に短い場合には注意が必要である。
- 5) 緊張・定着後に行われた施工や、コンクリートのクリープの影響など、施工終了後から長期にわたる張力の変動を評価できる可能性が示された。

第4章 PC 構造物の緊張管理・維持管理への適用

以上のように、本計測技術は PC 構造物の緊張管理・維持管理の高度化に資する技術である可能性が示された。特に供用期間中においては、経年的な変動の評価に加え、例えば地震発生直後の緊急点検によって張力変動が想定範囲内であることを確認できれば、橋梁の早期供用再開の判断材料とできるなど、合理的な維持管理への貢献が期待される。

4.5 第4章の参考文献

- 4.1) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2017.
- 4.2) 宮下孝，小林憲一，加藤久紀，島津美砂子：妙高大橋のPCケーブル損傷に伴う外ケーブル補強と今後の維持管理について，国土交通省北陸地方整備局 事業研究発表会論文，2012.
- 4.3) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2017.
- 4.4) 國富康志，只熊公義，及川雅司，石塚純：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，pp.363-365，2013.
- 4.5) 廣瀬誠，青木圭一，宮川豊章：漏洩磁束法によるポストテンション実橋におけるPC鋼材破断調査，第23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.467-470，2014.
- 4.6) 大島義信，宇佐美惣，石田雅博，土橋克宏，上坂充：可搬型高出力X線によるPC桁内部の可視化実験，土木技術資料，Vol.57，No.9，pp.34-37，2015.
- 4.7) デイビダーク協会：デイビダーク工法設計・施工マニュアル，2013.
- 4.8) Hartog, A.H.: An introduction to distributed optical fibre sensors, CRC Press, 2018.1.2
- 4.9) 南雲広幸，毛利浩二，盛田行彦，曾我部直樹，今井道男，佐藤正：復興支援道路 月館高架橋上部工の施工，橋梁と基礎，Vol.50，No.12，pp. 5-10，2016.12.
- 4.10) 戸張正利，荒渡光貴，山崎大介，橋本学，温品達也，青山達彦：PC橋の耐久性向上への取組み－長部高架橋－，橋梁と基礎，Vol.51，No.2，pp. 13-19，2017.2.

第5章 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理への適用

本章では、本研究で開発した計測技術をグラウンドアンカーへ適用することを想定し、緊張管理・維持管理への適用性を検証した室内試験の結果、および実際のグラウンドアンカー工事へ適用した結果について述べる。なお、グラウンドアンカーにおいては、緊張材のことを「テンドン」、テンドンに作用する張力のことを「引張り力」と表記するのが一般的なため、本章ではこれらの表記を用いる。

5.1 光ファイバを用いた計測技術の適用性

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。これらの内、摩擦型グラウンドアンカーを用いて法面補強を行う際の構造イメージを図5.1-1に示す。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テンドンを挿入し、緊張・定着させることで想定すべり面に圧縮力を作用させ、摩擦力の増加や引き止め力によって地すべりを抑止する。この際、テンドンの引張り力は、先端のアンカー体と周辺地盤との間の周面摩擦力によって地山に伝達される。アンカー体は硬化したグラウト（一般的に、セメントミルクが用いられる）で形成され、法面上のアンカー頭部はくさび定着などによって定着される。アンカー体内部のテendonは、付着力によってグラウトと一体化されている。一方、アンカー頭部とアンカー体との間は自由長部と呼ばれ、シース管によってグラウト材との間の付着が切られた状態（アンボンド）となっている。

以下、本章では摩擦型グラウンドアンカーを用いた法面補強を例に考察を行うが、本計測技術は、その他の形式のグラウンドアンカーにおいても同様の効果が期待できると考えられる。

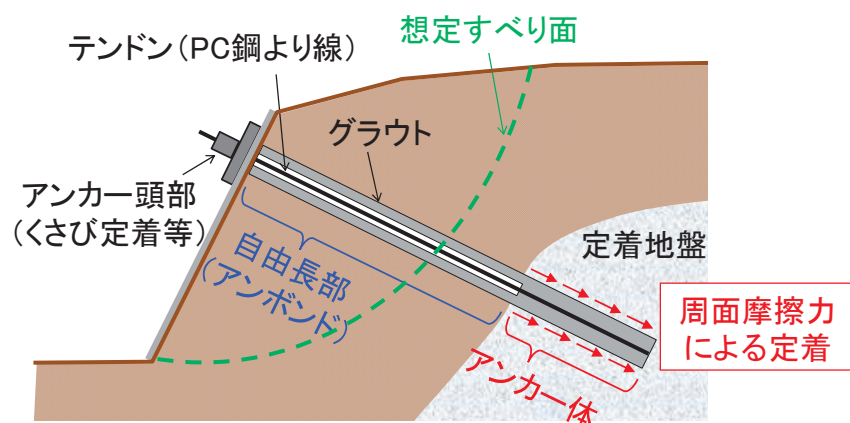


図5.1-1 摩擦型グラウンドアンカーによる法面補強の構造イメージ

供用期間中のグラウンドアンカーにおいては、腐食によるテンドンの破断の他、周辺の地形改変や地質の風化・劣化、グラウトの劣化・強度低下などの様々な原因によって残存引張力の変動することが想定される。4.2 PC 構造物を想定した計測性能確認試験で述べたように、テンドンに腐食破断などの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検知可能であると考えられる。

この他に、地上部における目視調査などでは検知できない、残存引張力を変動させる原因となり得る地中の変状としては、以下のようなものが想定される^{5.1), 5.2)}。それぞれの変状のイメージ図を図5.1-2に示す。

- ① 地下水位の変動や周辺の地形改変、地震などの外力の作用
- ② テンドンとアンカー体グラウトとの間の付着切れ
- ③ アンカー体グラウトと周辺地盤との間の周面摩擦切れ
- ④ すべり面の発生

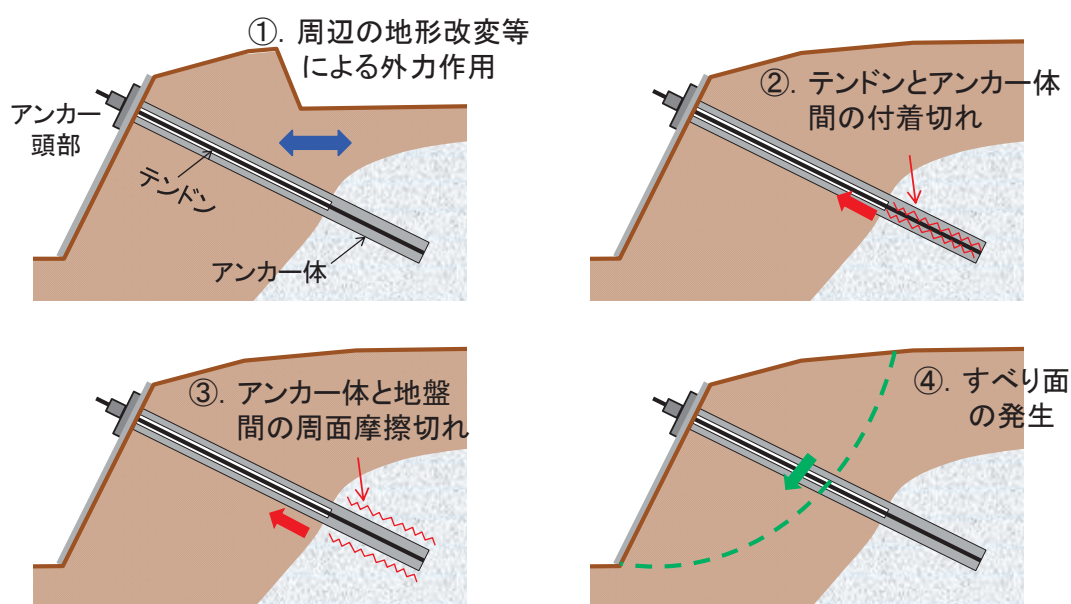


図 5.1-2 摩擦型グラウンドアンカーで想定される変状

上記の変状の内、①～③による引張力の変動が設計での想定以上となると、テンドンの破断や、アンカー体からのテンドンの引抜け、周辺地盤からのアンカー体の引抜けを生じ、アンカー頭部の飛出しや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、地すべりに対する抵抗力が不足していることを意味するため、放置していると法面の崩壊が生じるおそれがある。このように、グラウンドアンカーの残存引張力の変動した際には、最終的に重大な事象に至る可能性があるため、その原因となる変状に応じて、再緊張、緊張力緩和、アンカーの増打ちなどの対策工を講じる必要がある。その際、対策工を適切に選定・設計するためには、残存引張力の変動の原因となっている変状を正しく推定することが

必要である。しかし、2.2 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理で述べたリフトオフ試験^{5.3)}や荷重計を用いたモニタリング^{5.4)}など、アンカー頭部における残存引張り力しか計測することができない既往の計測・評価技術では、変動の原因を推定することが困難である。

これに対し、本研究で開発した光ファイバを用いた張力分布計測技術をグラウンドアンカーに適用すれば、自由長部からアンカー体内部を含めたテンドン全長にわたる引張り力の分布を計測することが可能となる。上記①～④の変状が生じた際に想定される、残存引張り力分布の変化のイメージを、図5.1-3に示す。

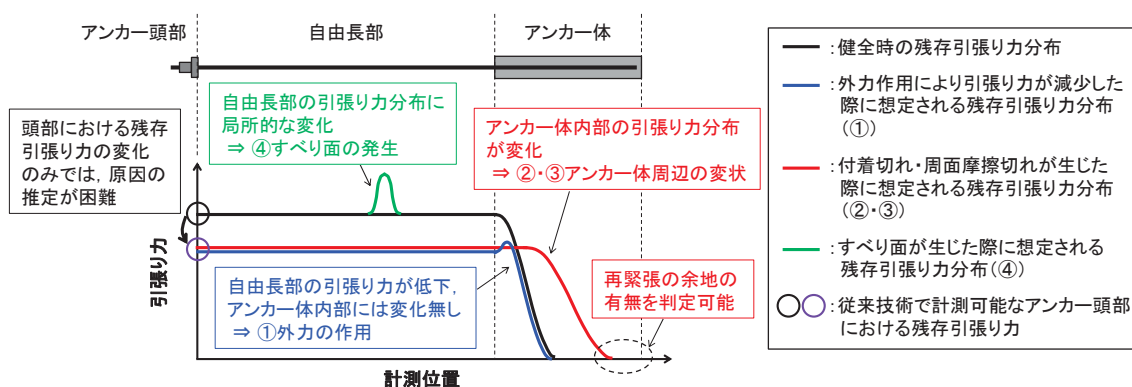


図 5.1-3 変状発生時に想定される残存引張り力分布の変化

例えば、周辺の地形改変などの外力の作用によって引張り力の低下が生じている場合 (①) には、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、再緊張による引張り力の回復が可能と判断できる。一方、アンカー体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る場合 (②・③) には、アンカー頭部から自由長部にかけての引張り力が低下するだけでなく、アンカー体内部ではその先端へ向かって引張り力が伝播するように分布が変化すると考えられる。特に引張り力の伝播範囲がアンカー体先端まで到達している場合には、十分な定着性能がアンカー体に残されておらず、再緊張を行うことによって完全に引き抜けてしまう危険性がある。このような場合には、アンカーの増打ちなどの対策工が必要となる。また、すべり面が発生した場合 (④) は、その発生箇所の周辺にのみ引張り力分布の局所的な変化が生じることが想定される。

本計測技術を用いてテンドン全長にわたる残存引張り力分布を計測・評価することができれば、上記のような引張り力分布形状の変化を判定することによって、残存引張り力の変動の有無や大きさだけでなく、その原因を推定でき、適切な対策工の選定・設計に活かすことが可能となる。

なお、グラウンドアンカーにおいては、地盤内のアンカー体内部に埋設されるテンドン先端側からは光ファイバを計測器に接続することが不可能であるため、計測器への接続が片端だけで良い (表 2.3-1 参照) BOTDR 方式のひずみ計測を使用する。

5.2 グラウンドアンカーを想定した計測性能確認試験

PC 鋼より線を用いたグラウンドアンカーテンドンは、同じく PC 鋼より線を用いた PC ケーブルと本質的には同じであるため、本計測技術を適用することによって、緊張時に導入される引張り力の分布や供用期間中の変化を計測・評価可能であることは、前章までの試験によって既に確認済みと言える。本節では、グラウンドアンカーテンドンの引張り力分布を計測することによって前節で述べたような変状を検知可能かどうか検証することを目的に、テンドンの引抜け、アンカー体の引抜け、およびすべり面の発生を模擬した試験を実施し、それぞれの変状によって生じる引張り力分布の変化の計測を試みた。各試験の概要および結果について以下に述べる。

なお本節で述べる試験においては、ECF タイプの 7 本より光ファイバ組込み式 PC 鋼より線 1 本（シングルストランド、1S15.2）をテンドンとして用いたが、実際のグラウンドアンカー工事では、複数の PC 鋼より線を束ねた大容量のマルチストランドテンドンが用いられることもある。グラウンドアンカーは、直線状に削孔された孔内にテンドンを挿入するため、マルチストランドテンドンにおいても PC 鋼より線ごとの緊張前のたわみの差異などは生じにくく、マルチストランド用のジャッキで緊張することによって複数本の PC 鋼より線に均等に引張り力を作用させることが可能であるため、中央付近の PC 鋼より線 1 本に光ファイバを組み込んで計測することで、十分な精度で引張り力を評価可能であると考えられる。

5.2.1 テンドンの引抜けに対する検知性能の確認試験

(1) 試験概要

アンカー体を形成するグラウトの風化・劣化が生じると、テンドンとグラウトの間の付着が切れ、テンドンの引抜けが生じる。実際には、長年にわたる地下水の流れや化学的な作用などによって徐々に付着強度が低下していくものと想定されるが、本研究では、グラウトの強度をパラメータとしてアンカー体からのテンドンの引抜けを模擬した計測試験を行った。

試験概要を図 5.2-1 に示す。200×200×3,044mm、板厚 16mm の角鋼管（SS400 材）内に、ECF タイプの 7 本より光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いたシングルストランドテンドン（1S15.2）を挿入後、鋼管内にグラウトを充填した。試験ケースは表 5.2-1 にグラウトの配合を示す 3 ケースで、Case H は通常のグラウンドアンカー施工時に想定される配合である。Case M および L は、通常より低強度となるよう W/C を大きく設定した配合であり、粉体量が少ないことによる材料分離を防ぐために石灰石微粉末を添加している。表 5.2-2 に試験時の材齢におけるグラウトの物性値を示す。なお、試験によりテンドンが完全に引き抜けてしまうことがないよう、テンドンは角鋼管を貫通させ、先端をくさび式定着具で定着した。

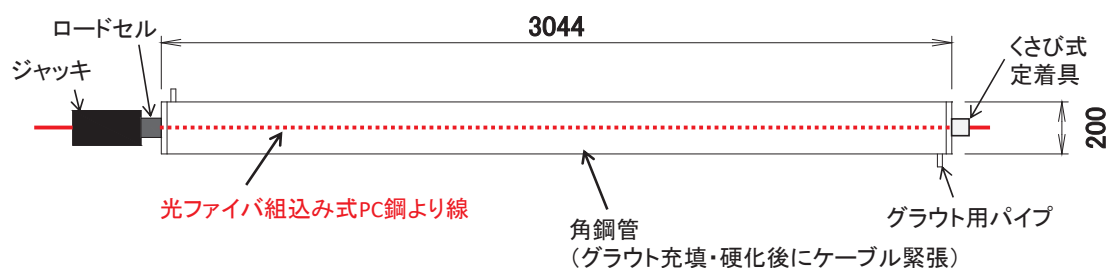


図 5.2-1 テンドン引抜け検知性能の確認試験概要図 (単位: mm)

表 5.2-1 テンドン引抜け検知性能の確認試験ケースおよびグラウト配合

Case	W/C %	W/(C+LS) %	C kg/m ³	W kg/m ³	LS kg/m ³
H	49.5	49.5	1,230	609	0
M	57.1	49.5	1,058	604	163
L	66.7	49.5	901	601	312

C: 普通ポルトランドセメント, W: 水, LS: 石灰石微粉末

表 5.2-2 テンドン引抜け検知性能の確認試験グラウト物性値

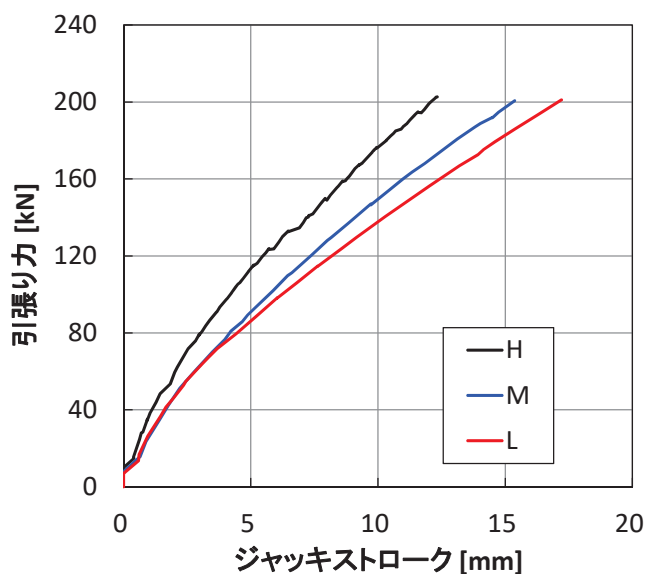
Case (材齢*)	弾性係数 kN/mm ²	圧縮強度 N/mm ²
H (53 日)	17.4	68.1
M (4 日)	8.0	18.3
L (4 日)	7.0	13.5

※試験時材齢

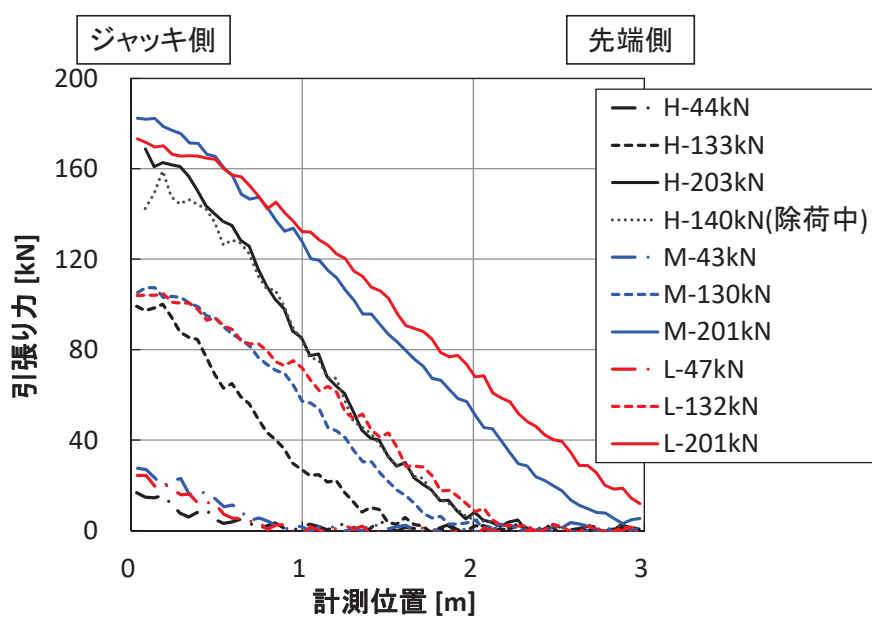
グラウト硬化後に、油圧ジャッキを用いて片端より最大引張り力 200kN (ポンプ油圧: 46MPa) で緊張した。なお、この最大引張り力は、「供用期間 2 年以上の一般の構造物」または「特殊な条件下にある構造物 (常に繰返し荷重が作用する場合や、高腐食条件下で使用される場合)」に適用されるランク A のアンカーにおける地震時の許容引張り力 ($0.9 T_{ys}$, T_{ys} は降伏引張り力) ^{5.1)} に相当する値である。緊張中、所定の緊張力 (ポンプ油圧) に達するごとにジャッキを固定し、ひずみ分布の変化を光ファイバにより計測した。併せて、ジャッキストロークを変位計で、ジャッキにより作用させる引張り力をセンターホールロードセルで計測した。ひずみ分布およびジャッキストロークは、初期緊張時 (ポンプ油圧: 2.0MPa) からの増分として整理し、見かけの弾性係数を用いてひずみ計測値を引張り力に換算した。見かけの弾性係数には、後述するアンカー体の引抜けに対する検知性能確認試験において、ジャッキにより作用させた引張り力と自由長部で計測されたひずみとの相関から算定した値、198kN/mm² を用いた。

(2) 試験結果

図 5.2-2 に、作用引張り力-ジャッキストローク関係、および角鋼管内のテンドンの引張り力分布の計測結果を示す。なお、図 5.2-2 a) に示したジャッキストロークは、グラウトからのテンドンの引抜き量と、ロードセルおよびジャッキ内でのテンドンの伸び量（最大で 2.5mm 程度）とを合わせた値である。



a) 作用引張り力-ジャッキストローク関係



b) 引張り力分布計測結果

図 5.2-2 テンドンの引抜き検知性能の確認試験結果

第5章 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理への適用

グラウトの強度が小さいほど、また作用引張り力が大きくなるほど、グラウトからのテンドン引抜け量が大きくなり、同時にテンドンの先端側（図 5.2-2 b）中の右側）まで引張り力が伝播していく様子が確認できる。なお、本試験では角鋼管の外側に自由長部に相当するテンドンが無く、空間分解能が約 1m である BOTDR 方式による計測を行っているため、ジャッキより外側の無荷重状態の範囲の影響を受けて、ジャッキ側（計測位置 0~0.5m 程度の範囲）の引張り力が実際より低めに計測されている。

本試験では最初から強度の低いグラウト材を用いているため、実際のグラウトの風化・劣化に伴うテンドンの引抜けを直接再現した試験ではないが、グラウトの強度低下によって、同じ引張り力に対しても必要な定着長が長くなり、グラウト内部における引張り力分布形状が変化することが確認できた。約 200kN（ポンプ油圧：46MPa）まで緊張した時点での必要定着長は、十分なグラウト強度を有する Case H と比較して、グラウト強度の低い Case M および L では 1m 程度以上長くなっていることが確認できる。

本試験では、BOTDR 方式による計測を行ったため、空間分解能は約 1m、計測精度は約 $\pm 50\mu$ である（表 2.3-1 参照）。計測間隔は 51mm に設定した。なお「空間分解能」とは、その区間の平均値としてひずみを計測することを意味しており、通常のひずみゲージにおけるゲージ長に相当する値である。計測間隔や空間分解能、計測誤差が大き過ぎると、より狭い範囲で生じる局所的な現象や微小な変化を捉えられなくなることが考えられる。ここで、グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説^{5.1)}ではアンカー体長は 3m 以上と規定されているため、本実験において 3m 程度の範囲内における引張り力の変化が確認できれば、グラウンドアンカーのアンカー体内部における引張り力分布の変化を評価できると考えられる。これに対し、通常のグラウンドアンカーで想定されるグラウト配合とした Case H では、最大引張り力作用時においても、約 2m の範囲でテンドンの引張り力が徐々に低下し、グラウトに伝達している状況が確認できる。一方、上述した通り、Case M および L ではテンドンに引張り力が伝播している範囲が 1m 程度以上長くなっていることが明確に確認できる。また、本試験の計測結果には、計測精度である $\pm 50\mu$ に相当する $\pm 1.4\text{kN}$ 程度のばらつきが確認できるが、その大きさは、ランク A のアンカーにおける常時の許容引張り力 ($0.6 T_{us}=157\text{kN}$, T_{us} は極限引張り力)^{5.1)}の $\pm 0.9\%$ 程度であり、グラウンドアンカーの健全性を評価する上では問題無い大きさと言える。以上のことから、本計測技術の計測条件や精度によって、アンカー体内部における引張り力分布の変化を十分評価可能であることが確認された。

本試験では、テンドンの引抜けが生じてからも緊張を継続したため、引抜けによる引張り力の低下は生じていない。しかし、実施のグラウンドアンカーにおいて、アンカー頭部が定着された状態、つまり自由長部の長さが固定された状態でアンカー体からのテンドンの引抜けが生じた場合には、その引抜け量だけ自由長部の伸び量が小さくなるため、図 5.1-3 で想定したように (②)、アンカー体内部での引張り力分布形状が変化すると同時に、自由長部からアンカー頭部にかけての残存引張り力が低下すると考えられる。

Case H において、203kN (ポンプ油圧:46MPa) まで緊張後に 140kN (ポンプ油圧:30MPa) まで除荷した状態での計測値を、**図 5.2-2 b)** に併せて示した。これは、アンカー体内部が健全なままで外力の作用によって自由長部の伸び量が小さくなった状況を模擬したものと言える。本試験体では自由長部に相当する部分が無いが、角鋼管内のジャッキ側 (**図 5.2-2 b)** 中の左側) では引張り力の低下が見られる一方で、約 0.7m より深い位置における引張り力分布の変化は見られない。これは、除荷時にはアンカー体内部において緊張時とは逆向きに付着力が作用することによって、アンカー体内部の引張り力が保持されていることを示しており、**図 5.1-3** で想定した、外力の作用により引張り力が減少した場合の分布形状の変化 (①) と一致する。

(3) 付着応力度の推定

ここでは、本来の引張り力分布に対して約 1m の移動平均処理を施した結果に相当する BOTDR 方式による計測結果に基づいて、元の引張り力分布を推定することを試みる。以下にその手順を示す。

まず、アンカー体を模擬したグラウトの内部における、本来のテンドンの引張り力分布形状に対して、次の 2 通りのモデルを仮定する。

i) 余弦波分布：

ひび割れが生じたコンクリート内部における、ひび割れ間の異形鉄筋に作用する引張応力の分布として用いられるモデル^{5.5)}

ii) 直線分布：

単位長さあたりにテンドンからグラウトに伝搬する引張り力が一定、つまり付着応力度が一定と仮定するモデル

いずれのモデルにおいても、ジャッキ側端部 (0.0m 位置) における引張り力を作用引張り力として固定すると、分布形状を決定する変数は、定着長 (引張り力が 0 となる位置) のみとなる。次に、仮定した引張り力分布に対して 1m の長さの移動平均処理を行う。移動平均後の分布 (後述する **図 5.2-3** における赤線) が、BOTDR 方式による計測結果 (**図 5.2-3** における黒線) に良く一致するようにモデルの変数 (定着長) を決定し、本来の引張り力分布 (**図 5.2-3** における青線) を推定する。なお、上述したとおり、ジャッキ側 (計測位置 0~0.5m 程度の範囲) の引張り力の計測値はジャッキより外側の無荷重状態の範囲の影響を受けているため、考慮していない。

以上の手順により推定した結果を、**図 5.2-3** に示す。

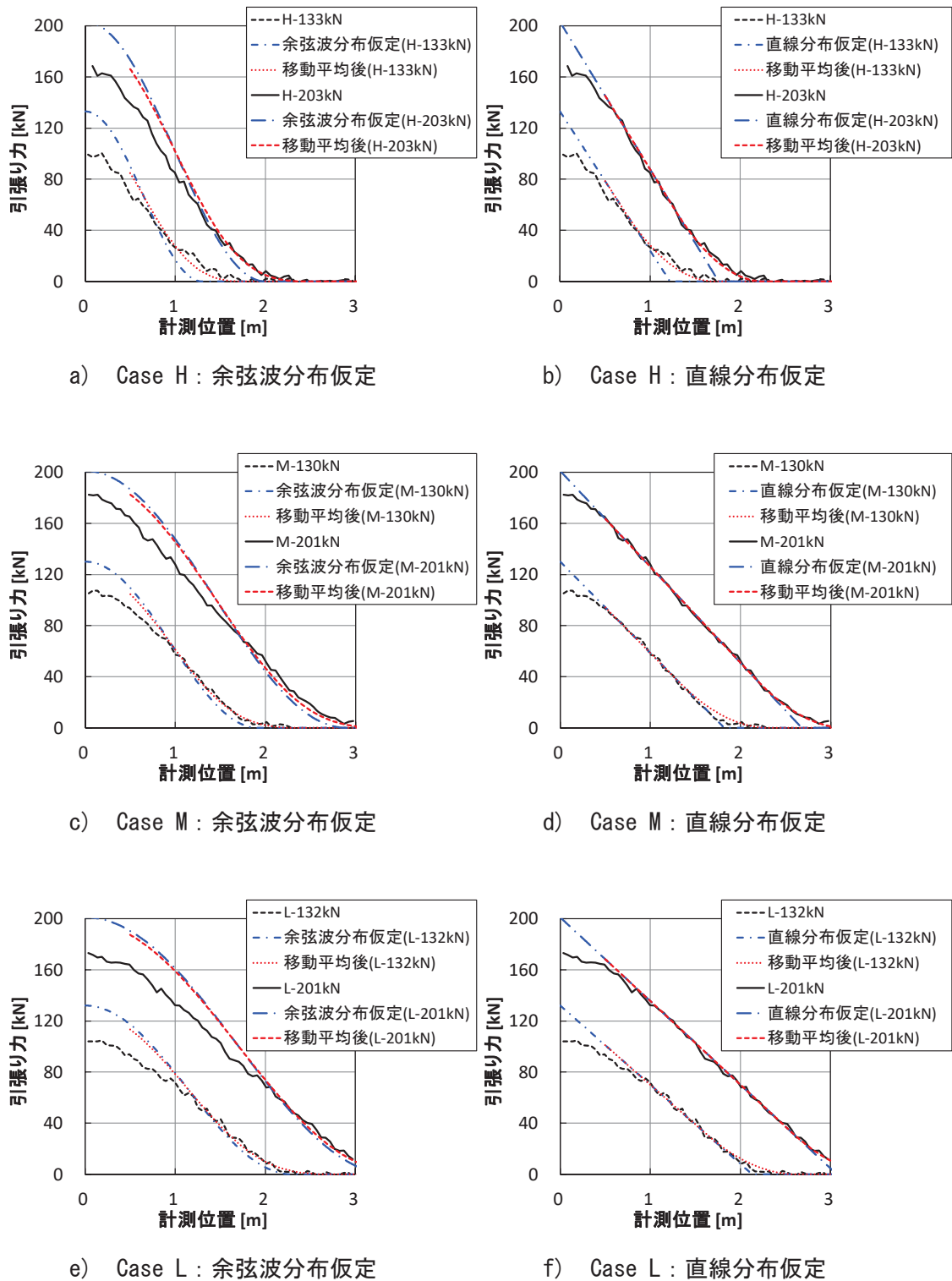


図 5.2-3 本来の引張り力分布の推定結果

図 5.2-3 より、グラウト内部の引張り力分布として直線分布を仮定した方が、移動平均後の分布が計測結果と良く一致していることが確認できる。ここで、余弦波分布の仮定は、前

述のとおりコンクリート内部における異形鉄筋に作用する引張応力の分布として用いられるモデルである。これに対して、グラウンドアンカーのアンカー体内部を模擬した本試験では、グラウトには骨材が含まれておらず、また節の無いPC鋼より線をテンドンとして用いていることから、骨材と節の噛み合わせによる抵抗といった機構が無く、余弦波分布よりも直線分布の方が良く一致したものと考えられる。

図 5.2-3 より仮定した直線分布の傾きから、テンドン-グラウト間の平均付着応力度を推定した結果を表 5.2-3 に示す。ただし、ECF タイプの 1S15.2 テンドンの周長として、47.7mm を用いた。

表 5.2-3 平均付着応力度の推定結果

Case	平均付着応力度 N/mm ²	
	約 130kN 時	約 200kN 時
H	2.29	2.42
M	1.50	1.57
L	1.30	1.37

表 5.2-3 より、グラウトの圧縮強度が低いほど平均付着応力度が低くなっており、また設計で用いられる許容付着応力度は、ランク A のアンカーで 1.0N/mm²、ランク B のアンカーで 1.5 N/mm²である^{5.1)}ことから、これらの推定結果は妥当な値であると判断できる。

以上のように、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いてグラウンドアンカーテンドンの引張り力分布の変化を計測することにより、外力の作用またはテンドンの引抜けによる残存引張り力の減少を検知でき、両者の判別が可能となることが示唆された。さらに、BOTDR 方式による計測結果から、移動平均前の本来の引張り力分布を推定することによって、平均付着応力度を推定できる可能性も示唆された。

5.2.2 アンカー体の引抜けに対する検知性能の確認試験

(1) 試験概要

アンカー体周辺の地盤に風化・劣化が生じると、アンカー体と周辺地盤との間の周面摩擦力が低下して、アンカー体の引抜けが生じる。実際には、長年にわたる地下水の流れや化学的な作用などによって徐々に周面摩擦力が低下していくものと想定されるが、本研究では、周辺地盤をコンクリートブロックで模擬した試験体を製作し、アンカー体の引抜けに対する検知性能を確認した。

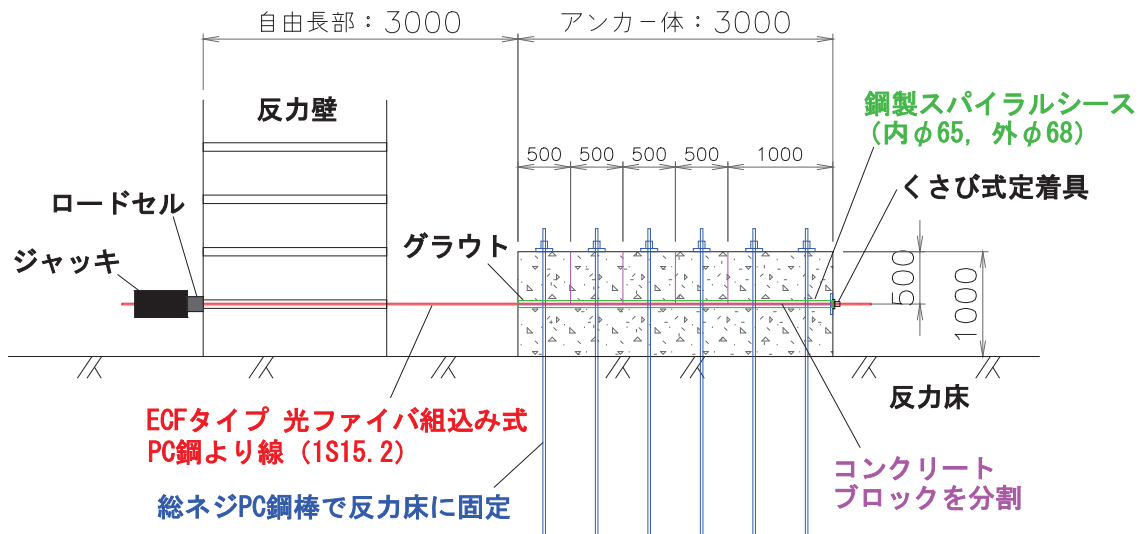
試験概要を図 5.2-4 に示す。周辺地盤を模擬するコンクリートブロックの寸法は 1,000×1,000×3,000mm で、ビニールシートや型枠材を用いて図中に示すように分割して打設した。なお、使用したコンクリートの粗骨材最大寸法は 20mm である。ブロックの中心には鋼製

第5章 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理への適用

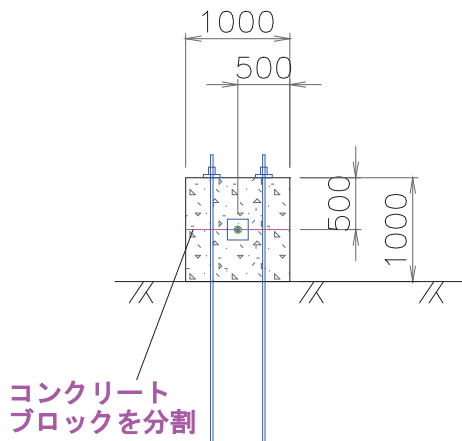
スパイラルシース管（内φ65mm，外φ68mm）を埋設しており，コンクリート硬化後，シース管内に ECF タイプの 7 本より光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いたシングルストランドテンドン（1S15.2）を挿入，シース管内にグラウトを充填してアンカー体を模擬した。グラウト材には，早強ポルトランドセメントによる W/C=49.5%のセメントミルクを用いた。表 5.2-4 に試験時の材齢におけるコンクリートおよびグラウトの物性値を示す。グラウト硬化後に，自由長部の長さが 3,000mm となるように，総ネジ PC 鋼棒を用いてコンクリートブロックを反力床上に固定した。反力壁を介して油圧ジャッキを用いて引張り力 140kN（ $0.54T_{us}$ 相当， T_{us} は極限引張り力）で緊張し，ジャッキのストロークを固定した。なお，試験によりアンカー体が完全に引き抜けてしまうことがないよう，テンドンはコンクリートブロックを貫通させ，先端をくさび式定着具および鋼板で定着した。

ジャッキのストロークを固定したまま，反力床に固定した総ネジ PC 鋼棒を撤去しながら，上側のコンクリートブロックを長さ 500mm 分ずつ順次撤去し，その間の引張り力分布の変化を計測した（図 5.2-4 d）～g）。実際のグラウンドアンカーでは，健全時にはアンカー体は周辺地盤による拘束を受けて周面摩擦力により定着されているが，地盤の風化・劣化によってアンカー体の拘束が弱くなると，周面摩擦力が低下してアンカー体の引抜けが生じる。本実験では，アンカー体を模擬したシース管を周囲のコンクリートブロックが拘束している状態からブロックを徐々に撤去することにより，アンカー体周りの拘束および周面摩擦力が徐々に低下する現象を模擬した。

光ファイバによるひずみ分布の計測は，コンクリートブロックを 1 つ撤去するごとに行い，初期緊張時（ポンプ油圧 5.0MPa）からの増分として整理し，見かけの弾性係数を用いてひずみ計測値を引張り力に換算した。見かけの弾性係数には，緊張時の，ジャッキにより作用させた引張り力と自由長部で計測されたひずみとの相関から算定した値， 198kN/mm^2 を用いた。



a) 試験体正面図 (単位：mm)



b) 試験体側面図 (単位：mm)

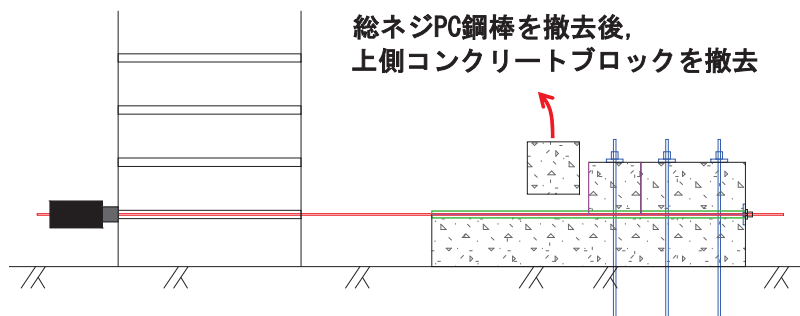


c) コンクリートブロックの製作状況 (下段ブロック打設後)

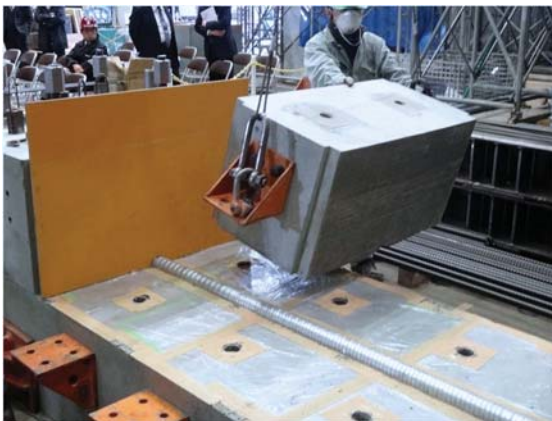
図 5.2-4(1) アンカー体引抜け検知性能の確認試験概要



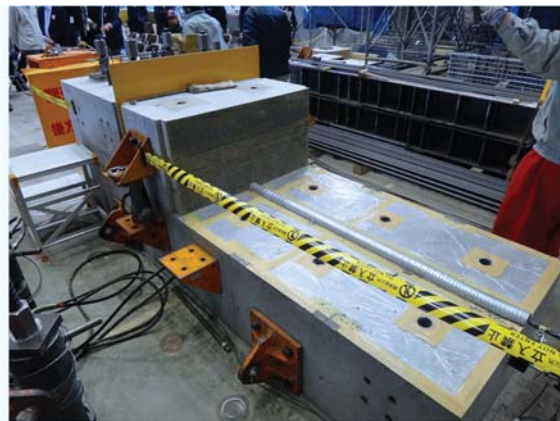
d) コンクリートブロックの固定状況（試験開始前）



e) ブロック撤去イメージ図（正面図，3ブロック目撤去）



f) ブロック撤去状況



g) 3ブロック目撤去後の状況

図 5.2-4(2) アンカー体引抜け検知性能の確認試験概要

表 5.2-4 アンカー体引抜け検知性能の確認試験材料物性値

材料 (材齢*)	弾性係数 kN/mm ²	圧縮強度 N/mm ²
コンクリート (19日)	31.7	53.2
グラウト (12日)	13.4	59.2

※試験時材齢

(2) 試験結果

図 5.2-5 に、テンドンの引張り力分布の計測結果を示す。

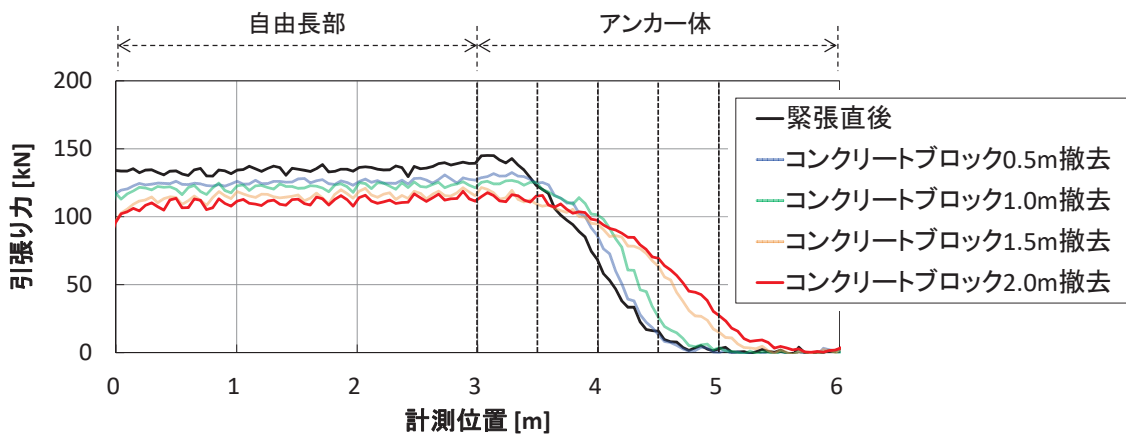


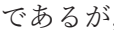
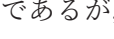

図 5.2-5 アンカー体引抜け検知性能の確認試験結果

緊張直後の計測結果では、自由長部の引張り力はほぼ一定値を示しており、アンカー体内部においては徐々に引張り力が低下し、アンカー体中央付近でほぼゼロとなっている。これは、アンカー体がコンクリートブロック内に健全に定着されることによって、付着力および周面摩擦力を介して引張り力がテンドンからコンクリートブロックに伝達されていることを示している。

コンクリートブロック撤去後の計測結果では、撤去を進めるごとに、自由長部の残存引張り力が徐々に低下していることがわかる。同時に、アンカー体内部においては、引張り力が減少し始める点がアンカー体の先端側（図 5.2-5 中の右側）に移動するとともに、その減少勾配が緩やかとなっている。これらの結果は、図 5.1-3 で想定したように (3)、アンカー体周辺の拘束が徐々に解放される（周面摩擦力の低下を模擬）ことによって、アンカー体の定着位置および定着長が変化すると同時に、アンカー体の引抜けが生じることで自由長部の引張り力が低下する現象を検知したものであると考えられる。ただし、アンカー体内部において引張り力が減少し始める点と、撤去したコンクリートブロックの長さとは完全には

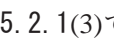
第5章 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理への適用

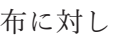
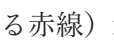

一致しない。これは、本試験体ではシース管を残置していることや、下半分のコンクリートブロックは撤去していないことによって、アンカー体に対する拘束が完全に失われてはいないためと言える。


なお、本試験において自由長部を模擬した区間はPC鋼より線が空中に位置している。このため、摩擦等の外力を受けない状態であり、この区間の引張り力は完全に一定となるはずであるが、に示した計測結果には若干のばらつきが見られる。これは、に示した計測原理上の誤差(約±50μ)に起因するばらつきであるが、前項で述べたとおり、グラウンドアンカーの健全性を評価する上では問題無い大きさと言える。また本試験では、BOTDR方式による計測を行ったため、空間分解能は約1m、計測精度は約±50μである(参照)。計測間隔は51mmに設定した。前項で述べた試験結果と同様、これらの計測条件で、自由長部からアンカー体内部における引張り力分布の形状およびその変化が明確に確認できる。

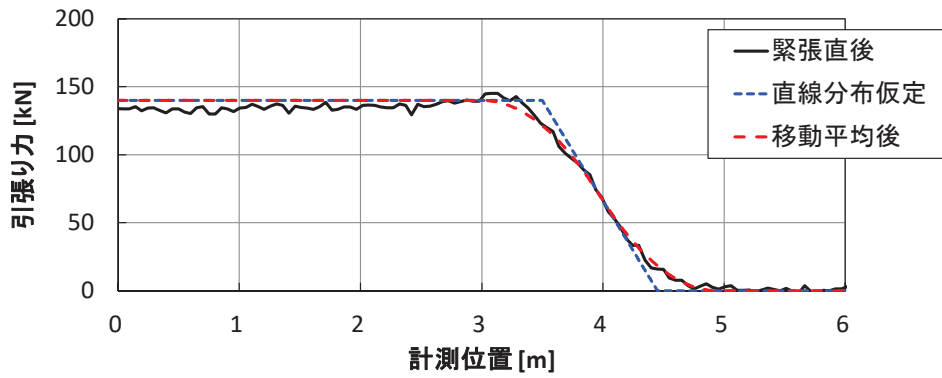
(3) 付着応力度の推定

前項と同様に、ここでは、本来の引張り力分布に対して約1mの移動平均処理を施した結果に相当するBOTDR方式による計測結果に基づいて、元の引張り力分布を推定することを試みる。以下にその手順を示す。

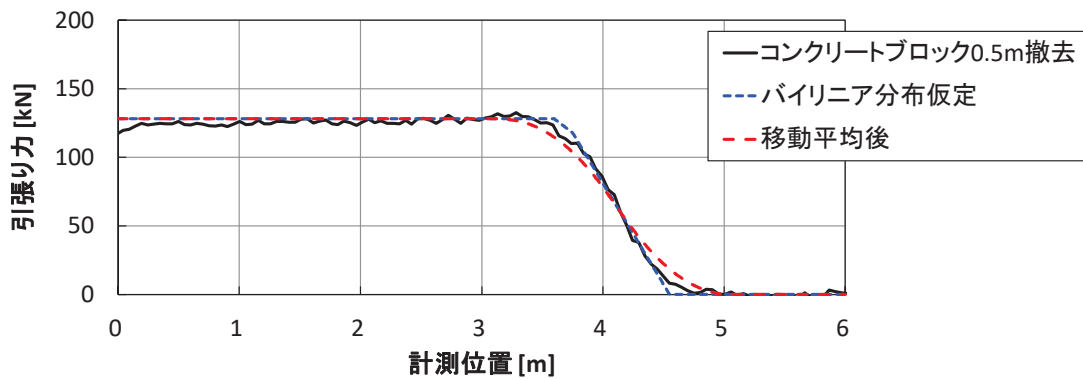
まず、アンカー体内部が健全な状態と定義できる、緊張直後の引張り力分布を対象に、で述べたのと同じ手順で平均付着応力度を推定する。ただし、前項の結果から、アンカー体内部における引張り力分布形状のモデルとしては直線分布を仮定する。また、本試験ではアンカー体の外側に自由長部を有していることから、自由長部内では引張り力は一定と仮定し、アンカー体内部全体の計測結果を用いて移動平均後の分布が一致するように元の分布を推定した。

次に、コンクリートブロック撤去後のアンカー体内部を、先端側の健全部と、自由長部側の非健全部とに分ける。つまり、先に求めた緊張直後におけるアンカー体内部の傾きと同じ傾きとする範囲(健全部)と、引抜けが生じたことによって傾きが小さくなった範囲(非健全部)とのバイリニア分布を仮定する。この時の変数は、非健全部の長さ(傾き変化点の位置)と、定着長(先端側で引張り力が0となる位置)の2つである。仮定したバイリニア分布に対して1mの長さの移動平均処理を行い、移動平均後の分布(後述するにおける赤線)が、BOTDR方式による計測結果(における黒線)に良く一致するように2つの変数を決定し、本来の引張り力分布(における青線)を推定する。

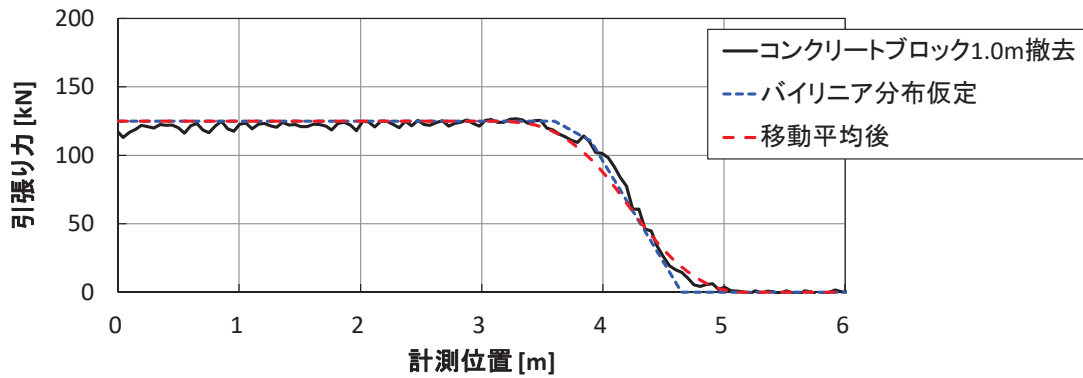
以上の手順により推定した結果を、に示す。



a) 緊張直後 (健全時)

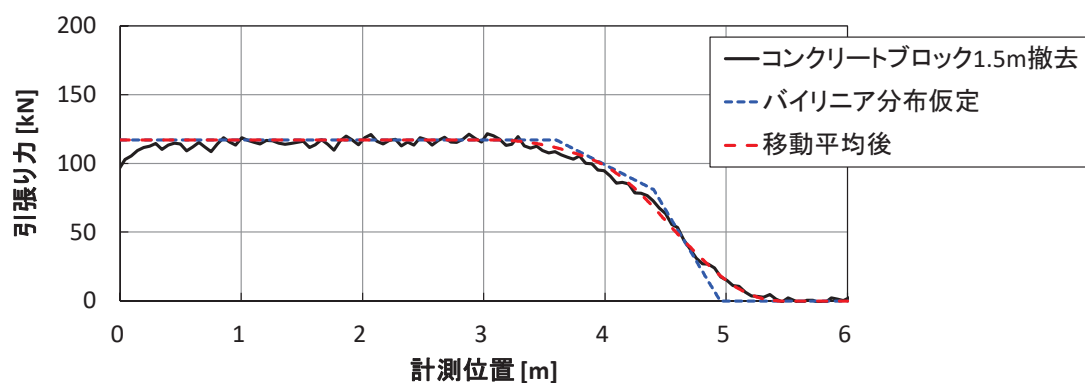


b) コンクリートブロック 0.5m 撤去後

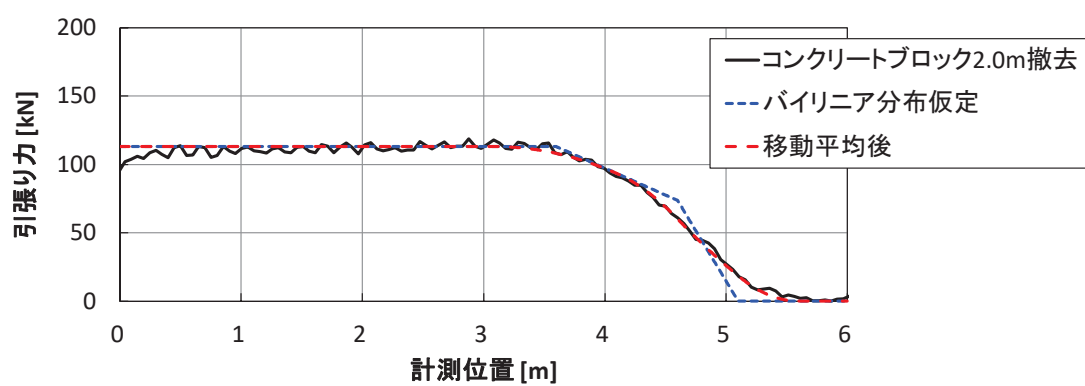


c) コンクリートブロック 1.0m 撤去後

図 5.2-6(1) 本来の引張り力分布の推定結果



d) コンクリートブロック 1.5m 撤去後



e) コンクリートブロック 2.0m 撤去後

図 5.2-6(2) 本来の引張り力分布の推定結果

図 5.2-6 より、アンカー体引抜けを模擬した試験結果に対して、非健全部と健全部を定義したバイリニア分布を仮定することによって、移動平均後の分布が計測結果と良く一致していることが確認できる。仮定した分布形状から、非健全部の長さや平均付着応力度を推定した結果を表 5.2-5 に示す。ただし、ECF タイプの 1S15.2 テンダンの周長として、47.7mm を用いた。

表 5.2-5 非健全部の長さや平均付着応力度の推定結果

Case	健全部の平均付着 応力度 N/mm ²	非健全部の長さ m	非健全部の平均付着 応力度 N/mm ²
緊張直後	3.09	0	-
0.5m 撤去		0.15	1.41
1.0m 撤去		0.30	1.01
1.5m 撤去		0.80	0.94
2.0m 撤去		1.00	0.82

表 5.2-5 より、アンカー体の引抜けが模擬されることによって、徐々に非健全部の長さが長く、また非健全部の平均付着応力度が小さくなっている様子が確認できる。なお、非健全部の長さは、コンクリートブロックを撤去した長さより短くなっているが、これは前述のとおり、コンクリートブロックを撤去した範囲でもアンカー体に対する拘束が完全に失われてはいないためと言える。

本試験は、実際の定着地盤の風化・劣化に伴うアンカー体の引抜けを直接再現したものではない。このため、アンカー体内部における引張り力分布の変化の仕方は、定量的には実際のアンカー体の引抜け時とは異なることも考えられる。しかし、作用する引張り力が大きい自由長部側から徐々に引抜けが進展し、付着応力度が小さくなるという点については、両者は同じ傾向を示すと想定できる。本試験結果より、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いてグラウンドアンカーテンドンの引張り力分布の変化を計測することによって、アンカー体の引抜けに伴う残存引張り力分布の変化を検知可能となることが示唆された。さらに、BOTDR 方式による計測結果から、移動平均前の本来の引張り力分布を推定することによって、アンカー体の引抜けに伴う付着応力度の変化を推定できる可能性も示唆された。

5.2.3 すべり面の発生に対する検知性能の確認試験

(1) 試験概要

グラウンドアンカーの自由長部においてすべり面が発生すると、テンドンのひずみ分布に局所的な変化が生じることが想定される。本研究では、すべり面の上下の地山を2体のコンクリートブロックで模擬した試験体を製作し、すべり面の発生およびその位置の検知性能を確認した。

試験概要を図 5.2-7 に示す。地山を模擬するコンクリートブロックは、1,000×900×1,995mm の固定側ブロック、1,000×800×5,000mm の载荷側ブロックに分けて製作した。なお、使用したコンクリートの粗骨材最大寸法は 20mm である。固定側ブロックは、総ネジ PC 鋼棒を用いて反力床に固定し、载荷側ブロックは図 5.2-7 a) 中の右端下面をピン支持し、両ブロックの間には 5mm の隙間を設けた。図 5.2-7 b) に示すように、2本の鋼製スパイラルシース管（内φ65mm、外φ68mm）を、両ブロックに貫通するように埋設しており、コンクリート硬化後、シース管内に ECF タイプの7本より光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いたシングルストランドテンドン（1S15.2）を1本ずつ挿入した。この際、一方は通常のグラウンドアンカーの自由長部を想定してポリエチレンシースによってグラウト材との付着を切ったアンボンドとし、シース管内にグラウトを充填・硬化後にテンドンを緊張した。もう一方は、テンドン全長にわたって地盤と付着させたケースを模擬するため、ポリエチレンシースは用いず、テンドンの緊張後にシース管内にグラウトを充填・硬化させ、テンドンと付着させた。グラウト材には、早強ポルトランドセメントによる W/C=49.5%のセメントミルクを用いた。表 5.2-6 に試験時の材齢におけるコンクリートおよびグラウトの物

第5章 グラウトアンカーの緊張管理・維持管理への適用

性値を示す。 tendon の緊張は、反力床に固定した荷重用フレームおよび反力壁を介して油圧ジャッキを用いて行い、引張り力 140kN (0.54 T_{us} 相当, T_{us} は極限引張り力) で緊張し、ジャッキのストロークを固定した。

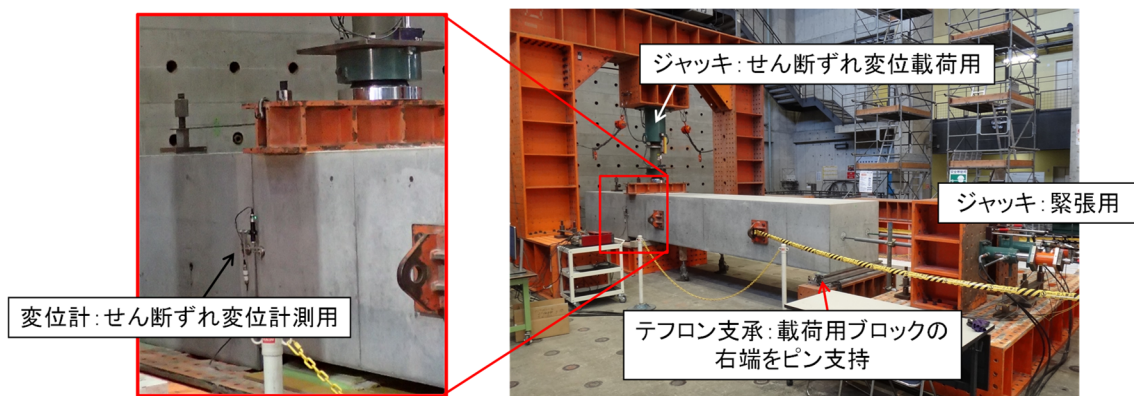
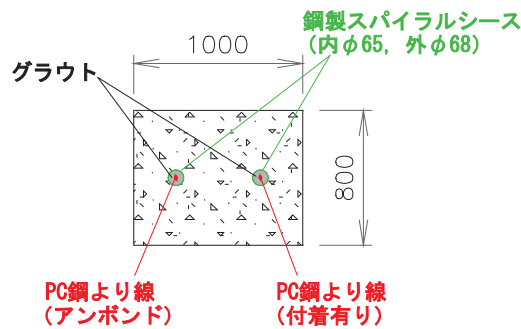
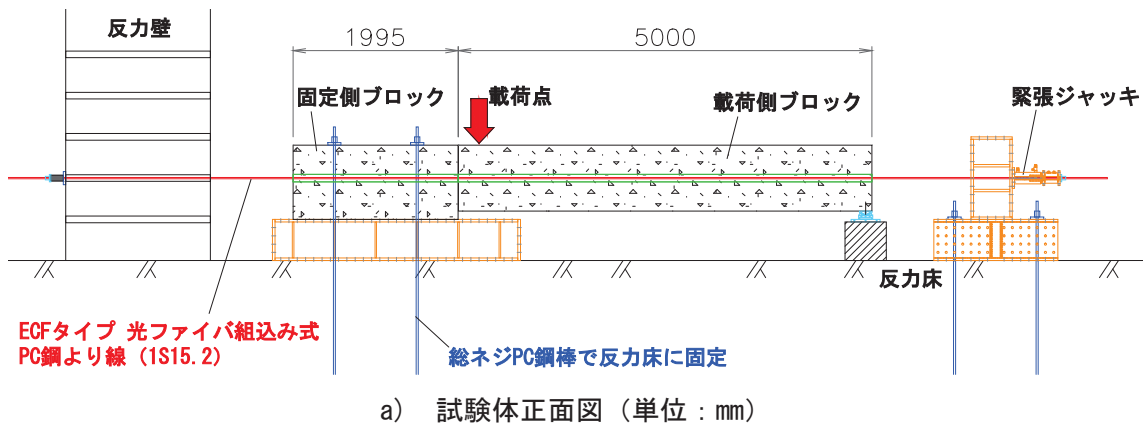


図 5.2-7 すべり面検知性能の確認試験概要

表 5.2-6 すべり面検知性能の確認試験材料物性値

材料 (材齢※)	弾性係数 kN/mm ²	圧縮強度 N/mm ²
コンクリート (52日)	31.0	44.1
グラウト (45日)	14.2	62.9

※試験時材齢

固定側ブロックはすべり面より下の土塊を、荷側ブロックはすべり面より上の移動土塊を模擬しており、荷側ブロックの左端上面から油圧ジャッキにより鉛直下向きに荷することにより、両ブロック間にすべり面を模擬したせん断ずれ変位を与えることとした。荷側ブロックの左端下面は、 tendon 挿入時から荷開始直前まで機械式ジャッキで支持・固定しておき、ひずみの初期値を計測した後に機械式ジャッキを撤去し、油圧ジャッキによる鉛直下向きの荷を開始した。試験は、せん断ずれ変位を変位計で計測しながら行い、適宜、ジャッキを固定して光ファイバによるひずみ分布の計測を行った。計測されたひずみは、機械式ジャッキの撤去直前に計測した初期値からの差分として整理した。

(2) 試験結果

図 5.2-8 に、 tendon のひずみ分布の計測結果を示す。なお本試験で計測されたひずみには、 tendon に作用する引張り力に起因する引張ひずみだけでなく、 tendon のせん断変形に起因するひずみも含まれると考えられるため、ここでは引張り力への換算を行わず、ひずみ差分のまま示している。

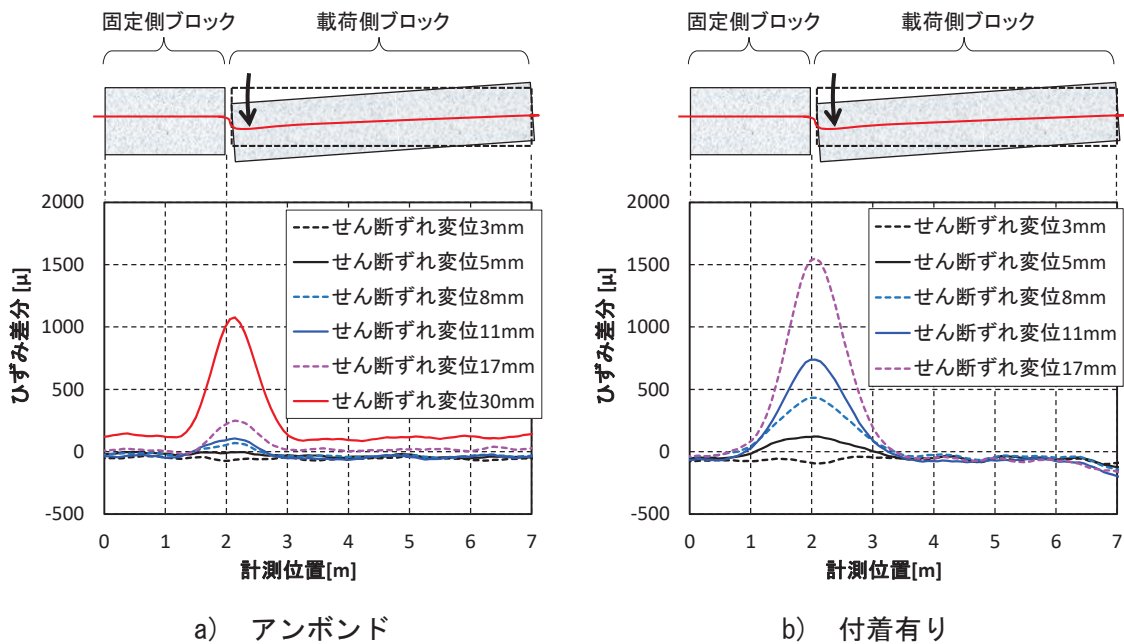


図 5.2-8 すべり面検知性能の確認試験結果

いずれのケースにおいても、せん断ずれ変位の増加に伴い、すべり面を模擬した位置付近を中心にひずみが増加している様子が確認できる。これは、両ブロック間のせん断ずれ変位が生じた位置においては tendon に局所的なせん断が作用しているが、ずれ変位の増加に従って、左右からすべり面位置に向かって引き込まれるような引張りが tendon に作用しているためと考えられる。アンボンドのケース（図 5.2-8 a）では、ずれ変位 17mm 程度からひずみ分布の変化が顕著となり、変位 30mm の計測結果では、すべり面を模擬した位置付近でのひずみの増加が卓越することに加え、tendon 全長にわたってひずみが 100～150 μ 程度増加している。これは、上記のようにせん断ずれ変位が生じた位置に向けて引き込まれるような引張りが tendon に作用するが、グラウトとの付着が切られているため、生じたひずみ増分が tendon 全長に分散されていることを示している。一方、付着有りのケース（図 5.2-8 b）では、アンボンドのケースと比べてより小さな変位 5～8mm 程度から、すべり面を模擬した位置付近のひずみが局所的に増加している様子が確認できる。なお本試験では、光ファイバによるひずみ分布計測において、複数回の計測を行い、結果に対して平均化処理を行っている。これにより、前項までに述べた試験の計測結果と比較して計測結果のばらつきが小さくなっていることが確認できる。

計測されたひずみ差分の分布を2つのコンクリートブロック内の全長で積分した値と、ジャッキにより与えたせん断ずれ変位との関係を図 5.2-9 に、計測されたひずみ差分の最大値と、せん断ずれ変位との関係を図 5.2-10 に示す。

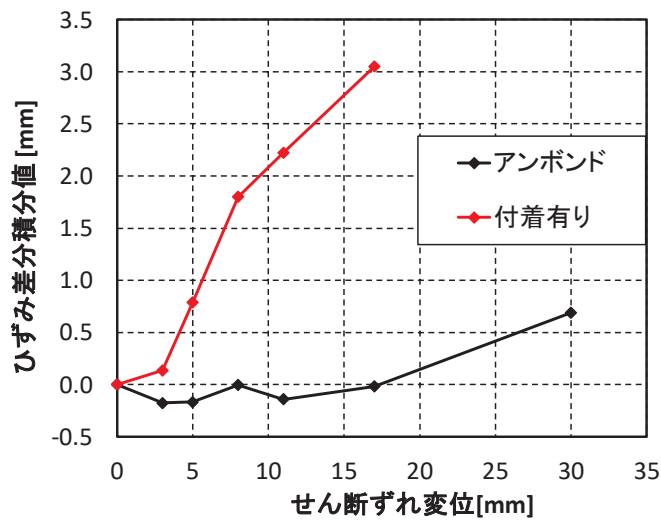


図 5.2-9 ひずみ差分積分値とせん断ずれ変位の関係

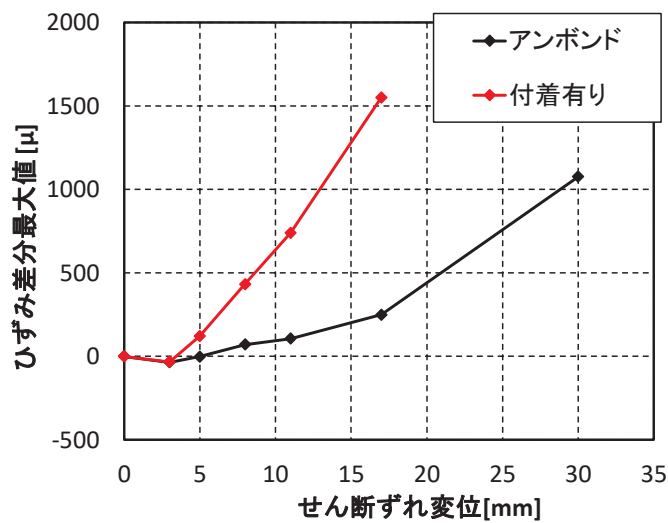


図 5.2-10 ひずみ差分最大値とせん断ずれ変位の関係

付着有りのケースでは、ひずみ差分の積分値・最大値ともに、ずれ変位 5mm から顕著な増加が見られる。アンボンドのケースでは、ひずみ差分の積分値はずれ変位 17mm から増加に転じており、ひずみ差分の最大値はずれ変位 8mm から徐々に増加し始め、17mm 以降顕著に増加している様子が確認できる。このように、実際のグラウンドアンカーにおいてもひずみ差分の最大値や積分値の変化を確認していくことで、すべり面が発生し始めた時期やその進展状況を確認できるものと考えられる。ただし、ひずみ差分の積分値は tendon の伸び量に相当するが、その値は、付着有りのケースにおいても、与えたせん断ずれ変位の 1/5

程度であった。これは、せん断ずれ変位の増加に伴って、テンドン周りのグラウトやコンクリートの圧壊が生じ、テンドンが S 字状に変形していたため、伸び量がずれ変位よりも小さくなっていたためと考えられる。よって、本計測技術によって、すべり面の発生が検知できた場合にも、すべり量の定量的な評価は難しいと言える。

実際のグラウンドアンカーにおいては、自由長部の周辺の地山は支持層ではないため、礫混じりの土砂や軟岩など、本実験で用いたコンクリートブロックほど剛ではない地層と想定される。このため、本試験は実際の地山におけるすべり面を直接模擬したものとは言えず、引張り力分布は実際にはもっとなだらかなピークを示すことも考えられる。しかし、本試験結果からは、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を用いてグラウンドアンカーテンドンの引張り力分布の変化を計測することにより、すべり面のような局所的なせん断ずれ変位を検知可能であることが示唆されたと言える。また、通常のグラウンドアンカーの自由長部のようにアンボンドとした場合には、特にすべり量が小さい段階においてはひずみの増分が分散されてしまうが、全長にわたりテンドンとグラウトを付着させることで、すべり面の検知性能を向上できる可能性が示された。すべり面の有無および位置の検知を目的とする場合には、自由長部を設けた通常の構造用アンカーの他に、光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を含むテンドンをグラウトなどによって全長にわたり地山と一体化させた計測用アンカーを設置することが有効であると言える。

以上、本節で述べた各試験の結果から、本計測技術によって残存引張り力分布の変化が確認された際には、その変化の仕方に基づいて、グラウンドアンカーに生じている変状を推定できる可能性が示唆された（図 5.2-11）。さらに、BOTDR 方式による計測結果から、移動平均前の本来の引張り力分布を推定することによって、平均付着応力度を推定できる可能性も示唆された。

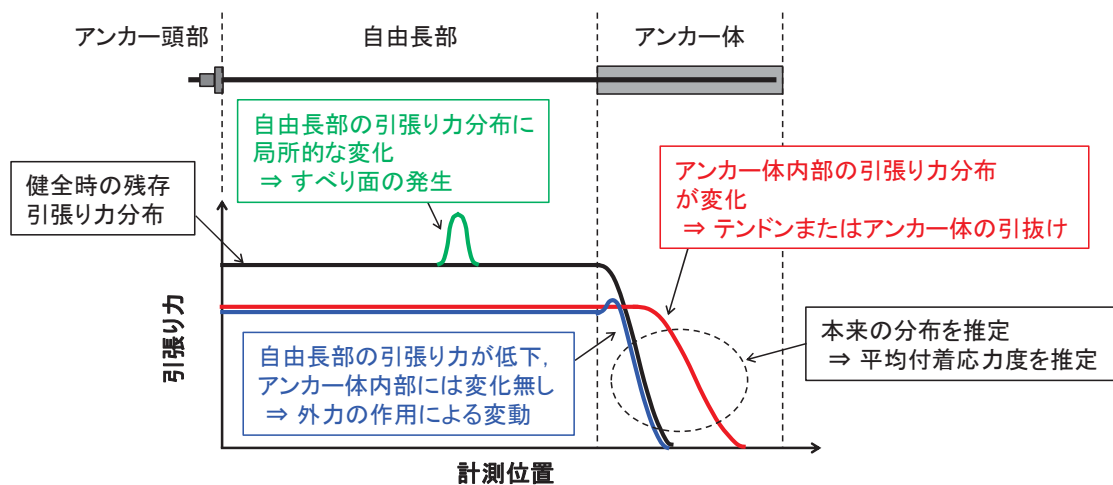


図 5.2-11 残存引張り力分布の変動から想定されるグラウンドアンカーの変状

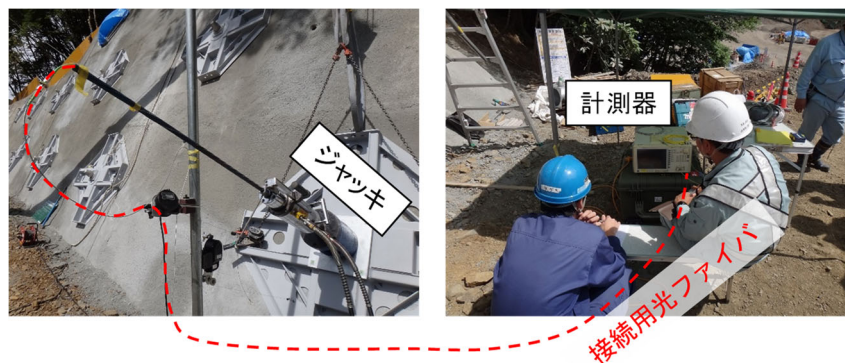
5.3 実構造物への適用試験

実際のグラウンドアンカー工事のテンドンに光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を適用して引張り力分布の計測を行い、本計測技術の適用性を検証した。実工事への適用によって確立された現場での作業手順、および確認された計測性能について以下に述べる。

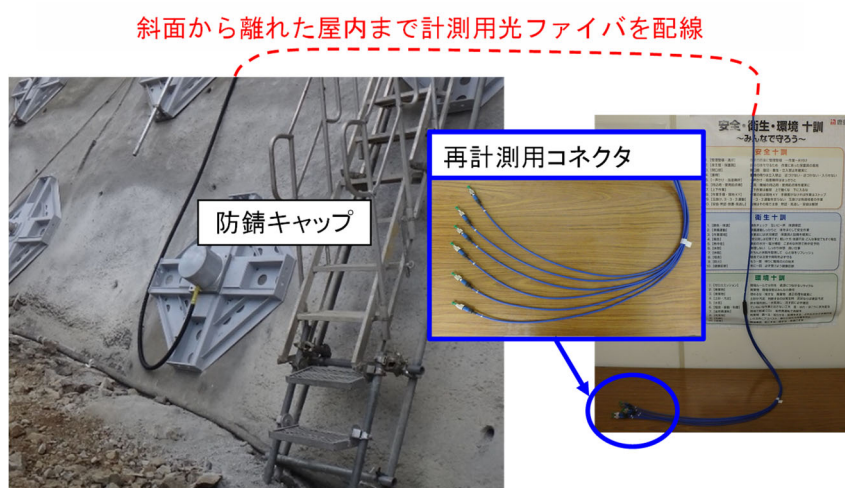
5.3.1 実施工現場における計測手順

実工事への適用試験によって確立した、グラウンドアンカー工事現場における施工時の緊張・計測作業の状況を図 5.3-1 に示す。工場で製作された ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を現場に搬入し、通常と同じ手順で切断、現場組立加工、挿入を行い、定着具、緊張用ジャッキを設置した。なおこの際、実構造物での施工においても、3.2 光ファイバ組込み式 PC 鋼より線の開発で述べた想定のとおり、光ファイバを傷つけることなく通常と同じ手順で作業可能であることを確認した。ジャッキ後方の余長部分のエポキシ樹脂被覆を切削して光ファイバを取り出し、計測器に接続した後、緊張・計測を行った(図 5.3-1 a))。ここで、1 回の計測時間は約 3 分間である。緊張作業中の各荷重段階において、ジャッキの油圧弁を閉じてストロークを固定した状態で計測を行っている。

緊張・定着・頭部処理完了後には、光ファイバの余長を防錆キャップに設けた孔から取り出し、斜面から離れた安全な屋内まで延長して再計測用コネクタを残置した(図 5.3-1 b))。



a) 緊張・計測



b) 防錆キャップからの取出しおよび再計測用コネクタの残置

図 5.3-1 グラウンドアンカー工事への適用状況

緊張時の計測は、確認試験（計画最大荷重まで緊張後，除荷）中の各段階，最終緊張時，および定着後に行った。また，緊張・定着作業終了後に，ラマン散乱光による光ファイバの温度分布を計測した。

計測されたひずみ分布に，テンドンの見かけの弾性係数 $E_{PC_{eq}}$ および有効断面積 A_{PC} を乗じ，引張り力分布に換算した（式 5.3-1）。この時，見かけの弾性係数は，確認試験中に計測した，油圧ジャッキにより作用させた引張り力と，摩擦の影響が小さいジャッキ近傍におけるひずみ計測結果との相関から算定した。

$$PC_i = \varepsilon_i \times E_{PC_{eq}} \times A_{PC} \quad \text{式 5.3-1}$$

ただし， PC_i ：計測点 i における引張り力， ε_i ：計測点 i におけるひずみ計測値

再計測時には，上述した再計測用コネクタを残置した場所まで計測器を運搬して接続し，

ひずみ分布および温度分布を計測した（図 5.3-2）。第3章で述べたとおり、ブリルアン散乱光を用いた BOTDR 方式による計測結果は、ひずみ変化だけでなく温度変化による影響も含む。このため、再計測結果に対しては、施工時からの温度変化に温度補正係数 k ($=28.9\mu$ / $^{\circ}\text{C}$) を乗じた値を差し引くことによって温度補正（式 5.3-2）を行った後、式 5.3-1 により引張り力分布に換算した。

$$\Delta \varepsilon_{t-0,i} = (\varepsilon_{mea_{t,i}} - \varepsilon_{mea_{0,i}}) - k(T_{t,i} - T_{0,i}) \quad \text{式 5.3-2}$$

ただし、 $\Delta \varepsilon_{t-0,i}$ ：計測点 i における施工時（時刻 0）から再計測時（時刻 t ）までのひずみ変化、

$\varepsilon_{mea_{t,i}} / \varepsilon_{mea_{0,i}}$ ：計測点 i における時刻 $t/0$ でのひずみ計測結果、

$T_{t,i} / T_{0,i}$ ：計測点 i における時刻 $t/0$ での温度計測結果



図 5.3-2 再計測状況

5.3.2 法面補強用アンカー工への適用試験

実際の法面補強用アンカー工における計測性能を確認することを目的に、摩擦型グラウンドアンカーテンドン（ECF タイプ）に本計測技術を適用した。

(1) 計測の概要

赤谷（あかたに）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）の法面補強用グラウンドアンカーテンドンに光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を適用し、引張り力分布の計測を行った。本工事は、平成 23 年 9 月の台風 12 号に伴う豪雨によって斜面の崩落が生じ、流入した土砂によって河道閉塞された赤谷川に対し、堆積した土砂を撤去するとともに護岸の保全工事を行い河道の安定化を図る工事である。本工事の位置図、施工後の法面の写真を図 5.3-3 に示す。

- ・ 工事場所：奈良県五條市大塔町清水地先

第5章 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理への適用



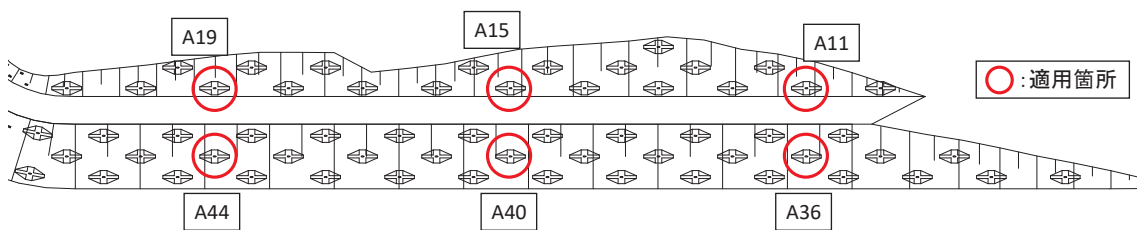
a) 位置図



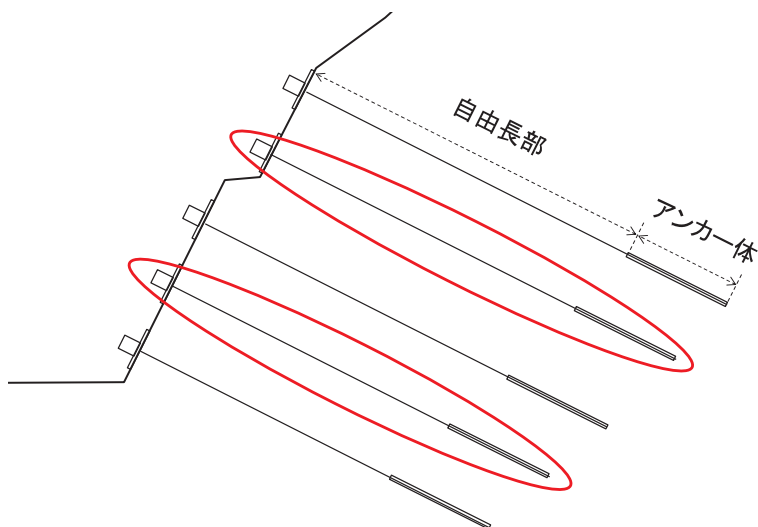
b) グラウンドアンカー工施工後の法面写真

図 5.3-3 赤谷地区溪流保全工他工事の概要

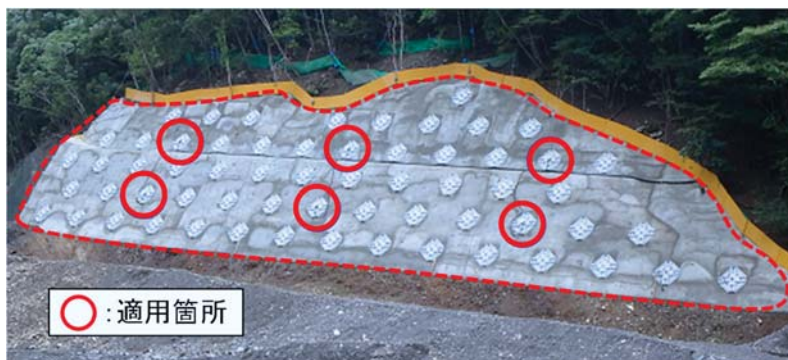
適用対象は赤谷川左岸の法面補強用のグラウンドアンカーで、全61本のアンカーの内図5.3-4に示す6本で計測を行った。いずれも ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線1本を用いる 1S15.2 シングルストランドテンドンである。自由長部の長さは 7.5~14.1m, アンカー体長さは全て 4.0m である。緊張時の計測完了後、再計測用のコネクタは、斜面から約 100m 離れた屋内まで延長して残置した。



a) 平面図



b) 断面図



c) 全景写真

図 5.3-4 赤谷地区溪流保全工他工事における適用対象アンカー

(2) 緊張時の計測結果

緊張時の計測結果の一例を図 5.3-5 に示す。

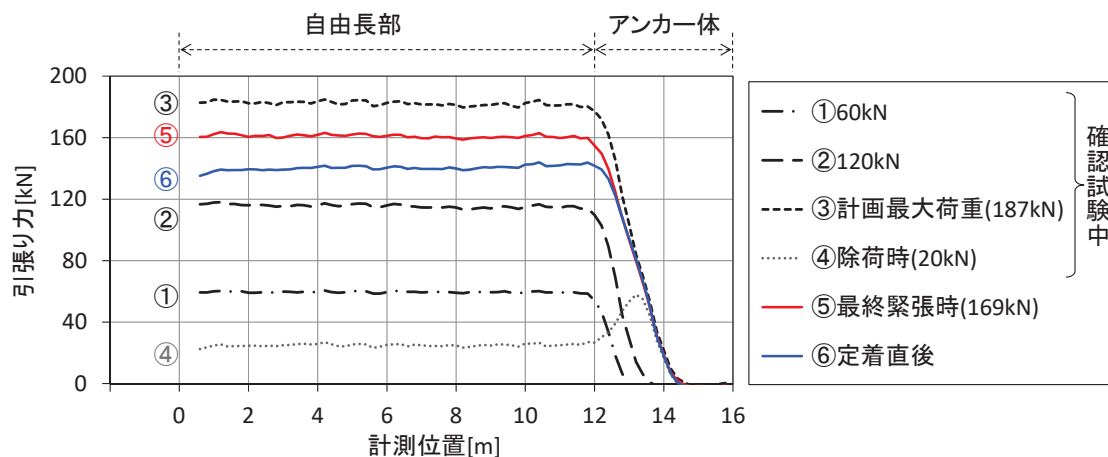


図 5.3-5 赤谷地区溪流保全工他工事における緊張時の計測結果 (A15)

いずれの計測結果においても、自由長部からアンカー体内部まで、テンドン全長にわたる引張り力の分布が計測されており、自由長部における引張り力はほぼ一定となっていること、計画最大荷重（187kN）まで緊張した場合でもアンカー体の先端約 2m の範囲では引張り力がほぼゼロとなっていることがわかる。また、確認試験中の除荷時（20kN）には、図 5.2-2 b) に示したテンドン引抜け試験における除荷中の計測結果（H-140kN（除荷中））と同様に、アンカー体内部の逆向きの付着力によって引張り力が残存する現象が見られる。

これらの計測結果から、自由長部ではグラウトとの付着が確実に切られており引張り力のロスがほとんど生じていないこと、アンカー体内部において定着長約 2m で健全に定着されていることが確認できる。

ここで、自由長部中央位置、アンカー体開始点、アンカー体内部 1m の位置、の 3 点について、ジャッキにより作用させた引張り力と各位置で計測された導入引張り力との関係（確認試験中から最終緊張時まで）を図 5.3-6 に示す。この結果から、自由長部内～アンカー体開始点では、除荷時および再緊張時（最終緊張時）までを含めほぼ線形関係を示していることが確認できる。一方、アンカー体内部 1m 位置においては、作用引張り力 60kN の時点ではまだ引張り力が伝達されておらず、その後徐々に伝達されていく様子が確認できる。2.2 グラウンドアンカーの緊張管理・維持管理で述べたように、従来の緊張管理における、本緊張を行う前の確認試験や適性試験では、アンカー頭部において計測される引張り力とテンドン全体の伸び量のみから線形性を確認して健全性を判定していたが、本計測技術を用いることによって、地盤内の各点における導入引張り力が可視化され、より確実な施工管理・安全管理が行えるようになると期待できる。

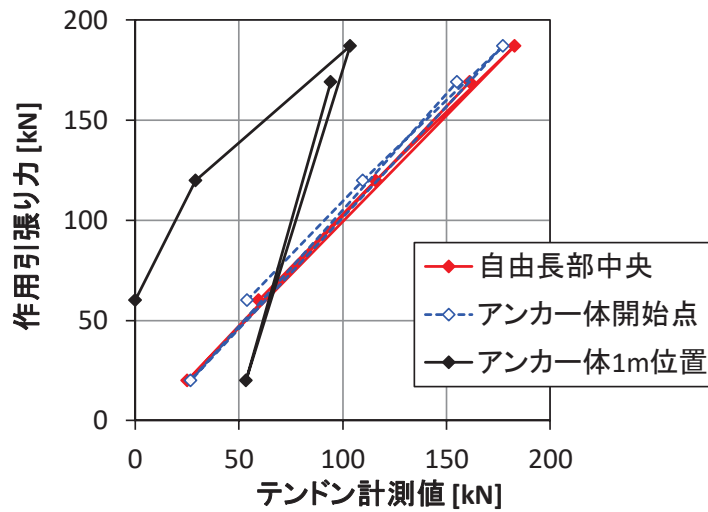


図 5.3-6 テンドン内各位置における引張り力の履歴

また、5.2.2 アンカー体の引抜きに対する検知性能の確認試験で述べたのと同様に、本来の引張り力分布に対して約1mの移動平均処理を施した結果に相当するBOTDR方式による計測結果に基づいて、元の引張り力分布の推定を試みた。5.2.2(3)のコンクリートブロック撤去前の計測結果に対する手順と同様、アンカー体内部における引張り力分布形状のモデルとしては直線分布を用い、自由長部内では引張り力は一定と仮定して、アンカー体内部全体の計測結果を用いて移動平均後の分布が一致するように元の分布を推定した。ただし、一度除荷を行った後のアンカー体内部には、緊張時と逆向きの付着力によって引張り力が残存し、直線分布の仮定が成立しないものと考えられることから、確認試験中の計測結果に対してのみ、推定を行った。本来の引張り力分布を推定した結果を、図5.3-7に示す。

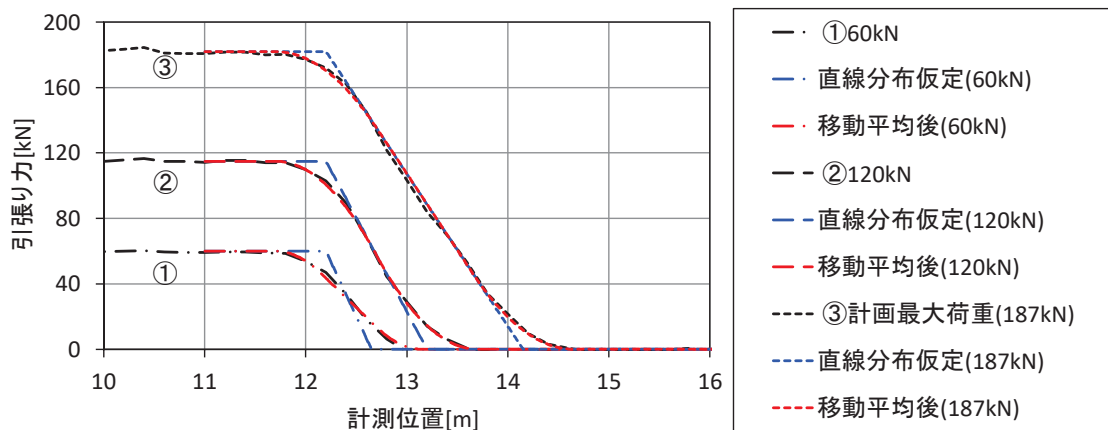


図 5.3-7 本来の引張り力分布の推定結果

図 5.3-7 より、実際のグラウンドアンカーにおいても、アンカー体内部の直線分布を仮定することによって、移動平均後の分布が計測結果と良く一致していることが確認できる。仮定した分布形状から、定着長と平均付着応力度を推定した結果を表 5.3-1 に示す。ただし、ECF タイプの 1S15.2 テンドンの周長として、47.7mm を用いた。

表 5.3-1 定着長と平均付着応力度の推定結果

作用引張り力 kN	定着長 m	平均付着応力度 N/mm ²
60	0.45	2.80
120	1.00	2.41
187	1.95	1.96

この結果は、表 5.2-5 に示したアンカー体引抜け模擬試験における健全部の平均付着応力度 3.09N/mm² と比較して小さく、また作用引張り力が大きくなるにつれて付着応力度が小さくなっていることが分かる。これは、試験で定着地盤を模擬したコンクリートブロックと比較して、実際の定着地盤の方がアンカー体との間のすべりが生じ易かったためと考えられる。ただし、設計で用いられる許容付着応力度^{5.1)} (ランク A のアンカー：1.0N/mm², ランク B のアンカー：1.5 N/mm²) に対しては十分大きく、健全に定着されていることが確認できる。

(3) 施工後の再計測結果

緊張後 6 ヶ月および 18 ヶ月経過後に、アンカー頭部から延長して残置した再計測用コネクタに計測器を接続し、再計測を行った。再計測結果の一例を、定着直後の計測結果と併せて図 5.3-8 に示す。図中には、グラウンドアンカー維持管理マニュアル^{5.2)}で健全な状態と判定される上限値（設計アンカー力）と下限値（定着時引張り力の 80%以上）を示した。ここで、下限値の計算に用いる「定着時引張り力」には、定着直後の計測結果の内、アンカー頭部からの長さ 2m までの範囲の平均値を用いた。

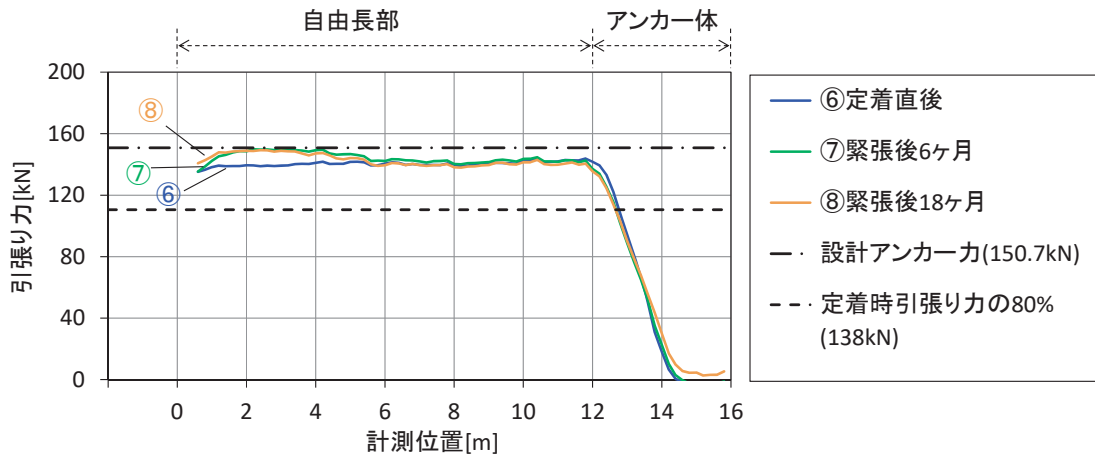


図 5.3-8 赤谷地区溪流保全工他工事における再計測結果 (A15)

緊張後 6 ヶ月経過後の再計測結果を見ると、自由長部において、定着直後と比較して最大で 1 割程度残存引張り力が増加していることが確認できる。この時、引張り力増加後の自由長部内部の分布の傾きから算定される摩擦力は、約 2.3kN/m であった。またアンカー頭部の背面においてはほとんど変動が見られないことも特徴的であった。この原因としては、当該アンカーの施工完了後に行われた施工（下段側の切土など）による影響などが考えられるが、この 6 ヶ月の間には計測を行っておらず、いつ変動が生じたのか、その時グラウンドアンカーや地山にどのような挙動が生じていたのかを推定することは難しい。今後、次項で述べるような常時観測を行っていくことによって、変動の原因となった地山やグラウンドアンカーの挙動の推定が容易になることが期待される。

なお、自由長部における上記の変動量は、グラウンドアンカー維持管理マニュアルで健全な状態と判定される範囲内であり、またアンカー体内部においてはほとんど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と評価できる。緊張後 18 ヶ月経過後の計測結果は、6 ヶ月経過時点とほぼ同様な分布を示しており、この間には大きな変化が生じていないことも確認された。

以上のように、実際のグラウンドアンカー工事においても、本計測技術を用いてテンドン全長にわたる引張り力の分布を計測でき、計測結果からアンカー体の健全性を評価可能であることが確認できた。また、施工時に光ファイバを斜面から離れた安全な場所まで延長しておくことにより、随時の再計測を容易に実施可能であることが確認された。なお、今回対象としたグラウンドアンカーにおいては、本計測技術の計測精度、約 $\pm 50 \mu$ は、定着時引張り力の約 $\pm 1\%$ に相当する。このため、対象としたアンカーの健全性を評価する上では十分な精度を有していると言える。ただし、アンカー容量に対して 20% 程度以下など非常に小さな設計引張り力となっている場合には、計測誤差の比率が相対的に大きくなるため注意が必要である。

5.3.3 仮設用グラウンドアンカー工への常時計測適用試験

前項で述べたように、本技術を用いた常時計測を行うことによって、残存引張り力分布に変動が生じたタイミングを明らかにし、変動の原因となった地山やグラウンドアンカーの挙動の推定が容易になることが期待される。また、掘削工事における仮設用グラウンドアンカーなどにおいては、常時計測を行うことによって施工中の安全管理を高度化していくことも期待できる。そこで、仮設用グラウンドアンカー tendon を対象に、本計測技術による常時計測の適用試験を実施した。

(1) 計測の概要

建物基礎掘削工事における仮設用グラウンドアンカー tendon に光ファイバ組込み式 PC 鋼より線を適用し、引張り力分布の計測を行った。

適用対象としたのは、土留め支保工として使用した仮設用グラウンドアンカー7本で、いずれも ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線9本を用いる 9S15.2 マルチストランド tendon である。自由長部の長さは 11.0～31.0m、アンカー体長さは全て 8.5m である。計測対象とした7本のグラウンドアンカーのうち同一断面に配置された5本の配置図を、**図 5.3-9** に示す。

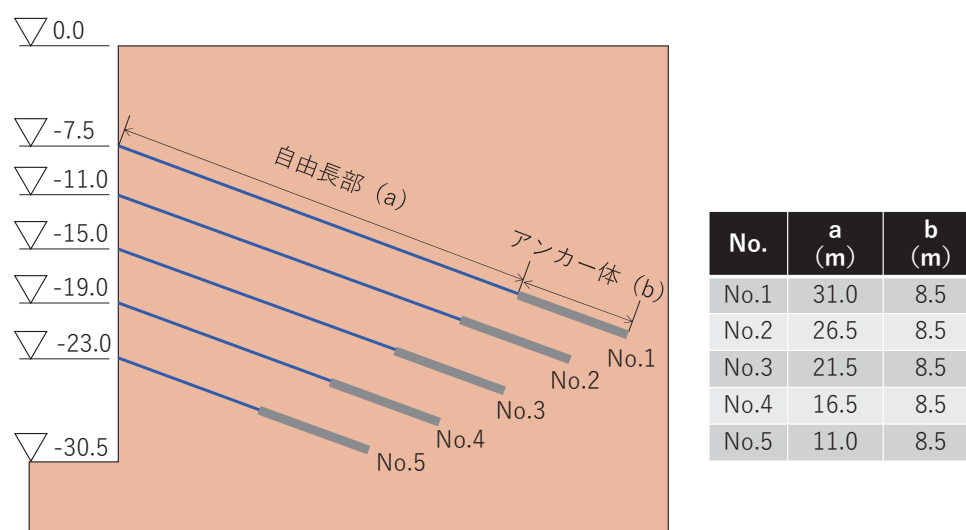


図 5.3-9 基礎掘削工事における適用対象アンカー
(全7本のうち、同一断面に配置された5本)

本工事では、グラウンドアンカーの施工完了後、残存引張り力分布の常時計測を行った。緊張・定着後にアンカー頭部から延長した光ファイバを、複数本の光ファイバを切替え可能な「光ファイバ切替装置」を介して計測器に接続することによって、1台の計測器を用いて7本のグラウンドアンカーの計測を行った。計測システムの概要図を**図 5.3-10**に、光ファイバ切替装置および計測器の接続状況を**図 5.3-11**に示す。

計測は、対象グラウンドアンカーの施工直後に開始し、2019年9月19日～2020年1月6日までの期間、1時間に1回の頻度で行った。

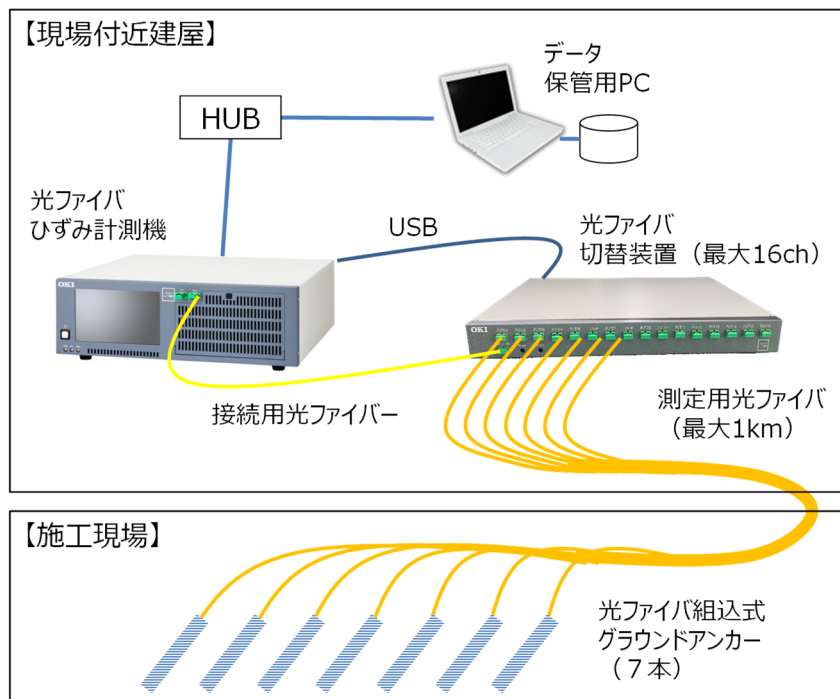


図 5.3-10 常時計測システムの概要

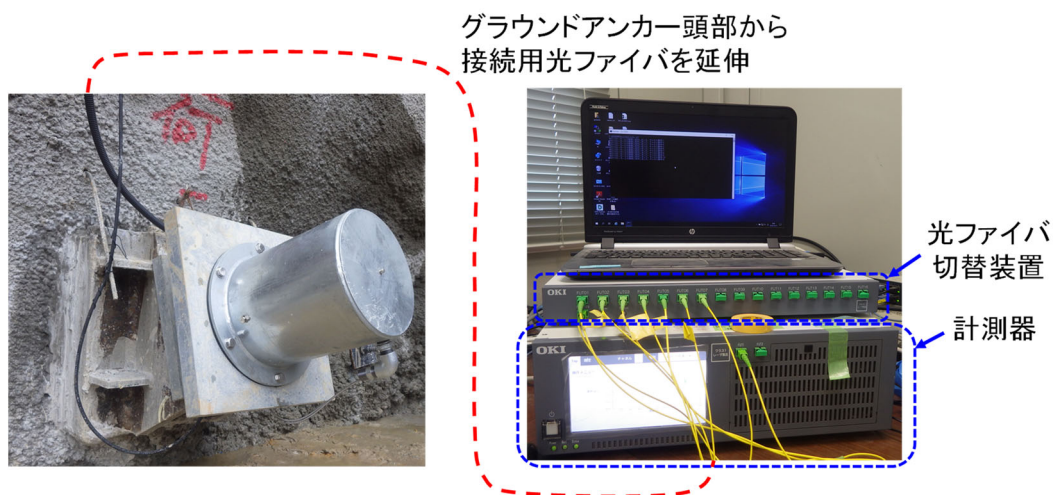


図 5.3-11 光ファイバ切替装置および計測器の接続状況

(2) 常時計測結果

常時計測結果の一例として、自由長部の長さ 11.0m のグラウンドアンカー (No.5) におけ

る、約半月ごとの計測結果を図 5.3-12 に示す。

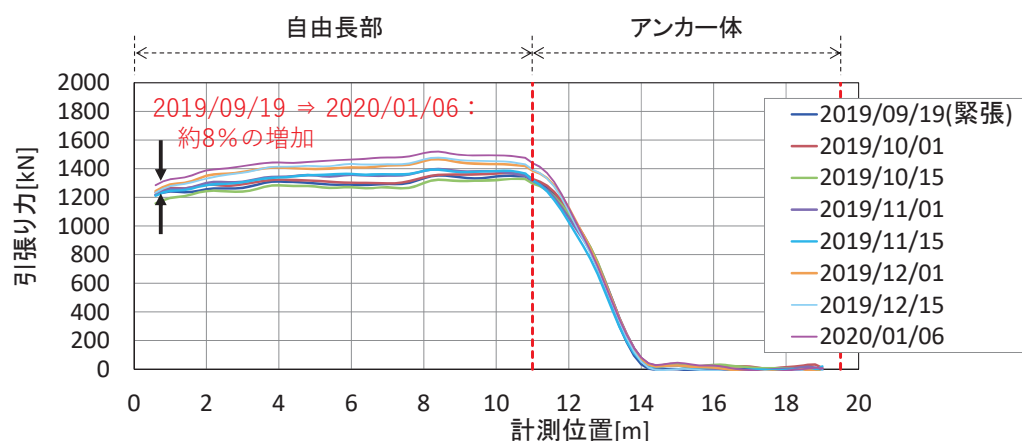


図 5.3-12 基礎掘削工事における仮設用グラウンドアンカーの計測結果 (No. 5)

自由長部における残存引張り力は、2019年9月19日の緊張・定着後、約1ヶ月の間に若干の減少が見られるが、その後増加が生じ、2020年1月初めの時点で緊張時と比較して約8%の増加が確認できる。一方、アンカー体内部の残存引張り力には大きな変化は見られない。これらの結果から、アンカー体は地盤内に健全に定着されており、自由長部における引張り力の増加は、掘削の進展に伴って内空側の土圧が減少し、土留め支保工であるグラウンドアンカーの負担分が増加したことによるものと判断できる。

本工事では、自動的に蓄積される常時計測データを、定期的に確認するシステムとしている。今後、異常を判定するための閾値を設定することによって自動で警報を発するなどの機能を付与することによって、施工の安全や品質に支障を来すような大きな変状が生じる前に予防保全的な対策を講じることが可能となると考えられる。

以上のように、光ファイバ切替装置などを用いることで、本計測技術による常時計測が可能であることが確認された。今後、掘削工事中の安全管理や法面補強用グラウンドアンカーなどの維持管理をより高度化していくことも期待できる。

5.4 まとめ

本章では、光ファイバを用いた張力分布計測技術をグラウンドアンカーへ適用することを想定した室内試験、および実際のグラウンドアンカー工事へ適用した結果について述べた。本章のまとめを以下に示す。

- 1) 本計測技術を用いることでグラウンドアンカーテンドン全長にわたる引張り力分布の計測が可能となり、テンドンやアンカー体の引抜けによるアンカー体内部の引張り力分布の変化、すべり面の発生による局所的なひずみの増加を検知し、これ

らの変状の推定が可能となることが示唆された。

- 2) 実際のグラウンドアンカー工事においても、テンドン全長にわたる引張り力の分布を計測でき、その計測結果から、施工時および供用期間中のアンカー体の健全性を評価可能であることが確認された。
- 3) 空間分解能の低い BOTDR 方式による計測結果からであっても、アンカー体内部における本来の引張り力分布を推定することによって、平均付着応力度を推定できる可能性が示唆された。
- 4) 光ファイバ切換装置などを用いることにより、グラウンドアンカーの残存引張り力分布の常時計測が可能となる。計測結果から異常を判定する閾値を設定することによって自動で警報を発するなど、工事中の安全管理や重要構造物の維持管理をより高度化していくことも期待される。

5.5 第 5 章の参考文献

- 5.1) 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，2012.
- 5.2) 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.
- 5.3) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーのリフトオフ試験方法に関する検討，土木学会論文集 C，Vol.67，No.4，pp.558-568，2011.
- 5.4) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーの残存引張り力のモニタリング手法に関する検討，土木学会論文集 C，Vol.68，No.3，pp.547-563，2012.
- 5.5) 玉井真一，島弘，出雲淳一，岡村甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集，第 378 号，V-6，pp.239-247，1987.2.

第6章 結論および今後の課題

6.1 結論

本研究では、全長にわたるひずみ分布を計測することが可能な光ファイバセンサを応用し、PC鋼より線の張力分布を計測可能な技術を開発した。各種室内試験によって本技術の計測性能を確認した後、実際の工事に適用して本計測技術の有用性を確認した。本論文の結論を以下にまとめる。

第1章では、本研究の背景としてPC構造物およびグラウンドアンカーの緊張管理・維持管理における課題を整理し、本研究の目的および本論文の構成を明示した。

第2章では、PC構造物およびグラウンドアンカーの緊張管理・維持管理に関する既往技術や、光ファイバを用いたひずみ計測に関する既往技術および研究事例を紹介し、本研究の位置付けを示した。

第3章では、本研究で開発した「光ファイバを用いた張力分布計測技術」について、開発時の課題やその解決方法を概説すると共に、基本的な計測性能を確認するための室内試験を実施し、以下の結論を得た。

- ・裸線タイプおよびECFタイプの2種類の光ファイバ組込み式PC鋼より線（7本より、S15.2）を開発した。いずれも通常と同じ手順で施工可能であり、くさび定着を行っても光ファイバを損傷させずに計測が可能である。またECFタイプにおいて、光ファイバを組み込むことによってもエポキシ被覆と鋼より線との一体性は阻害されず、通常のECF鋼より線と同等の防食性能を有する。
- ・BOCDA方式またはBOTDR方式による計測結果に対し、必要に応じて温度分布計測結果などを用いた温度補正を行い、見かけの弾性係数を用いて張力に換算して張力分布を評価することが可能である。
- ・裸線タイプおよびECFタイプのいずれも、光ファイバはPC鋼より線に接着され、両者が滑らずに一体として挙動する。
- ・実際の構造物で想定される長さや曲線配置された場合でも、シース管との間の摩擦によるロスを含め、実務上十分な精度で張力分布を評価可能である。
- ・光ファイバは高い耐久性を有する材料であり、さらに、再計測用の光ファイバを安全な場所まで延長しておくことにより、随時の再計測を容易に行うことが可能になるなど、PC構造物やグラウンドアンカーの維持管理のための計測技術に適した材料である。

第6章 結論および今後の課題

第4章では、本計測技術をPC構造物へ適用することを想定し、緊張管理・維持管理への適用性を検証した室内試験、および実際のPC橋梁上部工工事への適用試験を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- ・PCケーブル周囲にグラウト充填されたPC部材内部においても、光ファイバはPC鋼より線と一体として挙動し、外力の作用によるひずみや張力の変動をPC鋼より線の降伏後まで計測可能である。
- ・本計測技術を用いてPCケーブル全長にわたるひずみ分布の変動を評価することによって、従来技術では不可能であった、任意の位置におけるPCケーブル破断などの異常およびその影響範囲を検知できる可能性が示された。
- ・実際のPC橋梁上部工工事の緊張管理に本計測技術を用いることにより、従来は間接的にまたはセンサを設置した特定の位置においてのみ確認していた、設計張力以上の張力が導入されていることを、全断面において直接確認可能であることが確認された。また、計測結果を用いて、PCケーブルとシース管との間の摩擦係数を評価できる可能性が示された。
- ・PC鋼より線を複数本束ねたマルチストランドケーブルにおいても、中心に近いPC鋼より線1本に光ファイバを組み込み計測することで、実務上十分な精度で計測可能である。ただし、ケーブル長が極端に短い場合には、緊張前のPC鋼より線ごとのたわみ量の差の影響によって計測誤差が大きくなる可能性があるため、注意が必要である。
- ・PC構造物の維持管理に本計測技術を用いることで、施工終了後から長期にわたる張力の変動を評価できる可能性が示された。また、経年的な変動の評価に加え、例えば地震発生直後の緊急点検によって張力変動が想定範囲内であることを確認できれば、橋梁の早期供用再開の判断材料とできるなど、合理的な維持管理への貢献が期待される。

第5章では、本計測技術をグラウンドアンカーへ適用することを想定し、緊張管理・維持管理への適用性を検証した室内試験、および実際のグラウンドアンカー工事への適用試験を行い、以下の結論を得た。

- ・本計測技術を用いることでグラウンドアンカー tendon 全長にわたる引張り力分布を計測でき、供用期間中の異常の発生を検知可能となる。さらに、従来技術では困難であった、異常の要因である地中の変状を推定可能となることが示唆された。
- ・実際のグラウンドアンカー工の緊張管理や維持管理に本計測技術を用いることで、tendon 全長にわたる引張り力の分布を計測でき、その計測結果から、施工時および供用期間中のアンカー体の健全性を評価可能であることが確認された。
- ・空間分解能の低いBOTDR方式による計測結果からであっても、アンカー体内部における本来の引張り力分布を推定することによって、平均付着応力度を推定できる可能性が示唆された。

- ・光ファイバ切換装置などを用いることにより、グラウンドアンカーの残存引張り力分布の常時計測が可能となる。計測結果から異常を判定する閾値を設定することによって自動で警報を発するなど、工事中の安全管理や重要構造物の維持管理をより高度化していくことも期待される。

6.2 今後の課題

本研究により、光ファイバを用いた張力計測技術は、PC 構造物およびグラウンドアンカーの緊張管理において、設計上必要な張力以上の張力が導入されたことやアンカー体の健全性などを直接確認可能な技術であることが確認された。また、PC ケーブルの破断の有無や影響範囲が検知でき、グラウンドアンカーにおける地中の変状を推定できる可能性が示されるなど、維持管理への有用性も明らかとなった。

しかし、本技術において、長期間経過後の再計測結果に対して温度補正を行う際の補正係数は、ECF タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線に対してのみ行った温度影響確認試験結果に基づいて得られた値を使用している。今後、より正確な温度補正を行うためには、裸線タイプの光ファイバ組込み式 PC 鋼より線に対しても同試験を行い、補正係数を確認する必要がある。また、使用する材料や光ファイバの組込み方法などを大きく変更する場合にも、再度試験を行い、温度による影響の違いを確認していく必要がある。また、PC 鋼より線への光ファイバの組込みに使用しているエポキシ樹脂に関して、近年、その強度が周囲の水分の影響を受けるといった報告もなされている。長期的な計測性能を担保するためには、同材料に関する今後の動向を注視するとともに、必要に応じて耐久性の検証を行うことが求められる。

また現時点では、実際の構造物における再計測の実施は施工から 2 年程度の期間が最長であり、供用期間中の長期にわたり本計測技術が使用可能であるかどうかは未確認である。今後も、適用現場における継続した再計測を実施し、本計測技術が長期にわたり継続して使用可能であることを引き続き検証していく必要がある。さらに、実際の構造物において何らかの異常が検知された場合には、本計測技術による計測結果とその他の計測技術や目視観察結果などとの比較を行い、実構造物における挙動と計測結果との対応を確認していくこともまた必要である。

PC 鋼より線への光ファイバの組み込み技術としては、現状実用化された鋼より線のサイズは限られている。さらに、PC ケーブルの定着機構としては、本研究で対象としたくさび方式が一般的に広く用いられているが、グラウンドアンカー頭部におけるテンドンの定着機構としては、くさび方式の他に、テンドンに圧着した鋼管を介してナット定着する圧着マシオン方式も多く用いられている。本技術の適用先を今後より拡大し、各種構造物の緊張管理・維持管理の高度化に貢献していくためには、様々なサイズの PC 鋼より線への光ファイバ組込み技術や、くさび方式以外の定着機構に対応可能な製作・施工技術などを確立していく必要がある。また、グラウンドアンカーには、本研究で検討や適用の対象とした摩擦型

第6章 結論および今後の課題

グラウンドアンカーの他に支圧型や複合型がある。これらは、それぞれ地盤への定着機構が異なるため、特にアンカー体内部での引張り力分布が異なることが想定される。各種形式のグラウンドアンカーにおいても、第5章で述べたような本計測技術の優位性が期待できるが、具体的にどのような変状やそれに伴う引張り力分布の変化が想定されるかなど、今後詳細な検討を行い、適用先を拡大していくことが望ましい。

光ファイバを用いたひずみ分布計測技術は、2020年現在も、高精度化や高分解能化、高速化など、より高性能な計測器の開発が進められている。本研究で使用したBOCDA方式、BOTDR方式を含め、これらの計測器は一般的に通信用に用いられる光ファイバを用いたものであり、PCケーブルやグラウンドアンカーテンドンとして、施工時に光ファイバ組込み式PC鋼より線を用いておけば、今後開発されるより高性能な計測器を維持管理において使用できる可能性もある。今後も、新たな計測器の性能評価などを適宜行っていくことにより、より高度な緊張管理・維持管理手法としてアップデートさせていくことが必要である。

発表論文一覧

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 (材料・コンクリート構造), Vol.76, No.1, pp.41-54, 2020.

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 (構造・地震工学), Vol.76, No.1, pp.126-138, 2020.

大窪 一正, 今井 道男, 山本 徹, 山野辺 慎一, 曾我部 直樹, 横田 祐起, 千桐 一芳, 小林 俊之, 松原 喜之, 及川 雅司, 中上 晋志: 光ファイバを用いた PC 緊張力変動の計測, 土木学会第 71 回年次学術講演会, pp.1163-1164, 2016.

大窪 一正, 今井 道男, 千桐 一芳, 中上 晋志: 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.

大窪 一正, 今井 道男, 中上 晋志, 早川 道洋: 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, 第 26 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.217-222, 2017.

大窪 一正, 今井 道男, 戸邊 勇人, 江口 健治, 松本 健太郎, 及川 雅司, 中上 晋志, 早川 道洋: 光ファイバを用いた PC 緊張力計測技術のグラウンドアンカーへの適用, 土木学会第 73 回年次学術講演会, pp.817-818, 2018.

Kazumasa Okubo, Michio Imai, Naoki Sogabe, Shinichi Yamanobe, Masashi Oikawa, Shinji Nakaue, Kazuyoshi Chikiri, Toshiyuki Kobayashi and Junichiro Niwa: Development and Application of the Measuring Method for PC-Tensioning Force by Optical Fiber, Proceedings of the fib Symposium 2019, pp.1194-1201, 2019.

Kazumasa Okubo, Michio Imai, Naoki Sogabe, Shinichi Yamanobe, Masashi Oikawa, Shinji Nakaue, Kazuyoshi Chikiri, Toshiyuki Kobayashi and Junichiro Niwa: Monitoring Method for the Distribution of Prestressing Force by Optical Fiber, Proceedings of the IABMAS2020, 2021. (掲載予定)

謝辞

本論文は、筆者が鹿島建設（株）技術研究所において2013年以来取り組んできた研究開発の成果を取り纏めたものであります。研究の推進および論文の執筆に際して、多くの方々からご指導やご協力を賜りました。

東京工業大学大学院 二羽 淳一郎教授には、研究内容のみならず、学位論文を執筆するにあたっての心構えから論文の構成、内容、体裁に至るまで、細部にわたって懇切丁寧なご指導・ご鞭撻を賜りました。心より感謝し、深く御礼申し上げます。また、学位論文の審査員を務めて頂きました、東京工業大学大学院 岩波 光保教授、竹村 次朗准教授、佐々木 栄一准教授、千々和 伸浩准教授には、的確なご指摘や貴重なご意見を多数頂きました。厚く御礼申し上げます。

鹿島建設（株）技術研究所 今井上席研究員、曾我部上席研究員を始め、社内開発関係者の皆様には、多くのご協力を頂きました。また本研究は、ヒエン電工（株）様、住友電気工業（株）様、（株）エスイー様との共同研究として行っており、各社ご担当の皆様のご協力・ご尽力無くして、本研究開発は成し得ませんでした。さらには、国土交通省東北地方整備局、近畿地方整備局のご関係の皆様、および各適用現場関係各位には、実際の工事現場における貴重な適用試験の機会を与えて頂きました。心より御礼申し上げます。

以前に在籍されていた方々を含め、鹿島建設（株）技術研究所 土木構造グループの皆様、および東京工業大学 二羽研究室の皆様には、折に触れて本研究へのご意見・ご指導を頂いたほか、多岐にわたって私の研究活動を支えて頂きました。誠にありがとうございました。

また、社内の上司・先輩・同僚、友人・家族を始め、公私にわたり私を支えて下さった全ての方々に感謝申し上げます。

最後に、私を研究者の道に導いて下さり、学部・大学院修士課程在学時より多くのご指導・ご鞭撻を賜りました、京都大学大学院 松本 勝教授（当時。現、名誉教授）、白土 博通助教授（当時。後、教授。2018年5月ご逝去）、八木 知己助手（当時。現、教授）に、感謝の意を表させていただきます。ありがとうございました。

2020年10月
大窪 一正