

プレストレストコンクリート部材への分布型光ファイバ計測手法の適用性に関する研究

Study on Applicability of Distributed Optical Fiber Measurement Method to Prestressed Concrete Members

小 嶋 進太郎 曾我部 直 樹 平 陽 兵

要 約

プレストレストコンクリート (PC) 部材における外力作用時及び長期的な応力、ひずみの変化の計測技術として、高耐久で構造全体のひずみ分布を計測可能な分布型光ファイバセンサに着目し、PC 部材の載荷実験及び屋外長期暴露実験において同センサによる計測を実施した。その結果、PC 部材に外力が作用した際の曲げ挙動や長期的なひずみの変動を把握する手法として同センサによる計測が有効であることを確認した。また、得られたひずみから PC 部材の有効プレストレスを評価する方法について検討した結果、設置環境における影響を考慮する必要があることを示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 分布型光ファイバ計測手法の概要
- III. 実験概要と計測方法
- IV. 光ファイバによるひずみ計測結果
- V. 有効プレストレスの評価
- VI. おわりに

I. はじめに

橋梁などの長大なプレストレストコンクリート (PC) 部材の維持管理では、外力や経年によるプレストレスの変化やひび割れを漏れなく把握することが重要であり、そのためには PC 部材全長のひずみ分布の変動を計測することが有効である。著者らは、この手段として、高耐久で全長のひずみ分布を計測できる分布型光ファイバセンサを用いた計測技術に着目し、PC 部材への適用性について検討を行っている。

分布型光ファイバ計測技術には様々な計測方式が提案されているが、インフラを対象とした従来の計測では、主に BOTDR 方式が使われてきた^{1),2)}。この方式でのひずみの計測精度は \pm 数十～百 μ 程度、最小空間分解能は 1m 程度であり、ひずみ分布の変化を定性的に評価して、異常の有無を検知したりすることには有効であったが、例えば、数 μ 程度のひずみの変動やひび割れの検知など、より細かな挙動を把握することは困難であった。一方で、光信号の解析・計測技術の進歩によって BOTDR 方式よりも高分解能かつ高精度なひずみ

分布計測が可能な TW-COTDR 方式³⁾ や PPP-BOTDA 方式⁴⁾ などの計測技術が実用化されてきている。

近年、実用化が進んできたこれらの分布型光ファイバ計測技術を PC 部材へ適用することで、外力が作用した際のひび割れの検知やひずみの変化、乾燥収縮・クリープに伴う長期的なひずみの変動など、PC 部材の維持管理において重要となるデータを計測できる可能性がある。そこで、本研究では TW-COTDR 方式と PPP-BOTDA 方式を用いた分布型光ファイバ計測によって、PC 梁試験体を対象とした 4 点曲げ載荷実験及び屋外長期暴露時のひずみ計測を実施し、PC 部材を対象とした本計測技術の有効性を検証した。さらに、光ファイバ計測で得られた PC 部材のひずみから収縮ひずみとクリープひずみを分離し、有効プレストレスの変動を評価する方法について検討した。

II. 分布型光ファイバ計測手法の概要

分布型光ファイバ計測は、光ファイバ内に光を入射した時に生じる光ファイバ内の後方散乱光を利用している。前述の計測方式は、入射光やひずみの評価に用いる後方散乱光の種類により分類されている (Table 1)。TW-COTDR 方式は、ほかの散乱光に比べて圧倒的に光強度の強いレイリー散乱光を活用した方法であり、2cm の最小空間分解能と、ひずみゲージと同等の $\pm 1\mu$ の計測精度が実現されている。一方、PPP-BOTDA 方式は、最小空間分解能が 2cm で計測精度が $\pm 25\mu$ であり、TW-COTDR 方式よりも精度の点で若干劣るものの、計

キーワード : 分布型光ファイバセンサ, PC 部材, 維持管理, ひずみ, モニタリング

Keywords : distributed optical fiber sensor, PC members, maintenance, strain, monitoring

測ステップ間において数千～数万 μ の大きなひずみ変化が生じる場合でも計測が可能である。なお、これらの計測方式はいずれも計測対象に設置される光ファイバセンサ自体は同一のもので良いため、目的に応じて計測器や計測方式を切り替えて計測することができる。

となるように、ポストテンション方式で180kN/本の緊張力を導入した後、PC鋼材の周囲にグラウト材を充填した。No.1試験体に対しては、等曲げ区間が800mm、せん断スパンが1,500mmとなる条件で4点曲げによる曲げ荷重を行った。荷重はTable 2に示すステップで荷重と除荷を繰り返しながら

Ⅲ. 実験概要と計測方法

計測の対象としたPC梁試験体は同一の諸元で製作した2体であり、外力が作用した際の挙動の把握を目的としたNo.1試験体と、長期的なひずみの変動の評価を目的としたNo.2試験体である。Fig.1に試験体の形状を示す。PC鋼材は3本のPC鋼より線(1S15.2)を下縁から120mmの位置に呼び径35mmのシースを用いて直線配置した。自重や曲げ荷重に対して引張線となる下面のコンクリートの応力度が6.0N/mm²

Table 1 各計測方式の概要及び性能

(Overview and Performance of Each Measurement Method)

計測方式	TW-COTDR ³⁾	PPP-BOTDA ⁴⁾	BOTDR
後方散乱光の種類	レイリー	ブリルアン	ブリルアン
計測器との接続	片端のみ	両端	片端のみ
最小空間分解能	2cm	2cm	1m程度
ひずみ計測精度	$\pm 1 \mu$	$\pm 25 \mu$	\pm 数十～百 μ
計測ステップ間での許容ひずみ変化量	数百 μ	数千～数万 μ	

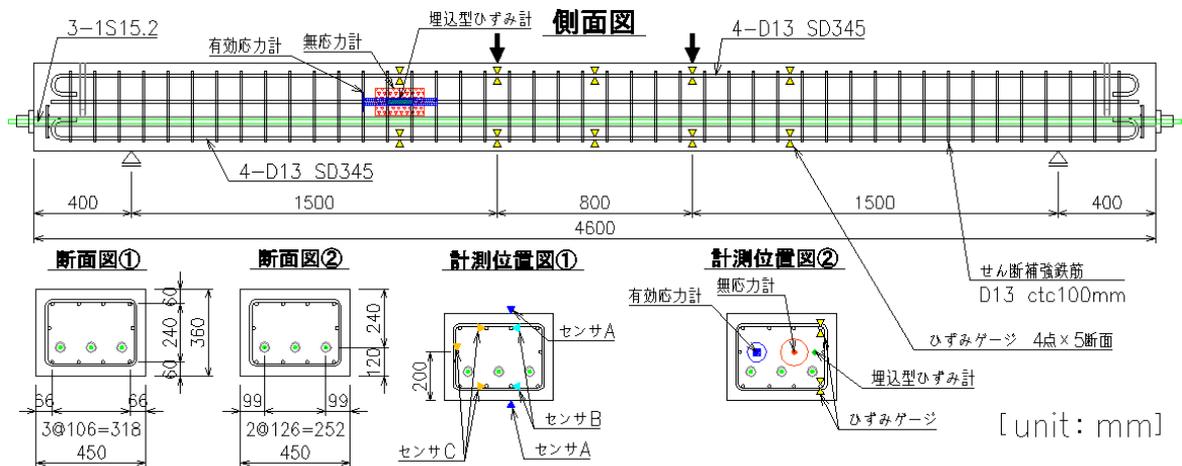


Fig.1 PC梁試験体の形状及び計測位置

(Shape and Measurement Position of PC Beam Specimen)

Table 2 荷重ステップ (Loading Step)

荷重ステップ	荷重 (kN)
1 下縁応力度 0N/mm ² (計算値)	76
2 ひび割れ発生荷重(計算値)	101
3 ひび割れ目視確認	115
4 引張側主鉄筋降伏(実測値)	224

Table 3 光ファイバセンサの種類と設置の仕様 (Types and Installation Specifications of Fiber Optic Sensor)

計測名称	使用した光ファイバセンサの種類	設置箇所	設置方法
センサ A	光ファイバ心線 ϕ 0.9mm	コンクリート表面(上下面)	接着剤で固定
センサ B		上側鉄筋: 下縁から 300mm 下側鉄筋: 下縁から 60mm	鉄筋表面に接着剤で固定
センサ C	光ファイバ心線+ゴム被覆 \square 4.7mm \times 1.7mm	段取り鉄筋: 下縁から 200mm 下側鉄筋: 下縁から 60mm	結束バンドで鉄筋に間欠固定

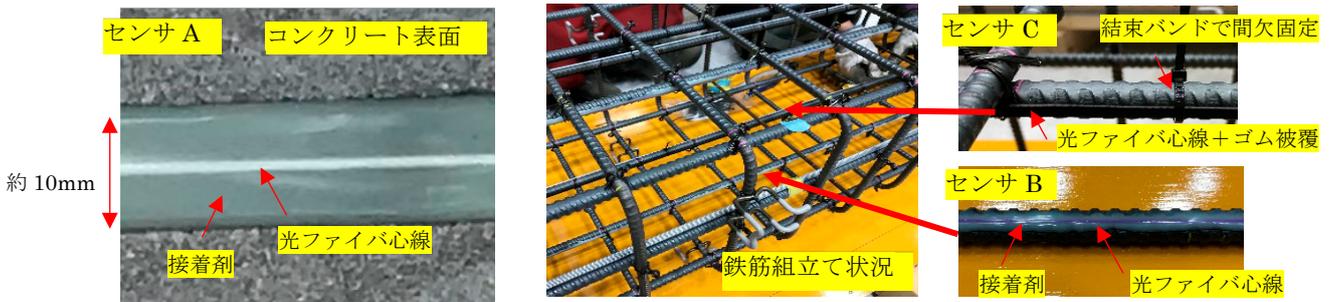


Photo 1 光ファイバセンサの設置状況 (Installation Status of Optical Fiber Sensors)

増加させた。

光ファイバセンサは Table 3 に示すように、コンクリート表面及び内部に 3 種類の方法で設置した。Photo 1 に各方法の設置状況を示す。センサ A は光ファイバ心線をコンクリート表面に接着剤で固定し、センサ B はセンサ A と同じ光ファイバ心線を鉄筋表面に接着剤で固定した。センサ C については光ファイバ心線を表面に凹凸を有するゴムで被覆したケーブルを結束バンドで鉄筋に間欠固定し、附着によりコンクリートと一体化させる方法とした。光ファイバ計測方式は、TW-COTDR 方式（以下、R 方式）を基本としたが、No.1 試験体の荷重実験時には計測ステップ間における大きなひずみ変化にも追従可能な PPP-BOTDA 方式（以下、B 方式）も併用した。両方式ともに、計測点を 5cm 間隔、空間分解能を 10cm とした。なお、試験体表面には検長 60mm のひずみゲージ、軸方向鉄筋には検長 2mm のひずみゲージも設置した。また、下縁から 200mm の高さには標点距離 10cm の測温機能付き埋込型ひずみ計と無応力計⁵⁾（測温機能付き埋込型ひずみ計を容器に入れて周囲からの応力の影響をなくし、コンクリートの収縮によるひずみのみを計測するもの）、有効応力計⁵⁾をそれぞれ設置した（Fig.1）。また、No.1 試験体の荷重実験時にはたわみを変位計によって計測した。

Table 4 に試験体の製作履歴とコンクリートの強度試験結果を示す。材齢 27 日に PC 緊張を実施し、No.1 試験体は材齢 84 日に 4 点曲げ荷重実験を実施した。また、No.2 試験体については、材齢 93 日に屋内から屋外の暴露環境下へ搬出した。なお、暴露試験は東京都調布市で実施した。

IV. 光ファイバによるひずみ計測結果

1. プレストレス導入時の結果（No.1 試験体）

Fig.2 に光ファイバセンサとひずみゲージによって得られたコンクリート下面と、下側鉄筋位置におけるひずみ分布を示す。なお、図中には緊張時のコンクリートのヤング係数を用いて算出したプレストレス導入に伴う圧縮ひずみの計算値も併せて示す。光ファイバセンサによって試験体の軸方向に連続的なひずみ分布が計測できており、その大きさは設置箇所や方法によらず、いずれも計算値やひずみゲージによる計測結果とほぼ一致していた。今回採用した設置方法、計測方式によって、プレストレス導入時における PC 部材のひずみの変化を精度良く計測できることを確認した。

2. 荷重実験時の結果（No.1 試験体）

光ファイバ計測は各荷重ステップで適宜実施したが、本稿で示すひずみ分布およびたわみ分布は、Fig.3 の荷重-変位関係における下縁コンクリートがひび割れ発生強度に達する時の荷重の計算値 101kN、ひび割れを目視確認した 115kN、及び引張側の主鉄筋が降伏ひずみに達した 224kN とする。なお、ひび割れを目視確認した荷重 115kN 以降では、ひび割れ

Table 4 試験体の製作履歴とコンクリートの強度試験結果 (Production History of Specimens and Strength Test Results of Concrete)

日時	材齢	製作履歴	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
2021/3/2	0	コンクリート打込み	—	—
2021/3/8	6	脱枠：乾燥開始	—	—
2021/3/29	27	プレストレス導入	43.0	28.3
2021/3/30	28	グラウト充填	43.1	30.0
2021/5/25	84	No.1 荷重実験	49.7	31.5
2021/6/3	93	No.2 屋外暴露開始	—	—

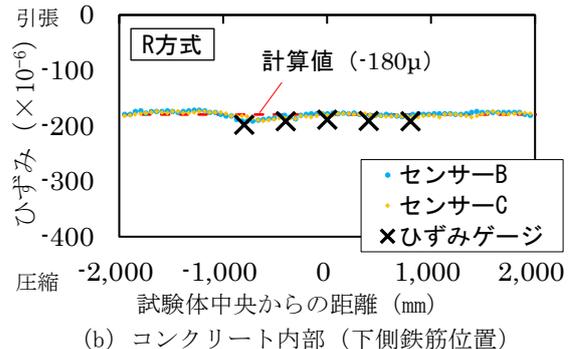
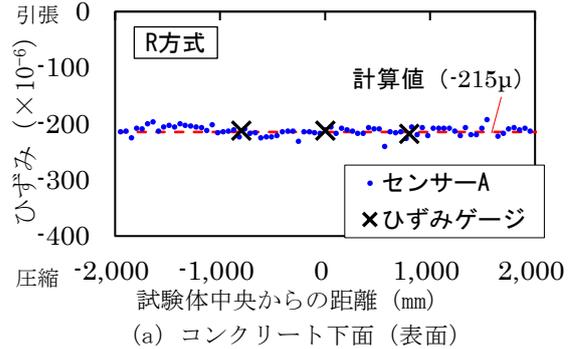


Fig.2 プレストレス導入後のひずみ分布 (Strain Distribution after Prestressing)

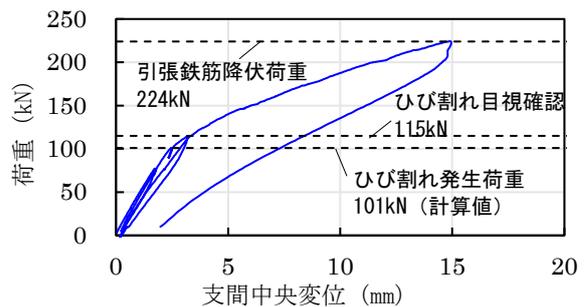


Fig.3 荷重-変位関係 (Load-displacement Relationship)

発生位置においてひずみ変化量が大きくなり、R 方式における計測ステップ間の許容ひずみ変化量を超過した。したがって、荷重 115kN 以降の光ファイバ計測結果は B 方式のみを示す。

Fig.4 に、101kN 時点におけるコンクリート表面(センサ A)と主鉄筋(センサ B) の R 方式によって得られたひずみ分布

を示す。ひずみは断面の上下における主鉄筋とコンクリート表面の値を示しており、縦軸を反転させている。また、鉄筋のひずみゲージの値も併せて示す。主鉄筋に接着したセンサ B による計測値は、曲げモーメント分布に応じた上下の鉄筋ひずみを部材軸全体にわたって捉えており、ひずみゲージによる計測値とも一致した。コンクリート表面に接着したセンサ A も概ね曲げモーメントに応じた分布となっているが、引張側の等曲げ区間内で局所的に大きなひずみが確認された。そこで、等曲げ区間近傍に着目したセンサ A のひずみ分布を Fig.5 に示す。図中には、荷重 101kN におけるコンクリート表面のひずみ分布と局所的にひずみが増加した点を矢印で示すとともに、ひび割れをはじめて目視確認した 115kN のひび割れ状況を併せて示す。ひび割れ発生荷重の計算値に相当する 101kN 時に計測された局所的なひずみ変化点は、115kN 時に目視観察されたひび割れ発生位置と一致している。このことから、101kN 時に計測された局所的な変化は、同時点では目視で確認できなかったひび割れ、あるいはその予兆を捉えたものと推察される。

Fig.6 にひずみ分布から算出した変位分布を示す。変位は上下の主鉄筋のひずみ（センサ B）から曲率を算出し、これを両側の支点で変位がゼロになるような境界条件を設定して 2 階積分して求めた。同図には荷重 101kN 時点の R 方式・B 方式の結果と、引張鉄筋の降伏荷重に相当する荷重 224kN 時点の B 方式の結果を示す。算出した変位分布は、ひび割れ発生以降も含め変位計による計測値と一致していた。

以上より、R 方式と B 方式を併用することにより、外力が作用した時のひずみ分布の変化を精度良く計測でき、その結果に基づいてひび割れの発生の検知やたわみの評価が可能であることを確認した。

3. 屋外暴露環境における長期計測の結果 (No.2 試験体)

Fig.7 に埋込型ひずみ計、及び試験体断面内の同じ高さに設置したセンサ C による計測値のプレストレス導入直後からの変動を示す。なお、光ファイバセンサと埋込型ひずみ計で計測したひずみは、埋込型ひずみ計に内蔵された熱電対で計測した温度に基づき、温度変化によるコンクリートの線膨張係数分のひずみを除いている。同図から、センサ C と埋込型ひずみ計の計測値はほぼ一致しており、センサ C がプレストレス導入後における長期的な PC 部材のひずみの変動を適切に計測できていることが分かる。

V. 有効プレストレスの評価

PC 部材において光ファイバセンサで計測されるひずみは、プレストレスによる弾性ひずみのほかに、コンクリートの収縮やクリープによるひずみを含んでいる。そのため、PC 部材の性能を評価する上で重要な指標の一つである有効プレストレスを評価するためには、光ファイバセンサで計測され

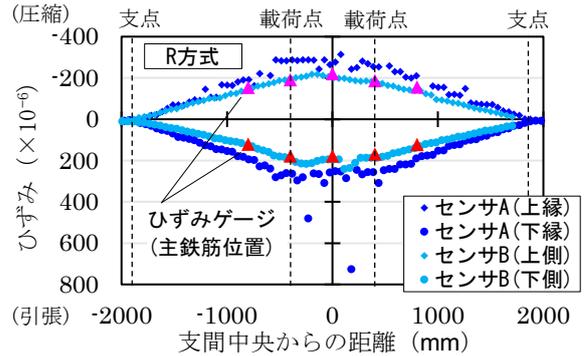


Fig.4 101kN時のひずみ分布 (Strain Distribution at 101kN)

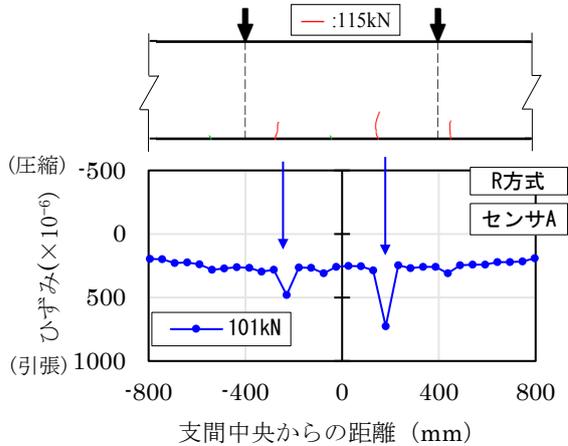


Fig.5 ひずみ分布 (101kN時) とひび割れ状況 (115kN時) (Strain Distribution and Cracks)

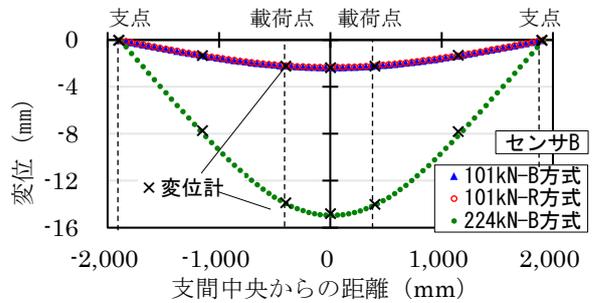


Fig.6 たわみ分布 (Deflection Distribution)

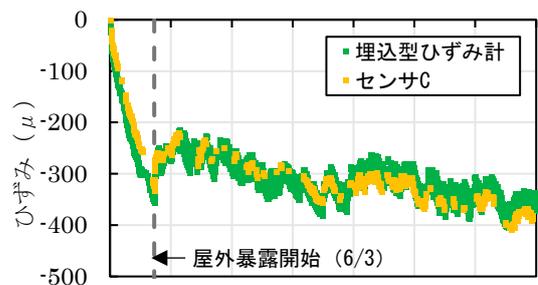


Fig.7 ひずみの経時変化 (Change in Strain Over Time)

た結果から、収縮・クリープによるひずみを控除する必要がある。

そこで本章では、光ファイバセンサにより計測した全ひずみから、既存の予測式や計測値により評価した収縮・クリープひずみを分離することにより弾性ひずみを求め、有効プレストレスを評価することを試みた。なお、光ファイバセンサの計測結果をもとに算出した有効プレストレスは、有効応力計による計測値と比較することにより評価した。また、弾性ひずみから有効プレストレスを算出する過程では、弾性ひずみに設計基準材齢である材齢 28 日のヤング係数 29,974N/mm² を乗算することで応力度に換算した。

Table 5 に有効プレストレスの評価ケースを示す。ケース 1 は、収縮ひずみをコンクリート標準示方書⁶⁾に示される予測式(1)で評価したケース、ケース 2 は、暴露試験体に設置した無応力計の計測結果を用いて収縮ひずみを評価したケースである。なお、クリープひずみについては、両ケースともコンクリート標準示方書に示される予測式(2)を用いて算出した。

$$\epsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{1-RH/100}{1-60/100} \cdot \epsilon'_{sh,inf} \cdot (t-t_0) \cdot \dots (1)$$

$$\left(\frac{d}{100} \right)^2 \cdot \beta + (t-t_0)$$

$$\epsilon'_{cc}(t, t') / \sigma'_{cp} = \frac{4W(1-\frac{RH}{100})+350}{12+f_c(t')} \cdot \log_e(t-t'+1) \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon'_{ds}(t, t_0)$: 部材の乾燥収縮ひずみ、 t, t_0 : コンクリートの材齢及び乾燥開始材齢[day], RH: 構造物の置かれる環境の平均相対湿度[%], d: 有効部材厚[mm], $\epsilon'_{sh,inf}$: 乾燥収縮ひずみの最終値、 β : 乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数、 $\epsilon'_{cc}(t, t') / \sigma'_{cp}$: 単位応力当たりのクリープひずみ、 t, t' : コンクリートの有効材齢及び載荷時有効材齢[day], W: コンクリートの単位水量[kg/m³], RH: 構造物の置かれる環境の平均相対湿度[%], $f_c(t')$: 載荷時の有効材齢 t' 日における圧縮強度[N/mm²]である。なお、計算値の算出にあたり、コンクリートの配合から β は 37.9, W は 172kg/m³ とし、RH は東京における年平均湿度の 68.6%, $f_c(t')$ はプレストレス導入時の圧縮強度試験結果である 43.0N/mm² を用いた。

Fig.8 に各ケースによる有効プレストレスの算出結果について、プレストレス導入直後から約 2 年間の変動を示す。まず、プレストレス導入直後から屋外暴露開始(6/3)までの期間では、有効応力計の計測値とケース 1 及びケース 2 の算出値は概ね同じ経時変化を示した。屋外暴露開始から 3 か月が経過して以降は、ケース 1 では経時によって有効応力計による計測結果との乖離が大きくなり、ケース 2 では計測結果と同様に周期的な増減を繰り返す傾向が示された。ここで、Fig.9 に収縮ひずみの計測値と予測値について、プレストレ

Table 5 有効プレストレスの評価ケース (Effective Prestress Evaluation Case)

検討ケース	収縮	クリープ
ケース 1	予測式(1)による計算値	予測式(2)による計算値
ケース 2	無応力計による計測値	

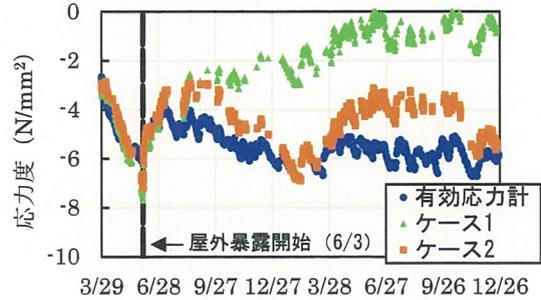


Fig.8 有効プレストレスの経時変化 (Changes in Effective Prestress Over Time)

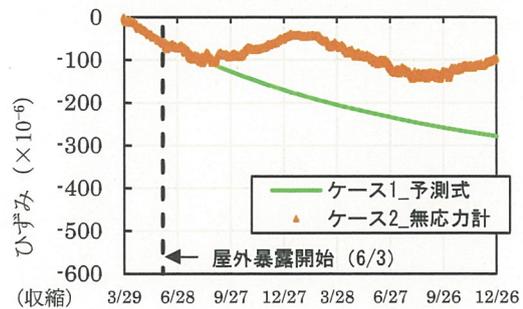


Fig.9 収縮ひずみの経時変化 (Changes in Shrinkage Strain Over Time)

ス導入直後から約 2 年間の経時変化を示す。ケース 1 で用いた予測式(1)による計算値は、単調に収縮方向のひずみが増加した。一方で、ケース 2 で用いた無応力計の計測値は、屋外暴露を開始してから 2 か月程度の間は計算値とほぼ一致しているものの、それ以降は周期的な増減を繰り返して両者が徐々に乖離した。この増減の要因としては、増減周期が約 1 年間であることから季節的な環境条件の変動が考えられる。

以上より、PC 部材の有効プレストレスを精度よく評価するためには、対象となる PC 部材の環境条件を踏まえた収縮ひずみの推定が必要であることが示唆された。

VI. おわりに

本研究では、PC 部材を対象として外力が作用した際の挙動、及び長期的な応力・ひずみの変動の把握に対する分布型光ファイバセンサの適用性について検証するため、PC 梁試験体のプレストレス導入時、曲げ載荷時及びプレストレス導入後の屋外暴露環境における光ファイバ計測を実施した。ま

た、光ファイバ計測で得られた全ひずみから収縮・クリープひずみを分離し、有効プレストレスを評価する手法についても検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ① プレストレス導入時及び外力作用時のひずみ・変形について、TW-COTDR方式とPPP-BOTDA方式を併用することにより、ひび割れ発生前からひび割れ発生後の大変形に至るまで、ひずみゲージや変位計の計測値と光ファイバ計測値がよく一致することを確認した。さらに、TW-COTDR方式により計測したひずみ分布における局所的なひずみ変化点はひび割れ位置と合致しており、ひび割れの検知に本計測技術を適用できることを確認した。
- ② プレストレス導入後の乾燥収縮やクリープを含む長期的な全ひずみの変動について、埋込型ひずみ計による計測値とTW-COTDR方式による光ファイバ計測値がほぼ一致することを確認した。
- ③ 光ファイバセンサで計測されたPC部材の全ひずみから、クリープ・収縮ひずみを控除することで、有効プレストレスを評価できる可能性を確認した。ただし、収縮ひずみの評価においては、対象となるPC部材の環境条件を適切に考慮する必要がある。

ひずみを分布として計測できるといった光ファイバセンサの特徴を活かすことで、PC部材の有効プレストレスを分布として評価できる可能性がある。ただし、有効プレストレ

ス分布を精度良く評価するためには、クリープや収縮によるひずみも分布として評価する必要がある。今後、クリープや収縮ひずみ分布を評価するための、光ファイバセンサの実装方法や計測結果の評価方法についても、検討していく予定である。

参考文献

- 1) 三木千壽ほか；光ファイバセンサシステムを用いた都市高速道路橋の長期継続モニタリング，土木学会論文集A1，Vol.71，No.3，2015，pp.416-428.
- 2) 岩城英朗ほか；長大PC斜張橋の長期モニタリングに向けた分布型光ファイバセンサの適用性に関する研究，構造工学論文集，Vol.62A，2016，pp.585-594.
- 3) 今井道男ほか；レイリー散乱光を用いた分布型光ファイバセンサの基礎検討，令和3年度土木学会第76回年次学術講演論文集，2021，CS9-50.
- 4) 李哲賢ほか；PPP-BOTDA測定技術を用いた2cm分解能ブリルアン分布計測の実現，信学技報，OFT2008-13，2008.5，pp.1-6.
- 5) 清宮理；最近のコンクリート計測技術，コンクリート工学，Vol.29，No.5，1991.5，pp.5-14.
- 6) 土木学会；コンクリート標準示方書【設計編】，2017，pp.107-110.

Study on Applicability of Distributed Optical Fiber Measurement Method to Prestressed Concrete Members

Shintaro Kojima, Naoki Sogabe and Yohei Taira

As a technology for measuring strain changes in prestressed concrete (PC) members, we are focusing on distributed optical fiber sensors that are highly durable and capable of measuring the strain distribution of an entire structure. Strain was measured using this sensor in loading experiments and outdoor long-term exposure experiments on PC members. As a result, it was confirmed that measurement using this sensor is effective as a method for understanding the bending behavior and long-term strain fluctuations when an external force acts on a PC member. In addition, as a result of examining a method for evaluating the effective prestress of PC members from the obtained strain, it was observed that it is necessary to consider the influence of the installation environment.