

論文 RFID ひずみ計測システムによる PC 部材のプレストレス導入管理と長期ひずみに基づく有効プレストレスの推定

岡崎 佳菜子*1・森 寛晃*2・前田 昌大*3・布川 博一*4

要旨: PC 構造物の施工時の導入プレストレスおよび供用中の有効プレストレスの管理手法の高度化を目的として、RFID ひずみ計測システムを用いて、プレストレス導入時ならびに長期保管中の PC 試験体のひずみ挙動を調べた。その結果、RFID ひずみ計測システムはプレストレス導入管理に適用できること、RFID 鉄筋計は長期計測においてコンクリートの収縮やクリープを反映した部材のひずみ変化を捉え、有効プレストレスを高い精度で推定できることが分かった。

キーワード: プレストレスコンクリート, プレストレス導入管理, 有効プレストレス, ひずみ, RFID

1. はじめに

プレストレスコンクリート（以下、PC）構造物の施工において、プレストレス導入管理は通常、鋼材端部の緊張力と伸び量を計測することで行われており、部材コンクリート内部の応力管理は行われていない。埋込み型ひずみ計を用いて緊張前後のひずみから応力度を算出し、プレストレス導入管理に用いた方法¹⁾はあるが、実施するためにはケーブル配線やデータロガー、電源等が必要となる。また、維持管理においては、施工時に導入したプレストレスが供用中に設計値を下回らないことの確認が求められており、既設 PC 構造物の有効プレストレスを推定する方法として応力解放法^{2),3)}が提案されているが、微破壊を伴う試験であり、労力とコストがかかる上に、試験条件によっては精度が低い場合もある。

RFID ひずみ計測システム⁴⁾は、近接無線通信技術（Radio Frequency Identification）を用いて、コンクリート構造物内部のひずみを表面から与える無線電波により計測する外部電源不要なシステムである。データロガーやケーブル配線が不要なため、有線ひずみ計測器類と比べて長期計測に適している。非破壊かつ簡易に計測できることから、例えば、PC 構造物の新設時に適用することで施工管理・維持管理の高度化が期待できる。既往の検討⁵⁾では、本システムの PC 部材のプレストレス導入管理への適用性が示されており、長期ひずみ計測による有効プレストレスの推定も試みられているが、その精度検証は行われていない。

本検討では、本システムを適用した PC 部材を作製し、プレストレス導入管理への適用性を再確認するとともに、その後長期的にひずみを計測して、有効プレストレスを推定した。さらに、ロードセルによる実測値と比較することで推定精度の検証を行った。

2. RFID ひずみ計測システム

RFID ひずみ計測システムの概要を図-1に示す。本システムは、構造物内部に設置する RFID ひずみセンサと、読取りのためのリーダライタおよび専用ソフトウェアで構成される。RFID ひずみセンサは、ひずみを検知するセンサ部と、リーダライタからの電磁波を受信し、センサ部への電力供給およびセンサ部のひずみ出力をリーダライタへ送信する通信部（RFID タグ）からなる。センサ部と通信部はケーブルで繋がれており、すべてを構造物に埋設して使用する。RFID ひずみ計測システムには、近傍の鉄筋を利用して任意の部材断面内に設置できる RFID コンクリート計と、主筋に沿わせて使用する RFID 鉄筋計があり、本検討では上記の 2 種類を使用した。

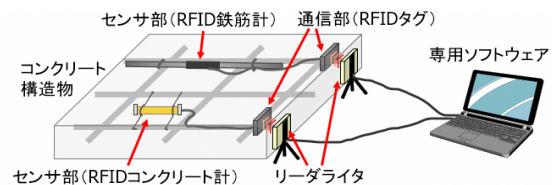


図-1 RFID ひずみ計測システムの概要

3. 実験概要

3.1 PC 試験体の作製

(1) 使用材料、コンクリート配合と物性

表-1に、コンクリートの配合、フレッシュ性状（スランプフロー（SF）、空気量（Air）および圧縮強度（材齢 7 日）を示す。結合材（B）には、早強ポルトランドセメント（HC、密度：3.14g/cm³）と高炉スラグ微粉末 BFS（ブレン：4000cm²/g、密度：2.88g/cm³）を用いた。BFS の使用量は、結合材に対して質量比 30%とした。細骨材（S）には川砂（表乾密度：2.60g/cm³）を、粗骨材（G）

*1 太平洋セメント（株） 中央研究所 インフラ先進技術チーム 工修（正会員）

*2 太平洋セメント（株） 中央研究所 インフラ先進技術チーム リーダー 工修（正会員）

*3 東海旅客鉄道（株） 建設工事部 土木工事課

*4 東海旅客鉄道（株） 建設工事部 土木工事課 工修

表-1 コンクリートの配合, フレッシュ性状および圧縮強度

W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		材齢 7 日圧縮強度 (N/mm ²)		
		W	HC	BFS	S	G	(B×%)				
							SP	AE 剤		SF (cm)	Air (%)
34.8	45.0	174	350	150	722	923	0.8	0.3	59.0	5.0	53.5

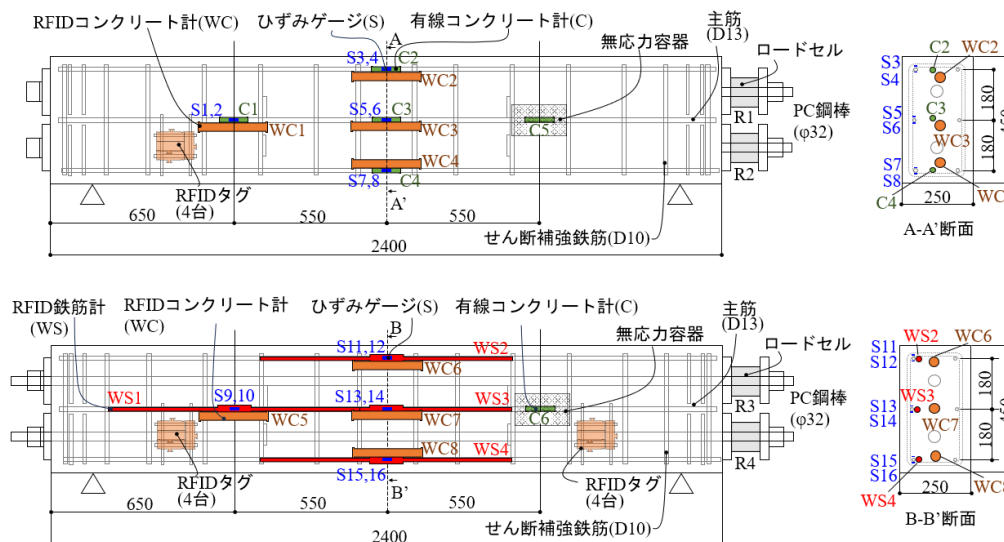


図-2 各種センサの配置 (上が PC 試験体 1, 下が PC 試験体 2)

には砕石 (表乾密度: 2.72g/cm³, 最大寸法: 20mm) を用いた。混和剤には高性能減水剤 (SP) と AE 剤を用いた。

(2) 配筋および各センサの設置状況

PC 試験体の寸法は幅 250mm, 高さ 450mm, 長さ 2400mm で, 緊張材には PC 鋼棒 B 種 1 号 φ32 を 2 本使用した。PC 鋼棒の緊張力は, 定着部端部のセンターホール型ロードセル (容量 500kN) を用いて計測した。試験体のひずみは, RFID ひずみセンサの精度検証のため, 4 種類のセンサを用いて測定した。試験体はセンサの過密配置を避けるため 2 体 (PC 試験体 1 および 2) とし, PC 試験体 1 には RFID コンクリート計 (標点距離 250mm, 記号: WC) と有線コンクリート計 (標点距離 100mm, 記号: C) を, PC 試験体 2 には RFID コンクリート計と RFID 鉄筋計 (D13, センサ長 900mm, 計測部長さ 95mm, 記号: WS) を設置した。センサの配置図を図-2 に示す。センサは, 各試験体のスパン中央の 3 つの高さ (図心軸から-180mm, 0mm, 180mm) と, スパン中央から左に 550mm の図心軸の位置に設置した。有線コンクリート計および RFID コンクリート計は周辺の鉄筋を利用して断面幅の中央位置になるように結束線で吊し, RFID 鉄筋計は主筋に沿わせて結束バンドで固定した。RFID タグは, 4 台ずつまとめてコンクリート側面付近に設置した。また, いずれの試験体においても, RFID 鉄筋計に沿わせた主筋の上下面にひずみゲージ (鉄用, ゲージ長 5mm, 記号: S) を常温硬化型接着剤で貼り付け, コーティングテープによって防水処理を施した。さらに, スパン中央

から右に 550mm の図心軸の位置に, 内部に有線コンクリート計を入れて無応力容器 (φ114×200mm) を設置した。RFID ひずみセンサは太平洋セメント社製, その他の計測器は東京測器社製である。

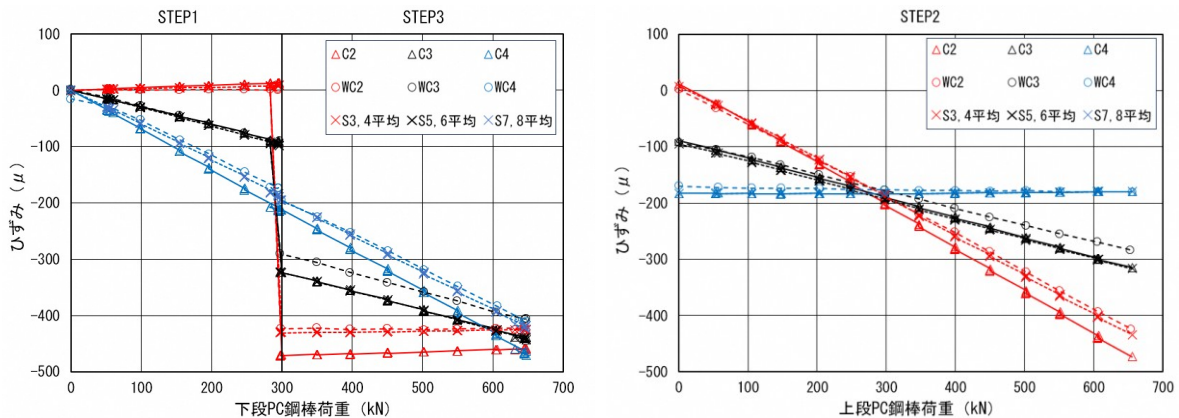
(3) コンクリート打込みと養生

各種センサ, 鉄筋およびシース管を配置した型枠にコンクリートを打ち込み, 打設面に湿布を施した。その後, 2 体の PC 試験体をシートで覆い, 材齢 2 日まで型枠内で養生した。材齢 2 日に脱型し, 建屋内にて気中養生を行った。材齢 7 日に緊張作業場所 (倉庫内) へ運搬し, 後述する緊張作業を行った。

3.2 各種センサによるひずみ計測

(1) プレストレス導入時

緊張作業は, 材齢 7 日にセンターホールジャッキおよび電動ポンプ (片引き) により実施した。緊張時のコンクリートの圧縮強度は 53.5N/mm², 静弾性係数は 27.3kN/mm²であった。プレストレスの導入は STEP1: 下段 PC 鋼棒 300kN, STEP2: 上段 PC 鋼棒 630kN, STEP3: 下段 PC 鋼棒 630kN とし, 各 STEP では約 50kN ごとに 2 分程度荷重をホールドしながら段階的に導入した。ロードセル, 有線コンクリート計およびひずみゲージは, データロガーにより 1 分間隔で計測した。RFID コンクリート計および RFID 鉄筋計は, 4 台の RFID タグをまとめた位置付近のコンクリート表面にリーダーライトを密着させ, 制御用 PC のプログラムで連続計測を行った。連続計測では, 1 台のセンサにつきひずみ計測値を 7 点取得



図－3 緊張作業時のひずみ挙動 (PC 試験体 1)

表－2 各緊張ステップ完了時のひずみ計算値とひずみ計測値

緊張STEP	図心軸からの距離 (mm)	PC 試験体 1				PC 試験体 2			
		ひずみ計算値 (μ)	ひずみ測定値 (μ)			ひずみ計算値 (μ)	ひずみ測定値 (μ)		
			有線コンクリート計	RFID コンクリート計	ひずみゲージ		RFID 鉄筋計	RFID コンクリート計	ひずみゲージ
1	180	5	14	2	8	6	13	5	16
	0	-90	-89	-90	-93	-93	-92	-85	-85
	-180	-185	-207	-172	-181	-191	-189	-178	-184
2	180	-417	-471	-423	-433	-408	-440	-407	-416
	0	-292	-315	-282	-316	-290	-303	-279	-280
	-180	-166	-194	-180	-180	-172	-192	-190	-183
3	180	-401	-461	-425	-426	-395	-428	-403	-402
	0	-401	-438	-406	-439	-397	-420	-391	-387
	-180	-402	-460	-407	-416	-399	-425	-400	-406

することを1回の計測とし、これを2分間隔で繰り返した。各センサにおいて、7点のひずみ計測値の平均をその時刻のひずみとした。

(2) 倉庫保管時

緊張作業完了後は、シース管へのグラウト注入は行わずに、アンボンド状態でPC試験体を倉庫内に静置して計測を実施した。ロードセル、有線コンクリート計およびひずみゲージはデータロガーにより10分間隔で計測値を取得した。RFIDコンクリート計およびRFID鉄筋計は、1回の計測で1台のセンサにつき7点のひずみ計測値を取得し、その平均値をその時刻のひずみとした。計測間隔は、定着完了から材齢125日までは10分間隔、材齢125日以降は1時間間隔とした。

4. 実験結果および考察

4.1 プレストレス導入時のひずみ変化

図－3に、PC試験体1の緊張作業時における、PC鋼棒の緊張荷重と各センサで計測したひずみの関係を示す。PC鋼棒の緊張荷重はジャッキと反対側の端部に設置したロードセルで計測したものであり、緊張荷重およびひずみは、緊張作業開始直前をイニシャルとして整理した。図中の△、○および×はそれぞれ、スパン中央に設置し

た有線コンクリート計、RFIDコンクリート計およびひずみゲージによるひずみ計測結果である。赤で示すC2, WC2, S3およびS4は図心軸上方180mm、黒で示すC3, WC3, S5およびS6は図心軸位置、青で示すC4, WC4, S7およびS8は図心軸下方180mmに設置したセンサを表す。ひずみゲージは、主筋の上下面に貼った2枚のゲージによるひずみの平均値をプロットした。STEP1およびSTEP3で下段のPC鋼棒を緊張した際は赤で示す断面上側のセンサのひずみはほとんど変化せず、STEP2で上段のPC鋼棒を緊張した際は青で示す断面下側のセンサのひずみはほとんど変化しなかった。図は省略するが、PC試験体2でも同様の傾向が見られた。断面内の各位置のセンサはそれぞれ、緊張荷重に応じた弾性ひずみを捉えたものと考えられる。

表－2に、緊張作業の各STEPが完了した時の2本のPC鋼棒の緊張荷重を基に算出した断面内の各センサ位置のひずみ計算値と、各センサによるひずみ測定値を示す。センサの種類によってひずみに多少の差異はあるが、いずれのセンサでも、計測したひずみはPC鋼棒の緊張荷重を基に算出したひずみ計算値と概ね対応していた。したがって、所定のプレストレスを導入する際、断面内のセンサ位置に生じるひずみを予め算出しておけば、緊

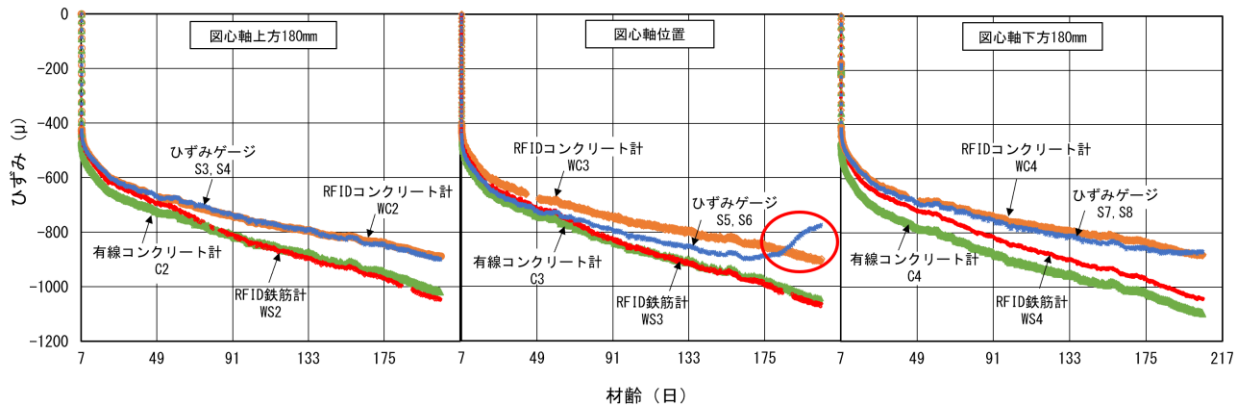


図-4 倉庫保管時のひずみ挙動

張作業開始から完了までのひずみ変化量を確認することで、プレストレス導入管理が可能と考えられる。

4.2 倉庫保管時のひずみの経時変化

図-4に、材齢206日までのひずみ計測結果を示す。ひずみは、緊張開始直前を起点として整理した。3つのグラフはスパン中央で、高さの異なる3箇所での計測結果である。時間の経過に伴うひずみ変化は、コンクリートの自己収縮、乾燥収縮およびクリープなどの影響によって生じたものと考えられる。ひずみゲージのグラフは、主筋の上下面に貼った2枚のゲージのひずみを平均化したものだが、図心軸位置のひずみ変化は、他のケースと異なり材齢175日付近から図中赤丸の様な特異な変化を示した。これはひずみゲージが剥がれるなどして正しく計測できていない可能性が考えられ、ひずみゲージが長期計測には不向きであることを示唆している。これに対して、有線コンクリート計、RFIDコンクリート計およびRFID鉄筋計は、これまでのところ、長期にわたってコンクリートの収縮およびクリープ等によって生じたひずみ変化を捉えている。ただし、RFIDコンクリート計によるひずみと、有線コンクリート計およびRFID鉄筋計によるひずみには乖離が生じた。両者のひずみ差は、倉庫内の気温が高くなり始めた材齢63日頃から顕著となり、材齢206日時点では150~200 μ 程度の差が生じた。長期的な計測においてセンサ種類によってひずみ計測値に差が生じた原因は現時点では不明である。長期ひずみに基づく有効プレストレスの推定を行う上では、この差異についてセンサ固有の特性によって生じたものか、あるいは設置方法等の試験条件に起因するものかを明らかにする必要があると考える。

4.3 各材齢におけるひずみの推定

各材齢においてセンサで計測されるひずみは、プレストレス導入による弾性ひずみと、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみの合計値と考えられる。そこで一例として、無応力計と同じ図心軸位置の有線コ

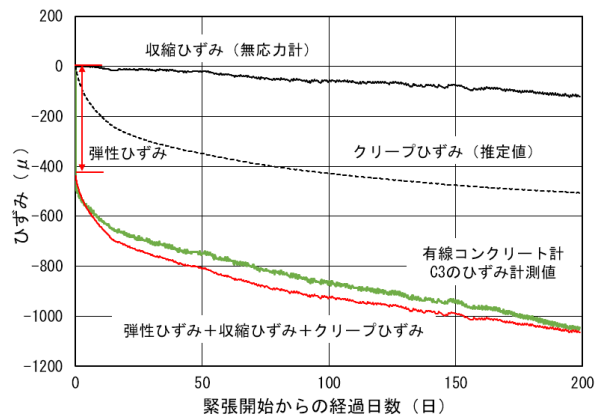


図-5 ひずみ推定値と計測値の比較

ンクリート計 C3 について、ひずみ計測値と前記のひずみ合計値を比較することとした。プレストレス導入による弾性ひずみには、有線コンクリート計 C3 で計測した定着完了直後のひずみを採用した。自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみには PC 試験体 1 に設置した無応力計 (有線コンクリート計 C5) の定着完了からのひずみ変化量を、クリープひずみにはコンクリート標準示方書設計編⁶⁾ (以下、設計編) の式(1)による計算値を用い、これらを部材の剛性を考慮したひずみに換算した。

$$\begin{aligned} & \varepsilon'_{cc}(t,t')/\sigma'_{cp} \\ &= \frac{4W(1-RH/100)+350}{12+f'_c(t')} \cdot \log_e(t-t'+1) \quad (1) \end{aligned}$$

ここに、 $\varepsilon'_{cc}(t,t')/\sigma'_{cp}$: 材齢 t' (日) に初荷重を行ったコンクリートの材齢 t (日) における単位応力当りのクリープひずみ ($\times 10^{-6}$ (N/mm²)), W : コンクリートの単位水量 (kg/m³), RH : 相対湿度 (%), t' および t : 荷重時および荷重中のコンクリートの有効材齢(日), $f'_c(t')$: 荷重時の有効材齢 t' (日) におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

相対湿度には、倉庫内に設置した温湿度計で約1か月

間測定した湿度データの平均値 (RH=55%) を用いた。有効材齢の計算には、PC 試験体 1 の無応力計 (有線コンクリート計 C5) で測定した温度データを使用した。図-5 は、算出したひずみ合計値と有線コンクリート計 C3 の計測値を比較したものである。ひずみ合計値の推移は、有線コンクリート計によるひずみ計測値の推移とよく一致した。このことから、有線コンクリート計は、長期にわたってコンクリートのクリープおよび収縮によるひずみ変化を捉えていると考えられる。

4.4 有効プレストレスの推定

RFID ひずみ計測システムの長期的なプレストレス量管理への適用性を検証するため、2 種類の RFID ひずみセンサを配置した PC 試験体 2 の計測データを用いて有効プレストレスを推定し、ロードセルの実測値と比較した。また、設計編に示される PC 鋼材の引張応力度減少量の算出式に収縮ひずみの実験値を代入することによっても有効プレストレスの推定を試みた。

ロードセルによる荷重の計測値 (PC 鋼棒 2 本の平均値) は、定着完了直後では 624.2kN、材齢 206 日時点では 521.8kN であり、有効プレストレスは 83.6%であった。

RFID ひずみ計測システムのひずみデータに基づく有効プレストレスの算出は下記の方法で行った。センサで計測した、コンクリートのクリープおよび収縮によるひずみ変化に相当するひずみ変化が PC 鋼棒にも生じたと仮定し、センサのひずみ変化量に PC 鋼棒のヤング係数 ($2.033 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) および断面積 (804.2mm^2) を掛けることで、各時点における PC 鋼棒の緊張力減少量を算出した。その減少量をロードセルで計測した定着完了直後の緊張力から差し引いて各時点における PC 鋼棒の緊張力を計算し、定着完了直後の緊張力との比を取ることによって有効プレストレス (%) を算出した。図-6 に、算出した PC 試験体 2 の有効プレストレスの経時変化を示す。ロードセルの実測値は、PC 鋼棒 2 本の平均値を示した。RFID コンクリート計および RFID 鉄筋計のひずみによる推定では、スパン中央の 3 台のセンサのひずみ差は 10μ 程度と大差がないことから、これらの平均値を用いた。RFID 鉄筋計のひずみを用いて推定した有効プレストレスは、計測期間全体に亘ってロードセルの実測値との差が 1.5%以下であり、RFID コンクリート計のひずみを用いた場合に比べてロードセルの実測値とよく一致した。表-3 に、材齢 206 日時点の有効プレストレスの計算結果を示す。RFID 鉄筋計のひずみから推定した材齢 206 日時点の有効プレストレスは、ロードセルの実測値 83.6%と合致した。PC 鋼材が直線配置された矩形断面の PC 試験体を、雨掛かりがなく、湿度変化の少ない倉庫内に静置する場合、RFID 鉄筋計で計測したひずみを用いて高い精度で有効プレストレスを推定できることが分かった。

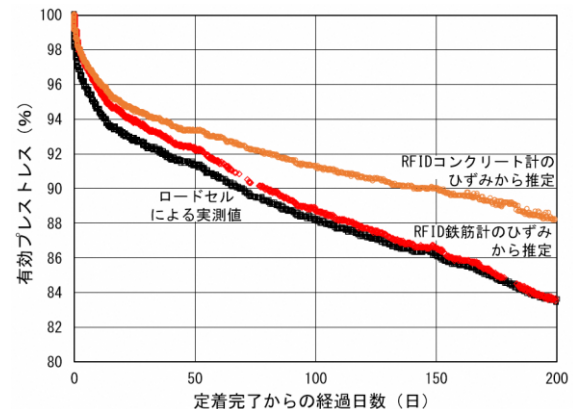


図-6 有効プレストレスの経時変化

表-3 材齢 206 日時点の有効プレストレス

センサの種類	RFID コンクリート計	RFID 鉄筋計
センサ記号	WC6, 7, 8	WS2, 3, 4
定着完了直後の緊張力 (kN)	624.2	624.2
材齢 206 日までのひずみ変化 ($\times 10^{-6}$)	450	626
材齢 206 日時点の PC 鋼棒の緊張力減少量 (kN)	73.5	102.3
材齢 206 日時点の PC 鋼棒の緊張力 (kN)	550.7	521.9
有効プレストレス (%)	88.2	83.6

設計編には、コンクリートのクリープおよび収縮による PC 鋼材の引張応力度減少量の算出方法として、式(2)が掲載されている。

$$\Delta\sigma_{pcs} = \frac{n_p \cdot \varphi (\sigma'_{cpt} + \sigma'_{cdp}) + E_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{1 + n_p \cdot \frac{\sigma'_{cpt}}{\sigma_{pt}} \cdot \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{pcs}$: コンクリートのクリープおよび収縮による PC 鋼材の引張応力度の減少量 (N/mm^2)、 φ : コンクリートのクリープ係数、 ε'_{cs} : コンクリートの収縮ひずみ、 n_p : PC 鋼材のコンクリートに対するヤング係数比、 E_p : PC 鋼材のヤング係数 (N/mm^2)、 σ_{pt} : 緊張作業直後の PC 鋼材の引張応力度 (N/mm^2)、 σ'_{cpt} : 緊張作業直後のプレストレス力による PC 鋼材位置のコンクリートの圧縮応力度 (N/mm^2)、 σ'_{cdp} : 永続作用による PC 鋼材位置のコンクリートの圧縮応力度 (N/mm^2)

PC 試験体 2 について、式(2)に、式(1)のクリープひずみから算出したクリープ係数、無応力容器内の有線コンクリート計で計測した収縮ひずみなどを代入して PC 鋼棒の引張応力度減少量を算出した。定着完了直後の上段と下段の PC 鋼棒の緊張力の差は 5kN 程度であったため、緊張力による断面内の圧縮応力度分布はほぼ一様であると見なして、応力度の計算には上段と下段の PC 鋼棒の

緊張力の平均値を用いた。なお、PC 試験体の自重によるコンクリートの圧縮応力度は考慮していない。計算の結果、定着完了直後の PC 鋼棒の引張応力度は 776.5N/mm^2 、材齢 206 日時点でのコンクリートのクリープおよび収縮による PC 鋼棒の引張応力度の減少量は 107.0N/mm^2 と算出された。

また、設計編には、PC 鋼材のリラクセーションによる緊張材引張応力度減少量の算出方法として、式(3)が掲載されている。

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pt} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{pr}$ ：PC 鋼材のリラクセーションによる緊張材引張応力度の減少量 (N/mm^2)、 γ ：PC 鋼材の見掛けのリラクセーション率 (%)、 σ_{pt} ：導入直後の PC 鋼材の引張応力度 (N/mm^2)

見掛けのリラクセーション率 γ は、PC 鋼材のリラクセーション率 γ_0 から、コンクリートのクリープ、収縮の影響を考慮して求めるもので、式(2)の $\Delta\sigma_{pcs}$ を用いて算出する式(4)が掲載されている。

$$\gamma = \gamma_0(1 - 2\Delta\sigma_{pcs}/\sigma_{pi}) \quad (4)$$

ここに、 σ_{pi} ：緊張作業直後の PC 鋼材の引張応力度 (N/mm^2)

PC 鋼棒のリラクセーション率 γ_0 には、試験成績表に示される値 3.31%を代入した。式(3)および式(4)を用いて算出した PC 試験体 2 の 2 本の PC 鋼棒のリラクセーションによる引張応力度減少量の平均値は 19.0N/mm^2 であった。リラクセーションによる引張応力度の減少は、プレストレスを与えてから 1~2 か月の間にそのほとんどが生じると言われている⁷⁾。材齢 206 日時点ですでに算出値の全量が減少したと仮定すると、コンクリートのクリープおよび収縮による減少量と合わせた引張応力度の減少量は 126.0N/mm^2 となり、残存している引張応力度は 650.5N/mm^2 と算出される。これは定着完了直後の引張応力度の 83.8%であり、ロードセルの実測値とよく一致した。無応力計を使用して PC 部材の収縮ひずみを取得できる場合は、設計編に示される式(2)~式(4)によっても高い精度で有効プレストレスを推定できると考えられる。

5. まとめ

PC 試験体を作製してプレストレス導入時から長期に亘りひずみ計測を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) RFID ひずみ計測システムによるプレストレス導入作業時のひずみ計測値は、PC 鋼棒の緊張荷重から計算されるひずみ値と概ね対応していた。本システム

は緊張作業時のプレストレス導入管理へ適用できると考えられる。

- (2) 有線コンクリート計で計測される長期ひずみは、載荷時の弾性ひずみ、無応力容器内の収縮ひずみおよび設計編に示される推定式で算出したクリープひずみの合計値と概ね一致した。
- (3) RFID ひずみ計測システムは長期計測に適用可能と考えられる。ただし、RFID 鉄筋計によるひずみは有線コンクリート計によるひずみと近い値であったが、RFID コンクリート計によるひずみは材齢が経過するとこれらのひずみ値から乖離する傾向であった。
- (4) RFID 鉄筋計のひずみデータを用いて推定した有効プレストレスはロードセルの実測値とよく一致した。
- (5) 設計編に示される PC 鋼材の引張応力度減少量の算出式に無応力計による収縮ひずみを用いて推定した有効プレストレスはロードセルの実測値とよく一致した。

謝辞

PC 試験体の作製および緊張作業において、(株) 富士ピー・エス三重工場の皆様にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 原健悟, 神山正成, 中村育樹, 渡瀬博: 津付ダム付替国道 397 号 2 号橋における緊張管理, プレストレストコンクリート工学会 第 21 回シンポジウム論文集, pp.469-472, 2012.10
- 2) 原口政仁, 幸左賢二, 瀬良洋夢, 清水英樹: PC 桁の有効プレストレス推定法の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.427-432, 2012
- 3) 二井谷教治, 渡瀬博, 阪田憲次, 綾野克紀: コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.2, 2009.5
- 4) 大塚裕太, 江里口玲, 井坂幸俊: RFID ひずみ計測システムの開発経緯と適用事例, コンクリート工学, Vol.60, No.9, pp.815-820, 2022.9
- 5) 早野博幸, 江里口玲, 石井祐輔, 原健悟: RFID を用いたひずみ計測による PC 構造物のプレストレス量推定, プレストレストコンクリート工学会 第 23 回シンポジウム論文集, pp.429-434, 2014.10
- 6) 土木学会: 2022 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善出版, 2022
- 7) 中井聖棋: 講座 プレストレッシングの基本 第 1 回 設計におけるプレストレス, プレストレストコンクリート, Vol.52, No.6, pp.113-117, 2010