

## 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

太平洋セメント(株)	博(工)	○早野 博幸
太平洋セメント(株)		江里口 玲
(株)太平洋コンサルタント	修(工)	石井 祐輔
オリエンタル白石(株)	正会員 修(工)	原 健悟

Abstract : We have been developing the structural inspection technology using the RFID (Radio Frequency Identification) that is widespread to electronic money, IC card and so on. The technology is the non-destructive inspection for monitoring the internal state of the concrete structure by connecting a sensor to the RFID with a sensor interface and providing the radio wave to the surface of the concrete, which is useful as a maintenance and management targeted at the strain generated in a structure. The strain measurement system with RFID was applied to the PC structure, its effectiveness was described in this paper. The strain behavior using the RFID strain sensor at prestressing or flexural loading on PC specimen is the same one using the wired strain gauge. Moreover, estimation method for long-term effective prestressing force of PC structures was proposed by using the RFID shrinkage specimen, compensating the difference of the thickness between the PC structure and the specimen.

Key words : Radio Frequency Identification (RFID) , Shrinkage strain , thickness , Prestressing force

## 1. はじめに

PC構造物は、所定のプレストレス量を導入することが極めて重要であり、緊張管理におけるプレストレス量の測定については様々な手法が提案されている<sup>1)</sup>。実構造物の特定部位における短期のプレストレス量を測定するには、コンクリート埋込み型ひずみ計等によって緊張前後のひずみを測定する方法があるが、この手法では、ひずみ計設置に伴う配線や計測するためのデータロガー、電源等が必要となる。また、長期のプレストレス量を推定するためには、供用中の場合では実橋の有線計測は困難な場合が多く、ひずみは収縮、クリープ、リラクセーション等の影響が入っておりこれらを分離するのは難しい。こうした中、RFID（無線通信）を用いてひずみが計測できるシステムが開発され、多くの適用事例がある<sup>2)</sup>。本研究の目的は2つあり、まずはRFIDを用いたひずみセンサをPC試験体に適用し、緊張導入時および曲げ載荷時のひずみ挙動が有線のひずみゲージによる測定結果と同等であることを確認することである。そして、PC試験体の環境条件や配合を同条件としたRFIDを用いたひずみセンサを埋め込んだ収縮試験体を用いて、PC試験体の長期収縮ひずみを予測し、有効プレストレスを推定する方法の有効性について検討することが最終目的であり、そのための実験的検討を行った。

## 2. RFIDを用いたひずみ計測

RFIDを用いたひずみセンサ（以降、RFIDひずみセンサ）を写真-1に示す。ひずみを計測するセンサ部となるRFIDタグ（外形寸法：100×40×12mm）はケーブルで接続されており、センサ部はひずみを計測したい部位へ、



写真-1 RFIDを用いたひずみセンサ

RFIDタグはかぶり付近の計測しやすい場所へそれぞれ設置し、すべてコンクリート内に埋込まれる。センサ部は、異形鉄筋の中央部に専用ゲージが貼付された鉄筋ひずみセンサ (写真-1) とコンクリートに直接埋め込むコンクリートひずみセンサがある。計測はコンクリートに埋設されたRFIDタグと専用のリーダライタの通信によって非破壊で行うことができ、計測時にリーダライタから電磁波によりセンサへ電力供給を行うため、センサ側には電源が不要であり、構造物内部に埋設しても長期間の利用が可能である。

### 3. 実験概要

RFID ひずみセンサを設置した PC 試験体の概要を図-1 に示す。鉄筋ひずみセンサ部は中央部断面の上, 中, 下に設置し, コンクリートひずみセンサ部は上, 下にそれぞれ設置した。また, 鉄筋ひずみセンサ部と同じ高さの位置の主筋上下に有線のひずみゲージを貼付した後, 早強セメントを用いた W/C0.38 のコンクリートを打設した。また, 併せて収縮ひずみ測定用の試験体として, 写真-2 に示すように, RFID コンクリートひずみセンサの周囲に PC 試験体と同じ鉄筋比となるように鉄筋を配し,  $\phi 150 \times 300\text{mm}$  の型枠に設置後コンクリートを打設し, 上面および下面をシールした試験体 (以降, RFID 収縮試験体) も作製した。本試験体は, PC 試験体の収縮ひずみを予測するために作製したもので, PC 試験体の傍に設置し, 同じ養生・環境条件とした。



写真-2 RFID 収縮試験体の概要

PC 試験体の緊張力導入および載荷試験は材齢 35 日に実施した。緊張はセンターホール型ジャッキを用い, 緊張力の管理はセンターホール型ロードセルにより行った。緊張力の導入はひび割れが発生しないように, STEP1: 下段の PC 鋼棒を 240kN, STEP2: 上段の PC 鋼棒を 482.5 kN ( $600\text{N}/\text{mm}^2$ ), STEP3: 下段の PC 鋼棒を 482.5 kN とした。有線ひずみは 50kN ごとに計測し, RFID ひずみセンサは写真-3 に示すように適宜リーダライタにより計測して一部では連続計測を行った。なお, 定着時の緊張力の損失は有線ひずみゲージの値がほとんど変化しなかったため, 無視できると考えられる。また, 緊張後に中央部 2 点載荷をひび割れが発生するまで実施した。



写真-3 緊張力導入時の測定状況

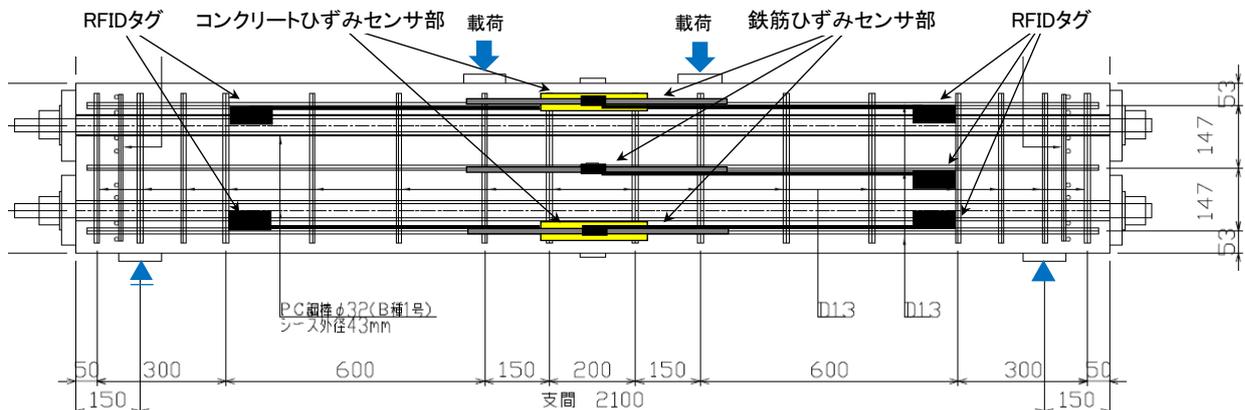


図-1 RFID ひずみセンサを設置した PC 試験体の概要

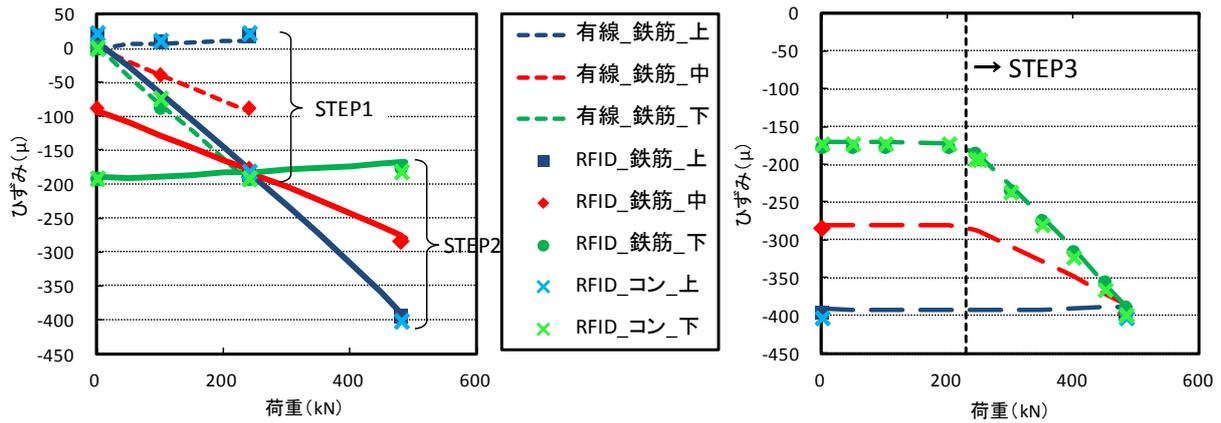


図-2 緊張力導入時におけるひずみの測定結果

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 緊張力導入時および載荷試験時のひずみ挙動

PC 試験体と同じ養生とした緊張力導入時のコンクリートの圧縮強度は  $62.4\text{N/mm}^2$ 、割裂引張強度は  $4.06\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数は  $30853\text{N/mm}^2$  であった。緊張力導入時におけるひずみの測定結果を図-2 に示す。

図より、STEP1（下段の PC 鋼棒を  $240\text{kN}$ ）、STEP2（上段の PC 鋼棒を  $482.5\text{ kN}$ ）、STEP3（下段の PC 鋼棒を  $482.5\text{ kN}$ ）のいずれにおいても、有線の鉄筋ひずみと、RFID 鉄筋ひずみセンサおよび RFID コンクリートひずみセンサによる値はほぼ同等であることが分かる。PC 鋼棒により導入した緊張力から算出した設計値との比較では、STEP3 終了後の中央断面の自重を考慮したひずみ設計値は主筋上部位置で  $-400\mu$  に対し、RFID 鉄筋ひずみセンサは  $-396\mu$ 、コンクリートひずみセンサは  $-402\mu$ 、下部位置では設計値  $-390\mu$  に対し、それぞれ  $-396\mu$ 、 $-398\mu$  とほぼ一致した。

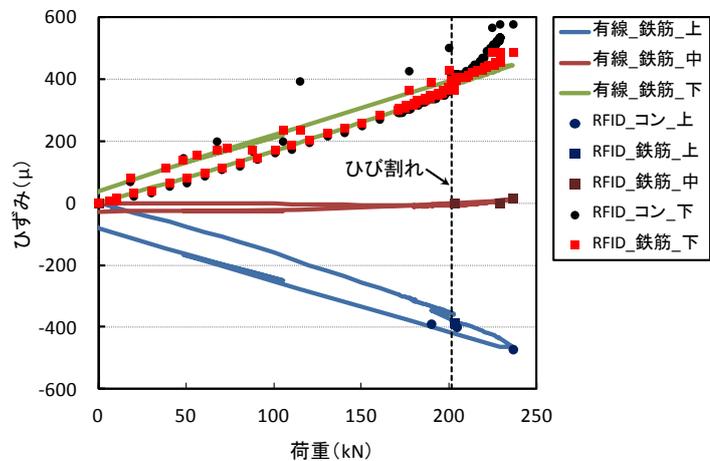


図-3 曲げ載荷試験時におけるひずみの測定結果

以上より RFID ひずみセンサは、圧縮応力下、さらに断面内で応力勾配が生じている場合においても所定部位のひずみが容易に計測でき、短期のプレストレス管理に適用可能であることが分かる。

曲げ載荷試験時におけるひずみの測定結果を図-3 に示す。載荷によりひび割れが発生する下部のひずみは、RFID ひずみセンサによる計測を約 1 秒間隔で連続して行った。図より、下部のひずみについては、ひび割れ発生以前は RFID のコンクリートひずみセンサが若干小さい値を示すものの、ほぼ有線のひずみと同様の値を示した。ひび割れ発生直後からは RFID のコンクリートひずみセンサが他よりやや増大する傾向を示した。これはセンサの直径とヤング係数が影響していると思われ、すべてのひずみ計測部の中心軸高さは同じであるが、コンクリートひずみセンサの直径は  $30\text{mm}$  で最も大きく（鉄筋ひずみセンサ  $D10$ 、有線ひずみ主筋  $D13$ ）、下縁から発生するひずみの影響を最も受けやすく、さらにヤング係数が小さいためひずみが大きく出たものと考えられる。ただし、最終的に除荷後にはすべて同様の値を示していることから、ひび割れ近傍部以外の端部における付着は確保されていると思われる。一方、中央部および上部では、下端部のひび割れによる影響を受けないため、ひび割れ発生後においても有線ゲージと同様のひずみ値を示したと考えられる。

### 4.2 有効プレストレス量の推定

前述したように、RFIDひずみセンサによって緊張前後のひずみを計測することで、短期的なプレストレス量が容易に把握できることが分かった。一方、長期的な有効プレストレスについては、実構造物の乾燥収縮・自己収縮、クリープ、PC鋼材のリラクセーションなどの影響を考慮する必要がある。中でも、収縮については、配合、部材の寸法および形状、環境条件、鉄筋の拘束など様々な要因が影響し、実構造物の収縮を精緻に予測することは極めて困難である。そこで本研究では、実際のPC試験体の近くに配合、環境条件、軸方向鉄筋比を同条件としたRFID収縮試験体を置いてそのひずみを測定し、PC試験体の収縮を予測することを検討した。ただし、部材の寸法および形状だけは同条件とすることが不可能であるため、その影響を考慮しなければならない。既往の研究では<sup>3)4)</sup>、試験室レベルでの供試体においては、コンクリートの乾燥収縮の最終値は、供試体寸法によらずほぼ同一とみなすことが可能で、乾燥収縮の経時変化を表す項は供試体寸法の二乗に比例して大きくなることを示している。2012年コンクリート標準示方書設計編においても、プレストレストコンクリートの有効プレストレスの算定に用いる場合には、この考え方を踏襲した式(1)が提案されており、本研究でも、基本的には自己収縮を含む収縮ひずみを式(1)に準じて求めた。

$$\epsilon'_{sh}(t, t_0) = \frac{\frac{1 - RH/100}{1 - 60/100} \cdot \epsilon'_{sh,inf} \cdot (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)} \dots \dots \dots (1)$$

- ここに、 $\epsilon'_{sh}(t, t_0)$  : 部材の収縮ひずみ ( $\mu$ )
- $t, t_0$  : コンクリートの材齢および乾燥開始時材齢 (日)
- $RH$  : 構造物の置かれる環境の平均相対湿度 (%)       $d$  : 有効部材厚 (mm)
- $\epsilon'_{sh,inf}$  : 収縮ひずみの最終値 ( $\mu$ )
- $\beta$  : 収縮ひずみの経時変化を表す係数       $\left(\beta = \frac{30}{\rho} \frac{120}{-14 + 21C/W} - 0.70\right)$
- $\rho$  : コンクリートの単位容積質量 ( $g/cm^3$ )

RFID収縮試験体の収縮ひずみの最終値 $\epsilon'_{sh,inf}$  ( $351 \mu$ ) については、適宜測定したRFID収縮試験体の材齢、収縮ひずみ、気象庁による日ごとの平均相対湿度の平均値、有効部材厚 (150mm) などを式(1)に代入し、最小二乗法により算出した。PC試験体の収縮ひずみの推定に関しては、断面が長方形のため有効部材厚を暫定的に断面積の1/2乗とし、収縮ひずみの最終値はRFID収縮試験体と同一の値を使用して、同様に式(1)を用いて算出した。乾燥材齢と収縮ひずみの関係を図-4に示す。式(1)は、鉄筋が入っていないコンクリート供試体を水中養生した後、乾燥させた場合の収縮試験結果を基につくられた式で、乾燥直後に急激に水分逸散が生じるため、一般的には初期に収縮ひずみは増大する傾向にある。それに対しRFID収縮試験体のひずみ実測値は、水中養生をしていないこと、内部の鉄筋が拘束されていること、断面が大きいことなどから、式(1)による推定値と比べて乾燥材齢初期のひずみが小さくなっているものと考えられる。

クリープひずみに関しては、コンクリート標準示方書の式(2)にしたがって算出した。

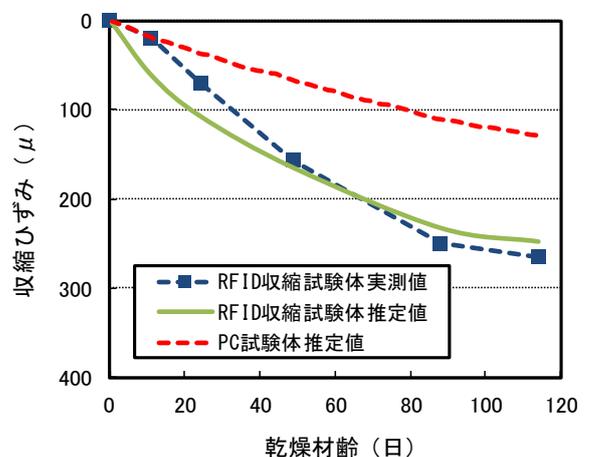


図-4 乾燥材齢と収縮ひずみの関係

$$\varepsilon'_{cc}(t, t') / \sigma'_{cp} = \frac{4w + \left(1 - \frac{RH}{100}\right) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \quad \dots \dots \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon'_{cc}(t, t') / \sigma'_{cp}$  : 材齢 $t'$ 日に載荷した材齢 $t$ 日の単位応力クリープひずみ ( $\mu / (N/mm^2)$ )  
 $w$  : コンクリートの単位水量 ( $kg/m^3$ )     $RH$  : 相対湿度 (%)  
 $t'$ および $t$  : 載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢 (日)  
 $f'_c(t')$  : 載荷時の有効材齢 $t'$ 日のコンクリートの圧縮強度 ( $N/mm^2$ )

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としては、コンクリート標準示方書設計編において式(3)が示されている。本式に、RFID収縮試験体から推定したPC試験体の収縮ひずみ、式(2)のクリープひずみから算出したクリープ係数などを代入すると $90N/mm^2$ となり、引張応力度は初期値 $600N/mm^2$ に対して $510N/mm^2$  (85%) と推定できる。なお、自重による影響は考慮していない。

$$\Delta\sigma_{pcs} = \frac{n_p \cdot \phi(\sigma'_{cpt} + \sigma'_{cdp}) + E_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{1 + n_p \cdot \frac{\sigma'_{cpt}}{\sigma_{pt}} \cdot \left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad \dots \dots \quad (3)$$

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 ( $N/mm^2$ )  
 $\phi$  : コンクリートのクリープ係数 (1.15)     $\varepsilon'_{cs}$  : 緊張後のコンクリートの収縮ひずみ ( $91\mu$ )  
 $E_p$  : PC鋼材のヤング係数 ( $20kN/mm^2$ )     $E_c$  : コンクリートのヤング係数 ( $30853N/mm^2$ )  
 $n_p$  : PC鋼材のコンクリートに対するヤング係数比 ( $n_p = E_p / E_c$ )  
 $\sigma_{pt}$  : 緊張直後のPC鋼材の引張応力度 ( $600N/mm^2$ )  
 $\sigma'_{cpt}$  : 緊張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 ( $12.2N/mm^2$ )  
 $\sigma'_{cdp}$  : 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 ( $0N/mm^2$ )

一方で、PC構造物の実現象としては、緊張力導入後からコンクリートの収縮ひずみ、クリープ、鋼材のリラクセーションが徐々に生じるため、材齢の経過に伴い有効プレストレスは減少していく。減少要因であるこれらの算出にあたっては、厳密にはその材齢におけるプレストレス力がコンクリートに加わっており、その値は材齢とともに変化していくことを考慮する必要がある。主要なものはクリープであるが、ここでは1日ごとにこれらの値を算出し、その材齢における有効プレストレスをPC鋼棒のひずみに換算し、1日ステップごとに算出を試みた。なお、コンクリートの圧縮強度およびヤング係数については、早強セメントを使用し、緊張材齢も35日とかなり経過していることから一定としたが、強度発現が遅く、早い材齢に緊張力を導入するのであれば、これらも時間の関数として変化させることも有効と考えられる。

緊張力導入によるPC鋼棒のひずみ変化量は $3000\mu (= \sigma_{pt} / E_p)$ であり、そこから式(1)により推定した収縮ひずみや式(2)のクリープなどの影響によりコンクリートとともにPC鋼棒のひずみが減少していくこととした。なお、PC鋼棒のリラクセーション率(%)は試験成績表により、リラクセーション率(%) =  $0.3185 \log_e(t) + 2.0122$  ( $t$ : 日)で近似し、リラクセーションによる緊張力の減少を見掛け上、PC鋼棒のひずみ減少量として扱った。摩擦の影響は、今回は直線配置されたPC鋼棒で、グラウト充填していないことからその影響はなく、さらに定着時の減少量もひずみの挙動でほとんど生じていないことを確認した。

緊張材齢と各ひずみの関係を図-5に示す。併せて、有線計測によるPC試験体のひずみ実測値(中段鉄筋)を図示した。推定したPC鋼棒のひずみ減少量とPC試験体のひずみ実測値を比較すると、材齢90日程度では値はほぼ一致しているものの、若材齢においては収縮ひずみ、クリープひずみ、リラクセ

ーション相当ひずみの和で算出したPC鋼棒のひずみ減少量の方が過大に算出されている。これは、算出したクリープひずみの影響が大きく出ており、クリープの算定式はコンクリートの値を基に定められていることから、鉄筋コンクリートとしてのクリープとしては、材齢初期にこれだけ過大にならない可能性はあると考えられる。90日以降については、PC試験体の実ひずみが推定値より大きくなると予測されるが、クリープ、リラクゼーションによるひずみが収束しつつあることから、収縮ひずみの増大により乖離してくる可能性がある。

本検討における緊張力導入時からのPC鋼棒の応力変化および初期応力に対する割合を図-6に示す。結果的に、式(3)で算出した応力 $510\text{N/mm}^2$ 、初期値に対する割合85%と同様の値となった。

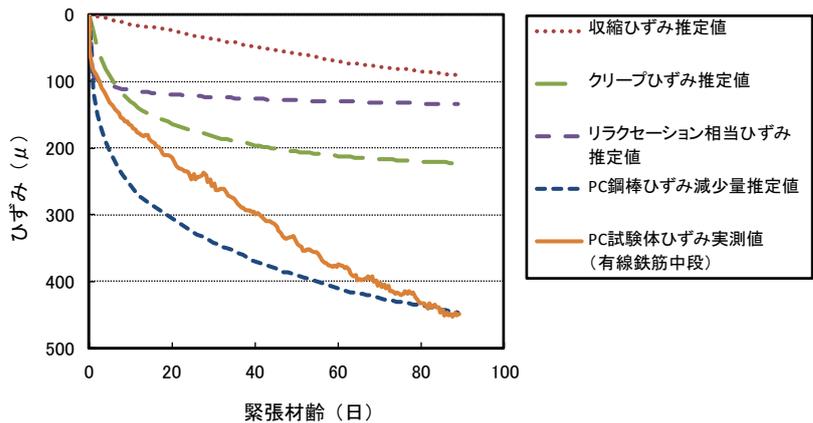


図-5 緊張材齢と各ひずみの関係

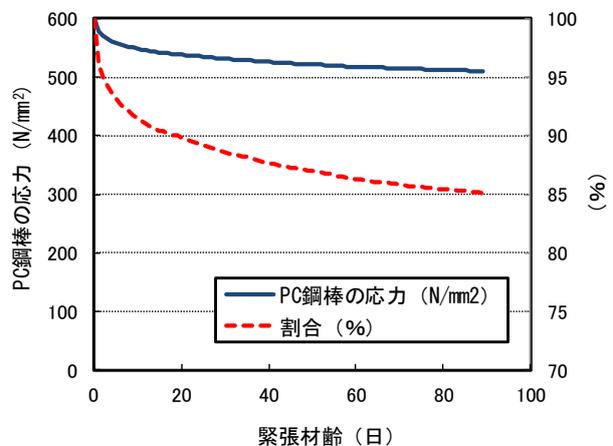


図-6 PC 鋼棒の応力変化および初期応力に対する割合

## 5. まとめ

RFIDを用いたひずみ計測によるPC試験体のひずみ挙動およびプレストレス量の推定について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) PC試験体の緊張導入時および曲げ載荷時のRFIDひずみセンサにおけるひずみ挙動について検討した結果、ほぼ有線のひずみゲージで計測した結果と同様の値が得られ、圧縮応力下においても非破壊で安定的にひずみ計測ができ、緊張管理に有効であることが明らかとなった。
- (2) PC構造物と同じ配合、環境条件、鉄筋比としたRFID収縮試験体を作製し、その収縮ひずみを現場でRFIDで簡易に測定することにより、有効部材厚を考慮してPC構造物の収縮ひずみを推定し、併せてクリープなどの影響を採り入れた手法を用いて、長期の有効プレストレスを算出する方法を提案した。

## 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) 江里口玲, 早野博幸, 佐藤達三, 石井祐輔: センサ付RFID を活用したコンクリート構造物診断システム, 第20回建築の自動化技術シンポジウム, 2014. 1
- 3) 小林仁, 先本勉, 藤井隆史, 綾野克紀, 宮川豊章: 乾燥収縮ひずみに与える部材寸法の影響, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp. 377-389, 2013
- 4) 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp. 421-437, 2013