

# 論文 PC 桁の有効プレストレス推定法の評価

原口 政仁\*1・幸左 賢二\*2・瀬良 洋夢\*3・清水 英樹\*4

**要旨:** PC 構造物の有効プレストレス推定法である応力開放法および荷重試験による推定法を緊張力が既知である実構造物レベルの PC 桁供試体に対して行い、適用性について検討した。その結果、荷重試験では供試体全体の剛性で評価するため誤差 6%の精度の高い推定結果が得られたのに対し、応力開放法では検討した 3 ケースで実際に作用する有効プレストレスの 4~6 割程度と小さい結果となり、変動係数が 22%とばらつきが大きくなった。これは応力開放法が局所を対象とした推定法であり、かつ、計測ひずみ量の絶対値が小さいことが原因と考えられる。

**キーワード:** PC, 有効プレストレス, 応力開放法, 曲げ荷重

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下 PC)構造が我が国で初めて採用されたのは、昭和 26 年頃といわれており、これらの PC 構造物を適切に維持管理していくために、コンクリート部材中のプレストレスをはじめとする応力度を適切に把握することが重要とされている。しかしながら、これまでに既設構造物のコンクリート部材に生じている応力度の推定法はいくつか提案、検討されているが、その測定精度などの問題から、十分には確立されていないのが現状である。

本論文では、コアを削孔するタイプの応力開放法を実構造物レベルの PC 桁供試体に対して行った。加えて緊張時のコンクリート表面において桁の軸方向に発生するひずみを計測し、応力開放法の結果と比較することで適用性を検討した。また、供試体の荷重試験より得られる推定初期ひび割れ荷重をもとに有効プレストレスを推定する手法も同時に行い、その推定精度について検討した。

## 2. 試験概要

### 2.1 実験供試体諸元

図-1、図-2 に供試体の基本寸法および配筋状況を示す。供試体は長さ 4500mm、幅 350mm、厚さ 550mm の長方形充実断面とした。PC 鋼線は  $\phi 19.3\text{mm}$  の鋼より線を 4 本配置しており、緊張方法はポストテンション方式とした。鉄筋は SD345, D13 を用い、軸方向に 10 本、帯鉄筋に 125mm 間隔で 35 本を使用した。なお、供試体端部には緊張力導入時の応力集中によるひび割れを防止する目的でグリッド筋を配置した。

表-1 に供試体の材料物性値を示す。水セメント比は 46%、単位水量は  $175\text{kg}/\text{mm}^3$ 、粗骨材には最大寸法 20mm の砕石、細骨材には砕石と海砂を混合使用した。コンクリートの圧縮強度および静弾性係数はシリンダー圧縮試験をテストピース 3 本で行い、その平均値とした。養生は保湿養生とした。材齢 5 週で圧縮強度は  $32.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、静弾性係数は  $27067\text{N}/\text{mm}^2$  となった。ここで設計基準強

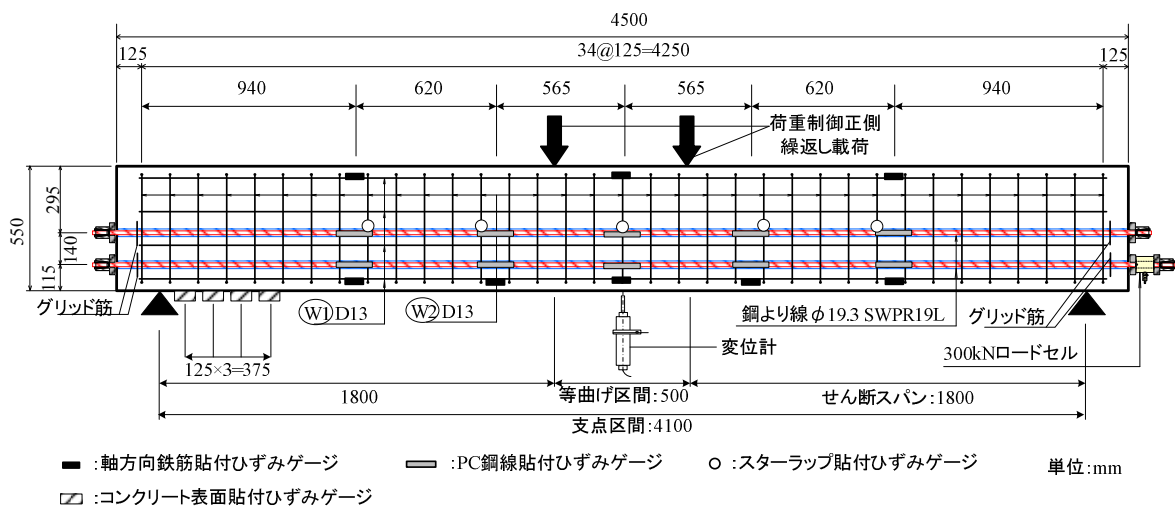


図-1 供試体平面図および計測位置

\*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科(正会員)  
 \*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D. (正会員)  
 \*3 九州工業大学院 工学部建設社会工学科(正会員)  
 \*4 大日本コンサルタント(株)九州支社技術部(正会員)

度は安全率を考慮せず、実強度で  $35\text{N/mm}^2$  となるよう配合を行っており、圧縮試験では設計強度と近い値が得られた。また、PC 鋼線、鉄筋の材料物性値は引張試験により求めた。なお、PC 鋼線の初期緊張力の設計値は  $1116\text{N/mm}^2$  であり、0.2%降伏強度の 63%となっている。

## 2.2 計測方法

図-1 中に各計測機器の設置位置を示す。PC 鋼線の緊張力を直接計測する目的でロードセルを端部に 1カ所設置した。ロードセルは中央に穴の開いたセンターホール型を使用しており、この穴に PC 鋼線を通して緊張力を測定している。また、コンクリート表面にゲージ長 30mm のひずみゲージを貼り付け、緊張時のコンクリート表面において軸方向に発生するひずみを計測した。なお、ゲージの防水処理はブチルゴム系およびポリエステル系コーティングにより行った。ひずみゲージの設置位置は図-3 に示すように、供試体下面の 4カ所とし、千鳥配置とした。なお、このひずみゲージは 5章に示す応力開放法においても使用した。また、鉄筋および PC 鋼線にひずみゲージを設置し、供試体内部のひずみ変化を計測した。

## 2.3 載荷試験概要

図-1 に載荷試験の概要を示す。支点間距離を 4100mm とし、載荷は等曲げ区間 500mm の 2点載荷とした。載荷方法は荷重制御片側繰返しで行い、変位は支間中央下縁に設置した変位計により計測した。荷重は載荷装置と載荷治具の間に 1000kN ロードセルを設置して計測した。なお、載荷試験は供試体打設から 1ヶ月後に実施した。

## 3. 緊張力導入時の緊張力計測

図-4 にロードセルで計測した PC 鋼線の緊張力変化を示す。PC 鋼線には、ジャッキの指示計によってほぼ等価の緊張力を導入し、そのうちの 1本で計測を行っている。セットロスの影響を考慮して設計値 272kN よりも大きな緊張力 308kN を導入したが、ジャッキ緊張力を開放した瞬間、想定以上にセットロスが生じ、緊張力は設計値 272kN に対し 258kN と 5%程度小さくなった。最終的にグラウトを行う直前の段階では 246kN となり、設計値より 10%程度小さくなった。ここでロードセルの計測値 246kN は信頼性の高い実測値であり、PC 鋼線の緊張応力に換算すると  $1009\text{N/mm}^2$  である。よって、以降の検討で比較を行う有効プレストレスの基準値は  $1009\text{N/mm}^2$  とした。また、コンクリート表面ひずみの基準値は  $1009\text{N/mm}^2$  の PC 鋼線緊張力が作用したときの供試体下面に作用する圧縮応力度をコンクリートの弾性係数  $27067\text{N/mm}^2$  で除して算出した。算出の結果  $353\mu$  となり、以降の初期緊張力導入時のコンクリート表面ひずみ計測および応力開放法における計測ひずみの比較対象とした。

図-5 に初期緊張力導入時のコンクリート表面ひずみ

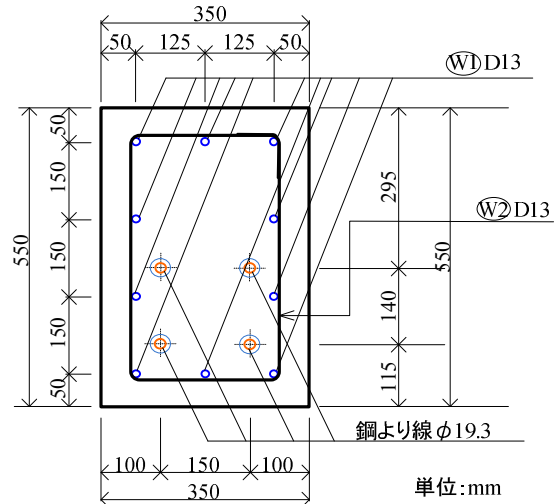


図-2 供試体断面図

表-1 材料物性値

使用材料	材料物性値	
	コンクリート	圧縮強度
静弾性係数		$27067\text{N/mm}^2$
PC鋼線	0.2%降伏強度	$1773\text{N/mm}^2$
	設計初期緊張力	$1116\text{N/mm}^2$
	弾性係数	$191200\text{N/mm}^2$
鉄筋	降伏強度	$365\text{N/mm}^2$
	引張強さ	$554\text{N/mm}^2$

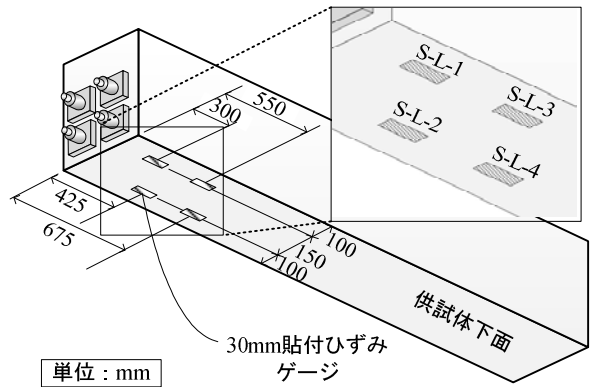


図-3 コンクリート表面ひずみ計測位置

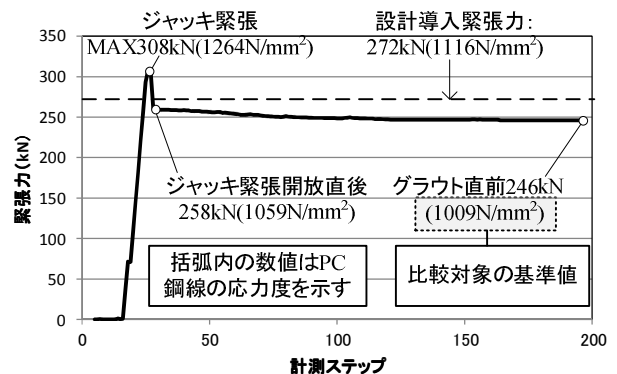


図-4 ロードセルによる緊張力測定結果

ゲージの計測値から推定した有効プレストレスを示す。計測は4カ所で行ったが、S-L-4が欠測であったため、結果から除外した。軸方向ひずみは298~332 $\mu$ の範囲で発生しておりこのひずみを、コンクリート表面ひずみの計算値353 $\mu$ で除することで推定有効プレストレスを算出している。基準値に対する推定有効プレストレスの比率は0.84~0.93となった。ロードセルとほぼ同等の緊張力が推定されていたことから、コンクリート表面に貼付したひずみゲージにおいてもプレストレス量がある程度の精度を持って計測されていたものと判断された。

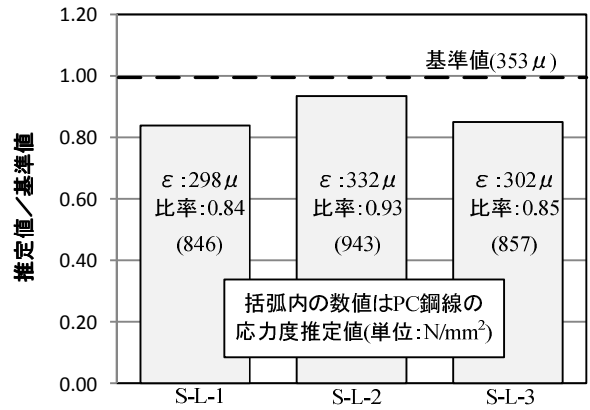


図-5 コンクリート表面ゲージによる推定結果

#### 4. 荷重試験による有効プレストレス推定

##### 4.1 有効プレストレス推定方法

図-6に有効プレストレス推定方法の分類を示す。荷重試験による推定法は $\pi$ ゲージを用いた推定法および荷重変位関係を用いた推定法の2種類があり<sup>2), 4)</sup>、今回は過去の研究に比較的高精度な結果が得られている初期ひび割れ荷重による推定法を用いた。

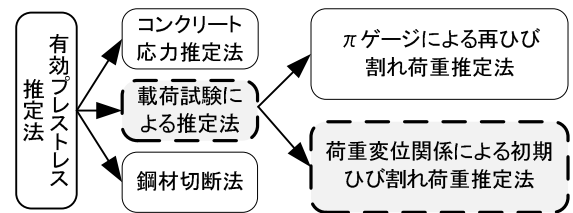


図-6 有効プレストレス推定法の分類

本推定法の概念を図-7に示す。本推定では荷重試験の荷重変位関係から初期ひび割れが確認されたサイクルの一次勾配と二次勾配を最小二乗法で定め、その交点における荷重を推定初期ひび割れ荷重とする。その後、推定初期ひび割れ荷重による供試体下縁の応力、仮定したひび割れ発生時の合計応力、既知である自重応力、有効プレストレスによる供試体下縁応力の4種類の応力のつり合いより有効プレストレスによる供試体下縁の応力およびPC鋼線の緊張力を逆算する。ここで計算は以下の仮定に基づく。

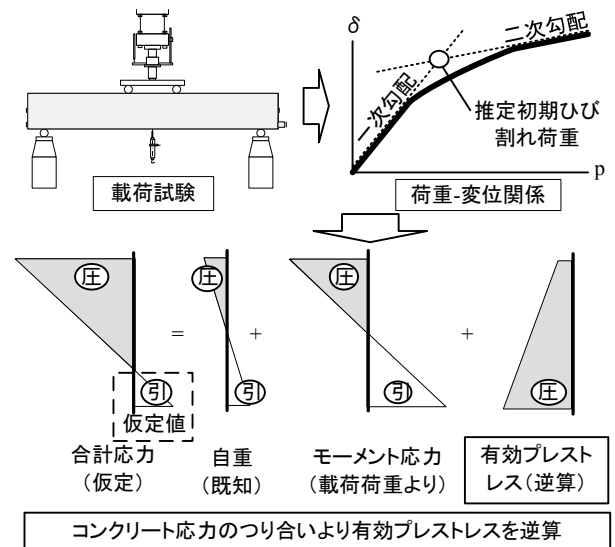


図-7 初期ひび割れ荷重による推定法の概要

- 1) 4本あるPC鋼より線はすべて同じ緊張力とする
- 2) 初期ひび割れ発生時PC桁下縁の合計応力は曲げ引張強度  $0.46fc^{2/3} = 4.92 \text{ N/mm}^2$  とする

PC鋼材の有効プレストレス量の算定は式(1)を用いて計算した。式(1)では有効プレストレス  $p$  が未知数であり、計算ではこれを逆算している。

$$\frac{A_s(n_U + n_L)p}{A_c} + \frac{A_s(n_L e_L - n_U e_U)p}{I_c} y_L = \sigma_L \quad (1)$$

[軸力分]                      [曲げ分]

ここに

- $A_s$ : PC鋼より線1本あたりの断面積( $\text{mm}^2$ )
- $n_u$ : 下側PC鋼線本数
- $n_L$ : 上側PC鋼線本数
- $A_c$ : コンクリート断面積( $\text{mm}^2$ )
- $e_u$ : 上側PC鋼線の中立軸からの偏芯量( $\text{mm}$ )
- $e_L$ : 下側PC鋼線の中立軸からの偏芯量( $\text{mm}$ )
- $I_c$ : 断面二次モーメント( $\text{mm}^4$ )

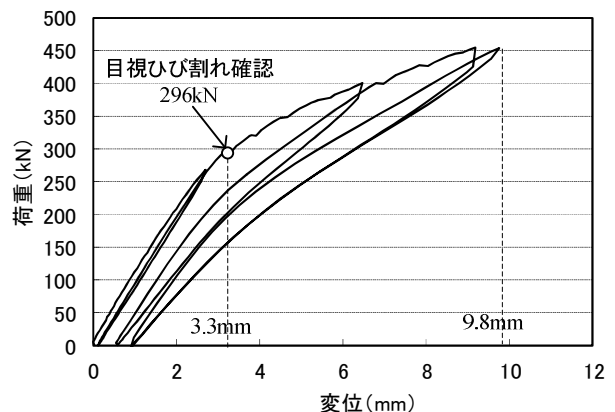


図-8 荷重-変位関係

$y_L$  : 図心から PC 桁下縁までの距離(mm)

$p$  : PC 鋼線の緊張力(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_L$  : PC 桁下縁の合計応力度(N/mm<sup>2</sup>)

#### 4.2 初期ひび割れ荷重による推定

図-8 に載荷試験結果の荷重変位関係を示す。1 サイクル目は 266kN まで載荷を行い、この時は荷重変位関係はほぼ線形を示し、残留変位も 0.1mm と小さかった。2 サイクル目の 296kN で目視のひび割れが確認され、この時の変位は 3.3mm であり、以降、勾配が変化した。その後、450kN までの載荷を 2 サイクル行い、最大変位は 9.8mm、最終残留変位は 0.9mm であった。

図-9 に荷重変位関係において、初期ひび割れが目視で初めて確認されたサイクルを示す。勾配に関しては最小二乗法を用いて計算し、計算範囲は荷重変位関係で直線に近い範囲として、一次勾配で 0~250kN、二次勾配で 300~400kN のすべてのプロットとした。一次勾配と二次勾配の直線の交点に相当する荷重は 295kN であり、これを推定初期ひび割れ荷重とした。この荷重は目視で最初のひび割れが確認された 296kN とほぼ同等の値となった。

推定した初期ひび割れ荷重をもとに計算した PC 桁支間中央での応力分布を図-10 に示す。式(1)より算出した有効プレストレス量は 1065 N/mm<sup>2</sup> となった。ロードセルより得られた緊張力 1009 N/mm<sup>2</sup> との比率は 1.06 となり、誤差の少ない推定値が得られた。

### 5. 応力開放法による推定

#### 5.1 応力開放法概要

応力開放法とは PC 構造物の表面にひずみゲージを貼り付け、その周囲にコアカッターなどで切り込みを入れ、その際に開放されるコンクリートのひずみ量を計測することで有効プレストレスを推定する方法である。本論文では緊張力導入時のひずみ変化量を計測し、その値と比較することで、応力開放法によるプレストレス推定量を検討している。なお、実験は緊張力導入後 1 ヶ月の時期に行い、これは供試体打設後 6 週に相当する。

図-11 に応力開放法の概要および手順を示す。1) でリード線はコア削孔の際にコア内部に位置するように打設前から設置しており、また、ひずみゲージは 3 章で示した緊張力導入前にコンクリート表面に貼り付けたゲージを使用した。緊張力を導入した後、2) に示す様にひずみゲージがコア中央に位置するように周囲をコアカッター(湿式)で削孔し、ひずみの開放量を計測した。

コアの削孔位置は図-3 に示すゲージ位置とした。コアの数は載荷試験時の影響を受けにくい端部近くの下面から 4 本とした。コア径は、鉄筋を避けて削孔する必要があることから参考文献<sup>9)</sup>を参考に 66mm とし、ゲージ

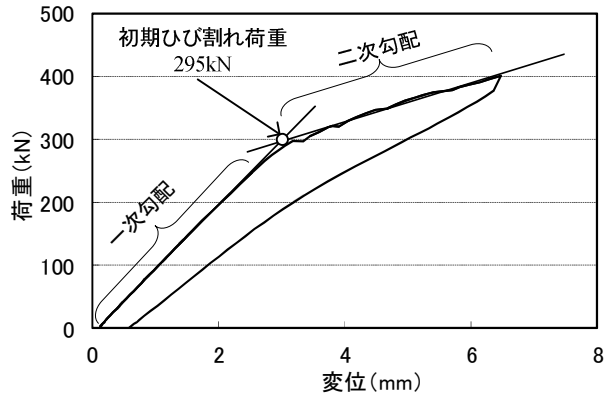


図-9 初期ひび割れ荷重

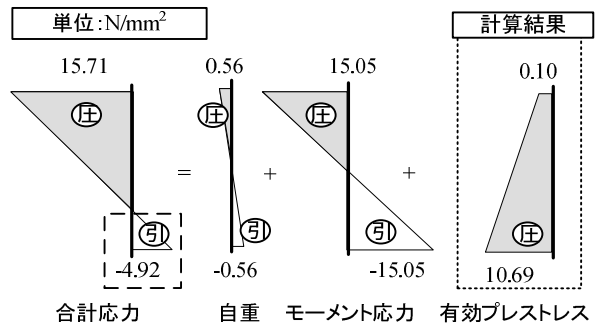


図-10 PC 桁供試体のコンクリート応力

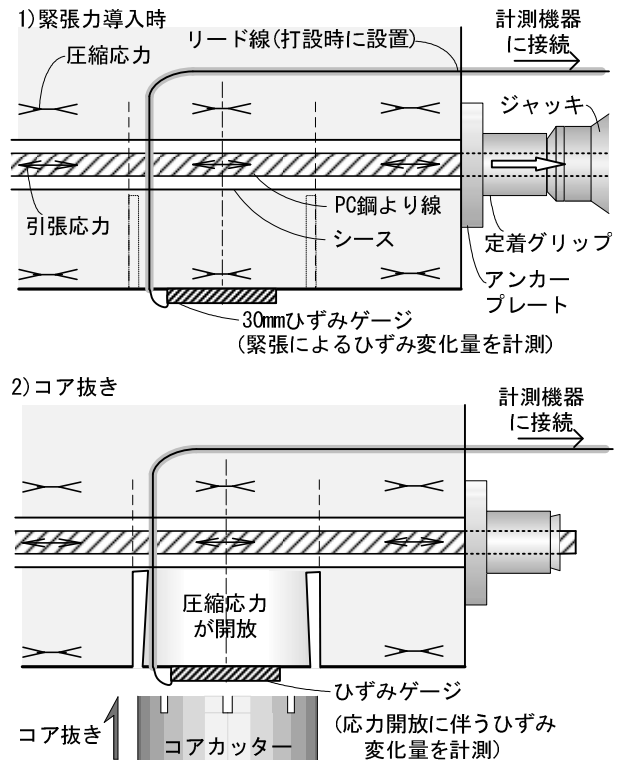


図-11 応力開放法概要

をコア内で健全な状態に保持するためにゲージ長は 30mm とした。削孔深さは、最終的な無応力状態まで計測を行うため、シース直上の 80mm までとした。また、削孔位置はコア相互の影響を排除するため千鳥配置とし

た。図-12にコアの模式図およびひずみゲージの計測方向を示す。ひずみ計測にはロゼッタゲージを用いたが、軸直角方向のひずみ量が小さく測定精度が十分に確保されていないことから、今回は軸方向の計測値で評価を行った。また評価は、PC鋼線に配置したロードセルの実測値を基に供試体下面において推定されるコンクリートのひずみ算出値と比較することによって行った。

## 5.2 応力開放法実験結果

図-13に計測開始から削孔深さ 80mm までのひずみ計測結果を示す。ひずみ量は削孔深さ 1mm ごとに計測している。S-L-1~3 に共通する事象として削孔深さ 30~40mm の範囲でひずみ量の最大値が計測され、その後、ひずみ変化量が減少し削孔深さ 60mm 以降で一定のひずみ量に収束していく挙動が見られる。このように削孔径の半分程度でひずみ変化量の最大値が計測された後、削孔径とはほぼ同等の深さで一定値に漸近する挙動は、コア表面近傍の圧縮応力の開放ひずみおよびコアの曲げ変形による引張ひずみによるものであり、これは過去の研究<sup>3)</sup>においても確認されている現象である。よって、今回は有効プレストレス推定結果が小さいものの応力開放法におけるひずみ開放の傾向は捉えていると考えられる。

表-2にひずみ計測結果および推定有効プレストレスの比率を示す。ここで推定有効プレストレスの比率を求める際、基準とするひずみは3章で示した 1009N/mm<sup>2</sup>のPC鋼線緊張力が作用した時の供試体下面のひずみ量の計算値 353 $\mu$ とした。比率は削孔深さ 80mm のときのひずみ変化量を算出した基準値 353 $\mu$  で除した値である。

推定有効プレストレス量はS-L-1で0.37, S-L-2で0.41, S-L-3は0.61となりいずれも、実際に作用している有効プレストレス量よりも4~6割程度低い値を示した。この原因については明確ではないが、コンクリートのクリープ、乾燥収縮によるひずみ変化の影響、円形コアに対するひずみゲージ長やゲージ貼付位置の影響、粗骨材寸法に対するコア径および削孔深さの影響などが挙げられる。

## 6. 考察

### 6.1 有効プレストレス推定結果の比較

図-14に有効プレストレス推定結果一覧を示す。載荷試験による推定と比較対象とする基準値は最も信頼性の高いロードセルより計測した緊張力である 1009N/mm<sup>2</sup>とした。また、コンクリート表面のひずみゲージによる推定の基準値は 1009N/mm<sup>2</sup>のPC鋼線緊張力が作用した時の供試体下面の算出ひずみ量 353 $\mu$ とした。応力開放法においてひずみを計測したゲージは初期緊張時のコンクリートひずみを計測したひずみゲージでも使用しているため、ゲージごとに有効プレストレス推定量を比較した。その結果、推定量の差はS-L-1で47%, S-L-2

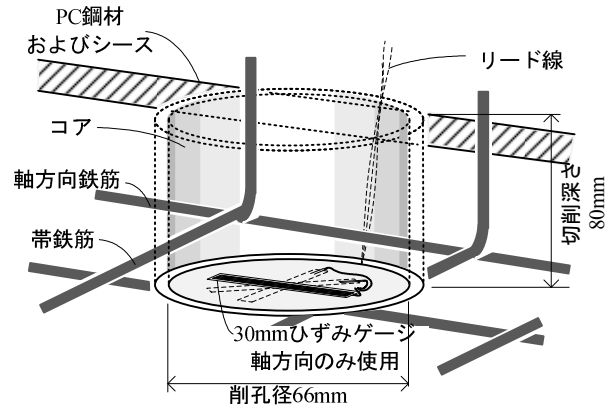


図-12 コアおよびひずみ計測方向

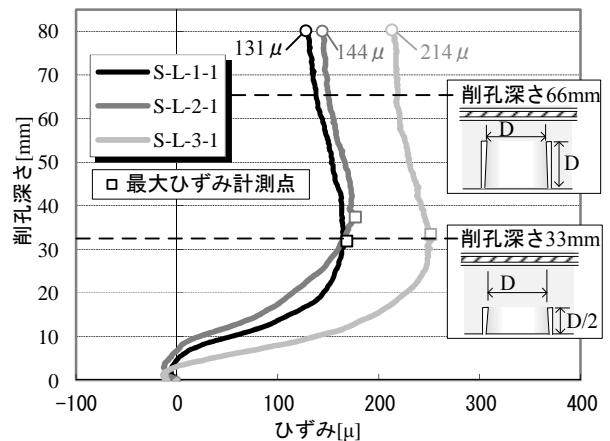


図-13 ひずみ計測結果

表-2 ひずみ計測結果

ゲージ No.	応力開放法 ひずみ変化量 (80mm削孔時)	比率 (変化量/ 計算値353 $\mu$ )
	$\mu$	
S-L-1	131	0.37
S-L-2	144	0.41
S-L-3	214	0.61

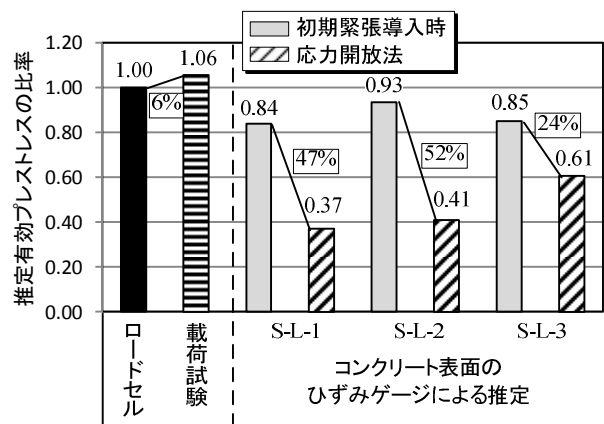


図-14 有効プレストレス推定結果

で52%, S-L-3は24%となり、緊張力導入時に対し応力開放法の推定量が小さく、大きな差が見られた。これに対し、載荷試験の推定量の差はロードセルの緊張力に対

し 6%であり高い精度で有効プレストレスを推定できた。

## 6.2 有効プレストレス推定結果のばらつき

表-3にコンクリート表面のひずみゲージの計測における初期緊張力導入時の表面ひずみによる推定結果と、応力開放法による推定結果のばらつきを示す。表中では変動係数(標準偏差/平均値)を示しており、初期緊張力導入時のコンクリート表面ひずみより求めたケースでは4.3%となり、応力開放法では大きく22.3%となった。このことからゲージ長30mmの貼付ひずみゲージを用いた場合、初期緊張の段階でひずみがある程度のばらつきを持って計測されるうえに、応力開放法では局所的なコア削孔の影響を受け、計測結果がさらに大きくばらつく可能性が高いと考えられる。

载荷試験は供試体全体の剛性をもとに推定する方法であり、荷重変位関係が局所的な変形の影響を受けにくいいため、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。これに対し、応力開放法は局所を対象に行う方法であるため、削孔範囲66mm以内のコンクリート材料が不均一な場合にひずみ変化量が様にならない場合や、乾燥収縮によるコンクリート表面近傍のひずみ変化の影響が大きい可能性が考えられる。また、応力開放法のばらつきが大きくなる原因として計測ひずみの絶対値量が小さいことも挙げられる。

図-15に応力開放法における80mm削孔時のひずみ計測結果とS-L-1~3の平均値との差を示す。ひずみ量の平均値との差はS-L-1で $32\mu$ 、S-L-2で $19\mu$ 、S-L-3で $51\mu$ となり、計測ひずみに対する相対誤差は13~24%となった。このように計測ひずみがわずか $51\mu$ 変動するだけで推定結果が24%も変化するのは、実験結果の計測ひずみが $131\sim 214\mu$ と絶対値が小さく、僅かなひずみ計測誤差が有効プレストレス推定結果に多大に影響するためである。よって応力開放法において精度の高い推定をするためにはひずみ計測の精度に十分留意する必要がある

## 7. まとめ

実構造物レベルのPC桁供試体を対象にコア抜きによる応力開放法および载荷試験のひび割れ荷重から有効プレストレスを推定する方法の適用性について検討した結果、以下の知見を得られた。

- 1)PC桁供試体の载荷試験から得られたひび割れ荷重より有効プレストレスを推定した結果、ロードセル計測値との比率が1.06となり、この方法では精度よく有効プレストレスを推定することが可能である。
- 2)応力開放法において既往の研究で確認されているひずみ開放の傾向は捉えているが、推定有効プレストレスはロードセル実測値に対し0.37~0.61と小さい。
- 3)応力開放法の計測ひずみは変動係数が24%とばらつき

表-3 各推定法の平均および標準偏差

推定法		基準値 (1009N/mm <sup>2</sup> ) に対する割合	平均	標準 偏差	変動係数 (%)
初期導入時の コンクリートひ ずみより算出	S-L-1	0.84	0.87	0.037	4.3
	S-L-2	0.93			
	S-L-3	0.85			
応力開放法	S-L-1	0.37	0.46	0.103	22.3
	S-L-2	0.41			
	S-L-3	0.61			

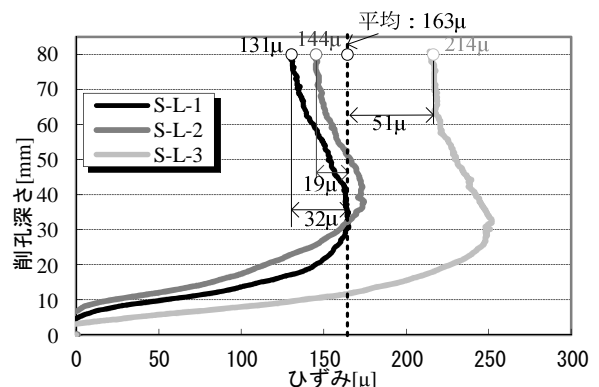


図-15 応力開放法の計測ひずみと平均値との差

が大きい結果となった。これは応力開放法が局所を対象にした推定法であり、かつ、 $131\sim 214\mu$ の絶対値量が小さいひずみから推定しており、僅かな計測誤差が有効プレストレス推定結果に多大に影響するためと考えられる。

## 参考文献

- 1) 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に関する研究, コンクリート工学, Vol.20, No.2, pp.27-37, 2009
- 2) 二井谷教治, 中村雅之, 辻幸和, 水田敦: 38年間供用したプレストレスコンクリート桁の耐久性および耐荷性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1585-1590, 2005
- 3) 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
- 4) 清水英樹, 幸左賢二, 福永靖雄, 松尾明武: 53年経過したPC版の残存プレストレス量の推定, 第19回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム pp.187-192, 2010.10
- 5) 清水英樹, 幸左賢二, 福永靖雄, 松尾明武: PC版の応力開放法による有効プレストレス量の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.529-534, 2011
- 6) 加藤 暢彦, 金田 昌治, 園田 恵一郎: コンクリート構造物の現存応力の測定方法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.333-340, 1996