

大型PC桁供試体を用いた有効プレストレス推定方法に関する検討

住友大阪セメント(株)	○上原 伸郎
九州工業大学 正会員 Ph. D.	幸左 賢二
九州工業大学	原口 政仁
大日本コンサルタント(株)	工修 清水 英樹

Abstract : Although several methods for estimating effective prestress were proposed, their accuracies were still not clear. In this paper, the stress-releasing method for estimating effective prestress is discussed, by drilling circular core on the large-scale PC beam specimen whose prestress is known. Based on experimental results, the strain on the surface of concrete when stress is input is about 20% smaller than that calculated according to the tensile load measured by load cell. Besides, the strain measured in stress-releasing method, reaches the maximum value when drilling depth is about half of core diameter, and then trends to compression. The measured strain trends to converge when depth is similar to core diameter.

Key words : PC beam , prestress, existing stress , released strain

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下 PC)は、コンクリートにプレストレスを導入することで引張応力度とひび割れを抑制する合理的な構造であり、公共施設や重要構造物など数多くの構造物で採用されている。すべてのPC構造では、供用中においてもプレストレスが有効に作用していることがその構造を成立させる上で必要不可欠である。しかしながら、PC構造物の事後評価においては、最も重要な評価項目の一つである有効プレストレスに関して、いくつかの推定方法が提案されているもののそれぞれの推定精度については未だ不明な点が残されており、非破壊検査等により適切に評価する手法は確立されていないのが現状である¹⁾。

以上から本稿では、緊張力が既知である大型のPC桁供試体を用いることで有効プレストレス推定方法に関する検討を行う。具体的には、円形コアを削孔した際にコンクリート表面で計測される応力開放量をコンクリートのひずみ変化量から求めることで、有効プレストレス量を推定する手法(以下 応力開放法)に関して、削孔深さの影響、ポアソン効果の影響などについて検討を加えた。

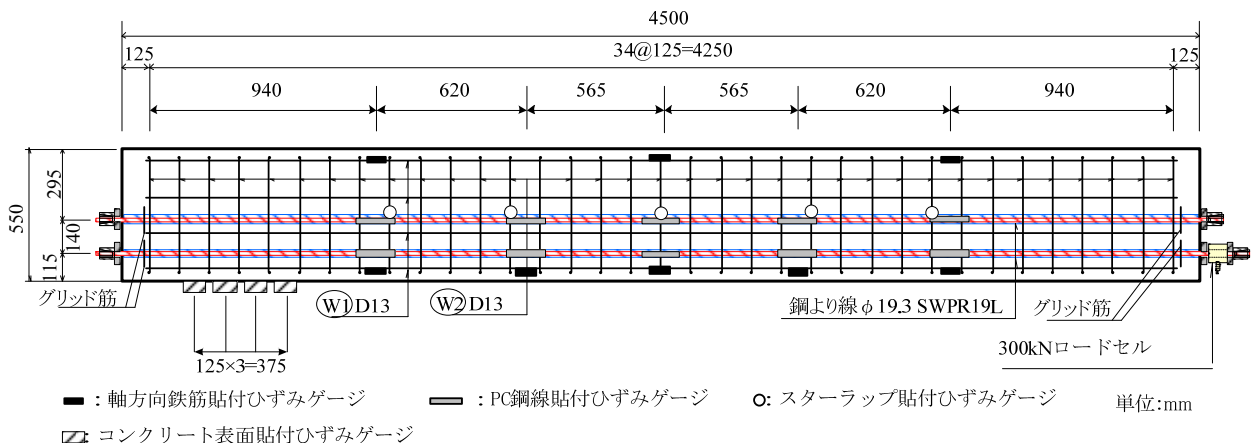


図-1 供試体概要と計測機器設置位置

2. 試験概要

2. 1 PC桁供試体諸元

図-1に供試体概要と計測機器設置位置、図-2に配筋状況を示す。供試体寸法は、長さ4500mm、幅350mm、厚さ550mmの長方形充実断面とした。PC鋼線はφ19.3mmの鋼より線を4本配置し、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、帯鉄筋には125mm間隔で35本使用した。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。

2. 2 材料物性

表-1に供試体の材料物性値を示す。コンクリートの配合は、水セメント比46.0%、単位セメント量380kg/m³、単位水量175kg/m³とした。コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、PC桁供試体打設時に作成したテストピース3本(φ100×200mm)の平均値で評価した。また、PC鋼線および鉄筋の材料物性値は引張試験により求めた。

2. 3 計測方法

図-1中に各計測機器の設置位置を示す。緊張力を直接計測するために下側のPC鋼線1本にセンターホール型のロードセル(容量300kN)を設置した。コンクリート表面には、ゲージ長30mmのひずみゲージを供試体下面に貼付し、同一のひずみゲージによって緊張力導入時のひずみ変化量、ならびに応力開放法実施時のひずみ開放量を測定した。図-3にコンクリートのひずみゲージ貼付位置の一例を示す。ひずみゲージは4箇所を1グループとして、PC桁軸方向の両端(南、北)に貼付し、2グループ8枚で評価を行う。図中に示す記号は、「供試体番号・方位-ゲージ長-通番」としている。ここで、ゲージ長の設定については、対象物がコンクリートであることを考慮すれば本来60mm程度以上を使用することが望ましい。しかしながら本研究では、削孔深さによる影響を検討項目としており、帯鉄筋以深までコアビットを挿入する必要があることから、帯鉄筋の配筋ピッチ(125mm)を考慮しφ66mmのコアを採用した。したがって、ひずみゲージはφ66mmコア内に設置可能なゲージ長30mmを選定した。

3. 緊張力導入時の計測結果

3. 1 ロードセルによる緊張力の直接計測

目標初期緊張力を1116N/mm²(272kN相当)とし、ロードセルを設置したPC鋼線を最初に緊張した。この時の油圧ジャッキの指示値を基準として、他の3本を順次緊張した。1本目導入時における最大緊張

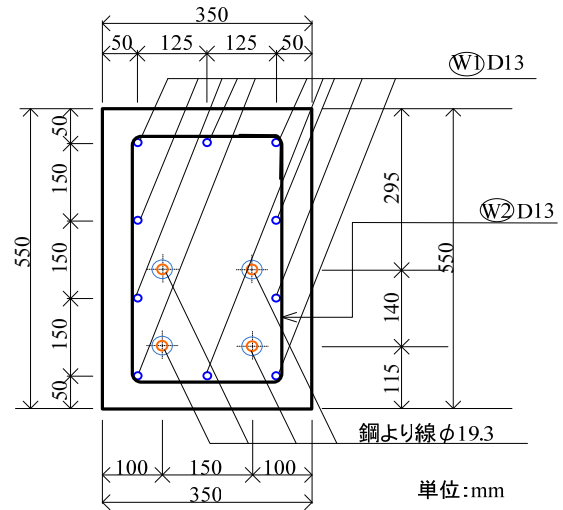


図-2 配筋状況

表-1 材料物性値

使用材料	材料物性値(N/mm ²)	
	コンクリート	圧縮強度
静弾性係数		27067
PC鋼線	0.2%降伏強度	1773
	目標初期緊張力	1116
	弾性係数	191200
鉄筋	降伏強度	365
	引張強さ	554

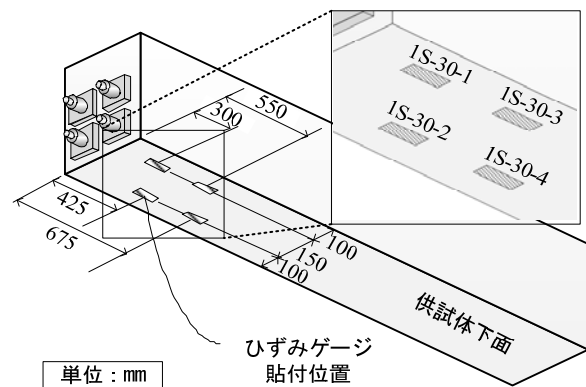


図-3 ひずみゲージ貼付位置の一例

力は、定着時のセットロスなどを考慮し、約 1270N/mm^2 (310kN 相当)までとしたが、4本すべての緊張作業を終えたのちロードセルで計測された緊張力は、 1009N/mm^2 (246kN)であった。

3. 2 緊張時のコンクリートひずみ量の測定

図-4に緊張力導入時におけるコンクリートひずみの経時変化として、南側(記号S)で計測した4点の結果を示す。また、図-5には、緊張力導入後のコンクリートひずみ変化量を示す。図中の基準値(374μ)は、緊張力導入によって供試体下面に作用する圧縮応力度をロードセルの値とテストピースで求めたコンクリートの静弾性係数を基に算出した想定ひずみ量である。なお、1N-30-2, 1N-30-3は、欠測であったため検討対象から除外した。

図-4より、下側のPC鋼線を緊張する際に比較的大きなひずみ変化が生じている。また、PC鋼線の緊張1本目から2本目までは、ほぼ同等の変化が生じているが、3本目以降から各ゲージの計測値に差が生じた。図-5に示すように、緊張力導入後の平均値は -295μ で基準値(374μ)の78.9%の値となった。また、変動係数は13.2%でばらつきは大きくなった。ばらつきは骨材の最大寸法に対してゲージ長が短いことから生じたものと考えられ、また基準値より小さい値は、供試体とテストピースとの実強度差やゲージ貼付位置におけるコンクリートの不均一さなどが原因として考えられる。

4. 応力開放法によるプレストレス推定

4. 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。本稿では、PC鋼線の緊張力をロードセルによって直接計測し、コンクリート応力のつり合いから供試体下面における応力度を求めた。次に、コンクリートの弾性係数を基にコンクリート下面における推定ひずみ量を算出し、この値と応力開放法によるひずみ開放量とを比較することで、有効プレストレス量を推定した。

図-6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コンクリート打設前から設置した。ひ

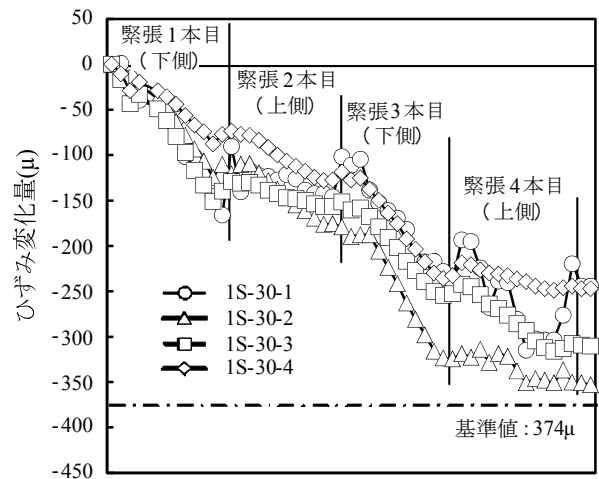


図-4 緊張後のコンクリートひずみ変化量

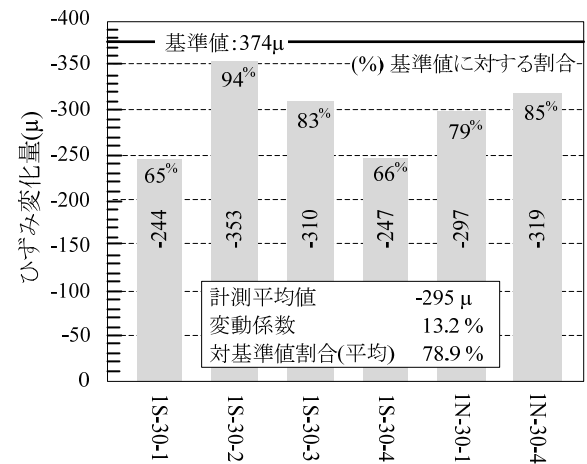


図-5 緊張時のコンクリートひずみ経時変化

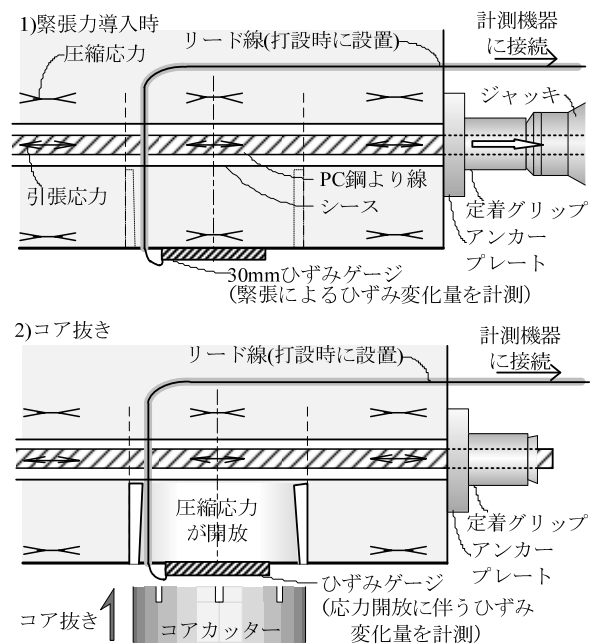


図-6 応力開放法の概要

ひずみゲージは緊張力導入前にコンクリート表面に貼付したゲージを使用した。緊張力導入後、2)に示すよう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で削孔し、ひずみの開放量を計測した。図-7にコアの模式図、およびひずみゲージの計測方向を示す。コア径は、配筋ピッチの都合上100mm程度以上を選択することが難しいことから、既往の研究²⁾を参考にしφ66mmを選択した。コアは軸方向鉄筋および帯鉄筋を避けるように削孔し、最大深さは、シース管を傷つけないように80mmまでとした。ひずみゲージは、1コアあたり3方向のひずみが測定できるものを使用しているが、本章では開放量を直接計測する軸方向ゲージの値のみで評価を行っている。なお、当初コア削孔位置は、図-3において説明した位置を予定していたが、供試体移動等によって1S-30-4が、また測定時の不具合等によって1N-30-1、および1N-30-4が損傷してしまったため、1S-30-1、1S-30-2、ならびに1S-30-3の3点のみで評価を行っている。

4. 2 応力開放法による有効プレストレス推定

図-8に応力開放法によるひずみの測定結果を示す。1S-30-1では削孔深さ31mmの時点で最大値165μが計測され、削孔深さ80mm近傍では130μ程度の数値に収束した。同じく、1S-30-2では最大値175μ(38mm時点)、収束値144μ(80mm近傍)、1S-30-3では最大値262μ(32mm時点)、収束値225μ(80mm近傍)となった。

3点すべてにおいて深さ33mm前後、すなわちコア径の約半分程度の深さまで削孔した際に最大値が示され、収束値に対して31~37μ程度の引張側となった。図-9に緊張力導入時のロードセルによる計測結果を基にした推定基準値との比較を緊張力導入時のひずみ変化量計測結果とともに示す。図に示す応力開放量は、コア内部の応力が完全に解放された時点、すなわち、ひずみの最大値を超過し、ひずみの変化量が収束する削孔深さ80mm時点における数値を評価対象とした。

今回行った試験では、いずれの測定値も基準値(374μ)を大きく下回る結果となった。また、同一箇所、同一ゲージで計測している緊張力導入時点のひずみ変化量と比較しても、計測数値として85

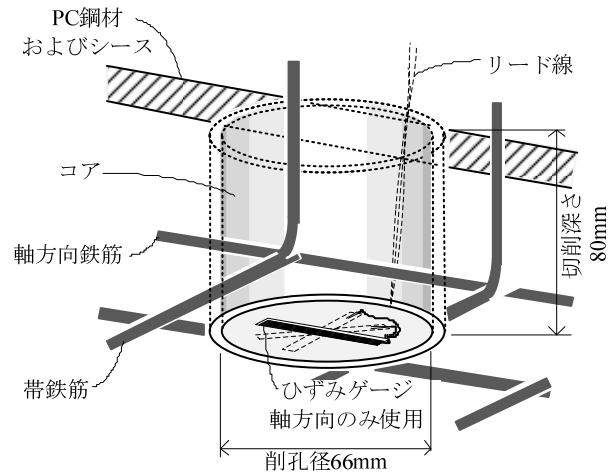


図-7 コアおよび計測方法

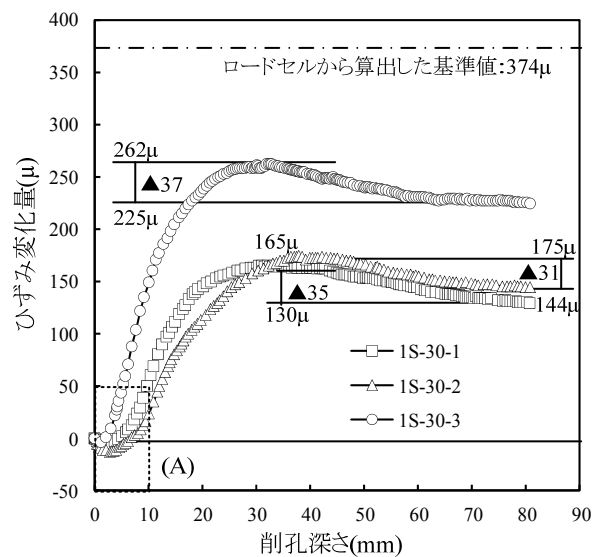


図-8 応力開放法によるひずみ測定結果

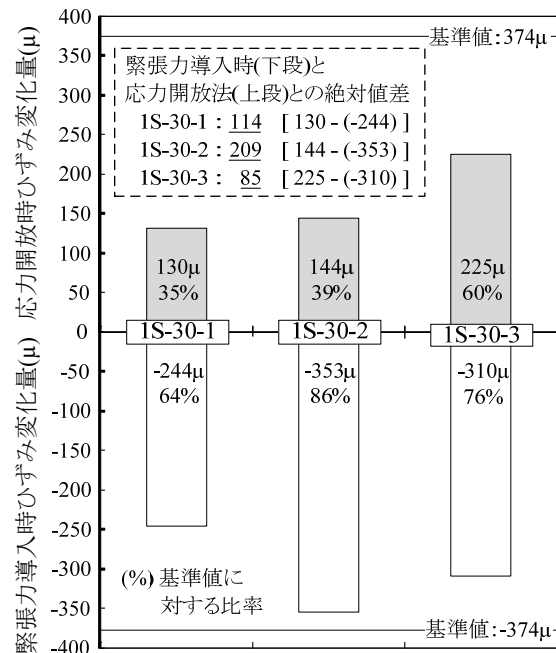


図-9 応力開放量と推定基準値および緊張力導入時との比較

～209 μ の大きな差となった。この要因については次章5.1で触れるが、コアビットの傾きやコンクリート表面の凹凸などが考えられる。

5. 応力開放法の算出値に関する考察

5. 1 最大ひずみ量と収束値について

ここで、図-8に示したように、応力開放ひずみは一様に膨張(引張)傾向を示すのではなく上に凸の形状となっている。樋口らの研究³⁾では、応力開放によってコンクリート表面近傍の圧縮応力が徐々に開放されていくとともに、削孔部分には曲げによる引張成分が発生するとしている。また、FEM解析で求めたこの現象は、コア径の半分程度の削孔深さで引張側の最大ひずみが算出され、その後圧縮傾向を示している。すなわち、今回の試験結果と同様な曲線が求められている。また、収束したひずみ値と最大引張ひずみとの差を比較すると約26%の差となっている。同じく加藤らの研究⁴⁾においても、解析によって算出された最大値と収束値との差を収束値を基準として比較すると約17%の差となっている。図-10に示すように、今回の計測結果において、応力開放ひずみの最大値と収束値との差は、収束値に対する比率として、1S-30-1で26.9%、1S-30-2で21.5%、1S-30-3で16.4%となる。したがって、応力開放によって計測したひずみ変化の下降域については、両者のFEM解析で得られた値とほぼ同等である。

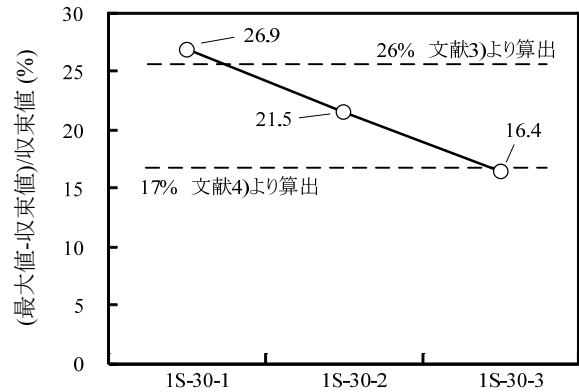


図-10 応力開放法による計測ひずみの最大値と収束値との関係

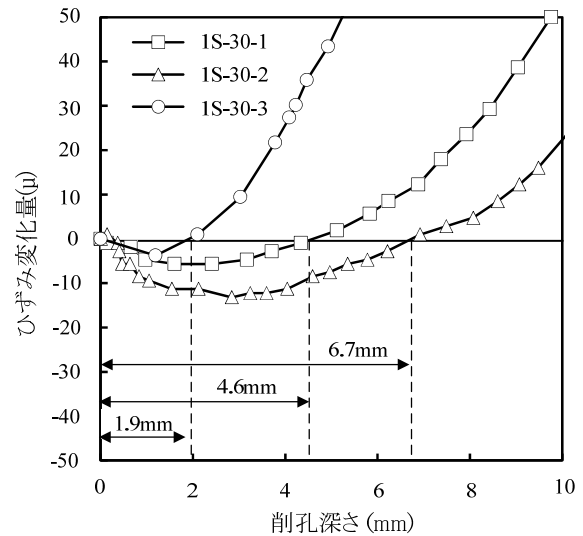


図-11 応力開放初期のひずみ変化

一方、今回の計測では、図-11(図-8(A)の拡大図)に示すように、3点すべてにおいて応力開放初期に収縮(圧縮)側の傾向を示している。この結果は、両者の解析結果とは異なるものである。原因については現時点で不明であるが、コアビットが供試体に接触する際の傾きや供試体表面の凹凸などの影響により、応力開放初期においてひずみ変化量の計測にロスが生じていた可能性が考えられる。以上から、今回の測定結果においては、主に応力開放初期で不安定なひずみ計測となったが、全体としては、コア削孔に伴う応力開放ひずみの傾向を反映した結果が得られたものとする。

5. 2 ポアソン効果について

計測される応力開放ひずみを小さくする要因として、軸直角方向のひずみ変化に起因するポアソンひずみが考えられる。したがって本項では、供試体軸直角方向のひずみ測定を行った結果をもとにポアソン効果による補正を行う。

供試体に作用している軸方向のひずみは、緊張力開放ひずみ(μ_p)、乾燥収縮ひずみ($\mu_{x,shr}$)、および軸直角方向の乾燥収縮ひずみに伴うポアソンひずみ($v \cdot \mu_{x,shr}$)とし、軸直角方向に作用しているひずみは、乾燥収縮ひずみ($\mu_{y,shr}$)、軸方向の緊張力開放ひずみに伴うポアソンひずみ($v \cdot \mu_p$)、および軸方向の乾燥収縮ひずみに伴うポアソンひずみ($v \cdot \mu_{y,shr}$)と仮定した。なお今回は、クリープひずみ、および鋼材によるひずみの拘束効果は考えないものとし、ポアソン比(v)は0.2一定とした。関係式を式(1)に示す。

$$\mu_x - \mu_y = (\mu_p - \mu_{x,shr} + v \cdot \mu_{y,shr}) - (-\mu_{y,shr} - v \cdot \mu_p + v \cdot \mu_{y,shr}) \quad (1)$$

ここで、 μ_x は、供試体軸方向の全ひずみ、 μ_y は、供試体軸直角方向の全ひずみである。乾燥収縮ひずみに方向性がないと考え、式(1)を変形すると以下のようになり、式(2)を用いてポアソンひずみを補正することとした。

$$\mu_p = (\mu_x - \mu_y) / (1 + \nu) \quad (2)$$

供試体軸直角方向の測定結果を含めたひずみ変化量の計測結果について、1S-30-2を一例とし、図-12に示し、同様にして算出したそれぞれのゲージのポアソンひずみ補正後における応力開放ひずみ量を図-13に示す。

ポアソンひずみを補正することによって基準値に若干近づく補正值となったが、平均すると基準値の50%程度に留まる結果であり、1S-30-3については、補正することによって開放量が減少する結果となった。軸直角方向のひずみ変化量は数十 μ 程度であり、前述の緊張力導入時の結果も併せて考えれば、ひずみゲージを用いたコンクリートのひずみ測定では、それ自身が持つ精度に由来したバラツキの中にポアソン補正量が含まれる結果になったと考えられる。

6. まとめ

- (1) 緊張力導入時に30mmのゲージを用いてコンクリート下面におけるひずみ変化量を計測した結果、ロードセルで測定した緊張力の基準値から算定した推定ひずみ量に対して、ばらつきが若干大きいものの、約80%程度の推定結果が得られた。
- (2) 応力開放法によるプレストレス量の推定では、基準値との差が緊張力導入時以上に大きく開く結果となった。応力開放ひずみ量の挙動としては妥当な線形が得られたが、主に応力開放初期の段階において不安定なひずみ変化量が測定された。
- (3) 軸直角方向のひずみ変化量の絶対値が小さいことから、ポアソンひずみによる補正量よりもひずみゲージによる測定の計測誤差の方が大きいものと思われる。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか：PC道路橋の健全度評価の高度化に関する共同研究，国土技術政策総合研究所資料，第613号，2010.10
- 2) 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，Vo. 33, No. 2, pp. 529-534, 2011, 7
- 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) 加藤暢彦，金田昌治，園田恵一郎：コンクリート構造物の残存応力の測定法に関する研究，構造工学論文集，Vol. 42A, pp. 333-340, 1996. 3

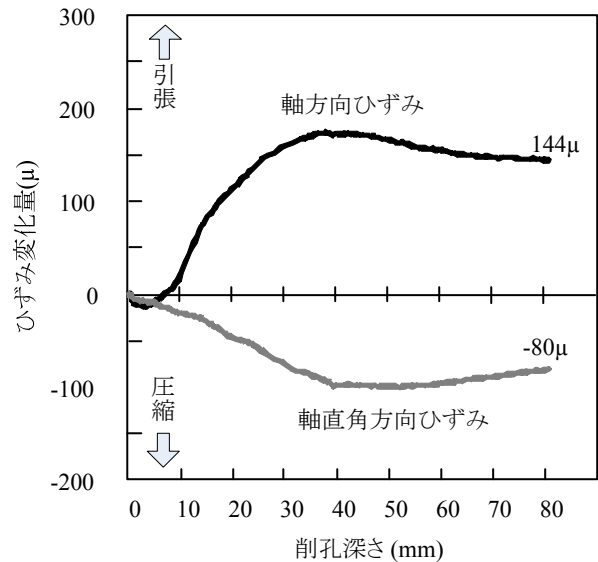


図-12 軸および軸直角方向のひずみ変化量

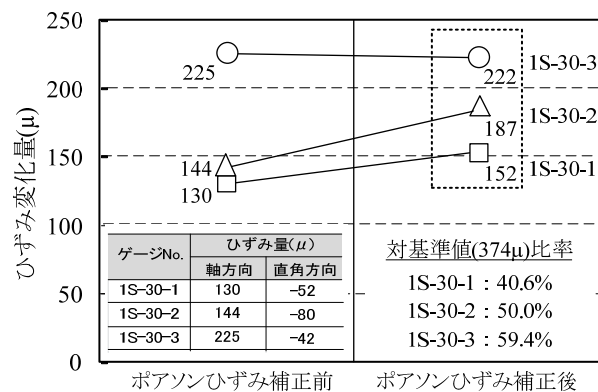


図-13 ポアソンひずみ補正後のひずみ量