

## 応力集中係数を用いたコンクリートの内部応力測定方法に関する基礎的研究

神戸大学 ○三木 大地  
神戸大学 正会員 三木 朋広

Abstract : A method to estimate the residual prestressing force in concrete members is required to evaluate the structural performance of existing prestressed concrete structures. Toward this goal, the stress concentration around the hole in a prestressed concrete specimen was used to evaluate the prestress in the concrete member. As the fundamental investigation, uniaxial compression tests were conducted for the mortar specimens with a circle hole in order to confirm the influences of the size of the hole and the material property on the estimation of the compressive stress in the concrete. The strain distribution around the hole in the specimen measured in these experiments was compared with the results calculated based on the theory of elasticity and finite element analysis, and consequently a validity of the experiment can be examined.

Key words: estimation of prestress, stress concentration, prestress estimation, aggregate, stress release

### 1. はじめに

既存PC構造物の性能評価のためには、残存プレストレスを適切に把握する必要がある。そのための手法がいくつか提案されている<sup>(例えば<sup>1)</sup>)</sup>。本研究では、コンクリートに作用する圧縮応力を推定する方法について、著者らの既往研究<sup>2)</sup>をもとにして種々検討していく。まず、円孔を有するモルタル供試体に対して一軸圧縮試験を行った。このときの円孔周辺のひずみ分布は円孔の大きさにより異なり、円孔直径が大きい程、比較的円孔際から離れた位置でも応力集中が生じる。そこで、円孔の大きさと材料特性が円孔周辺の応力集中に伴うひずみ分布に与える影響を確認した。これらのうち一部の供試体を対象として2次元有限要素解析を実施し、骨材の位置や分布の影響について調べた。さらに、コンクリート供試体にプレストレスを導入して、実際の構造を模擬した応力場における検討を加えた。これらの実験、理論、ならびに有限要素解析によって得られたひずみ分布を比較し、本手法の妥当性を検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 モルタル供試体

実験には 100 mm×100 mm×100 mm の立方体の供試体を用いた。用いた材料は、普通強度モルタル（以下モルタル）と超高強度モルタルの 2 種類である。本研究では対象に設けた円孔周辺の応力集中に伴うひずみ分布を利用して応力を測定していく。まず、設ける円孔の大きさが応力の測定結果に与える影響を検討するため、コンクリートより均質な状態を仮定できるモルタル供試体において、直径 5 mm, 10 mm, 20 mm の円孔を設けた供試体を 2 体、計 6 体作製した。ここで、打設前に丸棒を供試体側面中央に設置しておき、硬化す

表-1 超高強度モルタルの配合

W/C (%)	P (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )
0.14	2300	184	30

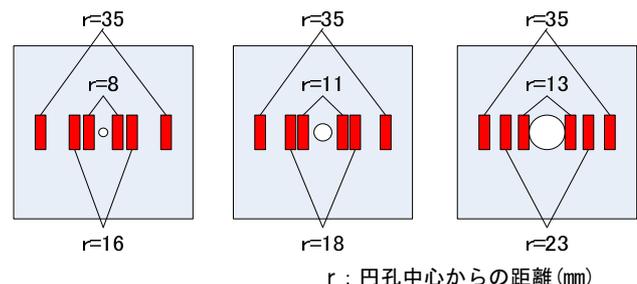


図-1 モルタル供試体のゲージ位置

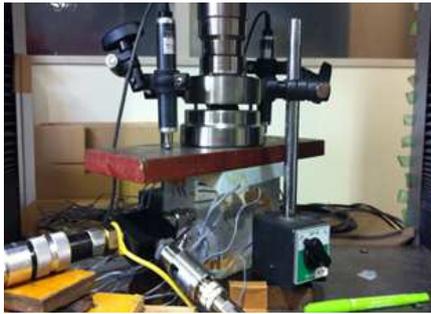


図-2 膨張圧荷荷の状況

る前に引き抜くことにより円孔を設けた。モルタルならびに超高強度モルタルの圧縮強度はそれぞれ  $40 \text{ N/mm}^2$ ,  $200\text{N/mm}^2$  とした。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、水、セメント、砂の割合は 1:2:6 とした。モルタルの骨材の最大寸法  $G_{\text{max}}$  は 5 mm であり、超高強度モルタルでは 2 mm 以下であった。超高強度モルタルの配合を表-1 に示す。

一軸荷重試験では、圧縮応力を一様に作用させるために、供試体の荷重面と底面に鋼製荷重板を設置した。荷重板と供試体の間には、水平方向の拘束を除去するため、二枚のテフロンシート間にグリースを塗布した減摩パットを配置した。円孔周辺のひずみ分布を測定するためのひずみゲージは、モルタルでは長さ 20 mm、超高強度モルタルでは長さ 10 mm のものを使用した。供試体の円孔を設けた表裏 2 面に、それぞれ 6 枚ずつ、計 12 枚貼り付けた。ひずみゲージの貼付け位置を図-1 に示す。

加力について、モルタルの圧縮強度の 1/4 程度の 10 MPa まで荷重した。さらに、円孔直径 10 mm のモルタル供試体においては上下面からの圧縮応力だけでなく、ジャッキによる膨張圧を荷重するケースと、圧縮応力と膨張圧を同時に荷重するケースを実施した。膨張圧の荷重状況を図-2 に示す。膨張圧は、設けた円孔周辺のコンクリートにおける応力状態を元に戻すよう円孔内側から加圧し、このときの円孔周辺のひずみ値の変化によって作用応力を推定しようとする目的がある。

## 2.2 コンクリート供試体

実験には断面が  $75 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  で、長さが 500 mm の供試体を用いた。ここで、1つの供試体において大きさの異なる 3つの円孔（直径 5 mm, 10 mm, 20 mm）を設けることによって、コンクリートの静弾性係数、ならびに、プレストレス力による応力状態におけるばらつきを可能な限り小さくするよう供試体を設定した。用いたコンクリートにおける粗骨材の最大寸法  $G_{\text{max}}$  は 20 mm とし、圧縮強度は  $30 \text{ N/mm}^2$  とした。コンクリートの示方配合を表-2 に、供試体概要を図-3 にそれぞれ示す。

プレストレスに相当する圧縮応力については、供試体の断面上部、下部の 2 か所において、それぞれ PC 鋼棒を介してプレストレス力を導入した。ひずみゲージは 20 mm のものを用い、円孔を設けた 2 面に貼り付けた。ひずみゲージの貼付け位置を図-4 に示す。

導入力は、PC 鋼棒のひずみゲージの値を随時計測して、その PC 鋼棒のひずみ値から算出した。コンクリートに加える目標応力は 5 MPa と設定して、PC 鋼棒一本当りの緊張力は 37.5 kN とした。ただ

表-2 コンクリートの示方配合

$G_{\text{max}}$ (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				単位量(ml/m <sup>3</sup> ) AE 減水剤
					W	C	S	G	
20	8	67.3	4.5	48.1	172	256	869	946	820

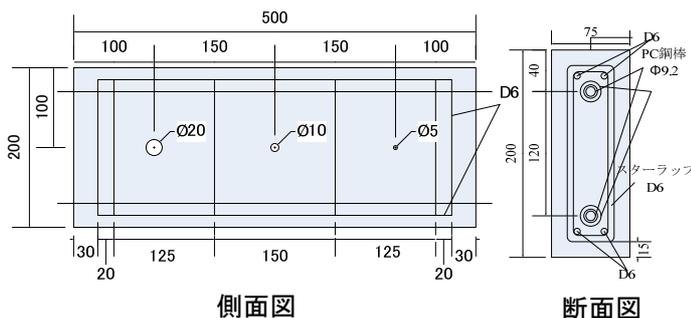
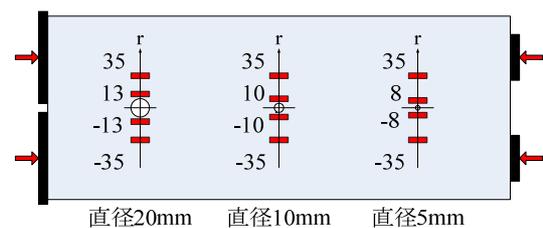


図-3 コンクリート供試体概要



r : 円孔中心からの距離 (mm)

図-4 コンクリート供試体のゲージ位置

し、片側だけに一度に 37.5 kN のプレストレスを作用させると曲げひび割れが生じる可能性があるため、交互に 7.5 kN 刻みで段階的にプレストレスを導入していった。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 モルタル供試体を用いた要素試験

本研究は既往研究<sup>2)</sup>の結果を基に考察するため、まずはその結果を図-5 に示す。ここでは本研究の円孔直径 10mm の供試体と同じ形状のモルタル供試体を対象とした载荷試験を行っている。膨張圧は、前出の図-2 のように小型円筒ジャッキを円孔に挿入し、作用させた。ゲージ位置は円孔中心からの距離  $r = 8\text{mm}$ ,  $18\text{mm}$ ,  $28\text{mm}$  であった。本実験では、円孔の大きさの影響について検討しており、载荷試験の結果として、モルタル供試体の結果を図-6 に、超高強度モルタルの結果を図-7 にそれぞれ示す。このとき、直径 50 mm, 高さ 100 mm の円柱供試体を用いて求めた静弾性係数は、モルタル供試体においては  $24000\text{ N/mm}^2$ , 超高強度モルタルにおいては  $43000\text{ N/mm}^2$  であった。

まず、図-5(1)をみると、圧縮力载荷で円孔の中心からの距離  $r = 8\text{mm}$ , ならびに  $18\text{ mm}$  の位置において、実験値と理論値はほぼ一致しているが、 $r = 28\text{mm}$  の位置に関しては、円孔の中心から離れるにつれて実験のひずみ値は理論値より小さく、実験値との差も大きい。図-5(2)の膨張圧のみを作用させたケースを見ると、ほぼ全ての点で理論値と実験値が一致している。ただし、図-5(3)のように、

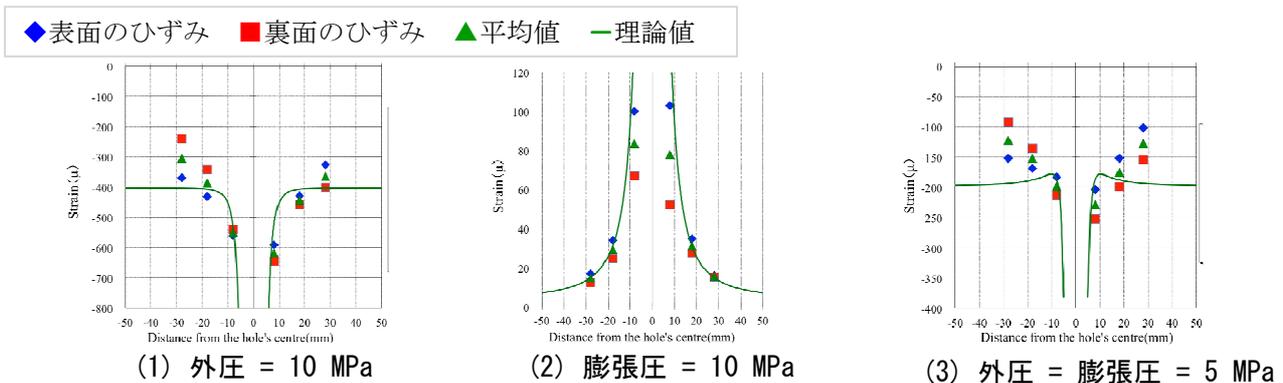


図-5 各ケースの円孔周辺における X 軸上の鉛直方向のひずみ分布<sup>1)</sup>

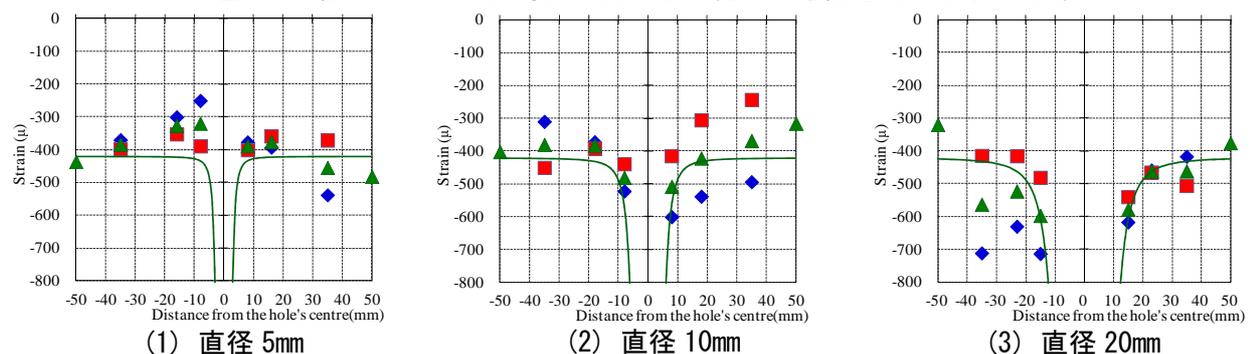


図-6 モルタルの圧縮試験結果 (10MPa 作用時)

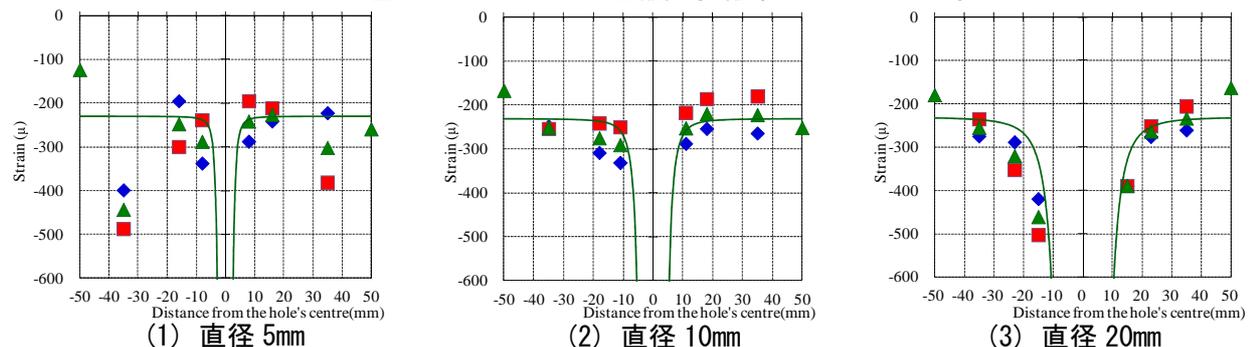


図-7 超高強度モルタルの圧縮試験結果 (10MPa 作用時)

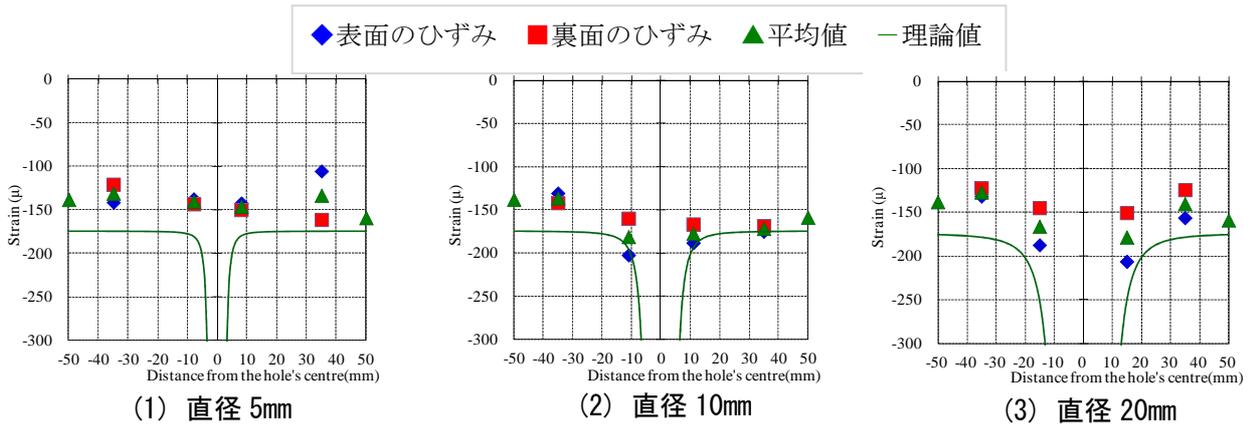


図-8 コンクリート供試体の各円孔付近の結果

圧縮応力と膨張圧を同時に作用させたケースでは、外圧のみを作用させた場合のひずみ分布の精度が影響するため、理論値と異なっていることがわかる。

図-6 と 図-7 をみると、今回のひずみゲージを用いた計測では、モルタル供試体と超高強度モルタル供試体ともに、円孔直径 5 mm のケースにおいては応力集中によるひずみ分布の変化が確認できなかったが、円孔直径 10 mm と 20 mm の結果においては確認できることがわかる。また、既往研究の結果と比較すると、端部の影響が小さくなっており、境界条件の影響が小さくなっていることがわかる。これは一様な載荷を行うため、供試体の載荷面と底面を石膏でキャッピングを施し、実験精度が向上したことによるものと考えられる。

また、図-7 より、超高強度モルタルのひずみ分布はモルタル供試体の結果よりも理論値に近い値となっていることがわかる。これはモルタルの骨材の最大寸法に対するゲージ長が 4 倍であるのに対し、超高強度モルタルの骨材の最大寸法に対するゲージ長が 5 倍以上あり、ひずみ測定の結果に与える骨材の影響が小さくなっていると考えられる。モルタル供試体と超高強度モルタル供試体の結果から、各供試体誤差においてほとんど違いはみられないことがわかる。ただし、円孔の大きさが大きくなるほど応力集中に伴うひずみの増大範囲が広く、円孔が 20 mm の場合では円孔の際から比較的離れた位置においても、より明確に応力集中を確認することができる。

測定箇所の一部では、供試体表面に生じていた気泡を避けてひずみゲージを貼ることが困難であったため、その影響により大きな誤差を示す測定結果となった。これらの点は応力推定の際には除外して整理していくが、実際の測定においては精度に影響するため、十分留意しておく必要がある。

### 3.2 コンクリート供試体を対象としたプレストレス力導入試験

プレストレス力導入試験の結果を図-8 に示す。ここで、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いて求めた弾性係数は 28000 N/mm<sup>2</sup> であった。今回はできる限り局所的なひずみ値を得ることを目的としたため、20 mm のひずみゲージを用いた。全体的に実測値は理論値より小さいことがわかる。これは、骨材が含まれている影響でひずみが小さくなっているということが考えられる。また、直径 5 mm と 20 mm の円孔周辺ではさらに小さくなっており、供試体端部に近くなり、想定したプレストレス力が導入されていないことが要因として考えられる。本実験では、供試体端部の影響についての配慮が十分ではなかったため、今後検討していく。

### 3.3 応力推定の評価

外圧として作用している圧縮応力  $p$  を推定するために、まず実験によって得られたひずみ  $\varepsilon$  に、円柱供試体を用いて求めた静弾性係数  $E$  を乗ずることにより、その点での応力を求める。ただし、膨張圧を作用させる場合には、圧縮応力と膨張圧が同時に作用した時のひずみの実測値から膨張圧のみ作用した時のひずみの理論値を引いたひずみ値を用いる。式(1)のように、この求めた応力を応力集中係

数の理論値  $k$  で除することにより、外圧として作用している応力  $p$  を求めることができる。

$$p = \frac{\sigma}{k} = \frac{E \times \varepsilon}{k} \quad (1)$$

このとき、応力集中係数  $k$  の理論値は以下の式を用いた。

$$k = 1 + \frac{a^2}{2r^2} + \frac{3a^4}{2r^4} \quad (2)$$

ここで、 $a$  : 円孔の半径(mm)、 $r$  : 円孔中心からの距離(mm)

ただし、実構造物においては作用している応力  $p$  の初期値は未知であるため、その場合は 2 点の応力の差をそれぞれの応力集中係数の差で除することによって求めることになる。

なお、今回行った円孔の大きさの影響を調べた実験では、膨張圧を加えたケースはないので、圧縮試験で得られたひずみを用いて、外圧として作用している応力を各点で式(1)を用いて推定した。

各直径の円孔を有する供試体の载荷試験の結果から推定した応力の平均値と、作用している外圧との測定誤差を図-9 に示す。なお前述の通りコンクリート供試体の直径 5 mm と 20 mm の円孔付近の結果は、実験条件が十分に再現できておらず、ここでは除外している。コンクリート供試体の直径 5 mm と 20 mm の結果を除く、全ての供試体で応力推定誤差は 8%以下になっており、超高強度モルタルでは 0.5~4%の誤差であり、特に、直径 20 mm のケースでは相対的に小さい誤差であることもわかる。

#### 4. 骨材を考慮した有限要素解析

ここでは骨材の位置や分布が円孔周辺の応力集中の状態に与える影響を調べるために、骨材を考慮した 2 次元有限要素解析を実施した。ただし、本解析では応力レベルの小さい段階の挙動を扱うため、コンクリート、ならびにモルタルは弾性挙動をとると仮定し、簡易的な 2 次元解析を行った。解析モデルは 100mm×100mm×100mm のモルタル立方体とし、円孔の無いものと有るもの（直径 10mm）の 2 タイプについてモデルを作成した。ハーフモデルとし、要素数は 720、要素形状は 8 節点アイソパラメトリック平面応力要素を用い、1 要素の大きさは 2.5 mm~7.0 mm 程度である。モルタルを骨材とセメントペーストの 2 種材料から構成されるものとし、各要素に表-3 に示すようにそれぞれの材料特性を入力した。そのモデルを図-10 に示す。円孔の有無で要素寸法が異なるが、ほぼ弾性範囲における解析であるため、ある程度の要素寸法の範囲であれば結果はほぼ変わらないことを確認している。

各要素に生じた  $y$  方向ひずみ分布を図-11 に示す。円孔がないケースでは、骨材の存在によって生じるひずみが大きく異なっており、骨材位置を考慮せずに均一モデルと仮定した理論値と比べると、ひずみ算出位置がセメントペーストであるとき、 $y$  方向ひずみは 150  $\mu$  ほど大きくなり、骨材である場合は 50  $\mu$  ほど小さくなっていることがわかる。

一方、円孔の内部から膨張圧を加えた場合は、骨材の影響が比較的小さいことがわかる。

ひずみの算出範囲を実際のゲージ長と同じ 10mm にして解析を行っ

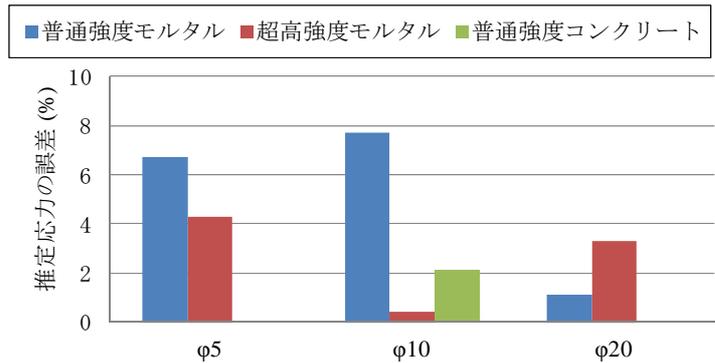
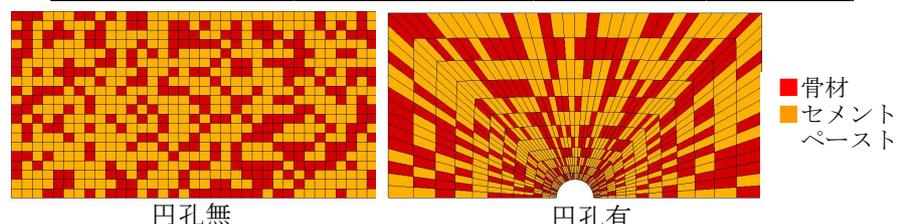


図-9 応力推定の誤差

表-3 材料特性と容積率

材料	弾性係数[N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	容積率
細骨材	40000	0.2	0.4
セメントペースト	15000	0.2	0.6



円孔無

円孔有

図-10 骨材を考慮した有限要素モデル

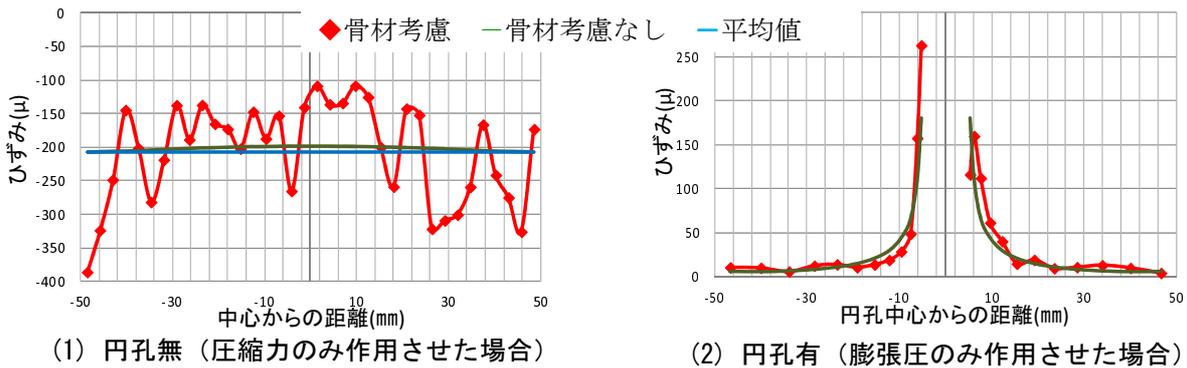


図-11 解析結果

た結果を図-12 に示す。この結果から、ひずみの測定長を大きくすることでひずみは平均化される。そして骨材の影響は外圧が 5MPa 程度であれば、大きくても 100 $\mu$  程度のひずみの誤差であり、比較的小さくなることが確認できる。

### 5. 実構造物に本手法を適用する際の課題

実構造物においては円孔を設ける際、コア削孔することを想定している。そのとき、円孔周辺が欠け、円孔直近のひずみ値の測定が困難になる。一方で、比較的離れた位置でも応力集中が生じるように円孔を大きくする必要があるが、計測に伴う構造物に与える影響は少ない方がよい。本実験では円孔の直径 20 mm でも円孔から比較的離れた位置で応力集中が円孔周辺のひずみによって測定できることがわかった。構造物に与える影響をできるだけ小さくした中で、今回の結果を見ると、円孔直径 20mm が妥当であると考えられる。

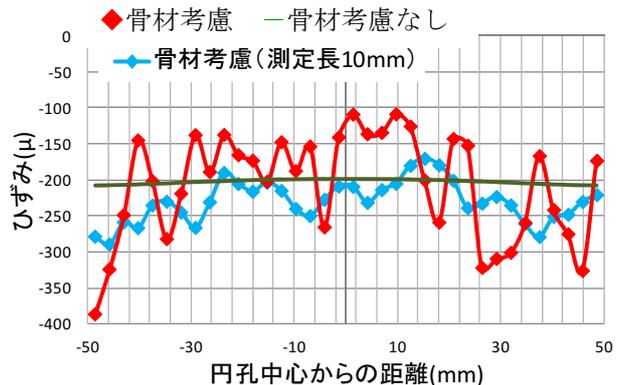


図-12 測定長を変化させた解析結果

### 6. まとめ

ゲージ長 10mm もしくは 20mm のひずみゲージを用いた計測では、応力集中をひずみ分布として計測できたのは円孔の直径が 10mm, ならびに 20mm のケースであった。また、応力推定を行う際、それらの誤差は 8%以下に収めることができた。

解析では、簡易的ではあるが、実験に則して骨材の位置や分布を変化させた解析モデルを作成し、それらがゲージ位置のひずみに与える影響について検討を行った。その結果、圧縮試験を行う場合には、骨材の位置や分布によって結果が左右されるのに対して、円孔内側から膨張圧を加えた場合には骨材の影響はあまり大きくないことがわかった。また、ひずみ測定長を骨材の最大寸法より大きくすることで、ひずみの値は平均化され、骨材の影響は小さくなることを確認した。

実構造物においては、円孔を設ける際に周辺が欠けることが想定されるので、円孔から比較的離れた位置でも応力集中が生じる直径 20mm の円孔を用いるのがよいと考える。

### 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, pp.27-37, 2009.5
- 2) 三木朋広, Nur Izyan Syazwani Binti Julkifli: 小型加力装置によるコンクリートに作用する圧縮応力の測定に関する実験研究, 第 22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.22, pp.323-328, 2013.10.