

論文 円孔周辺の応力集中を用いたプレストレス力の測定に関する実験的研究

三木 大地^{*1}・三木 朋広^{*2}

要旨: 本研究は、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、種々検討した。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い、円孔の大きさ、材料特性が円孔周辺のひずみ分布に与える影響を確認した。また、コンクリート供試体を対象とした検討では、プレストレス力を導入し、一様な応力、ならびに偏心させた応力を作用させることにより、実際の構造を模擬した応力勾配を再現した。結果を用いて、生じているひずみから作用している応力を算定したところ、応力勾配の有無に関わらず、比較的小さな誤差で測定できることがわかった。

キーワード: 応力集中係数, プレストレス, 応力測定, 円孔, 応力勾配

1. はじめに

既存 PC 構造物の性能評価のためには、残存プレストレス力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。浅井ら¹⁾が行っている方法はフラットストレス法と呼ばれるもので、計測対象位置にスリット状に切削し、その切削部分にフラットジャッキを挿入して加圧することによって、所定の検長区間が解放前の変位量となった時点での応力を現有応力として測定する方法である。構造物の応力勾配やひび割れの有無による影響が少ないという利点があるが、低応力状態の現有応力推定の精度が低いことや、測定にあたり装置がとても大がかりであり、測定作業が煩雑で熟練を要するなどの欠点も保有している。

二井谷ら²⁾が提案している方法では、測定箇所にはひずみゲージを貼り、周辺部をコア削孔する、もしくは矩形に切り欠くことによって、コアや矩形の切欠きの内部において作用していた応力を解放し、その応力と初期の圧縮応力が等しいことを利用して、測定されたひずみから圧縮応力を推定する方法である。利点としては測定したい点の解放ひずみを直接求めることができることにある。しかし、直径 100 mm のコア削孔を行う、ある程度の深さまでコア削孔を行わなくてはならないなど構造物に与える影響が大きいといった問題点が挙げられる。

そこで、本研究では、コンクリートに作用する圧縮応力を推定し、かつ、構造物に与える影響が小さい方法について、著者らの既往研究³⁾をもとにして種々検討していく。なお、本手法は二井谷らが行った応力解放法と組み合わせることも可能である。

検討では、円孔周辺のひずみ分布は円孔の大きさにより異なること、また円孔の直径が大きいと比較的円孔際から離れた位置でも応力集中が生じることから、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把握する。また、コンクリート供試体に一様な応力、ならびに偏心させた応力を作用させることにより、実際の構造を模擬した応力勾配を再現した状態での測定を試みる。さらに、一部の供試体に対して、画像解析を行うことにより、供試体に導入された応力状態を確認していく。これらの実験、理論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する。

2. 実験概要

本研究においては、モルタル供試体とコンクリート供試体を用いて検討した。モルタルは、骨材寸法が比較的小さく、より均質な材料であるため、材料的なばらつきの小さい中で本手法を検討するために用いた。一方、コンクリート供試体では、実構造物で用いられる材料状態を対象として、さらに偏心させて加力し、応力勾配を再現することによって、実構造物を想定して本応力測定手法の妥当性を検討した。

2.1 モルタル供試体

実験には 100 mm×100 mm×100 mm の立方体を用いた。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。供試体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、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、硬化する前に引き抜くことにより円孔を設けた。検討時の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 N/mm², 200 N/mm²であった。モルタルにおけるセメントには早強ポルトランドセメントを使用し、水、

*1 神戸大学 工学研究科市民工学専攻 (学生会員)

*2 神戸大学 工学研究科市民工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 超高強度モルタルの配合

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

表-2 コンクリートの示方配合

G _{max} (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤 (ml/m ³)
					W	C	S	G	
20	8	67.3	4.5	48.1	172	256	869	946	820

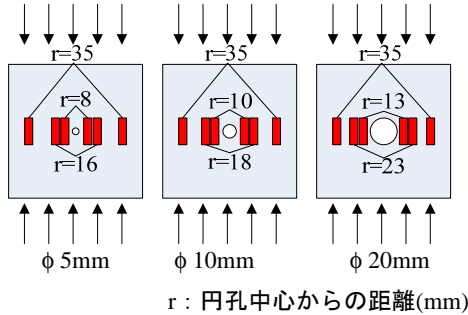


図-1 モルタル供試体のゲージ位置

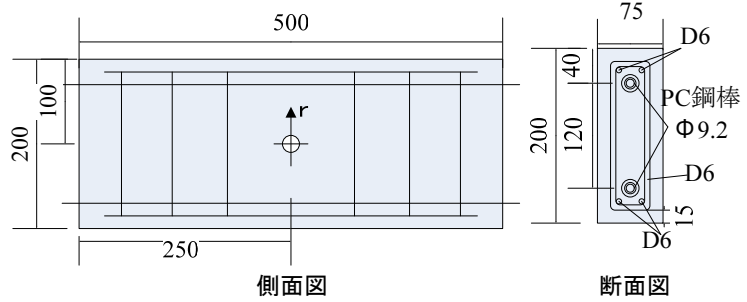


図-3 コンクリート供試体概要



(1) 荷況状況 (2) 荷方向概要
図-2 膨張圧荷荷の状況 (モルタル供試体)

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_{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。

一軸荷況試験では、圧縮応力を一様に作用させるために、供試体の荷況面と底面に石膏でキャッピングを施し、鋼製荷況板を設置した。荷況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、幅 6 mm、超高強度モルタルでは長さ 10 mm、幅 6 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。ただし、貼付け位置には多少のばらつきがある。

加力については、モルタルの圧縮強度の 1/4 程度の 10 N/mm² まで荷況した。応力は荷況を加力面の断面積 100mm² で除することによって求めた。さらに、円孔の直径 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況するケースと、圧縮応力と膨張圧を同時に荷況するケースを実施した。膨張圧の荷況状況を図-2 に示す。膨張圧は、

設けた円孔周辺のモルタル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た。

2.2 コンクリート供試体

実験には断面が 75 mm×200 mm で、長さ 500 mm の供試体を用いた。円孔は 200 mm×500 mm の側面に直径 10 mm、20 mm、30 mm のものを設けた。用いたコンクリートにおける粗骨材の最大寸法 G_{max} は 20 mm とし、圧縮強度の実測値は 32N/mm² であった。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、供試体断面上部、下部の 2 箇所において、それぞれ PC 鋼棒を介してプレストレス力を導入した。端面の境界条件は球座が有り、プレートの厚さ 10mm となっている。局所的なひずみを得るため、ひずみゲージは長さ 20 mm 幅 6mm のものを用い、円孔の直径 10 mm の供試体においては、円孔を設けた 2 面に計 8 枚、荷況軸と水平に貼り付けた。貼り付け位置は円孔からの距離が 10mm と 35mm の位置である。円孔の直径 20 mm、30 mm の供試体においては、画像解析を行うために円孔を設けた 2 面の片面のみひずみゲージを計 8 枚貼り付けた。円孔の直径 20mm の供試体のゲージ貼付け位置は円孔からの距離が 15mm、25mm、42mm、72mm の位置とし、円孔の直径 30mm の供試体では 20mm、28mm、48mm、78mm の位置とした。

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 N/mm² と設定して、PC 鋼棒一本当たりの緊張力は 37.5 kN とした。また円孔の直径 20 mm、30 mm の供試体は一様でない応力場を模擬するために、上部と下部で異なるプレストレス力を導入し、偏心した荷況も行った。その際の PC 鋼棒の緊張力は、上

部で 37.5 kN, 下部では 52.5kN である。

2.3 画像解析

本実験ではひずみ分布を確認するために、デジタル画像相関法を用いて、一部の供試体に対して画像解析を行った。画像相関法は、解析対象範囲において変形前と変形後の画像を比較して類似点を見つけ、それらの類似点の移動量を計測し、計測した移動量を用いて、ひずみ計算ソフトにより、最大、もしくは最小主ひずみ分布を求めるものである。

3. 実験結果と考察

3.1 モルタル供試体を用いた一軸圧縮試験

本研究は既往研究²⁾の結果を基に考察するため、まずはその結果を図-4 に示す。ただし、x 軸は円孔からの距離

である。ここでは本研究の円孔の直径 10 mm 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て作用させた。ゲージ位置は円孔中心からの距離 r が 8 mm, 18 mm, 28 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-5 に、超高強度モルタルの結果を図-6 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、モルタル供試体では 24000 N/mm², 超高強度モルタルでは 43000 N/mm² であった。

まず、図-4(1)をみると、圧縮力载荷で円孔の中心からの距離 r が 8 mm, ならびに 18 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 が 28 mm の位

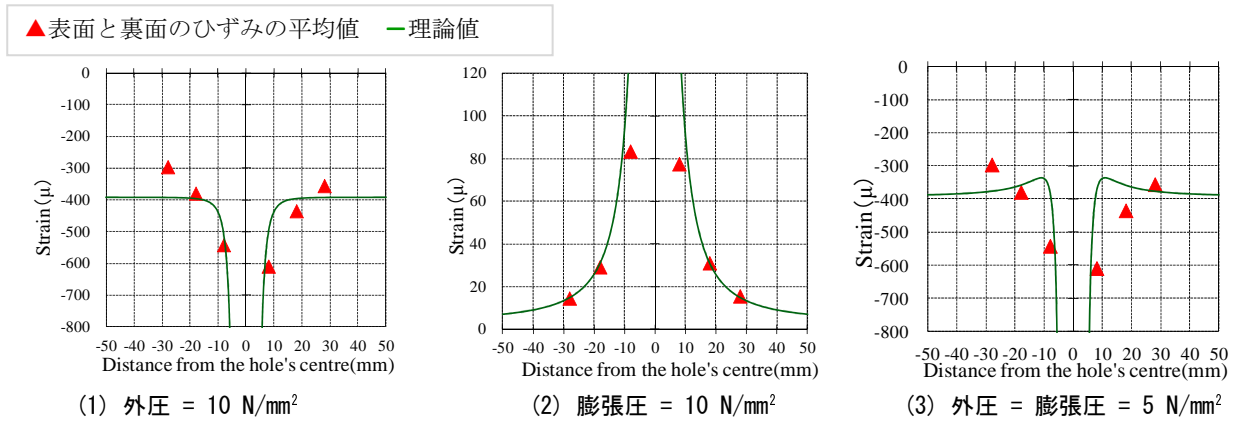


図-4 各ケースの円孔周辺における X 軸上の鉛直方向のひずみ分布 (直径 10 mm)²⁾

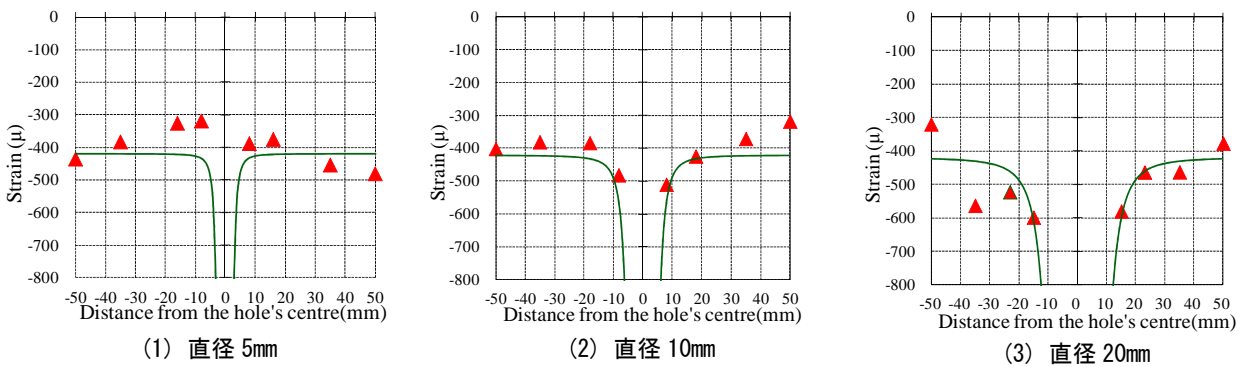


図-5 モルタルの圧縮試験結果 (10 N/mm² 作用時)

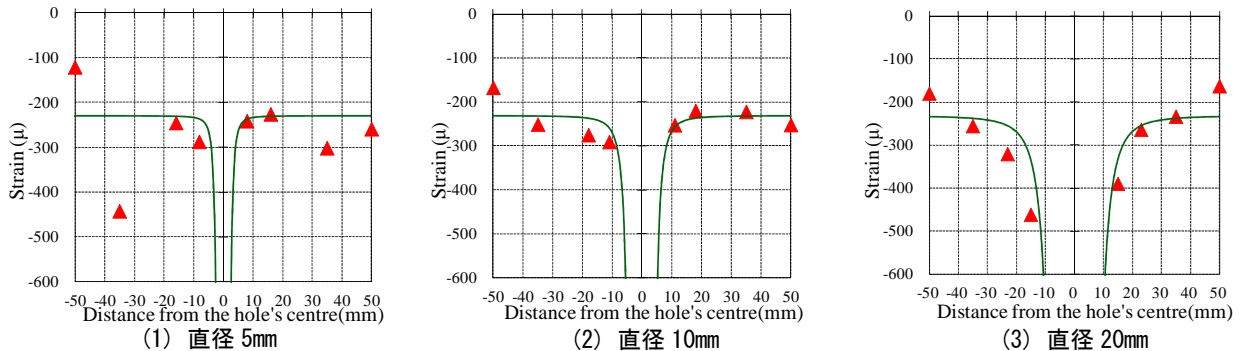


図-6 超高強度モルタルの圧縮試験結果 (10 N/mm² 作用時)

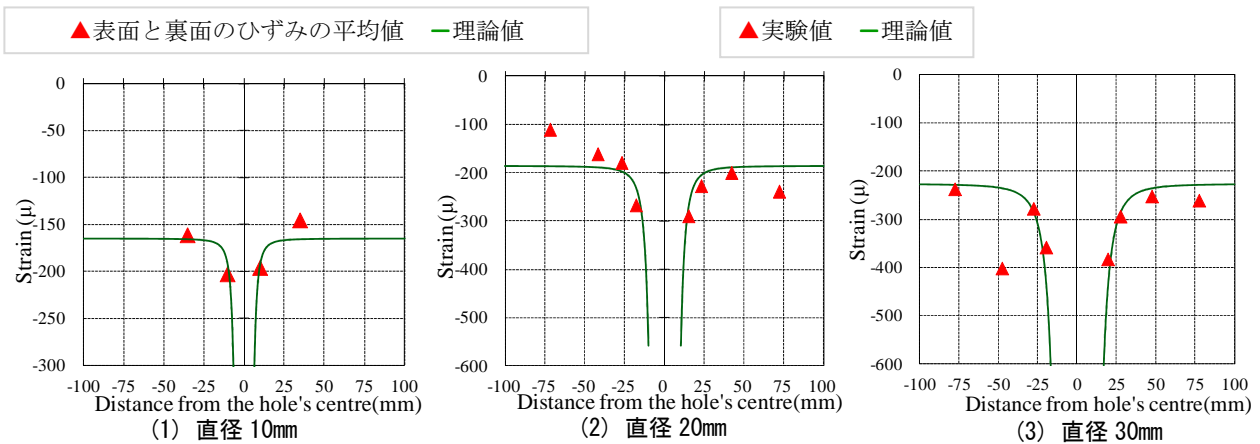


図-7 コンクリートのプレストレス力導入試験結果 (5 N/mm² 作用時)
(一様な応力場)

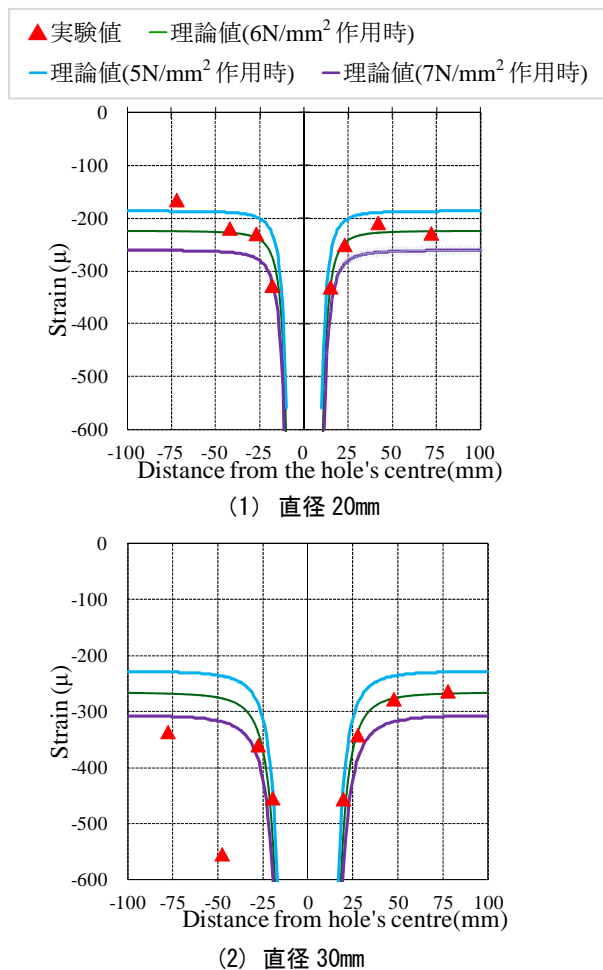


図-8 プレストレス力導入試験結果
(作用応力：負側 7N/mm²，正側 N/mm²)
(偏心させた応力場)

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応力集中によるひずみの理論値より小さい箇所が多く、実験値との差も大きい。図-4(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。このことは著者らが行った解析⁴⁾においても同様の結果が得られている。ただし、図-

4(3)のように、圧縮応力と膨張圧を同時に作用させたケースでは、圧縮応力のみを作用させた場合のひずみ値と理論値との誤差が大きいことが影響するため、理論値と異なっていることがわかる。

図-5 と図-6 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、円孔の直径 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、円孔の直径 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、円孔から離れた位置で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。これは一様な载荷を行うため、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-6 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いためと考える。モルタル供試体と超高強度モルタル供試体の結果から、各供試体において円孔の大きさが異なっても誤差の違いはほとんど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、円孔の直径が 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、供試体表面に気泡が観察され、それ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する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

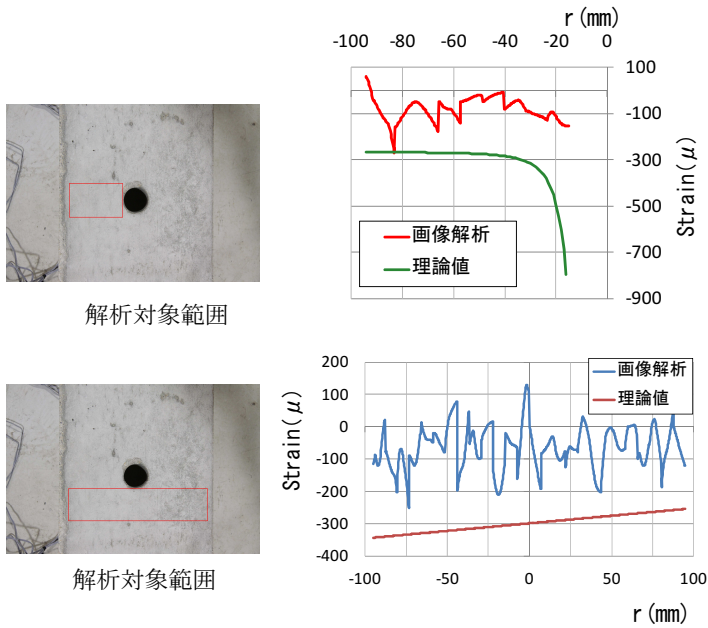


図-9 画像解析結果

意しておく必要がある。

3.2 コンクリート供試体を用いたプレストレス導入試験

まず一様な応力場でのコンクリート供試体の結果を図-7に示す。ここで用いたコンクリートでは、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 27000 N/mm²であった。

いずれの供試体においても実験値と応力集中によるひずみ分布の理論値はほぼ一致していることがわかる。円孔の直径 30 mm の供試体における r=-50 mm 付近の点において、理論値と大きな誤差が生じているが、これはモルタル供試体と同様に気泡が影響している。

次に前述したように偏心させた場合の結果を図-8に示す。円孔の中心からの距離 r が負側では 7 N/mm²に相当するプレストレス力(52.5 kN)を加力しており、r が正側では 5 N/mm²に相当するプレストレス力(37.5 kN)を加力している。また、縁応力はそれぞれ 7.7 N/mm²と 4.5 N/mm²となっている。は図-8には比較のために、5 N/mm²、6 N/mm²、ならびに 7 N/mm²が作用したときのひずみ分布の理論値を示している。両供試体ともに r が負側でひずみの変化量が大きくなっていることがわかる。また、6 N/mm²の応力が作用した時の理論値と概ね一致していることもわかる。

次に、偏心させた場合の応力分布を確認するために、円孔の直径 30mm の供試体の画像解析の結果とその対象範囲を図-9に示す。この図に示す通り、画像解析によるひずみのばらつきは極めて大きく、現状では画像解析による応力測定は困難である。しかし、近似的に画像解析対象範囲における大まかなひずみ分布を得ることができる。今後は、供試体表面に模様を付けるなどして、測定精度を上げることが課題である。

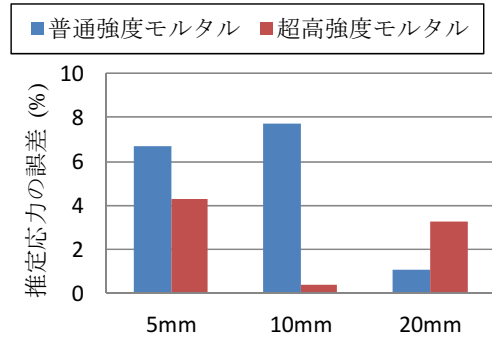


図-10 応力推定誤差(モルタル)

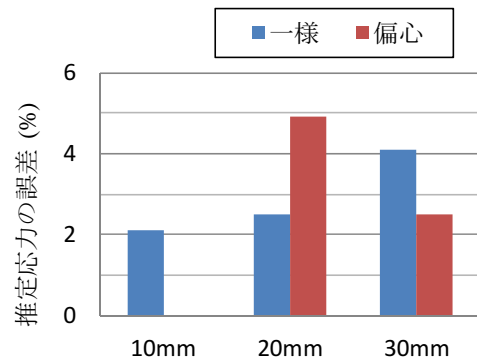


図-11 応力推定誤差(コンクリート)

3.3 作用する圧縮応力の推定結果の評価

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 ε 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 σ を求めた。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。

応力集中係数 k の理論値は、厚肉円筒弾性理論を用いて導出した。ここで、载荷軸 (y 軸) 方向に大きさ p の一様な引張応力を受けるとき、円孔を設けた平板中に生じる円周方向の応力は、

$$\sigma = \frac{p}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (1)$$

となる。円孔中心を通る水平軸 (x 軸) での応力分布は、式(1)に $\theta = \pm 90$ を代入することで求まり、

$$\sigma = kp \quad (2)$$

となる。ここで、応力集中係数 k は、

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

であり、 a は円孔の半径(mm)、 r は円孔中心からの距離(mm)である。

以上より、式(4)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。

$$p = \frac{\sigma}{k} = \frac{E \times \varepsilon}{k} \quad (4)$$

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。

各直径の円孔を有する供試体の載荷試験の結果からひずみゲージを貼り付けた各点で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求めた。モルタル供試体の結果を図-10に、コンクリート供試体の結果を図-11に示す。ただし、コンクリート供試体の偏心した場合の作用している外圧は、 5 N/mm^2 と 7 N/mm^2 の平均値である 6 N/mm^2 を用いて誤差を求めている。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行っていないので、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(4)を用いて推定した。

モルタル供試体においては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20mmのケースでは相対的に小さい誤差であることもわかる。

コンクリート供試体においては、全ての供試体、載荷方法で5%以下の誤差となっている。また、一様載荷と偏心載荷の結果を比べると、誤差の差が2%程度となっている。つまり、今回行った応力勾配をもった応力分布が本手法の測定精度に与える影響は極めて小さいということがわかった。

4. 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20mm、もしくは30mm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、円孔の直径20mmと円孔の直径30mmの誤差が同

程度であることから、円孔の直径は20mmが妥当であると考えられる。

5. まとめ

モルタル供試体において、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。

コンクリート供試体では全ての供試体、載荷方法で5%以下の誤差となった。また、一様載荷と偏心させた載荷の結果を比べると誤差の差が2%程度となったことから、今回行った応力勾配をもった応力分布が本手法に与える影響は極めて小さいということがわかった。また画像解析では応力推定は現状では困難ではあるが、大まかな応力分布を把握できた。

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大きな円孔を用いるのがよいが、構造物に与える影響を考慮すると、本実験の結果からは円孔の大きさ20mmが適していると考えられる。

参考文献

- 1) 浅井洋, 藤田学, Thomas Le Diouren, 宮本則幸: フラットジャッキを併用した応力解放法によるコンクリート部材の現有応力測定, コンクリート工学, Vol.42, No.4, pp.26-32, 2004
- 2) 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
- 3) 三木朋広, Nur Izyan Syazwani Binti Julkifli: 小型荷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.
- 4) 三木大地, 三木朋広: 応力集中係数を用いたコンクリートの内部応力測定に関する基礎的研究, 第23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.23, pp.435-440, 2014.1