

論文 非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験

出水 享^{*1}・松田 浩^{*2}・中島 朋史^{*3}・浜岡 広^{*3}

要旨：光学的全視野計測法であるデジタル画像相関法による硬化コンクリートの材料試験（ひずみ計測）への適用可能性を検討するために、円柱試験体を用いて圧縮試験、割裂引張試験を実施した。また、自己収縮や乾燥収縮や温度応力の計測では、通常埋込みゲージ等を用いてコンクリートのひずみは計測されるが、本論文では光学的手法により硬化過程における非接触全視野計測が可能であることを示した。

キーワード：非接触，全視野，ひずみ計測，硬化収縮，コンクリート材料試験

1. はじめに

硬化コンクリートの力学的性質に関する重要な試験方法として、圧縮強度試験、引張強度試験、曲げ強度試験などが挙げられる。これらの試験でひずみ計測を行う場合一般的に用いられるのがひずみゲージ法である。しかし、ひずみゲージで計測されるひずみ値はゲージ長の平均ひずみであり、ひび割れ近傍のひずみ値を正確に表しているわけではない。ゲージを貼った点のみのデータが得られるだけで、全体の応力分布や応力集中部を特定することは困難である。

一方、コンクリートの硬化過程において問題となる温度ひび割れや収縮ひび割れ発生に関しては、温度応力や硬化収縮量を計測する必要がある。フレッシュコンクリートの硬化過程におけるひずみの測定方法としては、埋込ゲージ法、コンタクトゲージ法、ダイヤルゲージ法等が考案されている。しかし、これらの試験法で得られる測定値も、ゲージ長あるいは試験体全体の平均的なひずみ量（あるいは変位量）である。

本研究ではコンクリートの材料強度試験及び硬化収縮ひずみを計測する際に、デジタル画像相関法により全視野変位計測を行った。全視野変位計測とは、デジタル画像の1画素単位の変位を全体を通して求めることができる計測法で、現在実験力学学会等で光学的全視野計測の研究¹⁾

が進められている。今回、得られた変位分布から、ひずみ値を算定し、ひび割れ発生および進展過程の可視化について検討した。また、ひずみゲージおよび埋込ゲージの計測結果との比較を行い、それぞれの試験方法において、デジタル画像相関法による全視野変位・ひずみ計測の適用可能性について検討した。

2. デジタル画像相関法

2.1 デジタル画像相関法の原理

デジタル画像相関法とは CCD カメラにより、計測物表面の画像を取り込み、変形前後を比較することで、画像全体にわたって変形分布を求めることができる計測方法である。

まず、変形前の画像において、任意の点（1画素）を中心とした $N \times N$ ピクセルの任意領域（サブセット）を指定する（図-1 (a)）。次にカメラを固定したままの状態、測定物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する。これらの変形前後のサブセットのデジタル情報を比較し、変形後のサブセットの位置を探し決定する。このサブセットの中心の移動量が計測点の変形量および変形方向である。

（図-1 (b)）。また、図-2のように2台のカメラを用いることで、三次元変形量、変形方向および形状を求めることができる。

*1 (株)計測リサーチコンサルタント 九州事業部 工修 (正会員)

*2 長崎大学 工学部構造工学科教授 工博 (正会員)

*3 長崎大学大学院生産科学研究科 修士課程 (正会員)

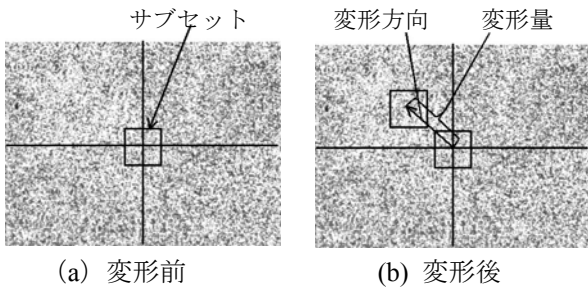


図-1 変形前と変形後のデジタル画像

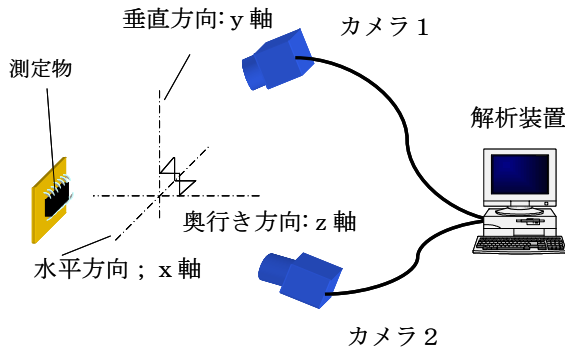


図-2 3D変位計測法

2.2 計測装置の概要

本研究では、変位・ひずみ分布の計測には、3D コリレーションシステムを使用した。図-3 に計測装置の概要を示す。

2 台の CCD カメラ (1380×1035 ピクセル) が取り付けられており、この 2 台のカメラにより、異なる方向から被計測物の画像を取り込み、変形画像の追跡とカメラの校正により、3D 形状と 3 次元の変形のパターンをとらえることができる。さらに、そこから表面のひずみのパターンとして出力することができる。本計測装置の仕様を表-1 に示す。

2.3 計測性能照査

デジタル画像相関法のひずみ計測結果の精度を確認するために、図-4 に示すアルミニウム合金製の試験片 (板厚 2mm) を用い、一軸引張り試験を行った。試験片にひずみゲージを貼付し、デジタル画像相関法による計測結果と比較した。得られた結果を図-5 に示す。なお、デジタル画像相関法による測定値はひずみゲージと同じ長さの平均ひずみ値である。デジタル画像相関法によって得られたひずみ値はひずみゲージによるひずみ値とほぼ一致している。以上よりデジ

タル画像相関法によるひずみ精度はひずみゲージと同程度の計測精度であることがわかる。



図-3 本計測装置の概要

表-1 本計測装置の仕様

計測範囲	10×10mm～1000×1000mm
計測感度	ピクセル間距離の 1/10～1/100
変位	100mm の視野で 20 μm
ひずみ	0.01%
計測レンジ	数百%の変形まで可
測距離	約 5～100cm
カメラ	1380×1035 ピクセル
出力形式	表面 3 次元形状, 変位, ひずみ

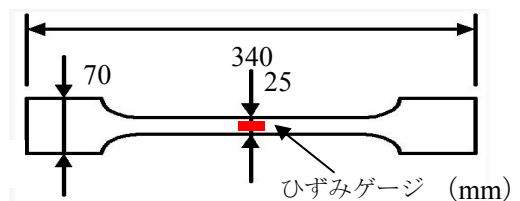


図-4 一軸引張り試験片

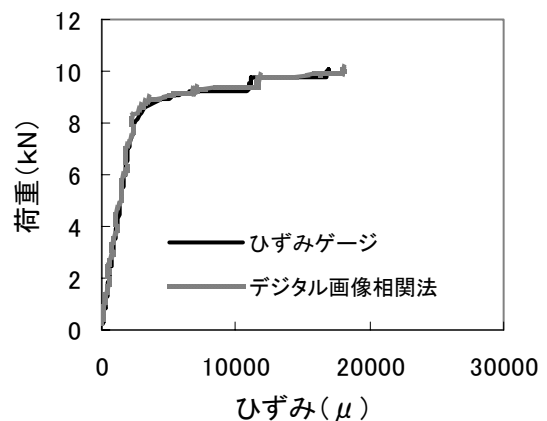


図-5 荷重—ひずみ曲線

3. 材料強度試験

3.1 割裂引張試験

(1) 試験概要

デジタル画像相関法による硬化コンクリートの材料試験（ひずみ計測）への適用とひび割れの可視化を目的とし、コンクリートの割裂引張試験方法（JIS A 1113）に基づき試験を行った。試験体は直径 10cm、高さ 20cm の円柱試験体を用いた。試験方法を図-6 に示す。試験体製作には普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を 50% とした（表-2 配合表）。

試験中は図-6 に示すように、試験体の表側をデジタル画像相関法により計測した。また、裏側中央にひずみゲージ（ゲージ長 60mm）を貼付し、ひずみ計測を行った。試験後、それぞれのひずみ値の比較を行った。さらに、デジタル画像相関法により得られたひずみ分布を用いてひび割れの発生・進展の可視化を行った。

(2) 試験結果

デジタル画像相関法及びひずみゲージで得られたひずみ値から、荷重-ひずみ曲線を図-7 に示す。デジタル画像相関法とひずみゲージが引張試験の場合ほどではないがほぼ一致していることがわかる。ひずみゲージ値と少々異なるのは、载荷において試験体の回転・移動が生じていることに起因することが考えられる。

本装置は、変形前に任意の長さの測定長を与えることにより、測定長を変化させた場合の影響を調べることができる。図-8 に測定長を変化させた時の荷重-ひずみ曲線を示す。測定長が短くなるほどひずみは大きくなった。通常、コンクリート用のゲージ長は最大骨材寸法の 3 倍以上とされている。しかし、そのひずみはゲージ長の平均ひずみであり、ひび割れ近傍のひずみ値ではない。よってデジタル画像相関法はひび割れ部近傍のひずみを計測するのにも有効だと考えられる。

図-9 に各荷重段階における x 方向ひずみ分布を示す。なお、同図(a)の荷重-ひずみ曲線のひずみ値は測定長 60mm で得られた値を示し、

同図(b)のひずみ値は 1 ピクセル当りのひずみ値である。(1) また、写真-1 に破壊後の試験体を示す。約 40 kN で図-6 中の A, B 点にひずみの集中が見られ、その後それぞれのひずみは中央に伸びている。破壊時にはひび割れに沿ってひずみが集中している。よって、デジタル画像相関法計測により得られたひずみ分布からひび割れの発生・進展過程を確認することができた。

表-2 配合表 (kg/m³)

セメント	水	細骨材	粗骨材	AE 剤
350	175	748	971	7.00

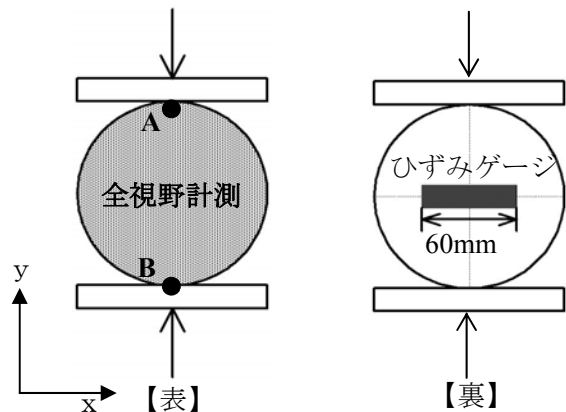


図-6 試験方法

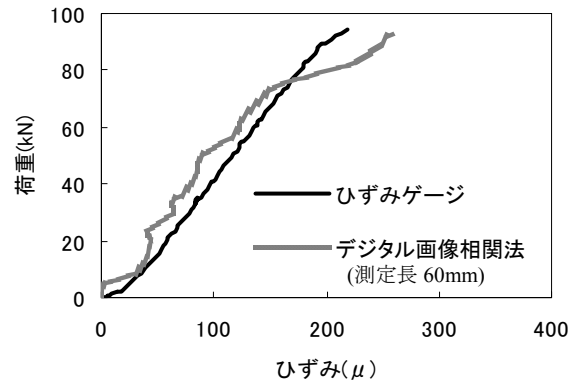


図-7 荷重-ひずみ曲線

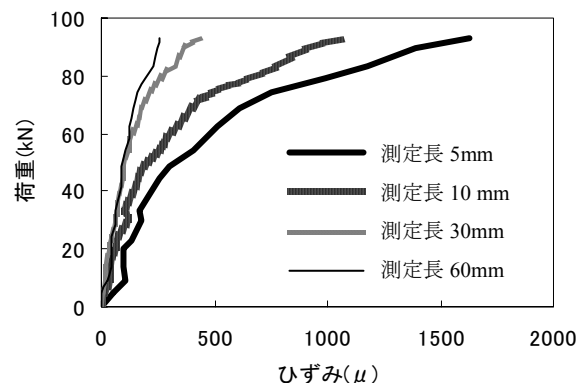
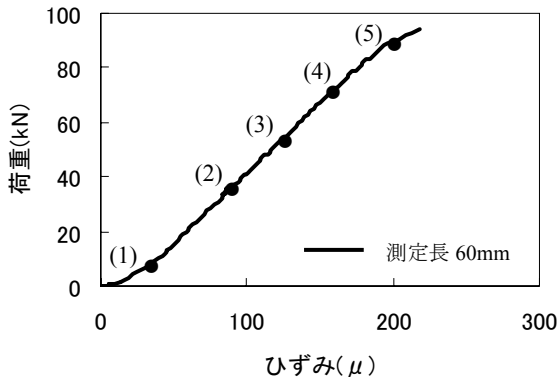
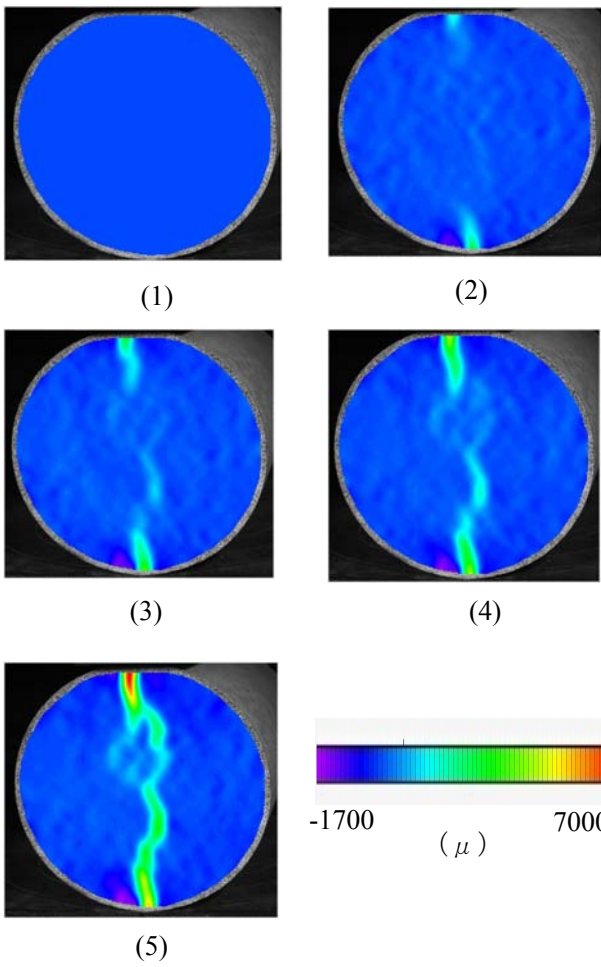


図-8 測定長とひずみの関係



(a) 荷重—ひずみ曲線



(b) ひずみ分布

図-9 各荷重段階における x 方向ひずみ分布



写真-1 破壊後の試験体写真

3.2 圧縮強度試験

(1) 試験概要

円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法 (JSCE G505 1999) に基づき、直径 50mm、高さ 100mm の円柱試験体を用いて試験を行った。試験体製作には普通ポルトランドセメントを使用し、セメント：水：細骨材の重量比を 1：0.5：2 とした。

試験中は試験体の半面をデジタル画像相関法で計測した。試験後、デジタル画像相関法により得られたひずみ分布を用いてひび割れの発生・進展の可視化を行った。

(2) 試験結果

図-10 に荷重開始から破壊までの最大主ひずみ分布および試験体写真を示す。試験体写真に、ひび割れを明瞭化するために図化を行った。

デジタル画像相関法計測により得られたひずみ分布からひずみの集中とひび割れ発生箇所が一致していることがわかる。よって、デジタル画像相関法によりひび割れの発生・進展を確認することができた。また、ひび割れが発生する以前にひずみの集中が見られ、ひび割れ発生箇所の予測も可能であると考えられる。

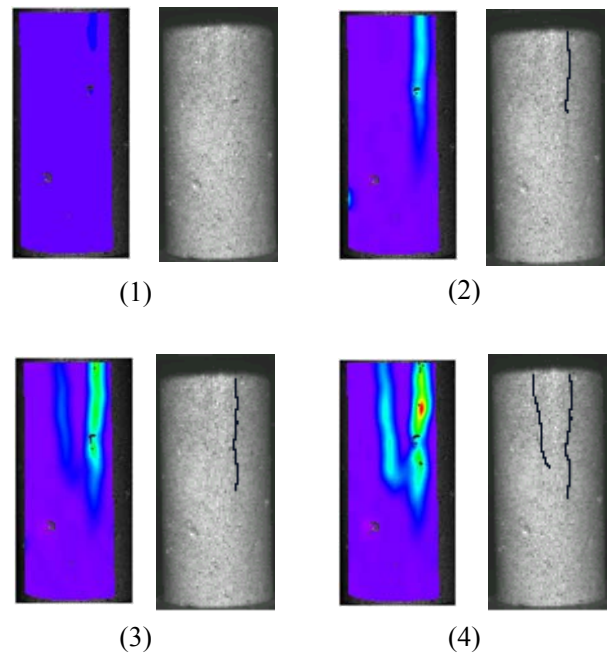


図-10 最大主ひずみ分布および試験体写真

4. 硬化収縮試験

4.1 試験概要

光学的手法により硬化収縮過程における非接触全視野計測の可能性を検討する目的で、セメントペーストの表面収縮ひずみをデジタル画像相関法により計測を行った。今回、硬化収縮量を大きくするため骨材を混合せず、セメントペーストを用いた。

試験体の種類は 2 種類とし、モルタル試験体用の型枠を使用した。それぞれの型枠及び呼び名を図-11 に示す。今回、早期に大きな硬化収縮量を出すために、試験体製作には超早強セメントを使用し、養生は湿潤養生を行わず、湿度の低い部屋で行った。水セメント比は 50%、室温は常時 20°Cとした。なお、モルタル収縮時の型枠による拘束を排除するために型枠に離型剤を塗布した。

試験中は、試験体表面をデジタル画像相関法によりひずみ計測を行った。また、埋込みゲージで測定した内部ひずみと表面ひずみの関係を把握するため、試験体 A, B には埋込みゲージ(ゲージ長 50mm)を深さ 20mm の位置に配置した。

4.2 試験結果

図-12 に試験体 A, B の埋込みゲージとデジタル画像相関法により得られたひずみ値の比較を行った結果を示す。なお、デジタル画像相関法の値は、埋込みゲージと同じ位置のひずみ値(測定長 50mm)である。

埋込みゲージで測定した内部ひずみは、試験体 A, B とともに、4 時間まで x 軸方向に収縮し、4~5 時間の間でわずかに膨張し、5 時間以降から 7 時間までは急激に収縮し、7 時間以降は緩やかに収縮している。

一方、デジタル画像相関法により測定した表面ひずみは、試験体 A では、1 時間まで x 軸方向に膨張傾向を示し、1~4 時間でわずかながら変動し、4 時間以降から 10 時間までは急激に収縮し、10 時間以降は緩やかに収縮している。ま

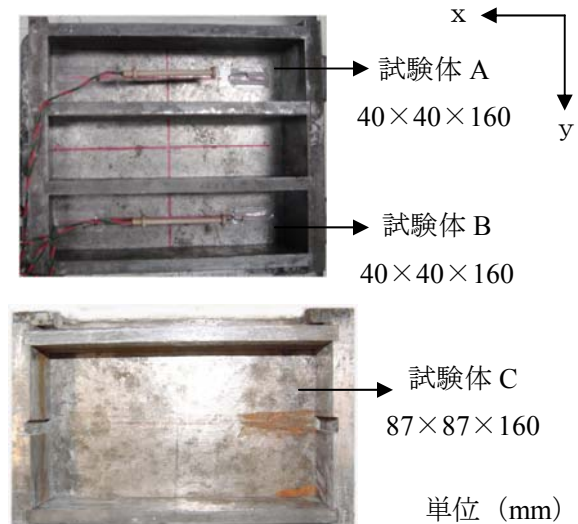


図-11 試験体型枠及び試験体呼び名

た、試験体 B では、試験開始 2 時間までは膨張し、その後は、ほとんど試験体 A と同じ傾向を示している。

埋込みゲージで測定した内部ひずみとデジタル画像相関法により測定した表面ひずみは、内部ひずみが 5~7 時間、表面ひずみが 2~4 時間で急激に収縮する時の傾き、および内部ひずみが 7 時間以降と表面ひずみの 10 時間以降の収縮の傾きは同じである。

以上の結果から、光学的手法であるデジタル画像相関法によりコンクリートの硬化収縮過程における非接触全視野ひずみ計測の可能性を見出すことができた。

なお、10 時間以降の埋込みゲージで測定した内部ひずみとデジタル画像相関法により測定した表面ひずみの差は、離型剤を塗布していたものの、試験体底面の摩擦拘束力や深さ方向の影響であるものと考えられる。また、試験開始後の 4 時間までの内部ひずみと表面ひずみの挙動には違いが見られる。表面ひずみは、ブリーディング水の膨潤作用により膨張しているように観測され、一方内部ひずみは、ブリーディングにより表面近傍のペーストより低水セメント比になっており、さらに水和反応により内部温度が上昇するため収縮反応が早期から進行するものと考えられる。今後は、低水セメント比で実験を行い、表面温度・ブリーディングとあわせ

て観察を行う予定である。

図-13に試験体Cにおける試験体表面のx方向ひずみ分布を示し、試験終了後の試験体写真を写真-2に示す。(試験体写真に、ひび割れを明瞭化するために図化を行った。)試験体Cには硬化収縮によるひび割れが生じた。約24時間後からひび割れ部付近にひずみの集中が始まっている。また、48時間後には完全にひび割れを可視化できている。

以上より、デジタル画像相関法により硬化収縮過程の全視野計測が可能であり、ひび割れ発生箇所の予測や可視化ができると考えられる。

5. まとめ

本論文では、デジタル画像相関法を用いて硬化コンクリートの材料試験及び、コンクリートの硬化収縮過程の非接触全視野計測を実施した。その結果を以下にまとめる。

1. 全ての試験において、デジタル画像相関法により得られたひずみ分布からひび割れの発生・進展を可視化することができた。
2. ひずみ分布を観察することで、ひび割れ発生箇所の予測ができ、コンクリート部材の破壊メカニズムの解明に繋がると考えられる。
3. デジタル画像相関法とひずみゲージのひずみ値の比較を行った結果、ほぼ一致していることがわかり、デジタル画像相関法のコンクリートへの適用性を確認することができた。また、ひずみゲージのような平均ひずみではなく、ひび割れ近傍のひずみ値を取得することができた。

6. あとがき

本研究は科学研究補助金、基盤研究(B)(2)(研究代表者：松田浩、課題番号：17360217)により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 米山聡, 森本吉春: 光学的全視野応力・ひず

み計測の国際標準化について、日本実験力学会誌 Vol2, No.1, pp32-38, 2002

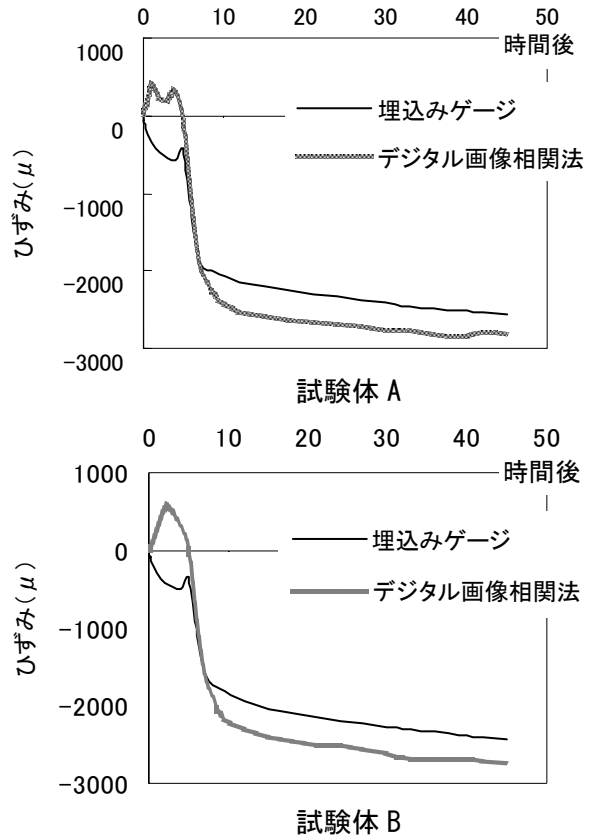


図-12 ひずみ値の比較

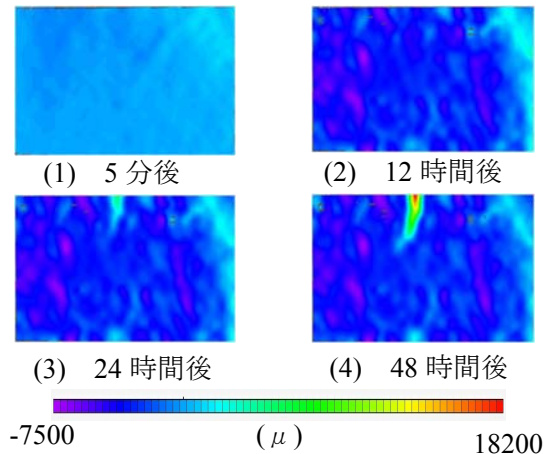


図-13 x方向ひずみ分布



写真-2 試験後の試験体写真