

# 論文 デジタル画像撮影によるコンクリート表面の収縮ひずみ分布測定のための基礎的検討

青木 優介<sup>\*1</sup>・蓮見 亮<sup>\*2</sup>・嶋野 慶次<sup>\*3</sup>・米村 恵一<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリートの収縮やひび割れの発生メカニズムの解明に資することを目的に、小型のコンクリート供試体の表面に生じる収縮ひずみの分布を容易に測定する方法について検討した。本研究では、デジタル画像相関法を用いる方法について検討を進めた。画像の撮影には市販のデジタルカメラを用い、照明には通常の蛍光灯を用いた。また、画像の探索精度を向上させるため、コンクリート表面を研磨して、骨材の表情をあらわにさせた。画像解析の結果、測定区間の長さを 60mm とした場合の収縮ひずみ、ならびに測定区間 60mm を 12 等分した場合の収縮ひずみ分布を、本方法により精度良く測定できることが推察された。

**キーワード:** ひずみ分布, 収縮, デジタル画像相関法, 骨材

## 1. はじめに

コンクリート構造物における収縮ひび割れの抑制が叫ばれて久しい。しかしながら、設計段階において収縮ひび割れの発生確率を適切に評価する技術は、未だ整備段階にあると見受けられる。今後のコンクリート構造物の信頼性を確保するためにも、本技術を早期に確立する必要があると考えられる。

本技術の確立にあたっては、合理的なコンクリートの収縮モデル、構成則、ひび割れ発生条件の開発が課題となる。近年では、コンクリートの収縮に関する骨材の影響を考慮しうる精緻な数値モデルも開発されつつある<sup>1)</sup>。これらモデルの合理性は、通常、これらを導入した数値解析結果と実験結果との比較により検証される。

ここで、精緻なモデルの合理性を検証するためには、実験において数百 mm 程度の測定区間での平均ひずみを得るだけでは足りない。例えば、5mm 程度の短い測定区間で、モルタル部、粗骨材部、両者の界面部のひずみまでを得ることが望ましい。つまり、コンクリート表面の詳細な収縮ひずみ分布を得ることが望ましい。

従来あるひずみゲージ法やコンタクトゲージ法では、コンクリート表面の詳細なひずみ分布を測定できない。一方、近年発展の目覚ましい光学的測定方法<sup>2)</sup>には、これを実現しうる可能性が認められる。

本研究では、光学的測定方法の中でも原理的に理解しやすく、測定装置も揃えやすいデジタル画像相関法に着目した。本稿では、市販のデジタルカメラと蛍光灯を用いて撮影したコンクリート表面の画像に、デジタル画像相関法を適用することにより、コンクリート表面の収縮ひずみ分布を測定した結果について紹介する。

## 2. 研究の方針

### 2.1 本研究の目的

本研究の目的は、コンクリートの収縮やこれを起因とするひび割れの発生メカニズムの解明に資することにある。これらの解明を進めるためには、制御された実験条件のもと、コンクリートの表面に生じる収縮ひずみの分布を測定しうる手段をもつことが効率的だと考えた。そこで本研究では、小型のコンクリート供試体を対象に、その表面に生じる収縮ひずみの分布を容易に測定する方法について検討することにした。

### 2.2 既往の収縮ひずみ分布測定方法

#### (1) ひずみゲージやコンタクトゲージによる方法

コンクリート表面の収縮ひずみ分布を測定する簡易で確実な方法の一つに、複数枚のひずみゲージを用いる方法が挙げられる。

過去に著者らは、乾燥収縮ひび割れ供試体の表面に複数枚のひずみゲージを貼り付け、その収縮ひずみの分布を測定した経験をもつ<sup>3)</sup>。一般に、ひずみゲージは収縮やクリープなど長期間にわたるひずみの測定には不向きとされていたが、著者らは事前の長さ変化試験にて、ゲージの貼り付け面を乾燥させる条件下であれば、乾燥開始以後において、供試体表面に貼り付けたゲージから得られるひずみと、供試体内部に設置した埋め込み型ひずみ計から得られるひずみは、ほぼ一致することを確認していた。実際に、測定された収縮ひずみの分布は妥当と判断された。このことから、コンクリート表面の一区内の収縮ひずみ分布を測定するだけなら、複数枚のひずみゲージを貼り付ける方法で十分可能だと考えている。

\*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

\*2 木更津工業高等専門学校 専攻科環境建設工学専攻

\*3 木更津工業高等専門学校 教育研究支援センター (正会員)

\*4 木更津工業高等専門学校 情報工学科 博士 (工学)

ただし、本研究では、コンクリート表面の一区内だけではなく、面的に、かつ詳細にひずみ分布を測定することを目指している。面的かつ詳細にひずみ分布を測定するには、供試体表面の全面にわたって、ひずみゲージを大量枚貼り付けなければならない。このことは、測定者に多くの負担を生じさせる。なおかつ、貼り付け箇所からの水分の乾燥を防ぐこと、貼り付けたゲージとその接着剤が貼り付け箇所を補強することにより、本来生じるはずの変形やひび割れを阻害する問題も生じさせる。これらの問題に対する解決策を現時点では講じない。よって、複数枚のひずみゲージを用いる方法では、本研究にて目指す面的かつ詳細なひずみ分布の測定を実現できないと考えられる。

他方、ひずみゲージによる長期間のひずみ測定に信頼を寄せられないのであれば、コンタクトゲージを用いる方法もある。この方法で、乾燥収縮を拘束されたコンクリートの表面のひずみ分布を測定した研究例もある<sup>4)</sup>。ただし、通常用いられるコンタクトゲージは、測定区間の長さが100mm~200mm程度と比較的長く、詳細なひずみ分布の測定には適さないと考えられる。

以上のことをふまえば、これらの方法はコンクリート表面の面的かつ詳細な収縮ひずみ分布を測定するには必ずしも適さず、むしろ他の方法により測定された結果の精度を検証するためのデータを得ることに適すると考えられる。

## (2) デジタル画像撮影による方法

内野らは、圧縮荷重下における角柱供試体のデジタル画像を撮影し、これにデジタル画像相関法を適用して、表面に生じるひずみ分布を測定している(図-1)<sup>5)</sup>。

デジタル画像相関法とは、対象物の変形前後を CCD カメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布から、対象物表面の変形量と変形方向を求める方法とされる。コンクリート供試体への圧縮荷重を例に具体的な説明を以下に加える。なお、図-2において、図による説明も試みているので参考にされたい。まず、変形前の画像にてひずみの測定区間を定め、その両端の座標を A 点、B 点と定める。ここで、A 点、B 点を中心とする N 画素×N 画素の画素集団をトリミングし、これらを A 点、B 点の基準画素集団としておく。次に、変形後の画像から A 点、B 点の基準画素集団が持つ輝度値分布に最も相似する点を探索する。この際、相関係数が判定基準となる。すなわち、変形後の画像にて A 点、B 点の基準画素集団を順次探索していき、最も輝度値分布の相関係数が高くなる画素集団の中心点を変形前の A 点、B 点だと特定する。変形後の画像から特定された A 点、B 点をそれぞれ A' 点、B' 点とすれば、式(1)から、A 点と B 点との区間に生じたひずみが算出される。

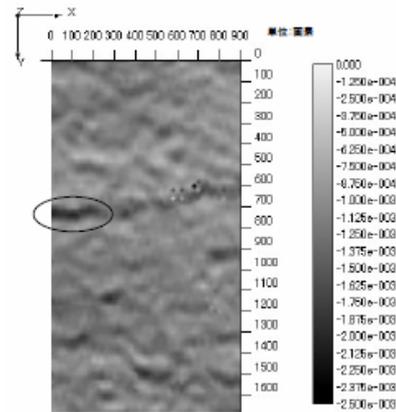


図-1 圧縮荷重を受ける供試体表面のひずみ分布<sup>5)</sup>

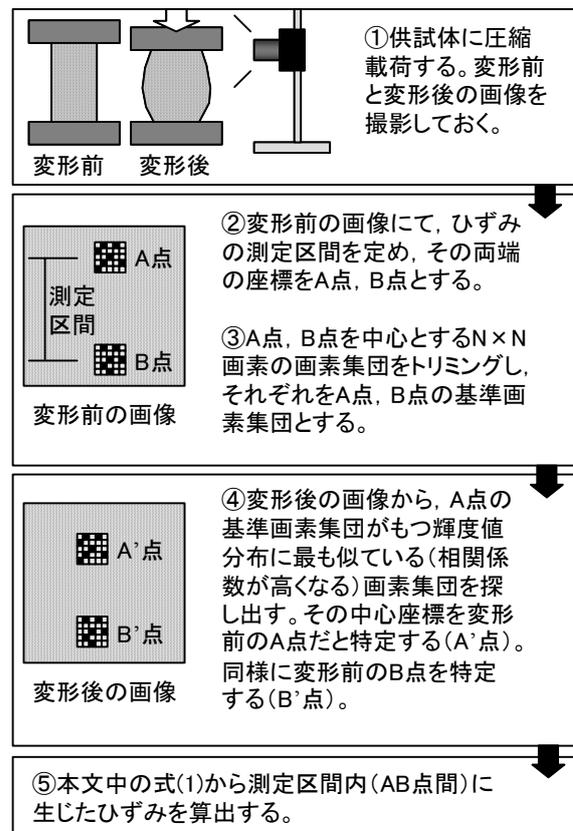


図-2 デジタル画像相関法によるひずみの算出<sup>5)</sup>

$$\varepsilon = \frac{A'B'間の画素数 - AB間の画素数}{AB間の画素数} \quad (1)$$

なお、画素を距離に変換したとしても算出されるひずみは同じ値になる。

以上から察せるように、本方法によるひずみの測定精度は、変形前の基準点(を含む画素集団)を変形後の画像から探索する精度に依存する。内野らは、画素単位で探索を行う粗探索に続き、画素以下の精度で探索を行う精密探索を加えることにより、探索精度の向上を図っている。また、コンクリート表面の輝度値分布を乱すことにより探索精度の向上が見込まれることから、供試体表面に黒色スプレーを噴霧している。

本方法であれば、ひずみゲージ法やコンタクトゲージ法で問題となった費用、手間、乾燥の妨害、接着箇所への補強、測定区間の長さなどの問題が全て解決される。撮影装置の準備と画像解析プログラムの作成が問題となるが、近年では高機能なデジタルカメラも入手しやすくなっていること、デジタル画像相関法自体は情報処理分野では基礎的な技術とされていることをふまえれば、その解決に大きな障害はないと考えられる。

なお、伊藤らは、ラインセンサスキャナを用いてデジタル画像を撮影し、これに画像相関法を適用してコンクリート表面のひずみ分布を測定している<sup>6)</sup>。この場合、CCDカメラの撮影では生じやすい照明の変動やレンズの収差による画像のゆがみの問題が解消されるだけでなく、器材自体も安価で、より高画素での撮影が可能になると報告している。

### (3) その他の方法

他にも、レーザー干渉を利用したモアレ干渉法、スペックル干渉法、ホログラフィ法などの測定方法が開発されている<sup>2)</sup>。これらの方法を用いてもコンクリート表面のひずみ分布を測定できる可能性が示唆されているが、やや特殊な測定装置を必要とすることから、本研究では検討の対象外とした。

## 2.3 本研究の方針

本研究では、内野らと同じく、デジタル画像相関法を用いてコンクリート表面の収縮ひずみ分布を測定する方法について検討する。基本的には内野らの測定方法を踏襲するが、内野らとの違いとして、撮影機器に市販のデジタルカメラを用いていること、照明に一般的な蛍光灯を用いていること、供試体表面の輝度値分布を乱すために、黒色スプレアの噴霧ではなく、表面の研磨により骨材の表情をあらわにする手法を用いていること、そして、長期間にわたる乾燥収縮ひずみの測定を行っていることが挙げられる。すなわち、研究の新規性としては、準備が容易な機器や条件を用いていること、画像の探索精度を上げると同時に粗骨材とモルタル部とのひずみ性状の違いを捉えようとしていること、長期間にわたるひずみの測定を行っていることが挙げられる。

なお、本研究におけるデジタル画像解析プログラムは、内野らの結果(図-1)のように、コンクリート表面のひずみ分布を詳細に出力しうる段階には達していない。現段階では、図-2のフローのように、あらかじめ指定する2点間に生じたひずみを手作業にて(相関係数を判定基準とする探索作業のみ自動)算出できるだけの完成度に留まっている。今後、詳細なひずみ分布を出力できるよう完成度を高める予定だが、本稿では、その基礎的検討として、現段階の解析プログラムでのひずみの測定精度について検証した結果を紹介する。

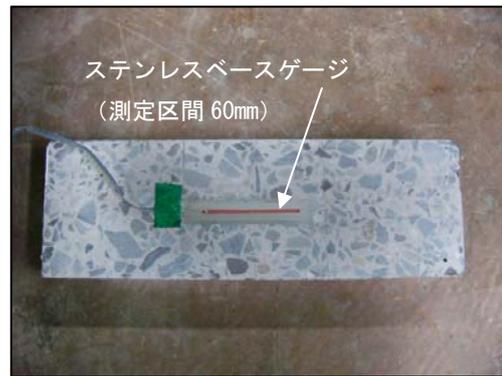


写真-1 乾燥収縮供試体の外観

## 3. デジタル画像撮影による収縮ひずみ測定

### 3.1 測定の流れ

測定は、基本的に図-2の流れに準じた。すなわち、乾燥収縮供試体の乾燥開始直後(実際には乾燥開始後24時間)とそれ以降の時点にて、供試体表面の画像をデジタルカメラで撮影した。乾燥開始直後の画像にて、ひずみの測定区間とその両端における基準画素集団を設定した。続いて、乾燥開始以降に撮影した画像から、両端の基準画素集団に最も相似する画素集団を探索し、両者の座標を特定した。当初に設定した測定区間に含まれる画素数と、探索された画素集団の座標間に含まれる画素数の差から、測定区間内に生じたひずみを算出した。

算出したひずみの精度については、測定区間の近傍に貼り付けたひずみゲージの値との比較により検証することにした。なお、本稿では、測定区間の長さを60mm(検証用ひずみゲージと同等の測定区間)とした場合の平均ひずみと、測定区間の60mmを12等分した場合のひずみ分布の測定例について紹介する。

### 3.2 供試体の準備

測定に用いた乾燥収縮供試体の外観を写真-1に示す。供試体は高さ50mm、幅100mm、長さ350mmの寸法をもつ角柱とした。撮影面の輝度値分布を乱すため、撮影面を研磨機により研磨し、骨材の表情をあらわにさせた。なお、研磨後の表面には研磨跡などの微妙な凹凸が残る。この凹凸が、撮影焦点のズレ等の問題を生み、結果的に、ひずみの測定精度を劣化させることも懸念される。このことに対して、本研究では特別な対策を施していない。すなわち、以降に示すひずみの測定結果には、この懸念による影響が含まれている可能性があることに留意されたい。また、供試体表面の輝度値分布を乱す方法として、研磨により骨材の表情をあらわにさせる本方法は、内野らが行った黒色スプレアの噴霧よりも手間を要する。しかし、表面の輝度値分布をより大きく乱せること、変形の局所化や破壊の発端に及ぼす骨材の影響を観察できることなどの利点があることから、本研究では採用することにした。

供試体の表面には、検証用のひずみ測定値を得るためのひずみゲージとして、測定区間 60mm をもつステンレススペースゲージを貼り付けた。なお、乾燥収縮供試体におけるコンクリートの配合は不明である。研究の目的上、配合が把握されている必要は特になく、約 1 年間、実験室に放置されていた供試体を用いた。ただし、供試体は乾燥開始以前に 10 日間水中に浸漬し、吸水させた。また、粗骨材の種類は砂岩砕石であり、その最大寸法は 20mm に相当することを確認した。

### 3.3 撮影機器の準備

ひずみの算出精度を高めるためには測定区間内における画素数を多くすることが重要となり、それを適えるためには高い撮影画素数をもつデジタルカメラを準備することが重要となる。例えば、100mm の測定区間を 4000 画素（1200 万画素デジタルカメラの長手方向の画素数）で撮影した場合、1 画素あたりの長さは 0.025mm となる。この条件下で 1 画素分の変形が生じたとすれば、そのひずみは  $0.025/100=250\mu$  となる。この値は、コンクリートの表面に生じている収縮ひずみを算出する際の最小目盛りとしては、明らかに粗い。

本研究では、N 社製デジタル一眼レフカメラを準備し、撮影に供した。本カメラの撮影画素数は最大 1200 万画素である。上述のように、コンクリート表面の収縮ひずみを測定するには、この画素数でも十分とは言えないが、市販されており入手しやすかったこと、（購入当時の）市販のデジタルカメラではトップクラスの撮影画素数をもっていたこと、豊富なレンズ群やパソコンと連動した自動撮影システムなどが既に整備されていたことなどを理由に、本カメラを選択した。

### 3.4 試験と画像撮影

乾燥収縮試験とその画像撮影の様子を写真-2 に示す。なお、当時の乾燥条件は、室温  $20\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度  $50\pm 5.0\%$  であった。

画像の撮影には、特別な機器や技術を要していない。鋼製の台座の上にカメラを固定し、レンズの先に供試体を置いた。以後、パソコンに導入した自動撮影システムにより、24 時間毎に画像を撮影した。照明には、室内の蛍光灯のみを用いた。特別な機器や技術を要さない条件下で、どの程度の精度のひずみ測定が可能となるのかを検証していることにも本研究の特徴がある。

### 3.5 画像解析によるひずみの算出

ひずみの算出作業には、図-2 にて紹介した内野らの方法をほぼ踏襲した<sup>7)</sup>。乾燥開始直後の画像にて設定した基準画素集団（ここでは 32 画素×32 画素）を、乾燥開始以降の画像から探索する際には、内野らと同じく、画素単位による粗探索と画素単位以下での精密探索を行った。具体的には、まず粗探索として、式(2)によって



写真-2 乾燥収縮試験と画像撮影の様子

計算される相関係数  $C$  を判定基準に、乾燥開始以降の画像において、基準画素集団に最も相似する画素集団の画素単位での座標を特定した。

$$C(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left| \begin{array}{c} I_d(X+u+i, Y+v+j) \\ -I_u(X+i, Y+j) \end{array} \right| \quad (2)$$

ここで、 $I_u(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$  はそれぞれ乾燥開始直後、乾燥開始以降の輝度値を表す。 $X$ 、 $Y$  は基準画素集団の中心座標、 $u$ 、 $v$  はそれぞれ  $x$  方向、 $y$  方向への移動量を表す。乾燥開始以降の画像において、式(2)から算出される相関係数  $C$  の総和が最小になる座標が、基準画素集団に最も相似する画素集団が存在する画素単位の座標として特定される。

次に精密探索として、式(3)によって計算される相関係数の残差  $S$  を判定基準に、基準画素集団に最も相似する画素集団の画素単位以下での座標を特定した。

$$S \left( X, Y, u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 1 - \frac{\sum [F(X, Y) \cdot G(X^*, Y^*)]}{\left[ \sum (F(X, Y)^2) \cdot \sum (G(X^*, Y^*)^2) \right]^{1/2}} \quad (3)$$

ここで、 $F(X, Y)$  と  $G(X^*, Y^*)$  は、それぞれ乾燥開始直後の  $(X, Y)$  と乾燥開始以降の  $(X^*, Y^*)$  における輝度値である。また、 $(X^*, Y^*)$  は  $(X, Y)$  の変形を考慮した座標であり、

$$\begin{aligned} X^* &= X + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ Y^* &= Y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。ここで、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  はそれぞれ基準画素集団の中心から  $(X, Y)$  までの距離である。 $(X^*, Y^*)$  は整数値にならないことが多く、その場合の輝度値は補間により求めることになる。乾燥開始以降の画像において、式(3)から算出される相関係数の残差  $S$  が最小になる座標が、基準画素集団に最も相似する画素集団が存在する画素単位以下での座標として特定される。

なお、精密探査では、画素単位以下の座標での相関を求める作業を行うため、画素と画素間の輝度値を補間する必要がある。今回の解析では、これに双一次補間法を用いている。本方法の説明については割愛する。

#### 4. 表面ひずみの測定結果と考察

##### 4.1 乾燥収縮試験における測定

###### (1) 測定区間長さを 60mm とした場合の平均ひずみ

ひずみの算出に用いた測定区間の画像を写真-3 に示す。ここでは、ひずみゲージを挟む 4 区間に生じるひずみを算出し、それらの平均値（1 区間のデータのみでは粗骨材の配置によりひずみ変動するため、4 区間の平均値とした）とひずみゲージにより測定されるひずみを比較することで、測定精度を検証した。なお、各区間における基準画素集団間の画素数は、ひずみゲージの測定区間 60mm と同等になるよう、2900 画素とした。

画像解析により特定した区間 1,2,3,4 における両端 2 点間の長さ（画素）を表-1 に示す。また、これらの値から計算した区間 1,2,3,4 におけるひずみを表-2 に示す。表-2 には、区間 1,2,3,4 におけるひずみの平均値とひずみゲージにより測定されたひずみも記している。図-3 には、両者の値と乾燥時間との関係を示している。両者の値はほぼ一致している。よって、本方法を用いても、コンクリート表面の乾燥収縮ひずみを良好な精度で測定しようと推察される。

なお、今回のひずみの計算では、乾燥開始後 24 時間で撮影した画像から基準画素集団を設定している。本来ならば、乾燥開始直後に撮影した画像から設定すべきである。しかし、乾燥開始直後のコンクリート表面では、水分の乾燥などにより、セメントペーストや骨材の輝度値に大きな変化が生じる。それゆえ乾燥開始直後の画像から基準画素集団を設定すると、以降の画像からそれを十分な精度で探索することができず、結果として、算出されるひずみに大きな誤差が生じることが確認された。この問題の解決については今後の課題とした。

###### (2) 測定区間 60mm を 12 等分した場合のひずみ分布

ひずみ分布の算出に用いた測定区間の画像を写真-4 に示す。ここでは、測定区間 60mm（本画像の場合 2556 画素）を 12 等分し、それぞれ 5mm の区間におけるひずみを算出することで、当該区間のひずみ分布を求めた。なお、求めたひずみ分布の妥当性を検証するためには、同じ測定区間において、5mm 毎にひずみゲージによりひずみを測定し、その分布との比較を行うことが望ましい。しかし、ここでは画像解析により求められたひずみ分布の平均値を算出し、これと測定区間 60mm のひずみゲージにより測定されたひずみの値を比較することで、妥当性の検証に代えることにした。

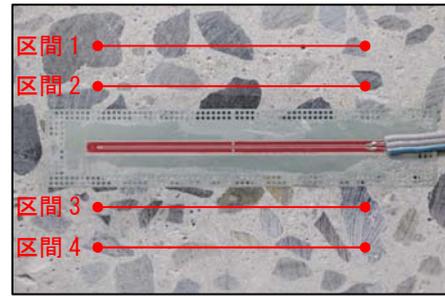


写真-3 平均ひずみの算出に用いた測定区間

表-1 区間 1, 2, 3, 4 における両端 2 点間の長さ

乾燥時間 (日)	区間1 2点間長さ (画素)	区間2 2点間長さ (画素)	区間3 2点間長さ (画素)	区間4 2点間長さ (画素)
1	2900.00000	2900.00000	2900.00000	2900.00000
3	2899.93729	2899.90946	2899.80002	2899.97872
7	2899.66815	2899.68407	2899.74087	2899.73237
14	2899.31059	2899.30931	2899.19901	2899.22613
21	2899.11319	2899.06703	2899.02757	2898.96149
28	2898.98821	2898.91118	2898.82571	2898.80586

表-2 区間 1, 2, 3, 4 におけるひずみ

乾燥時間 (日)	区間1 ひずみ ( $\mu$ )	区間2 ひずみ ( $\mu$ )	区間3 ひずみ ( $\mu$ )	区間4 ひずみ ( $\mu$ )	区間1-4 平均 ひずみ ( $\mu$ )	ゲージ ひずみ ( $\mu$ )
1	0	0	0	0	0	0
3	-22	-31	-69	-7	-32	-31
7	-114	-109	-89	-92	-101	-113
14	-238	-238	-276	-267	-255	-253
21	-306	-322	-335	-358	-330	-313
28	-349	-375	-405	-412	-385	-350

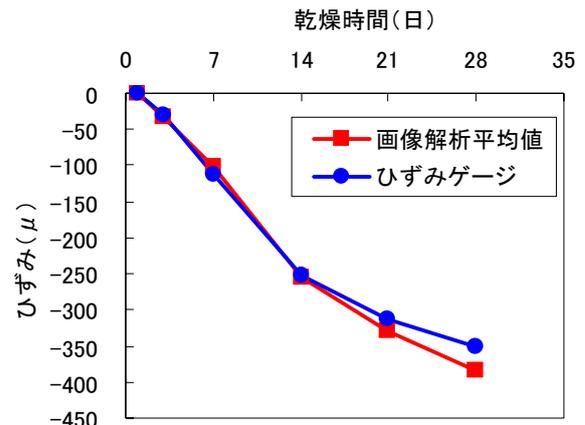


図-3 各区間の平均値とひずみゲージ値の比較



写真-4 ひずみ分布の算出に用いた測定区間

画像解析により求められた（表-1, 2 と同様の計算を行った）各区間のひずみと乾燥時間との関係を図-4 に示す。図-4 中には、各区間のひずみの平均値とひずみゲージにより測定されたひずみも、それぞれ太線で示してある。両者の値はほぼ一致している。よって、本方法により求められた測定区間内のひずみ分布は、妥当なものとして推測される。

この検証結果を受けて、改めて各区間のひずみを観察すると、その変動が著しいことがわかる。作図上、多数のデータ線が錯綜するため、ここでは特徴的な点についての考察に留める。例えば区間 b では、乾燥開始直後から急激に収縮し、乾燥後 7 日を過ぎたあたりからやや膨張に転じる様子が伺える。あるいは区間 j では、乾燥開始直後から膨張し、乾燥後 14 日を過ぎたあたりから収縮に転じる様子が伺える。区間 b、区間 j の状態を写真-4 から確認すると、区間 b ではモルタル分が多く、一部に粗骨材との界面を含んでいる。区間 j はそのほとんどが粗骨材によって占められている。これらのことから、モルタル、粗骨材および両者の界面における収縮や離挙動が相互しあい、コンクリート表面の収縮ひずみの変動に繋がっていることが伺える。

## 5. まとめ

小型コンクリート供試体を対象に、表面に生じる収縮ひずみの分布を容易に測定する方法について検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) デジタル画像関連法を用いてコンクリート表面の収縮ひずみ分布を測定した。本研究では、撮影機器に市販のデジタルカメラを用いる、照明に通常の蛍光灯を用いる、など画像の撮影に特殊な機器や技術を用いないことにした。また、供試体表面の輝度値分布を乱すために、表面の研磨により骨材の表情をあらわにする手法を用いた。
- (2) (1)の方法により、測定区間の長さを 60mm とした場合の平均ひずみを算出した。算出されたひずみは、ひずみゲージにより測定したひずみとほぼ一致したことから、本方法によりコンクリート表面の収縮ひずみを良好な精度で測定しうることが推察された。
- (3) (1)の方法の応用により、測定区間 60mm を 12 等分した場合のひずみ分布を求めた。求めたひずみ分布の平均値とひずみゲージにより測定したひずみがほぼ一致したことから、本方法によりコンクリート表面の収縮ひずみ分布を妥当に求められることが推察された。なお、今回のひずみ分布の測定結果からは、モルタル、粗骨材および両者の界面における収縮や離挙動が相互しあい、コンクリート表面の収縮ひずみの変動に繋がっていることが伺えた。

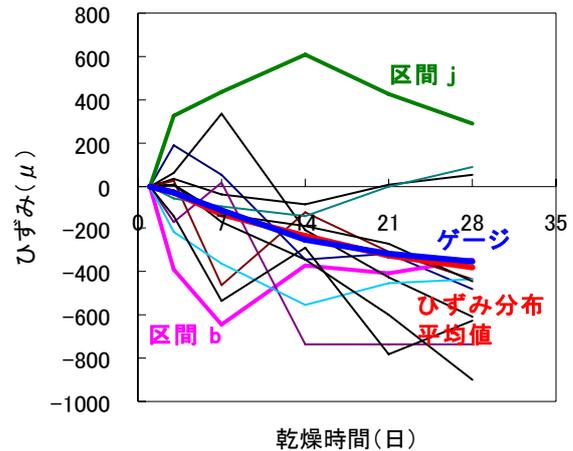


図-4 各区間のひずみと乾燥時間の関係

## 謝辞

本研究の実施にあたり、福岡工業技術センターの内野正和博士、九州工業大学の日比野誠博士、合田寛基博士には貴重なアドバイスを頂きました。ここに記し、深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) T. Shimomura: Time-Dependent Stress and Strain in Concrete Member under Restraint Drying Shrinkage, CREEP, SHRINKAGE, DURABILITY MECHANICS OF CONCRETE and CONCRETE STRUCTURES, Vol.1, pp.215-222, Oct.2008
- 2) 日本コンクリート工学協会九州支部：「光学的計測法によるインフラ構造物の新しい計測法」に関する講習会資料, 2006.10
- 3) Y. Aoki, T. Shimomura, H. Obata : Stress Analysis and Cracking Criteria of Concrete under Restraint Drying Shrinkage, Proceedings of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, pp.1425-1430, August, 1999
- 4) 大野俊夫, 魚本健人：コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木学会論文集 V 巻, No.662, V-49, pp.29-44, 2000.10
- 5) 内野正和ら：光学的変形計測手法を利用した構造物診断のための全視野計測方法の開発, 福岡県工業技術センター研究報告, No.16, 2006
- 6) 伊藤幸広ら：ラインセンサスキャナを用いた全視野ひずみ計測法に関する基礎的研究, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, pp.367-368, 2006.9
- 7) 松山幸央ら：デジタル画像関連法を用いたコンクリートのひずみ測定, 第 35 回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集, CD-ROM, 2008.3