

# 報告 フラットヘッドスキャナを用いた長さ変化供試体の収縮ひずみ測定

青木 優介\*1・小川 哲史\*2・嶋野 慶次\*3

**要旨:** フラットヘッドスキャナで撮影した長さ変化供試体のデジタル画像にデジタル画像相関法を適用し、その収縮ひずみを測定した。測定の結果、本方法により従来のコンタクトゲージ法と同等の精度にて供試体の収縮ひずみを測定できることがわかった。また、測定に際し供試体へのゲージプラグの貼り付けや特別な表面加工は必要なく、測定区間の標点となる箇所にマーカーにて印を描くだけで十分な測定精度を得られることもわかった。この他に、撮影時の解像度および標点画像の寸法の変化がひずみの測定結果に与える影響について分析した。

**キーワード:** 長さ変化試験, 収縮ひずみ, デジタル画像相関法, フラットヘッドスキャナ

## 1. はじめに

コンクリートは、乾燥収縮や自己収縮により収縮する。収縮はプレストレスの減少やひび割れ幅の増大などの原因となる。収縮が拘束されるとコンクリート断面には引張応力が生じ、ひび割れが発生することがある。これらの問題を顕在化させないためには、コンクリートの収縮ひずみを定量的に評価することが重要となる。

収縮ひずみを評価するための試験として、JIS A 1129 モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法（以降、長さ変化試験と称す）が規定されている<sup>1)</sup>。最近では、有害な収縮ひび割れの発生を抑制するために、本試験で測定されるひずみ値の確認を求められる場合もある<sup>2)</sup>。長さ変化試験の必要性は今後も高まると考えられる。

長さ変化試験には3つの測定方法が規定されている<sup>1)</sup>。それぞれの方法と概要を表-1に示す。これらの方法はいずれも実績に富む。しかしこれらの測定方法には以下3つの問題が指摘される。

- ① 測定結果に人的誤差が生じやすい
- ② 供試体へのプラグの埋め込みや貼り付けが必要
- ③ どの測定装置も高価で、生産・修理に難がある

長さ変化試験の必要性に応えるためにも、上記の問題を解消できる測定方法について考える。著者らは近年発展が目覚ましい光学的測定方法に着目する<sup>3)</sup>。中でも原理的に理解しやすく、コンクリートのひずみ測定への適用実績を持つデジタル画像相関法に着目する<sup>4)</sup>。

著者らは、長さ変化供試体の収縮ひずみ測定に際し、供試体表面のデジタル画像をより確実かつ安価に撮影するために、市販のフラットヘッドスキャナを用いる。本報告では、フラットヘッドスキャナで撮影した画像にデジタル画像相関法を適用して、長さ変化供試体の収縮ひずみを測定する方法の実現性を検証する。

表-1 規定されている長さ変化試験の測定方法

名称	コンパレータ方法	コンタクトゲージ方法	ダイヤルゲージ方法
測定機器			
測定	接眼マイクロメータで標点間距離を測定	表面のプラグ間の距離をゲージで測定	両端のプラグ間の距離をゲージで測定

## 2. 着想に至った経緯と本検証の位置づけ

### 2.1 デジタル画像相関法への着目

前章に挙げた長さ変化試験の3つの問題を解消できる測定方法について考える。例えば、埋設型ひずみゲージを用いる測定方法<sup>5)</sup>は有望である。①の問題が解消される上に、人による測定作業を要しないことは大きな利点である。ただし、供試体へのゲージの埋め込み作業は必要なので②の問題は残存する。また、ひずみ自動測定用のデータロガーは高価なので③の問題も残存する。

全ての問題を解消しようとするれば、測定作業から人的要素を排除し、供試体には何も設置せず、安価で入手も容易な測定機器を用いることが求められる。著者らは、近年発展が目覚ましい光学的測定方法に着目する。中でも、原理的に理解しやすく、コンクリートのひずみ測定への適用実績を持つデジタル画像相関法に着目する。本方法の詳細については次項以降で紹介する。本方法は上述の要求条件を全て満足する。すなわち、測定作業はコンピュータ上で行われるため人的要因が排除される。標点として画像の一部を用いるためプラグの設置を要しない。デジタル画像の撮影機器は従来の測定装置に比べれば安価であり、入手も容易である。パソコンや画像処理ソフトも汎用のもので足りる。これらの利点に加え、本方

\*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)

法であれば撮影した画像がコンピュータ内に保存されるため、測定作業日を制約されず、証拠も残る。着目に値する条件は整っていると考えられる。

## 2.2 デジタル画像相関法による収縮ひずみ測定

内野らは、圧縮荷重下においた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、供試体表面のひずみ分布を測定している<sup>4)</sup>。測定原理を単純化して以下に紹介する。図-1はその図解となる。まず、変形前の供試体の画像を撮影する。その画像にてひずみの測定区間を定め、両端の座標をA点、B点とする。続いてA点、B点を中心とするN画素×N画素の画像をトリミングし、これらをA点、B点の標点画像とする。続いて、変形後の画像からA点、B点の標点画像を探索する。厳密には、A点、B点の標点画像が持つ輝度値分布と最も近い(相関係数の高い)輝度値分布をもつN画素×N画素の画像を特定する。特定された画像の中心座標がもとのA点、B点であった可能性は極めて高い。これらをA'点、B'点とすれば、式(1)から、測定区間内に生じたひずみが算出される。

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

以上からも察せるように、本方法によるひずみの測定精度は、変形前の標点画像を変形後の画像から探索する際の精度に依存する。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。

著者らは、表面を研磨して骨材の表情をあらわにした角柱供試体を市販のデジタル一眼レフカメラで撮影し、その画像にデジタル画像相関法を適用して、供試体表面の収縮ひずみを測定している<sup>6)</sup>。骨材の表情をあらわにしたのは、内野らの黒色スプレー同様に、コンクリート表面の輝度値分布を乱すためである。

測定の結果、本方法にてコンクリートの収縮ひずみを長期的に測定できることが明らかとなった。ただし、測定を通じて以下3つの問題が浮上した。

- ① 供試体とカメラの距離・角度を一切ずらせない
- ② 照明を常に一定に保たなければならない
- ③ 高性能カメラとレンズのセットはやや高価

特に①の問題は深刻で、供試体を入れ替えられないため、複数の供試体を同時に測定できないことになる。

## 2.3 フラットヘッドスキャナを用いる利点

伊藤らは、ラインセンサスキャナを用いて梁供試体の表面の画像を撮影し、これに画像相関法を適用して、梁供試体表面のひずみ分布を測定している<sup>7)</sup>。この場合、

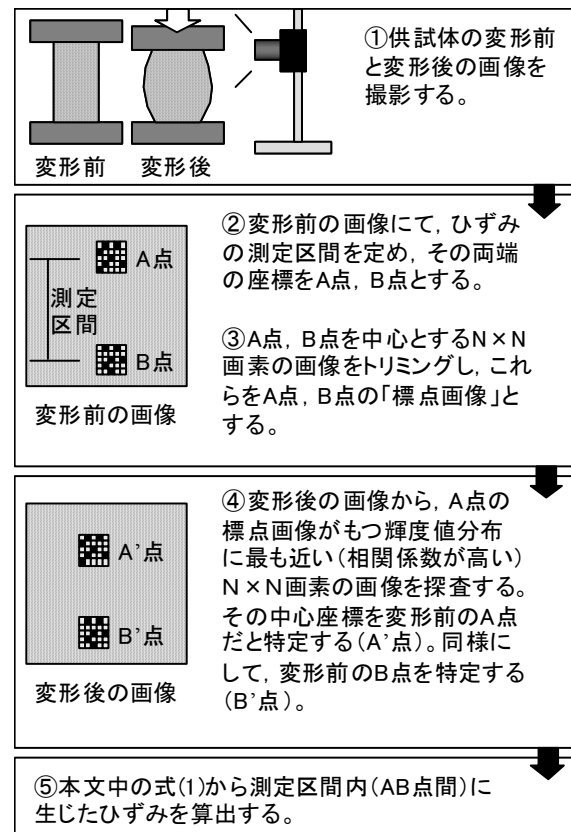


図-1 デジタル画像相関法によるひずみ測定原理

CCD カメラでの撮影では生じやすい照明の変化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、撮影機器自体も安価で、より高解像度での撮影が可能になると指摘している。

本指摘は、ラインセンサスキャナを用いれば、前項に挙げた②③の問題が解消されるだけでなく、より忠実な画像の撮影が可能となることを示唆している。そして、ラインセンサスキャナを内蔵するフラットヘッドスキャナならば撮影面とスキャナとの距離・角度は常に一定する。すなわち、①の問題も解消されることになる。

## 2.4 本検証の位置づけ

以上をまとめると、以下3点となる。

- ① デジタル画像相関法を用いる測定方法には、従来の測定方法における問題点を解消できる可能性が認められる。
- ② デジタル画像相関法を用いるひずみの測定方法自体はすでに確立されており、収縮ひずみ測定への適用事例もある。
- ③ デジタル画像の撮影にフラットヘッドスキャナを用いれば、より有利に収縮ひずみ測定が行えると考えられる。

本検証では③の真偽を検証する。なお、以降フラットヘッドスキャナによるひずみの測定方法をスキャナ法と称する。

### 3. 収縮ひずみ測定精度検証実験

#### 3.1 測定精度の検証方法

スキャナ法による収縮ひずみの測定精度を実験的に検証する。特に、デジタルカメラでの測定では不可能であった供試体の入れ替えを行っても、十分な精度で収縮ひずみを測定できるかを検証する。

検証方法として、コンタクトゲージ法にて測定される収縮ひずみとの比較を選択する。写真-1 に示す角柱型のコンクリート供試体を作製し、その収縮ひずみをコンタクトゲージ法で測定し続ける。一方、乾燥開始時点にてフラットヘッドスキャナにより供試体表面を撮影し、画像のゲージプラグの部分に標点画像に定める。以降、定期的に供試体表面を撮影する。撮影の都度、供試体をスキャナ上から移動させる。つまり供試体を入れ替える。定期的に撮影した画像にデジタル画像相関法を適用し、標点画像間のひずみを求める。これとコンタクトゲージ法により測定されたひずみとの一致を確認することで、スキャナ法によるひずみの測定精度を検証する。なお、マーカー（黒ボールペン）で描いた印を標点画像とする場合の測定精度も同時に検証する。これで十分な精度が得られるなら、今後は供試体にマーカーで印を描くだけで、収縮ひずみを測定できることになる。

#### 3.2 実験方法

##### (1) コンクリートの配合と練り混ぜ

実験に用いるコンクリートの配合と使用材料を表-2 に示す。練り混ぜにはパン型強制練りミキサを用いる。

##### (2) 供試体の作製

本実験では2体の供試体(A,B)を作製する。両者の型枠を写真-2 に示す。以下に長さ変化試験用の型枠を用いなかった理由を述べる。素材をアクリル板としたのは軽量化をはかるためである。2体ともに高さを200mmとしたのは撮影に用いるフラットヘッドスキャナがA4サイズ(210mm×297mm)対応のものだからである。加えて、コンクリートを縦方向に打設する形状としたこと、また、供試体Bの断面寸法を150mm×150mmとしたことは別目的の検討を兼ねるためである。ここで、本検証実験の本質は、同一供試体においてコンタクトゲージ法とスキャナ法により測定される収縮ひずみの一致を確かめることにある。上記の事項はいずれも本検証実験の本質を損なうものではないと考える。

ところで供試体の測定面には、コンタクトゲージ法に要するゲージプラグを配置しなければならない。ここで、同じ測定面をスキャナ法に供することを考えれば、測定面を極力平坦にする必要がある。すなわち、測定面から突出させないようにプラグを供試体に埋め込まなければならない。本供試体には図-2 のようにしてプラグを埋め込む。

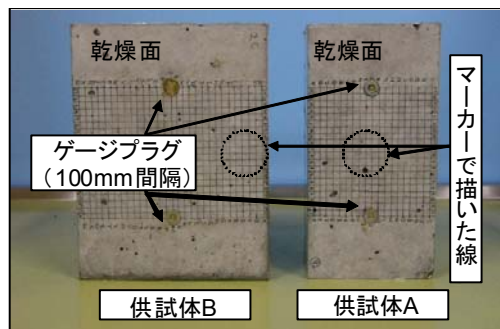


写真-1 検証実験用供試体 (A,B)

表-2 コンクリートの配合と使用材料

W/C	Air (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	Ad.
0.55	6.0	170	309	797	1027	1.2

W : 水道水  
 C : 普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm<sup>3</sup>)  
 S : 細骨材(山砂, 密度2.61g/cm<sup>3</sup>, F.M.2.63)  
 G : 粗骨材(碎石, 密度2.78g/cm<sup>3</sup>, 5-20mm)  
 Ad. : AE減水剤(リグニスルホン酸系化合物)

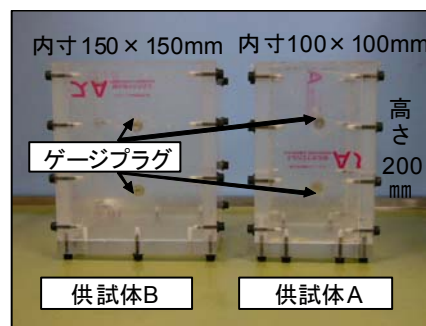


写真-2 供試体 A,B の型枠

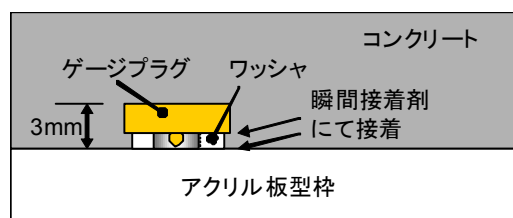


図-2 供試体へのゲージプラグ埋め込み

##### (3) 供試体の養生・乾燥

供試体を養生・乾燥する場所として、室温15±5.0℃、相対湿度50±20%となる室内を選ぶ。温度・湿度の変動が大きいが、コンタクトゲージ法とスキャナ法の測定が同時に行われるなら問題にはならない。コンクリートを型枠に打設した後、封かん状態のまま(型枠を外さず、打設面をビニールラップで覆ったままで)同室内に7日間静置する。その後、型枠を取り外し、写真-1に示すようにマーカーにて印を描く。さらに4側面のうち測定面以外の相対する2面をビニールテープによりシールし、両端面をアルミテープによりシールする。マーカーの印を複雑にしていること、乾燥面数を2面乾燥としていることは、前項でも触れた別目的の検討のためである。

#### (4) 収縮ひずみ測定

コンタクトゲージ法での測定については JIS 長さ変化試験方法に準じて行う。測定区間長さを 100mm とする。乾燥開始直後にプラグ間の基本距離を測定し、その後、定期的にプラグ間の距離を測定する。当日のプラグ間の距離と基本距離の差から、当日の収縮ひずみを算出する。

スキャナ法での測定においては、測定面の乾燥開始直後および定期的な撮影、そして画像から当日のひずみを算出する作業が必要となる。スキャナ法での測定状況を写真-3 に示す。なお、実際の撮影時には照明を一定にするため、スキャナ全体を段ボール箱にて覆う。

撮影には E 社製フラットヘッドスキャナを用いる。本スキャナの最大解像度（光学）は 6400dpi である。本実験では 4800dpi を用いる。4800dpi の解像度で撮影された画像の 1 画素あたりの長さは約 0.005mm となる。このままではコンタクトゲージの精度に及ばないが、画素以下の精度での精密探査を加えることで、それを補うことができる<sup>4),6)</sup>。本実験では、乾燥開始直後の測定面を撮影し、画像のうち 2 つのゲージプラグの部分の画像を標点画像と定める（1500 画素×1500 画素）。そして、標点画像の中心座標間の画素数を基本距離と定める。以降、コンタクトゲージ法と併行して測定面の撮影を行う。撮影回数は 1 測定につき 1 回とする。

当日の画像中から標点画像を探査し、その座標を特定することで収縮ひずみを算出できることは、2.3 節にて述べたとおりである。ここで必要となるのは、当日の画像中から標点画像を正確に探査できる画像解析ソフトである。本実験では、Euresys 社よりインターネット上に無料で配布されている画像総合処理ソフト EasyAccess を用いる<sup>8)</sup>。本ソフトは多くの画像処理機能を有するが、そのうち EasyMatch という機能はデジタル画像相関法による画像探査（精密探査をとまなう）を行うものである。

### 3.3 実験結果および考察

#### (1) 測定精度の検証

コンタクトゲージ法およびスキャナ法により測定された供試体 A,B の収縮ひずみの経時変化を図-3 に示す。両測定結果はほとんど一致する。厳密には、スキャナ法により測定された収縮ひずみの方がコンタクトゲージ法のそれよりも 10 $\mu$ ~50 $\mu$  程度大きくなる。この理由として以下の 3 点が考えられる。

- ① スキャナ法では実際よりも収縮ひずみが大きく測定されてしまう
- ② コンタクトゲージ法では実際よりも収縮ひずみが小さく測定されてしまう
- ③ 表面の収縮ひずみ（スキャナ法）とプラグの埋め込み深さを含む収縮ひずみ（コンタクトゲージ法）とでは、前者の方がやや大きくなる

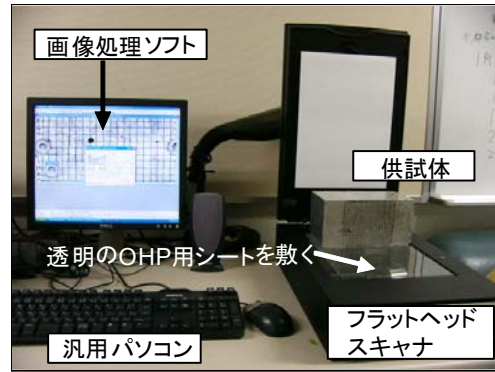


写真-3 スキャナ法の測定状況

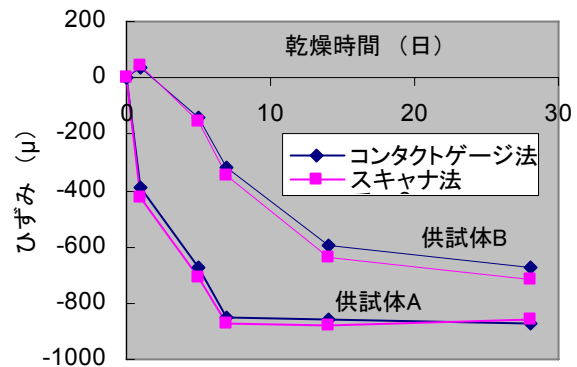


図-3 供試体 A,B の収縮ひずみの経時変化

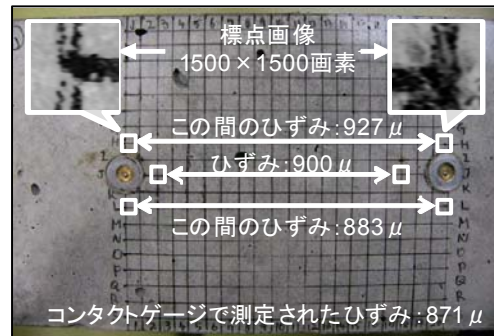


写真-4 マーカー印を標点画像とした測定結果

①②については真偽を検証する術がない。③について、別途、表面に貼り付けたプラグと埋め込んだプラグとでコンタクトゲージ法による収縮ひずみ測定を行ったところ、表面に貼り付けたプラグから測定された収縮ひずみの方が 10 $\mu$ ~30 $\mu$  程度大きくなる結果を得た。以上の結果を総括して、スキャナ法ではコンタクトゲージ法と同等の精度で収縮ひずみを測定できると判断する。

#### (2) マーカーでの測定精度の検証

スキャナ法にて標点画像をマーカー印部分（1500 画素×1500 画素）とした場合に測定された収縮ひずみとコンタクトゲージ法により測定された収縮ひずみとの比較を写真-4 に示す。スキャナ法により測定された各所のひずみはややばらつくが、これは測定箇所が異なるためだと考えられる。測定される収縮ひずみがコンタクトゲージ法のそれよりも 10 $\mu$ ~50 $\mu$  程度大きくなる傾向は、



ゲージプラグ部分を標点画像としていた場合と変わらない。よって、標点画像をマーカーで描いた印としても、コンタクトゲージ法と同程度の測定精度で収縮ひずみを測定できると判断する。

#### 4. 影響要因分析実験

##### 4.1 実験の目的

前章までの検証実験にて、スキャナ法によりコンタクトゲージ法と同等の精度での収縮ひずみ測定が可能となることを確認した。また、標点画像はマーカーによる印で十分であり、供試体へのゲージプラグの設置や表面への特殊な加工は必要にならないことも確認した。当初設定した検証の目的を一応達成したことになる。

ところで、ここまでのスキャナ法では撮影時の解像度や標点画像の寸法を一定としていた。これらが増減する場合の測定結果への影響を確かめておくことは、本方法の利用にあたって重要であると考えられる。ここでは、撮影時の解像度あるいは標点画像の寸法を変化させてスキャナ法による収縮ひずみ測定を行い、これらが測定結果に与える影響について分析する。

##### 4.2 実験方法

供試体の外観を写真-5に示す。本供試体は、前章の実験と同時に作製されている。形状、寸法、型枠、コンクリートの配合および打設方向ともに前章の供試体Aと同じである。ただし、乾燥開始材齢を36日とすること、乾燥面を4側面とすること、測定面にはマーカーによる線のみを描きゲージプラグを配置しないことが異なる。なお、マーカーにより5つの測定区間を設定しているが、中央を除く4区間は別目的の検討のためのものである。

##### 4.3 実験結果および考察

###### (1) 撮影時の解像度による影響

撮影時の解像度を4800dpi、2400dpi、1200dpiとした場合のスキャナ法による収縮ひずみの測定結果を図-4に示す。いずれの解像度においても測定に用いた標点画像は写真-5に示す白枠内から指定したものであり、その寸法は7mm×7mm(画素数で表すと、4800dpiの場合1323画素×1323画素、2400dpiの場合661画素×661画素、1200dpiの場合331画素×331画素)である。

図-4より、撮影時の解像度は収縮ひずみの測定結果に影響するといえる。仮に4800dpiで測定されたひずみを正值とする場合、2400dpiと1200dpiとで測定されたひずみには、正值から10μ～20μの誤差が生じていることになる。ただし、誤差には収縮ひずみの増大ともなう増加が認められない。よって以降、収縮ひずみが増大したとしても、誤差は依然10μ～20μ程度に留まると予想される。このことは、解像度の低下による影響が収縮ひずみの増大につれて相対的に低下することを意味する。

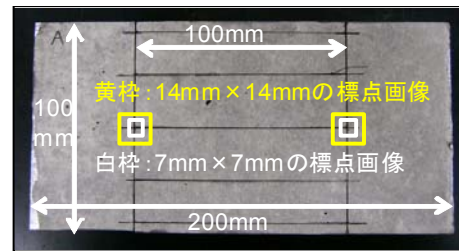


写真-5 影響要因分析実験用供試体

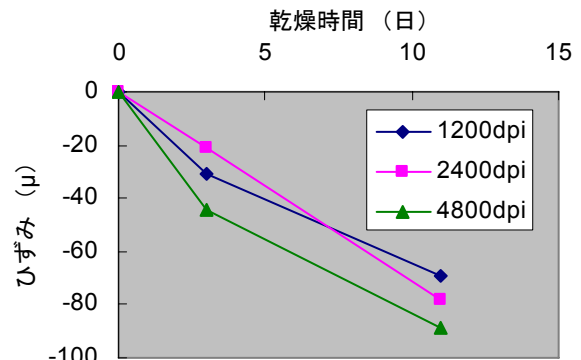


図-4 撮影時の解像度を変えた場合の測定結果

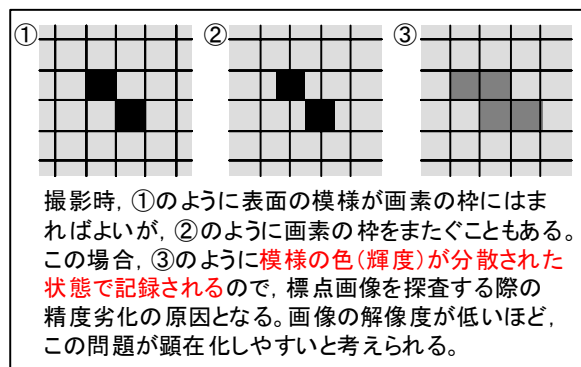


図-5 画像の解像度が測定結果に与える影響

なお、2400dpiの測定値と1200dpiの測定値が途中で逆転していることから、解像度の高さと測定される収縮ひずみの間には明確な関係が存在しないことがわかる。

以上の結果が得られた理由を考察する。直感的には、撮影時の解像度を低くすることはコンタクトゲージ法という最小目盛り(1/1000mm)を粗くすることと同義に感じられる。しかし、スキャナ法では画素以下の精度で精密探索が行われている。最小目盛りを粗くすることと同義にはならない。測定結果に影響するのは画像撮影時の忠実性であると考えられる。この考えを図-5に表す。この考察が正しければ、撮影時の解像度を低くした場合には、偶然に正しい値が測定されることもあるが、基本的には誤差が生じやすくなるといえる。一方、ひずみの大きさは無関係の原因であるため、誤差は生じたとしても常に限られた値内に収まると考えられる。そのため、収縮ひずみが増大するにつれ、誤差が測定値内に占める割合は小さくなっていくと考えられる。

## (2) 標点画像の寸法による影響

標点画像の中心座標を同じとし、画像寸法を 7mm×7mm (661 画素×661 画素)、14mm×14mm (1322 画素×1322 画素) とした場合のスキナ法による収縮ひずみの測定結果を図-6 に示す。なお、両測定ともに撮影時の解像度は 2400dpi である。

図-6 より、標点画像の寸法も収縮ひずみの測定結果に影響するといえる。この理由については、コンタクトゲージ法にて貼り付けるゲージプラグの大きさを変えることを想像すれば理解しやすい。図-7 に示すように、プラグが大きくなるほどひずみの測定幅が広がり、測定長さは長くなることわかる。標点画像の寸法を大きくすることはこれと同義であり、ばらつきの小さい測定結果を得やすくなる反面、真の 2 点間のひずみをクリティカルに求めにくくなる。なお、標点画像の寸法を極端に小さくすると、画像探査の際に画像中から近い輝度値分布を持つ画像を複数探査してしまい、誤った結果を招く可能性が高まる。一方、極端に大きくすると画像探査の際の計算量が膨大となり、コンピュータの処理能力が追いつかなくなる可能性が出てくる。スキナ法にてコンタクトゲージ法を代替しようとするなら、標点画像の寸法をゲージプラグと同等にすればよく、画像探査にも全く問題は生じない。

## 5. まとめ

フラットヘッドスキナを用いた長さ変化供試体の収縮ひずみ測定の実現について実験的に検証した。検証で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フラットヘッドスキナを用いて撮影したコンクリート供試体のデジタル画像にデジタル画像相関法を適用することにより、コンタクトゲージ法と同等の精度で収縮ひずみを測定することができる。
- (2) マーカーで印をつけた部分を標点画像とする場合でも、収縮ひずみの測定精度は劣化しない。すなわち、ゲージプラグの貼り付けや撮影のための特別な表面加工は不要である。
- (3) 撮影画像の解像度は収縮ひずみの測定値に影響する。撮影時の解像度を低くした場合には、偶然に正しい値が測定されることもあるが、基本的には誤差が生じやすくなると考えられる。一方、誤算は生じたとしても限られた値内に収まると考えられることから、収縮ひずみの増大につれて、測定値内に誤差が占める割合は小さくなると考えられる。
- (4) 標点画像の寸法も収縮ひずみの測定値に影響する。本方法にてコンタクトゲージ法を代替しようとするなら、標点画像の寸法をゲージプラグと同等にすればよい。

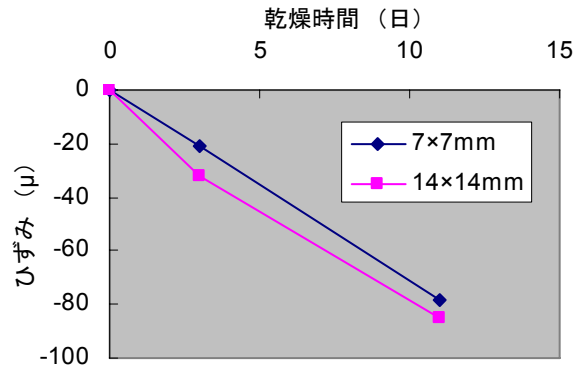


図-6 標点画像の寸法を変えた場合の測定結果

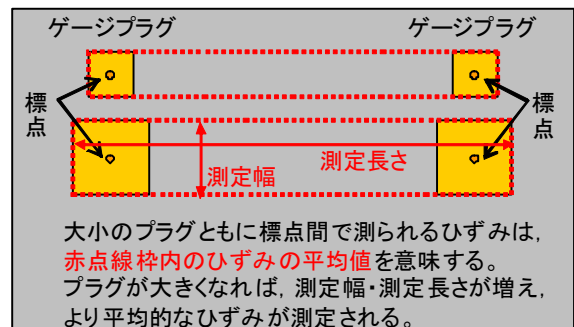


図-7 標点画像の寸法が測定結果に与える影響

## 謝辞

画像処理ソフト EasyAccess の利用にあたり、株式会社アド・サイエンス様より利用マニュアルをご提供いただきました。ここに記して、深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔規格編〕JIS規格集，土木学会，2007
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・同解説，日本建築学会，2006
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 百瀬晴基ら：乾燥収縮迅速評価システムの開発，コンクリート工学，Vol.47，No.10，pp.22-29，2009.10
- 6) 青木優介ら：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，コンクリート工学年次論文集，第31巻，pp.673-678，2009
- 7) 伊藤幸広ら：ラインセンサスキ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
- 8) <http://hp.vector.co.jp/authors/VA044784/easyaccess.html>