

論文 デジタル画像の相互相関係数を用いた RC はりのひび割れ検出について

竹ヶ原 一輝*1・菅田 紀之*2

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート構造部材の耐荷性能試験におけるひび割れの検出方法として、試験部材の変形前後において撮影したデジタル画像の相互相関係数の変化を用いる手法を提案し、小型鉄筋コンクリートはりの曲げ試験を実施しその適用性について検討を行った。その結果、相互相関係数の変化を用いてひび割れを検出可能なこと、適切な解析領域（サブセット）のサイズは51×51ピクセルであること、ひび割れ幅が大きくなるに従い相互相関係数の値が低下すること、解析領域内における画像の回転やひび割れ発生位置が、ひび割れ幅と相互相関係数の関係に影響を及ぼすことを明らかにした。

キーワード：ひび割れ、ひび割れ幅、デジタル画像、相互相関係数、デジタルカメラ

1. はじめに

コンクリート構造物の合理的な設計法を確立するためには、構造物あるいは構造部材の耐荷性能試験を行い、その詳細な挙動を把握しなければならない場合がある。そのためには、耐荷性能試験において、ひずみや変位の計測を行うとともに、特にコンクリート構造部材ではひび割れの発生状況を把握することが重要となる。ひずみや変位の計測は、計測技術の発展により静的な応答から衝撃的な応答まで詳細に連続デジタルデータとして得ることが可能になっている。しかしながら、ひずみや変位の計測はひずみゲージや変位計を用いて行うのが一般的であり、多点の計測を行う場合には多くのひずみゲージおよび変位計を設置することが必要になる。また、計測機器についても測定点数に応じたものが必要になるため、高コストになることが問題として生ずる場合がある。ひび割れについては、任意の位置に発生するため、多くのひび割れをひずみゲージやクラックゲージを用いて追跡することは難しく、目視で観測することが一般的である。そのため、ひび割れの発生・進展を連続的なデジタルデータとして得ることは非常に困難になっている。

近年、ひずみゲージや変位計を用いる計測に代わるデジタル画像を解析する方法が研究されてきている。その一つのデジタル画像相関法は、変形前後の解析対象物をデジタルカメラなどで撮影し、画像の類似領域を変形前後間の相互相関係数が最大になる領域として探索し、その座標の相対変化を変位とする。この方法は多点測定が容易であり、供試体表面のひずみ分布解析などに応用されている¹⁾。この方法によるひび割れの検出についても、ひずみ分布などから行うことが可能である²⁾。しかしながら、ひずみを解析するためには高精度な領域探索が必要であり、解析領域内にひび割れが発生した場合、精度が低下する問題が想定される。また、場合によっては有効な領域探索が不可能になる事も予想される。

そこで本研究では、ひび割れの検出方法として変形前後における画像間の相互相関係数の変化を用いる方法について検討を行う。変形前の画像に対して、変形後においてもひび割れが発生していない画像は高い相関を示すものと考えられる。一方で、変形後の画像においてひび割れが発生していれば、相関性は低くなり、相互相関係数の値も小さくなるものと考えられる。このような性質をひび割れの検出に応用するというものである。

2. デジタル画像を用いたひび割れ検出方法

2.1 デジタル画像の相互相関係数を用いた解析方法

デジタル画像の解析方法の一つとして、変形の前において撮影された解析対象のデジタル画像の相互相関係数を求める方法がある。この方法では、変形前の画像において解析点を定めその点を中心とするM×Nピクセル（画素）の相互相関係数の計算領域（サブセット）を設定する（写真-1(a)）。変形後の解析対象画像においては、変形に伴いサブセット（類似領域）の位置が画像上で移動する（写真-1(b)）。この変形後のサブセットの座標を、式(1)に示す相互相関係数が最大になる座標として探索する。

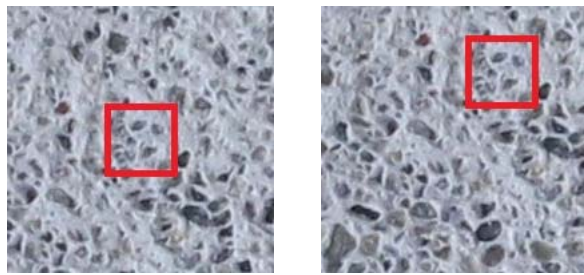
$$C = \frac{\sum (I_{oij} - \bar{I}_o)(I_{dij} - \bar{I}_d)}{\sqrt{\sum (I_{oij} - \bar{I}_o)^2 \sum (I_{dij} - \bar{I}_d)^2}} \quad (1)$$

ここで、 I_{oij} ：変形前輝度値、 I_{dij} ：変形後輝度値
 \bar{I}_o ：変形前平均輝度値、 \bar{I}_d ：変形後平均輝度値

このサブセットの中心の座標移動がピクセル単位の変位となる。ただし、この方法における変位はピクセル単位であり、ひずみの計算には精度不足となるため、相互相関係数が最大となる座標の前後を中心とした相互相関係数についても計算し、座標と相互相関係数の関係を曲線

*1 室蘭工業大学 大学院（学生会員）

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域准教授 博（工）（正会員）



(a) サブセットの設定 (b) サブセットの移動
写真-1 サブセットの探索



(a) ひび割れ前 (b) ひび割れ発生 (c) ひび割れ拡大



相互相関係数の低下

写真-2 ひび割れ発生サブセット

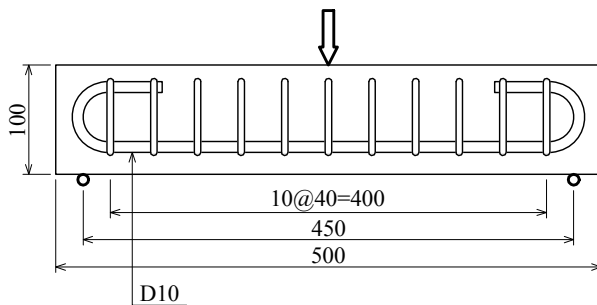


図-1 鉄筋コンクリートはり

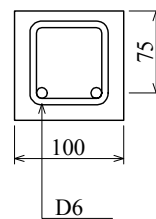


写真-3 実験状況

あるいは曲面近似することにより、相互相関係数が最大になる座標をサブピクセル単位（画素単位以下）で求めている。このサブピクセル単位の変位に基づきひずみを計算することができる。

2.2 従来の方法によるひび割れ検出の例

従来法によるひび割れ検出の方法としては、ひずみの値に閾値を設け、その値をこえた場合にひび割れと判断する方法、あるいは変形後の解析点の相対変位に閾値を設け、その値をこえた場合ひび割れと判断する方法、相対変位をひび割れ幅とする方法などが考えられる。これらの従来法を用いる方法では高精度な座標探索が要求され、場合によってはレンズの収差を補正するためのキャリブレーションが必要になる場合がある。また、解析点を含むサブセット内にひび割れが発生した場合、大きな誤差を生ずる事や解析が不可能になる事が想定される。

2.3 相互相関係数の変化を用いたひび割れ検出方法

本研究では、サブセット画像の変化に伴う相互相関係数の変化に注目した。写真-2(a)に示すひび割れ発生前のサブセットに対して、荷重が載荷しひび割れが発生したサブセット(写真-2(b),(c))では類似性が低下し、それに伴い相互相関係数の値も低下する。この相互相関係数の変化によりひび割れを検出する。この方法の利点としては、高精度な座標探索を要求されないこと、サブセット内に発生したひび割れの影響を受けないことなどがあげられる。ただし、ひび割れには様々な形態のものがああり、さらに輝度分布が異なるなどの要因により、ひ

び割れと相互相関係数の間に一意の関係が得られないことが予想される。

3. 実験概要

3.1 供試体

ひび割れ検出の対象とした供試体は、図-1に示すような小型のRCはりであり、コンクリート用の陸砂を用いたモルタルで製作した。寸法は100×100×500 mmであり、試験は、スパンを450 mmとし、スパン中央に荷重を載荷する曲げ試験とした。供試体の撮影面における輝度分布の変化（明暗）をはっきりさせるために、脱型直後に金属ブラシを用いて表面を薄く削り骨材を露出させる処理を行った。

3.2 撮影概要

写真-3のように供試体を耐圧試験機に設置し、デジタルカメラを配置した。デジタルカメラから供試体までの距離は約1.3 mとし、カメラの設定は表-1のとおりとした。撮影解像度は0.11 mm/pixelである。画像の撮影は、鉄筋が降伏するまでは荷重0.5 kN ごとに行い、降伏後については任意のタイミングで行った。

4. 結果および考察

4.1 ひび割れ発生による相互相関係数の変化

図-2にRCはりの荷重とスパン中央変位の関係を示す。変位は従来のデジタル画像相関法を用いて求めた。

表-1 カメラの設定

撮影画素数	5184×3456
レンズ焦点距離	50 mm
フォーカス方法	マニュアル
シャッター速度	1 / 30
絞り	F 8.0
撮影感度	ISO 800

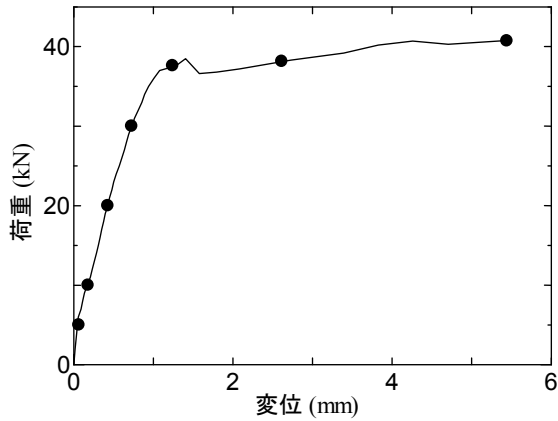


図-2 荷重-変位関係

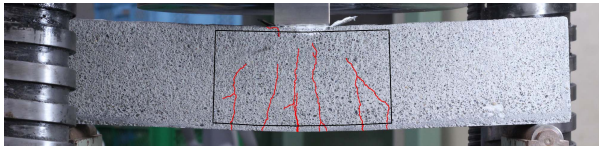
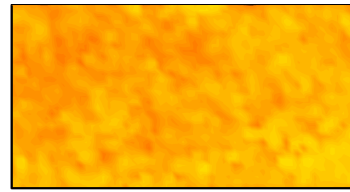
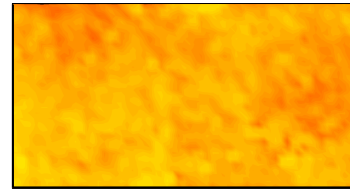


写真-4 解析範囲およびひび割れ

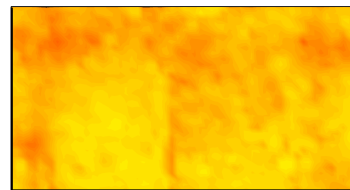
荷重-変位関係から荷重が 7 kN 程度で曲げひび割れが発生し、37 kN 程度で鉄筋降伏が起こっていることが推定された。写真-4 で示す範囲の相互相関係数の分布は、図-3 のようになる。図-2 中に黒丸で示す荷重-変位点で解析を行った。写真-4 には図-3 の降伏後2の載荷状態における画像において、目視で判断できるひび割れも赤の実線で示している。サブセットのサイズを 51×51 ピクセル、解析座標間隔を 25 ピクセルとして解析を行った。図より、ひび割れ発生前と推定できる荷重 5 kN では、ひび割れを示すような相互相関係数の分布を確認できない。荷重 10 kN においてもはっきりとした相関係数の低下を確認できないが、荷重 20 kN においてはセンターのひび割れ部分ではっきりとした相関係数の低下が確認できる。荷重 30 kN ではセンター以外におけるひび割れ部においても相関係数の低下が表れている。また、降伏後2の分布においては6本のひび割れがはっきりと示されている。一例としてスパンセンターの下縁に発生したひび割れについて、ピクセル単位で表したひび割れ幅と相互相関係数の関係を図-4 に示す。サブセットのサイズは 51×51 ピクセルとして解析を行った。ひび割



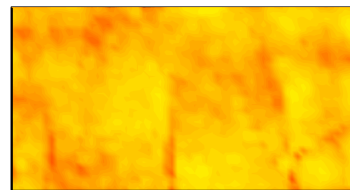
5 kN



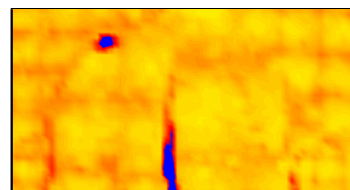
10 kN



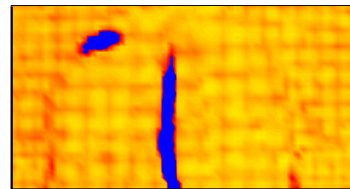
20 kN



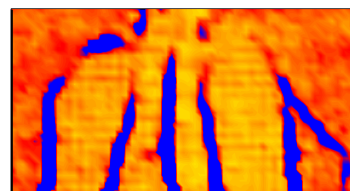
30 kN



降伏直後



降伏後1



降伏後2

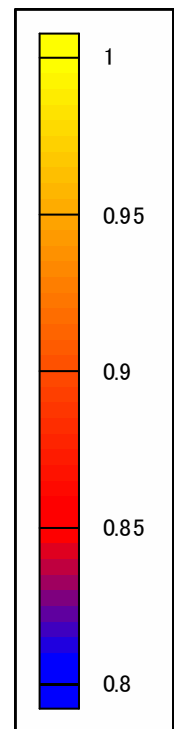


図-3 相互相関係数の分布

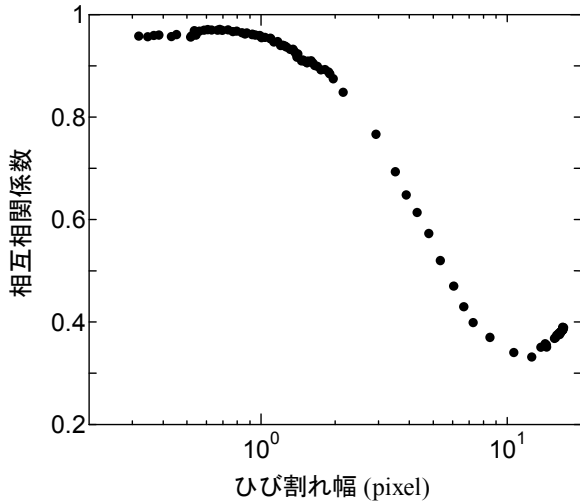


図-4 ひび割れ幅と相互相関係数の関係

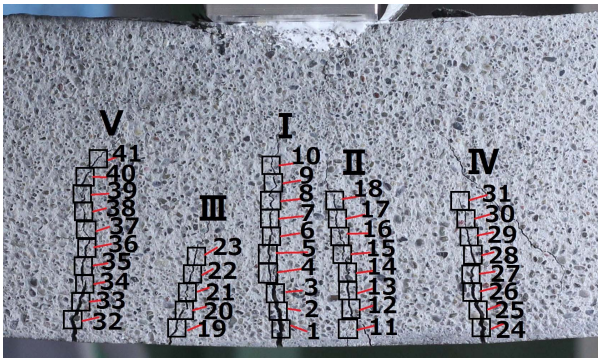


写真-5 サブセット設定位置

れ幅は、ひび割れを挟むように 150 ピクセルの間隔で 2 つのサブセットを設定し従来法で変位を求め、その相対変位とした。図より、ひび割れ幅が 0.8 ピクセル程度まで相互相関係数の値は 0.96 程度で一定であり、ひび割れ幅 0.9 ピクセル程度から 10 ピクセルの間で相互相関係数が低下していることがわかる。このように相互相関係数の変化をひび割れの検出およびひび割れ幅の算出に応用できる可能性を示すことができた。

4.2 ひび割れ幅と相互相関係数の関係

写真-5 で示しているほぼ垂直に発生した 5 か所の曲げひび割れにおける、ピクセル単位で表したひび割れ幅と相互相関係数の関係を示すと図-5 ~ 9 のようになる。サブセットのサイズは 51×51 ピクセルとして、ひび割れ発生画像を参照し同一のひび割れにおいて下縁から 50 ピクセル間隔で 5 から 10 か所のサブセットを設定した。また、ひび割れがサブセットの中央になるように設定し解析を行った。スパンセンター付近のひび割れ I の解析結果を図-5 に示している。なお、サブセット 4, 5 および 6 については、サブセット内のひび割れが 2 つになるまでの結果を示している。図より、ひび割れ幅 0.7 ピクセル程度まで相互相関係数の値が 0.95 から 0.97 で一

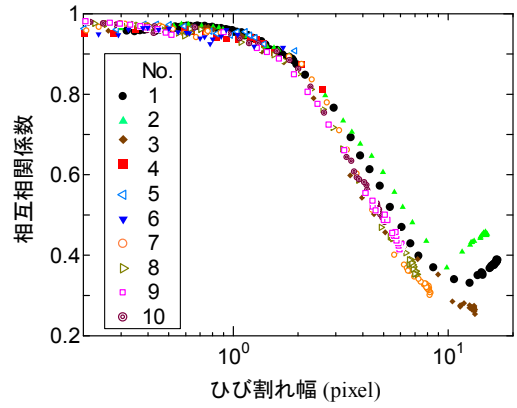


図-5 ひび割れ幅と相互相関係数の関係 (I)

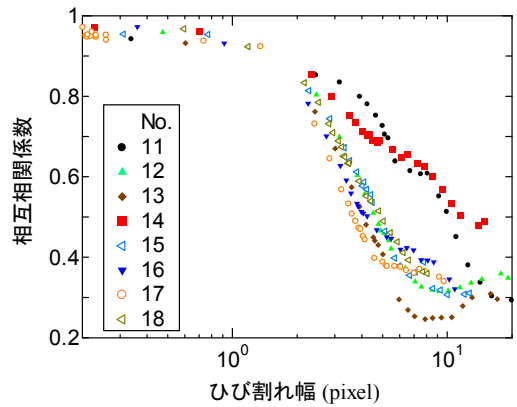


図-6 ひび割れ幅と相互相関係数の関係 (II)

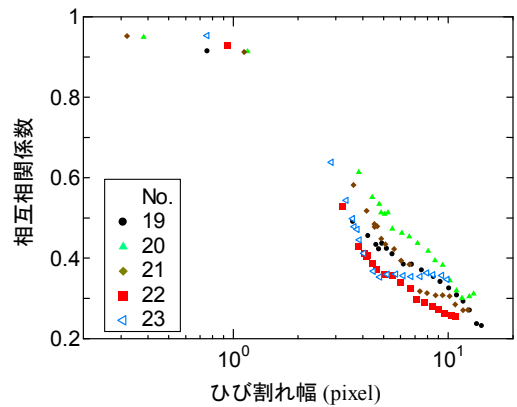


図-7 ひび割れ幅と相互相関係数の関係 (III)

定値を示し、ひび割れ幅が 0.8 ピクセルから 10 ピクセルの間で相関係数が低下していることがわかる。下縁に近くひび割れ幅が 10 ピクセルを超えたサブセット 1 および 2 においては、ひび割れ幅 10 ピクセル以上で、相関係数が増加している。また、ひび割れ幅 3~10 ピクセルにおける相関係数の値は、サブセット 1 および 2 において若干大きくなっているが、ほぼ同様の値になっている。スパンセンター付近のひび割れ II (図-6) については、ひび割れ幅が 1 ピクセル以上で相互相関係数が減少していることがわかる。また、ひび割れ幅に対する相互相関係数の値はサブセットによって異なっているが、ひび割れ幅 10 ピクセル程度までは減少傾向を示していること

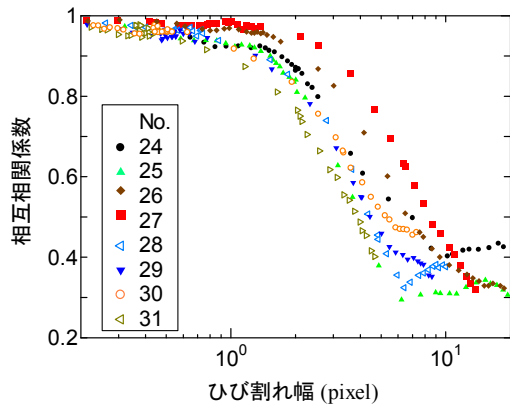


図-8 ひび割れ幅と相互相関係数の関係 (IV)

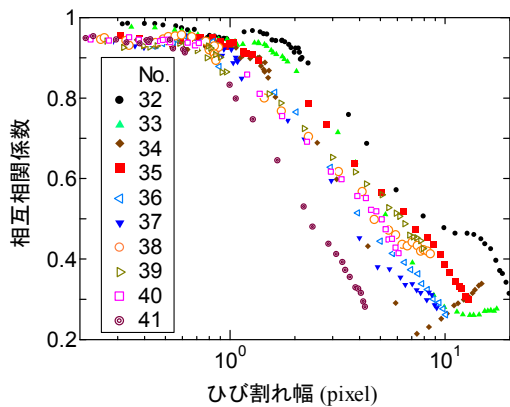


図-9 ひび割れ幅と相互相関係数の関係 (V)

がわかる。ひび割れ III の結果を図-7に示す。ひび割れ III は発生するタイミングが他のひび割れと比べ遅く、かつひび割れ開口速度が大きかったため、ひび割れ幅3ピクセル以下の結果が少なくなっている。図より、ひび割れ III においてもひび割れ幅1ピクセル程度以上において相互相関係数が低下することがわかる。また、ひび割れ II と同様にひび割れ幅に対する相互相関係数の値はサブセットによって異なっている。ひび割れ IV の結果を図-8に、ひび割れ V の結果を図-9に示している。図より、他のひび割れと同様に、ひび割れ幅0.7~1程度以下では相互相関係数はほぼ一定を保ち、それ以上のひび割れ幅において相関係数が減少していることがわかる。また、ひび割れ II および III と同様に、ひび割れ幅に対する相互相関係数の値はサブセットによって異なっていることがわかる。

以上より、ひび割れ幅が1ピクセル程度以下の場合、相互相関係数の変化は少なく、相互相関係数の値を単純に用いてひび割れを検出するのは難しいといえる。また、サブセット設定位置によりひび割れ幅と相互相関係数の関係が異なることがわかった。これは、ひび割れを含むサブセットの輝度分布、サブセット内のひび割れ角度、ひび割れ開口方向、たわみによる画像の回転などによる影響ではないかと考えられる。

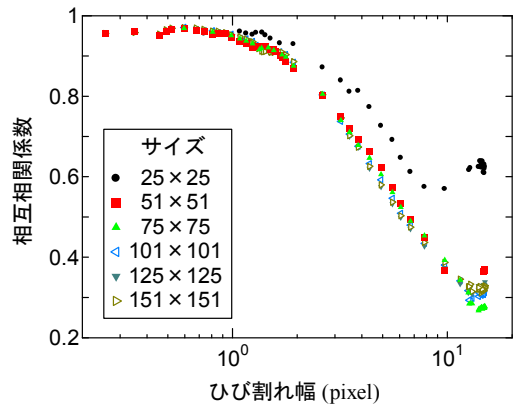


図-10 サブセットサイズの影響 (サブセット2)

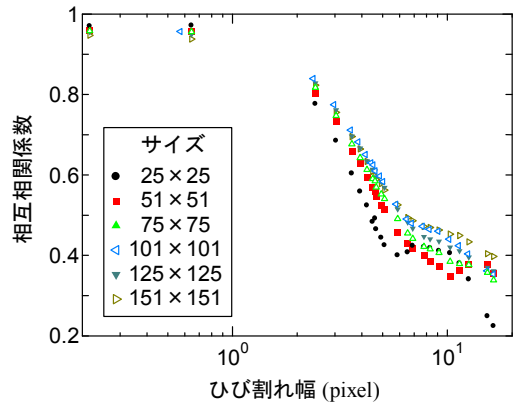


図-11 サブセットサイズの影響 (サブセット13)

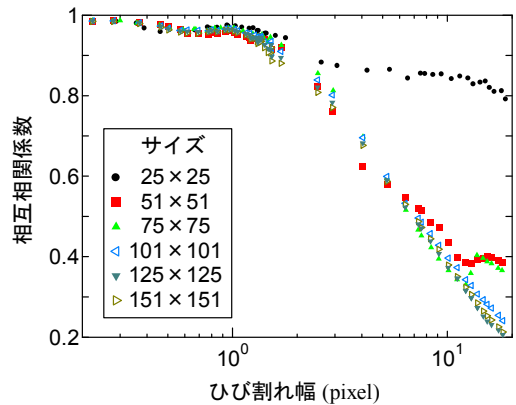


図-12 サブセットサイズの影響 (サブセット26)

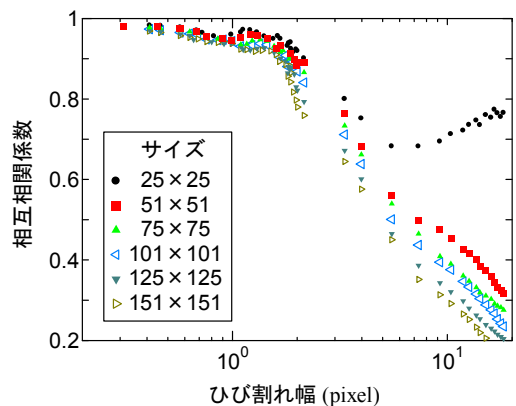


図-13 サブセットサイズの影響 (サブセット32)

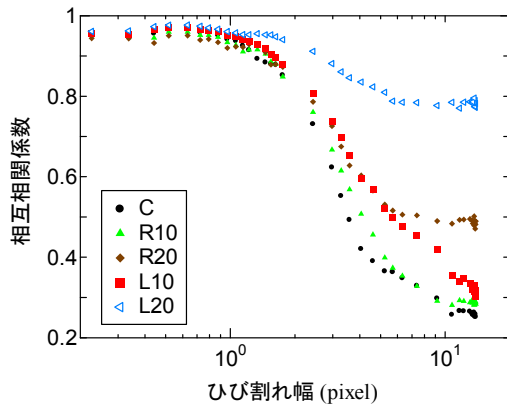


図-14 ひび割れ位置の影響 (サブセット 3)

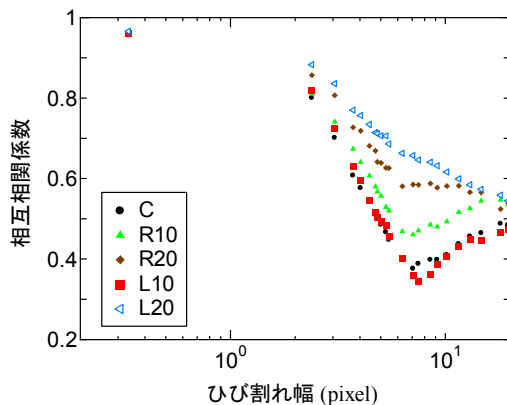


図-15 ひび割れ位置の影響 (サブセット 12)

4.3 ひび割れ幅と相互相関係数の関係に及ぼすサブセットサイズの影響

写真-5 の設定位置 2, 13, 26 および 32 におけるサブセットのサイズを 25×25 から 151×151 ピクセルまで、6 種類のサイズでひび割れ幅と相互相関係数の関係を求めた。その結果を図-10~13 に示す。サブセット 2, 26 および 32 では、サブセットサイズが 25×25 ピクセルの相互相関係数が、ひび割れ幅 1 ピクセル以上の範囲において、他のサイズの相関係数よりも大きくなっていることがわかる。サブセット 13 では、それとは反対にサブセットサイズ 25×25 ピクセルの相互相関係数が他のサイズの相関係数よりも小さくなっている。また、サブセットサイズ 25×25 ピクセルの相互相関係数は、サブセット 2 においてひび割れ幅 10 ピクセル以上で、サブセット 32 においてひび割れ幅 7 ピクセル以上で増加に転じていることがわかる。

サブセットサイズ 51×51 ピクセル以上に着目すると、サブセット 2 では、ひび割れ幅と相互相関係数の関係がサブセットサイズによらずほぼ等しくなっていることがわかる。サブセット 13 および 32 では、サブセットサイズが大きいほど相互相関係数も大きくなる傾向を確認できる。しかしながら、サブセット 13 ではひび割れ幅 5 ピクセル程度まではひび割れ幅と相互相関係数の関係はほ

ぼ等しいといえる。

以上より、サブセットサイズが 51×51 ピクセル以上であれば、ひび割れの開口にともなう相互相関係数の低下を解析できるといえる。また、サブセットサイズが解析時間に大きく影響を及ぼすことを考慮すると、本手法の相互相関係数の計算にはサブセットのサイズとして 51×51 ピクセルが適しているといえる。

4.4 ひび割れ幅と相互相関係数の関係に及ぼすサブセット内ひび割れ位置の影響

写真-5 の設定位置 3 および 12 においてサブセットを左右にずらし、サブセット内におけるひび割れの発生位置を変えて解析を行った。その結果を図-14 および 15 に示す。サブセットサイズは 51×51 ピクセルである。凡例の C, R10, R20, L10 および L20 は、ひび割れがサブセットの中心、中心から右に 10, 20 ピクセル、左に 10, 20 ピクセルの位置に発生していることを意味する。図より、ひび割れがサブセットの中心に発生する場合に相互相関係数が小さくなっていることがわかる。また、R10 よりも R20, L10 よりも L20 の相互相関係数が大きくなっていることも確認できる。本手法では、サブセット内にひび割れが発生した場合、変形前後のサブセットがひび割れを挟んで面積の大きい方に重なるように座標が探索される。これにより、ひび割れの位置が中心から外れているほど相互相関係数が大きくなったものと考えられる。

5. まとめ

コンクリート構造部材の耐荷性能試験において、ひび割れを検出・計測する方法として、変形前後のデジタル画像を用いて、その相互相関係数の変化を用いる手法を提案し、その適用性について小型 RC はりの曲げ試験を実施し検討を行った。その結果、本手法はひび割れの検出に应用可能であること、本実験の撮影条件においては解析に適切なサブセットサイズは 51×51 ピクセルであること、ひび割れ幅が大きくなるに従い相互相関係数が低下すること、ひび割れ幅と相互相関係数の関係に影響を及ぼす要因として、サブセット内における画像の回転やひび割れ発生位置などがあることを明らかにした。

参考文献

- 1) 佐川康貴, 尾上幸造, 内野正和, 松下博通: 一軸圧縮力を受けるモルタル供試体のひずみ計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討, 実験力学, Vol.7, No.2, pp.20-26, 2007.6
- 2) 浜岡広, 松田浩, 山下務, 中島朋史: 光学的全視野計測法による RC はりのひび割れ発生・進展の可視化, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.781-786, 2006.7