構造物モニタリングのための画像計測法の研究

廣田 彰久¹・西山 哲²・菊地 輝行³

¹学生会員 博士前期課程 岡山大学大学院環境生命科学研究科 (〒700-0087 岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail:pxhy5vnf@s.okayama-u.ac.jp

²正会員 岡山大学教授 岡山大学大学院環境生命科学研究科 (〒700-0087 岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail:nishiyama.satoshi@okayama-u.ac.jp

³非会員 (株)開発設計コンサルタント 地質部 (〒101-0021 東京都千代田区外神田 2-16-2)

E-mail:kikuchi-t@jpde.co.jp

本研究は、コンクリート構造物に発生したひびわれの幅をモニタリングする技術として画像計測を適用したものである。まず、反射ターゲットを計測機器として計測点に設置する。そして、任意の位置から 1 枚の画像に反射ターゲットとひびわれを写し、ひびわれ幅の変位を計算する。本研究では、撮影距離、撮影角度と計測精度の関係性について実験から検証を行った。その結果、撮影距離 100m まで、撮影角度 30° 以内でひびわれの 0.1mm の幅の変化を計測できることを確認した。さらに実際の現場に適用しひびわれの計測を行うことによって構造物の劣化進行状況を把握し、モニタリング技術への実用性を示した。

Key Words: digital photogrammetry, image processing, crack width, maintenance

1. 序論

高度経済成長期の短期間に社会資本が整備され、数多くの土木構造物が建設されたが、近年これらの多くは建設後 50 年以上経過し老朽化している。このような土木構造物は、今後 20 年間でさらに増加すると予想されている。また、我が国では人口減少が問題となっており、社会資本維持に関わる財源の確保が今後困難となってくる地域が生じることが懸念される¹⁾。その上、熟練技術者も減少しつつあるということが現在の状況である。このような状況において、適切な点検、維持管理を行っていくことは、ますます重要な課題となっている。

コンクリート構造物において、維持管理に関わる計測項目は多岐にわたるが、我々が最初に得られる劣化の情報はひびわれである。維持管理上、ひびわれ状況を把握し、構造物の健全性を評価し、以後の補修、補強の計画を立てることがきわめて重要である²⁾。またひびわれの計測項目には、長さや本数、幅など多くの項目がある。その中でひびわれの“幅”の計測は、高精度での定量化が求められ、その手法としては、クラックスケールやノギス等を用いて直接計測を行う場合や、クラックゲージ等を計測個所に設置する³⁾ことで計測を行う場合などがある。これらの手法を用いて随時計測することで、ひびわれ幅の変位を調査している。しかし、これらの計測手

法は計測精度が技術者の経験的な判断に依存してしまうため、定性的かつ非効率である⁴⁾ことや、計測に多大な労力やコストを要することなど課題は多い⁵⁾。一方で、進行性の有無やひびわれ幅の変位量に応じてひびわれ対策工法の選定がなされている⁶⁾ことから、維持管理におけるひびわれの幅の変位量を把握することが重要である。

このような背景から本研究では、コンクリート構造物の維持管理において重要となるひびわれの進行性に着目し、写真撮影という簡易作業により、ひびわれ幅の経時変化を計測する手法の開発を、構造物のひびわれモニタリングに適用するために行ってきた⁷⁾。本計測手法は単写真測量の一種であり、任意の撮影位置より撮影した 1 枚のデジタル画像を用いて計測を行う。本手法の特徴としては、以下のようなことが挙げられる。

1)写真撮影という簡便な方法で計測が可能であることから技術の導入が容易にできる点

2)計測機器は基本的にデジタルカメラとパソコンであることから、低コストで計測を実施できる点⁸⁾

本計測手法は、画像上のひびわれ変位を計測するものである。そのため、反射ターゲットをひびわれ両側に基準尺として 2 枚設置する。そして任意の撮影位置からターゲットを写しこむようにして 1 枚撮影し、得られた画像上のターゲットの 2 次元重心座標を求めることでひびわれの 2 方向（開口方向とせん断方向）の変位量を計測

図-1 計測点に設置した反射ターゲット

図-2 明度分布の一例

する。本研究では、実際のコンクリート構造物のひびわれの変位量を計測する手法として適用するために、計測精度に影響を与えと考えられるパラメータに関して検証を行った。具体的には、撮影距離および撮影角度が大きくなることにより画像上のターゲットが小さくなることから、ターゲットサイズやレンズの焦点距離を変更し、計測精度の低下について検証を行った。なお、開口方向(x方向)はひびわれの幅に関わる方向、せん断方向(y方向)はひびわれのずれに関わる方向で定義する。

2. ひびわれ計測における理論

本章では、本計測手法の手順および計測における基本理論について記述する。本計測手法では、反射ターゲットを2枚一組で計測対象点に設置する。設置の際は、接着剤等の利用、あるいは漏水対策のためにアンカー等で浮かせる方法を用いる。ターゲット設置の向きは計測対象とするひびわれに対して直交するように設置する。この反射ターゲットはガラス製で、トンネル等の暗い状況下においても計測を可能とするために、カメラのフラッシュ光に対して強く再帰反射するように作製されている。さらに、汚れの付着を防ぐため、ターゲット表面に加工処理を施している。ターゲット上の4点の白円は正確な

図-3 射影変換の概念

間隔で配置されており、基準尺としての役割の他、後述する射影変換の既知座標としても用いられる。ひびわれの変位量を計測し、その進行性について評価する。

(1) 計測手順

本計測手法の手順を以下に示す。

- 1) 図-1 に示すような反射ターゲットを計測対象となるひびわれの両側に設置し、任意の撮影位置から反射ターゲットを写しこむようにして撮影する。はじめに、一方のターゲット上の4点の円の重心の2次元座標を算出する。
- 2) 射影変換技術を用いて、任意の撮影位置から撮影した画像を正対した位置から撮影した画像に変換する。
- 3) 変換後の画像を用いて、ひびわれ両側のターゲットの円の2次元重心座標を算出する。
- 4) 算出された2点の円の2次元重心座標を計算し、前回計測時の距離からの差分をとることにより、ひびわれ開口方向と、せん断方向の変位量を評価する。

(2) 基本理論

デジタル画像計測において高精度で計測を実施するには、唯一の観測値となるターゲット円の2次元重心座標の読み取り精度をいかに高めるかが重要である⁹⁾。ターゲット円の2次元重心座標は、図-2に示すような明度分布より計算を行う。明度は1画素あたり0~255までの256階調で数値化されており、本計測手法では、最低明度の閾値を定め、閾値以下の明度については0とし、閾値以上の明度をもつ画素については以下の式を適用して、明度を重みとした重心計算を実施する¹⁰⁾。

$$x = x_0 + a_x \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (q(i,j) \times x_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q(i,j)} \quad (1)$$

$$y = y_0 + a_y \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (q(i,j) \times y_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q(i,j)} \quad (2)$$

ここで、 (x_0, y_0) は重心計算範囲の原点、 (a_x, a_y) はそれぞれの画素サイズ、 $q(i,j)$ は画素 (i,j) の明度である。また x_{ij} ,

図-4 共線条件の概念

y_{ij} は画素(i,j)での x 座標および y 座標である。

その後、射影変換技術を用いて元画像を修正、正対化
する。射影変換とは、図-3に示すようにある平面L上
にある点(x,y)を他の平面上 L'上の点(x',y')に投影されるよう
な変換を表す。本計測では、「斜めから撮影された画像
を正対した画像に直す」技術を指す。射影変換は、写真
測量の基本原則である共線条件に基礎を置いており、空
間対象点、その画像上の点、およびカメラの原点、すな
わちレンズの中心は、図-4に示すような幾何学的な関
係を持っている。ここでは、像の反転をなくすため、画
像面は空間対象点側に描いている。対象空間座標系で表
現した計測対象点 $\mathbf{X}(X,Y,Z)$ から発生した光はレンズ中心
であるカメラ座標系の原点を通る。そして画像面上に像
pを作る。これら3点は一直線上に存在する。このとき
計測点Pにおける座標 $\mathbf{x}_p(x_p, y_p, z_p)$ および画像上の計測点p
における座標 $\mathbf{x}(x,y,-c)$ はその幾何学的関係から次のよう
な式で表せる。

$$\mathbf{x} = -\frac{c}{z_p} \mathbf{x}_p \quad (3)$$

ここで、 c はカメラレンズの焦点距離を表す。このよう
な関係は y 座標、 z 座標においても成り立つ。次に、カ
メラ座標系と対象空間座標系の関係性について述べる。
カメラ座標系での点 $\mathbf{x}_p$ と対象空間座標系での点 $\mathbf{X}$ は、
座標軸の回転を表す行列 $\mathbf{M}$ とレンズ中心を対象空間座標
系で表した座標 $\mathbf{X}_0$ を用いて次のような式で表すことが
できる。

$$\mathbf{M}\mathbf{x}_p = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0 \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ は回転行列であり、座標軸の回転は次のよう
に定める。X軸回りに α 、Y軸回りに β 、Z軸回りに γ だ
けそれぞれ右回りに回転させるものとする。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

この回転行列 $\mathbf{M}$ は直交行列であるから、次のように式変

図-5 実験装置の概要

形することができる。

$$\mathbf{x} = -\frac{c}{z_p} \mathbf{M}^t (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (6)$$

この回転行列の転置行列 $\mathbf{M}^t$ の成分を m_{ij} とすれば、成分
で書き下した式(7)および式(8)で表すことができる。

$$x = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (7)$$

$$y = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (8)$$

以上の式において、測定対象面が同一平面上にあると仮
定することにより、式(9)および式(10)のような2次元射
影変換式が得られる¹¹⁾。

$$X = \frac{h_1x + h_2y + h_3}{h_7x + h_8y + 1} \quad (9)$$

$$Y = \frac{h_4x + h_5y + h_6}{h_7x + h_8y + 1} \quad (10)$$

この射影変換式には8つの未知係数が存在し、それらに
対して4点の基準点の測定値の組(x_i, y_i)($i = 1 \sim 4$)と変
換後の座標(X_i, Y_i)($i = 1 \sim 4$)から連立方程式を立てて、
それを解くことにより求められる。本研究では、ターゲ
ットには4つの真円が正確な間隔で配置されている。

そして最後にひびわれの両側のターゲット円の2次元
重心座標より図-5に示す2円の重心間距離を計算し、そ
の距離の変化によりひびわれの開口・せん断方向の変位
量を評価する。

3. 本計測手法の精度検証

本計測手法の計測精度を室内実験により、明らかにし
た。本章では精度検証の室内実験の結果について記述す
る。

(1) 実験の概要

先述したとおり、本計測手法の計測精度は、ターゲッ

図-6 撮影距離と撮影角度の定義

図-7 撮影距離と外的精度

ト円の重心の読み取り精度に強く依存する。重心座標の読み取り精度は画像上の円の半径と相関があり¹²⁾、画像上の円の半径は撮影距離が大きくなるにつれて、小さくなる。また、撮影角度が大きくなると計測精度は低下する。よって本研究では、撮影距離、撮影角度と計測精度の関係性について実験より検証を実施した。

実験方法は次のとおりである。図-5に示すように2枚の反射ターゲットのうち、1枚を固定し、もう1枚をマイクロメーターを用いて初期値取りをした後、1.0mmまで0.2mm単位で強制変位させる。また、撮影距離、撮影角度は図-6に示すように定義した。撮影距離は10～100mまで10mごとに、撮影角度は正対位置（0°）から

表-1 250mm レンズにおける撮影角度別の計測精度

撮影距離(m)	撮影角度	0°	15°	30°	45°	60°
10m	外的精度(mm)	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
	内的精度(mm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
30m	外的精度(mm)	0.06	0.06	0.07	0.10	0.18
	内的精度(mm)	0.03	0.05	0.08	0.08	0.16
50m	外的精度(mm)	0.09	0.24	0.48	0.2	1.47
	内的精度(mm)	0.07	0.17	0.36	0.18	0.35

表-2 600mm レンズにおける撮影角度別の計測精度

撮影距離(m)	撮影角度	0°	15°	30°	45°	60°
10m	外的精度(mm)	0.02	0.01	0.01	0.01	0.06
	内的精度(mm)	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03
30m	外的精度(mm)	0.04	0.06	0.01	0.26	0.25
	内的精度(mm)	0.03	0.01	0.01	0.03	0.13
50m	外的精度(mm)	0.07	0.05	0.04	0.10	0.20
	内的精度(mm)	0.06	0.03	0.03	0.06	0.10
100m	外的精度(mm)	0.12	0.27	0.16	0.30	0.31
	内的精度(mm)	0.12	0.09	0.08	0.25	0.22

60°まで15°ごとに計測するように設定した。その他、1方向のみの変位量を計測するのではなく、2方向変位を計測可能かについて検討を行っている。詳細は(5)節にて記述する。また実験機器として、1800万画素デジタル一眼レフカメラ、焦点距離250mmおよび600mmのカメラレンズ、反射ターゲットは1辺55mmのものと1辺110mmのものの2種類を用意した。

本計測手法の計測精度の評価には、「外的精度」と「内的精度」を定義している。マイクロメーターにより与えた変位量を真値と見なすと解析変位量とマイクロメーター変位量の差を誤差と定義できる。外的精度は、この誤差の平均を示し、外的精度が小さいほど計測の「正確性」が高いことを表す。n通りのマイクロメーター変位が実施された場合、次の式(11)で表される。

$$(\text{外的精度}) = \sqrt{\frac{\sum(\text{計測値} - \text{真値})^2}{n}} \quad (11)$$

また内的精度は、この誤差のばらつき度合いを表し、内的精度が小さいほど、計測の「精密性」が高いことを示している。この2種類をもって計測精度とした。

(2) 撮影距離と計測精度の検証

撮影距離が大きくなると画像上のターゲット円が小さくなるため、計測精度は低下していく。そこで、本節ではターゲットサイズ、カメラレンズの焦点距離を変更した実験を実施した。撮影距離は10～100mで、正対した位置から計測を実施した。図-7に本節での実験結果を示す。プロットは外的精度を、エラーバーは内的精度を表している。この結果から、撮影距離が大きくなると計測精度が低下しているが、ターゲットサイズ、カメラレンズの焦点距離を大きくすることで計測精度の低下を抑えていることがわかる。また、撮影距離が50mまでであれば、計測精度を誤差0.2mm以内に抑えている。精度

図-8 直径ピクセル数と外的精度

図-9 直径ピクセル数と内的精度

低下要因については、(4) 節にて記述する。

(3) 撮影角度と計測精度の検証

次に、撮影角度と計測精度の関係について検証を実施した。撮影距離は10~100m、撮影角度を0°~60°まで与え、ターゲットサイズは1辺が110mmのものを、カメラレンズの焦点距離は250mmと600mmの2種類を用意し、実験を行った。表-1 および表-2 にその実験結果を示す。撮影距離および撮影角度が大きくなると計測精度は低下していくが、焦点距離600mmのカメラレンズを使用した方が、精度の低下は小さい。また撮影距離が10mにおいては、撮影角度が60°においても精度の低下に大きな変化は見られず、誤差0.1mm以下の高精度での計測が可能であることを示した。

表-3 600mm レンズでの射影変換なしでの計測精度

撮影距離(m)	撮影角度	0°	15°	30°	45°	60°
10m	外的精度(mm)	0.01	0.01	0.05	0.08	0.20
	内的精度(mm)	0.01	0.01	0.03	0.05	0.11
30m	外的精度(mm)	0.03	0.01	0.01	0.21	0.28
	内的精度(mm)	0.01	0.01	0.01	0.07	0.11
50m	外的精度(mm)	0.05	0.01	0.04	0.07	0.22
	内的精度(mm)	0.03	0.01	0.03	0.03	0.11
100m	外的精度(mm)	0.08	0.09	0.06	0.09	0.17
	内的精度(mm)	0.04	0.04	0.04	0.05	0.07

図-10 同じ撮影距離(50m)での焦点距離の違いによる解像度の違い

(4) 計測精度の低下要因

以上の実験結果を踏まえ、本節では計測精度の低下要因について検討を行った。計測精度の低下要因として考えられる指標として、直径ピクセル数がある。直径ピクセル数とは、画像上のターゲット円のスケールのことを指す。図-8 および図-9 に直径ピクセル数と計測精度の関係を表したグラフを示す。直径ピクセル数が約50ピクセルを下回ると急激に誤差が増大している。この原因として2つ考えられる。1つ目はピクセル数の減少に伴う重心座標の読み取り誤差が大きくなることである。図-10 に同じ撮影距離で焦点距離を変更した際の画像の解像度の違いを示す。撮影距離が大きくなると、ターゲット円が小さくなるためにその解像度が低下し、円の形状を保つことができず、ターゲット円の重心座標の読取誤差が大きくなり、計測誤差が大きくなったと考えられる。そのため、ターゲットサイズおよびカメラレンズの焦点距離を大きくすることにより、解像度の低下を抑え、計測精度の低下を抑えられている。その他、画像の解像度低下を抑える方法として、カメラの解像度を上げることによっても画像上のターゲット円の解像度の低下を抑えることができることから、計測精度が向上すると考えられる。2つ目は、射影変換を行うことによりターゲット円の重心座標の読み取り誤差が伝播され、計測誤差がさらに拡大することである。重心座標の読み取り誤差が大きくなると、誤差伝播によりさらに誤差が拡大されるために、計測精度が低下したと考えられる。そのため、解析処理において射影変換処理を行わない、すなわち画像の正対化を行わない計測を実施した。その結果を表-3 に示す。この結果から、撮影距離が100mにおいても撮

図-11 2方向変位実験装置

図-12 計測箇所の状況

表-4 2方向変位実験の実験結果

x方向		
撮影距離(m)	外的精度(mm)	内的精度(mm)
1m	0.00	0.00
3m	0.02	0.02
5m	0.06	0.03
y方向		
撮影距離(m)	外的精度(mm)	内的精度(mm)
1m	0.01	0.00
3m	0.03	0.00
5m	0.01	0.01

影角度が 30° 以内であれば計測精度が誤差 0.1mm 以下となった。しかし、表-2と比較すると、撮影距離が短く撮影角度が大きくなった場合には、射影変換処理を行う解析方法での計測結果のほうが計測精度が向上していることから、撮影距離によって計測手法を変更する必要がある。すなわち、撮影距離が短い場合には射影変換処理を実施した解析手法によって計測を行い、撮影距離が大きい場合は射影変換処理を行わない解析による計測を適用する。

(5) 2方向の変位計測実験

現場での実用性を高めるため、2方向の変位を同等の精度で計測可能かについて検証を行った。実際のコンクリート構造物に発生したひびわれは、開口方向と同時にせん断方向にも進行する可能性が考えられる。従来のひびわれの変位量計測は、2点間距離の計測により開口量とすることが多い。本手法はターゲット円の2次元重心座標を取得するという特徴から、ひびわれをx, y座標の2方向に分けて検出することが可能かについて検証を行った。

本実験では、図-11に示すようなx方向（開口方向）およびy方向（せん断方向）に変位を与えることができ

図-13 開口方向とせん断方向の向き

る装置を用いて、反射ターゲットの一方を固定し、マイクロメーターを用いてx, y方向にそれぞれ 0.2mm ずつ 1.0mm まで等しく変位を与え実験を行った。撮影距離は1m, 3m, 5mでターゲットに正対した位置から計測を行った。なお、(2)節および(3)節において100mまでターゲットの認識および計測が可能であることが確認されているため、本実験では近距離での計測で2方向の変位計測を検証した。レンズの焦点距離は 50mm のものを使用した。表-4に実験結果を示す。実験を行った撮影距離すべてにおいて外的精度、内的精度ともに誤差 0.1mm 以内の高精度での計測を行うことが可能であった。これらの結果より、本計測手法の2方向変位計測の実用性を示した。

4. 現場計測における本計測手法の検証

実際のコンクリート構造物の健全性を評価するために、ひびわれの変位量の計測を実構造物に対して実施し、本計測手法の有用性を検証した。本章では2例紹介する。

図-14 ひびわれの2方向変位計測結果

事例1は撮影距離が1mの近接計測、事例2は撮影距離50mの遠距離計測で解析手法については各節で記述する。ターゲットを設置する際には、コンクリート表面を洗浄した上で接着剤にて接着、固定した。

(1) 計測事例1 (近接計測)

対象とした構造物は、電力施設(電源開発(株))の管理施設であるダム貯水池の右岸側に位置するコンクリート製スロープである。図-12に計測個所の状況を示す。平成23年度の出水時にスロープの護岸が洗掘で沈下したことにより、ひびわれが発生した。また計測点は貯水池の水位が上昇すると水没してしまい、ゲージの設置が困難となったため、本手法を適用して計測を行った。ターゲット設置はひびわれに直交する方向をx方向、その直交方向をy方向とした。図-13に本構造物における開口方向およびせん断方向の向きを示す。開口方向(x方向)はターゲットが開く方向を正、せん断方向(y方向)はターゲットが上流側に動く方向を正としている。

計測は平成23年12月に初期値取りを行い、平成25年9月まで計31回の計測を実施した。撮影間隔は約1ヶ月毎である。撮影距離は1mであるため、射影変換処理を実施する解析手法により計測を行った。横軸に計測日、縦軸に2方向別の累積変位量をとったグラフを図-14に示す。このグラフからx方向、y方向ともに累積変位量が増加していることから、このひびわれは進行性のあるものであることがわかる。ひびわれ開口方向(x方向)の月間変位量は2.39mm、せん断方向(y方向)の月間変位量は0.77mmであり、開口方向に卓越したひびわれであることがわかる。このようにひびわれが進行した原因として、貯水池護岸の洗掘が考えられる。対象となった

図-15 計測個所の概要

図-16 現場計測におけるひびわれの変位量

貯水池は運用水深が5~6mと浅い。そのため運用時の流速により、護岸の洗掘により沈下が進み、ひびわれが進行したと考えられる。さらに、せん断方向成分が上流側に進行しているのは、護岸の洗掘が上流側から進行しているためであると考えられる。平成25年2月以降には開口方向の累積変位量にばらつきが認められるが、これは構造物の崩壊する可能性があると考えられたため、現地では立入禁止措置を講ずるなどの対策を実施した。この後、貯水池側のブロックは、平成25年9月に流出している。このように定量的な計測を実施することにより、崩壊発生リスク評価に寄与することができ、また2方向の変位解析を行うことで挙動のメカニズムも推定することができ、その実用性を示した。

(2) 計測事例2 (遠距離計測)

続いて計測対象とした構造物は、電力設備(電源開発(株))の管理施設である橋梁のコンクリート橋脚部分に発生したひびわれである。周辺は斜面崩壊や深層崩壊が多く発生する個所であり、それらによる土石流が橋梁

に対して影響を与えることが想定された。また計測対象点は直接ゲージを設置したり、直接スケールを当てることにより計測することが困難であることから、本計測手法により計測を実施し、データの取得を継続して行っている。計測対象となったターゲットは図-15に示すような川中の橋脚に設置されており、計測するひびわれは構造物に対して非貫通で密着しているが、延長数 m に及ぶものである。計測は約3年間で不定期に実施し、撮影距離は50mであるため、射影変換処理を行わない解析方法により行った。横軸に計測日、縦軸に本手法でのひびわれ累積変位量をとったグラフを計測地点における気温データとともに図-16に示す。これを見ると、初期値から収縮方向への変位が見られるが、初期値から拡大方向への変位は見られない。また温度変化との相関についても認められず、本計測対象点は安定した状態であると判断した。今後も不定期に計測を実施し、地震等の災害時に計測を行うことで、ひびわれの挙動を把握することとした。

5. まとめ

本研究は、デジタル画像を用いたひびわれの変位量を計測する手法を構造物のモニタリング技術として適用するため、室内実験から精度検証を行い、実際のコンクリート構造物に適用した。本計測手法の特徴は、反射ターゲットを計測対象点に設置し、任意の撮影位置から計測を行うという簡易な手法でありながら、高精度でひびわれの変位量を計測することを可能とするものである。以下に得られた結論を示す。

- 1) 撮影距離が大きくなるにしたがって計測精度は低下するが、ターゲットサイズ、カメラレンズの焦点距離を大きくすることにより、精度の低下を抑えることができる。
- 2) 計測精度の低下要因について検討を行ったところ、射影変換処理による誤差の伝播が考えられた。そして射影変換処理を行わないことにより計測精度の低下を抑え、高精度での計測結果を得た。
- 3) 撮影距離によって解析手法を変更することにより、高精度での計測が可能である。
- 4) ターゲットの2次元座標を算出するという本計測手法の特徴を活かし、ひびわれの開口方向とせん断方向の2方向の変位を検出することを可能とした。
- 5) 実際の構造物に適用した結果、2方向変位を計測することで、ひびわれ進行の方向を確認した。また遠距離計測においても、ひびわれ特性を十分に確認できる高精度での計測が可能である。

今回の実験結果から、誤差要因として射影変換処理における誤差伝播について検討を行ったが、これは変換処理時におけるキャリブレーションの問題など、さらなる検討が必要であると考えられる。今後は、1枚の画像より反射ターゲットを自動認識し、多点計測を可能にするプログラムの作成。また計測現場での長期的な計測を実施して本計測手法の有用性を確認していく。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、現場での計測や解析にご協力いただいた電源開発株式会社西日本支店の関係者各位および高精度化に関して多大なご指導・ご協力をいただいた電源開発株式会社秦野輝儀氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書 2016, p.38, 2016.
- 2) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 吉武勇, 中川浩二, 西村和夫：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準, 土木学会論文集, 第63巻, 1号, pp.86-96, 2007.
- 3) 金澤彬, 西山哲, 矢野隆夫, 菊地輝行：構造物の維持管理のためのひびわれ幅の画像計測手法の研究, 岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.332-336, 2012.
- 4) 木元亮輔, 藤田悠介, 河村圭, 浜本義彦：画像処理によるコンクリート構造物のひびわれ計測の実用化に関する基礎研究, 26th Fuzzy System Symposium Hiroshima 2010.
- 5) 菊地輝行, 秦野輝儀, 壺阪知広, 西山哲：デジタル画像を利用したひび割れ幅計測手法の研究, 第59回地盤工学シンポジウム, 平成26年度論文集, pp.45-50, 2014.
- 6) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013-, p.121, pp.126-142, 日本コンクリート工学会, 2013.
- 7) 菊地輝行, 秦野輝儀：画像計測法のクラック幅計測への適用, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, VI-502, 2014.
- 8) Fraser, C.S. : High Accuracy Ground Surface Displacement Monitoring, *Photogrammetric Record*, Vol.14, No.81, pp.505-521, 1993.
- 9) Franklin, J.A. and Dussault, M.B.: *Rock Engineering*, p.296, Mc Graw Hill, 1989.
- 10) 龍明治, 大西有三, 西山哲, 中井卓巳：デジタル画像計測による斜面モニタリングシステムの研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.109-119, 2007.
- 11) 村井俊治, 近津俊文監修, 日本写真測量学会, 動体計測研究会編：デジタル写真測量の理論と実践, pp.34-43, 日本測量協会, 2004.
- 12) Trinder, J.C., : Precision of Target Location, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.55, No.6, pp.883-886, 1989.

(2016.10.27 受付)

A STUDY ON DIGITAL PHOTOGRAMMETRY FOR MONITORING INFRASTRUCTURES

Akihisa HIROTA, Satoshi NISHIYAMA and Teruyuki KIKUCHI

This paper presents a study on monitoring method of crack width on concrete structures using digital photogrammetry. In this measurement procedure, the reflective targets are installed at measurement points around the crack as the gauges, and the deformation of crack width is calculated from one image taken from arbitrary camera positions. In this paper, we verify the relation between the accuracy/precision and the distance/angle of photographic positions from the targets in experiments, and the results showed that it was possible to measure the displacement of crack about 0.1mm at 100m and 30 degree photographic angle. Moreover, application of this method to measuring crack changes on actual concrete structures showed that it was possible to monitoring of the structures easily by using this method.