

構造物の維持管理のための ひび割れ幅の画像計測手法の研究

金澤 彬^{1*}・西山 哲¹・矢野 隆夫²・菊地 輝行³

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒160-0004 京都府京都市西京区京都大学桂)

²京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒160-0004 京都府京都市西京区京都大学桂)

³開発設計コンサルタント

*E-mail: kanazawa@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

コンクリート表面に発生したひび割れ幅の変位を画像計測により測定する手法を研究開発した。計測においては、コンクリート表面に基準尺として2枚の反射ターゲットを設置した。この反射ターゲットをひび割れと共に1枚の写真に写し込み、ターゲットの2次元座標を計算することにより、ひび割れ幅の変位を計測可能とした。室内試験により、1300万画素のデジタルカメラであれば、対象から約1mの位置から撮影した場合、20 μ m程度の2次元変位を検知できることを確認した。また、室内試験を踏まえ、本計測手法の具体的適用例として、実際のトンネル壁面でのひび割れ計測の結果も示す。

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

1. はじめに

我が国では、数多くの土木構造物が1960年代の高度経済成長期に建設され、現在建設後50年が経過し老朽化が進行している。また、地震や台風などの自然災害も頻発し、これら構造物の安全性を把握することが重要な課題となっている。トンネルや橋梁などのコンクリート構造物の日常点検の際、表面に発生したひび割れの幅、長さや本数といった情報は、構造物の安全性を評価する上で重要な項目の一つである¹⁾。しかし、ひび割れ幅の計測は現状としてノギス等を用いた直接目視、クラックゲージ等の設置で済まされる場合がほとんどであり、これらの手法の計測精度は点検者の経験に基づくため、客観的な評価が困難であり、スケッチ図等のアナログデータは、データの管理が困難であるなどの様々な問題点を抱えている²⁾。これらの背景を踏まえ、本研究では、デジタル画像を用いてひび割れ幅の変位を計測する手法を開発した。単写真測量の一種である本計測手法は、任意の撮影位置により得られた1枚のデジタル画像を用いて計測を行う。この手法の特徴として以下の利点が挙げられる。

- ・専門知識及び人的労力を必要としない写真撮影によって計測が可能であるため、技術の導入が容易である³⁾。
- ・基本的に計測に要する機器はデジタルカメラとパソコンのみであり、計測機器に要するコストを低く抑えられる³⁾。

- ・客観性・再現性に優れている⁴⁾。
- ・ひび割れの本数や長さといった情報もデータベース化可能である。

本計測手法は、画像上のひび割れ変位を計測するものである。そのため、ひび割れの両側に基準尺としてガラスビーズ製の反射材を用いたターゲット（以下反射ターゲット）を2枚貼り付ける。任意の撮影位置から、ターゲットを写し込むようひび割れを1枚撮影し、得られた画像上のターゲットの座標を計算することで、ひび割れの二方向の変位（開く方向とずれる方向）を計測する。

本論文は5章構成である。第2章では、本計測手法の基本原理について述べる。第3章では、室内試験結果を示す。室内試験では、撮影距離及び撮影角度と計測精度の関係を明らかにした。第4章で具体的適用例として、実際のトンネルでのひび割れ変位の計測結果を示す。

2. 計測手順及び単写真測量の基礎理論

本章では、計測手順及びデジタル画像計測手法の基礎理論を述べる。

(1) 計測手順

計測手順を以下に示す。

- ①図-1に示す反射ターゲットを基準尺としてひび割れの両側に設置する。ターゲットは、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

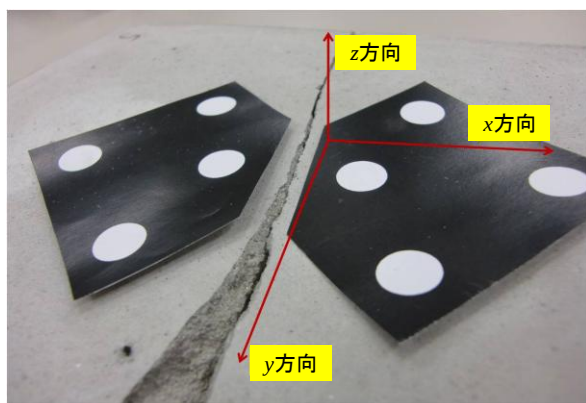


図-1 反射ターゲット

カメラフラッシュ光に対する乱反射を強めるためにガラスビーズを材料とし作成されている。ターゲットには、4点の円が既知の間隔で印刷されており、これは基準尺としての役割を果たす他、後述する射影変換にも用いられる。はじめに、一方のターゲット上の4点の円の重心の二次元座標を算出する。

- ②射影変換により任意の撮影位置から得られたデジタル画像を正対して撮影した画像に変換する。
- ③変換後の画像を用いて、両側のターゲット上の円の重心の二次元座標を算出する。
- ④算出された2つの円の重心間距離を用いて、ひび割れが開く方向とずれる方向の変位を評価する。

(2) 単写真測量の基本原則

本手法の計測精度は、ターゲット上の円の重心の二次元座標の読取精度に強く依存している⁵⁾。つまり、いかに正確に円の重心を検出するかが、本計測において重要となっている。そのため、ガラスビーズで作製されたターゲットを計測箇所を設置した。ガラスビーズによりカメラフラッシュの入射光は強く反射され、この反射光の強さの度合いを「明度」とよぶ。画像上の円の明度分布の一例を図-2に示す。

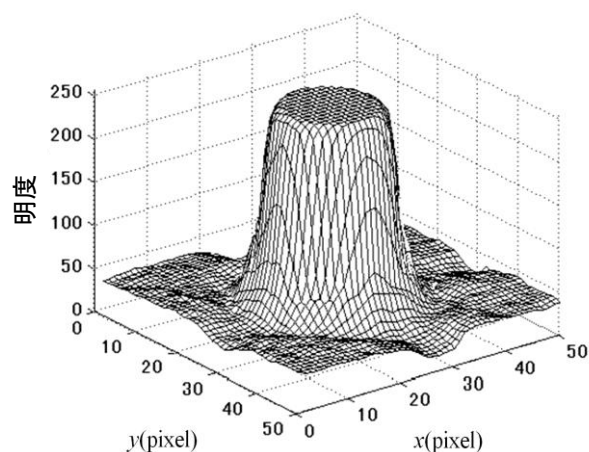


図-2 明度分布の一例

円の重心計算は、この明度分布を用いて二値化処理の後に算出される。明度は1画素当たり256段階で数値化されており、適当な閾値を定め、閾値以下の明度についてはゼロとし、閾値以上の明度をもつ画素について明度を重みとして以下の式(1)、及び式(2)により面積重心計算を行う。

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

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

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。

続いて、射影変換により元画像を修正、変換する。射影変換とは、図-3 に示すようにある平面 L 上の点 (x, y) が、投影中心 O に関して、他の平面 L' 上の点 (x', y') として投影されるような変換をいう。本計測手法においては、「斜めから撮影された画像を正面から撮影した画像に変換する」ことを指す。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おく。共線条件とは、図-4 に示すように、対象空間上の計測点とその画像上の点、及びカメラの原点（レンズの中心）は一直線上に存在するという原理である。共線条件から以下の射影変換式(3)及び式(4)が導出され、斜めから撮影された画像の画像座標 (x, y) が正対した位置から撮影した画像の画像座標 (x', y') に変換される。この2式には8個の未知係数が存在しており、4点以上の基準点の画像座標を用いて最小二乗法をあてはめることにより求められる。従って本研究では、ターゲットには4点の円

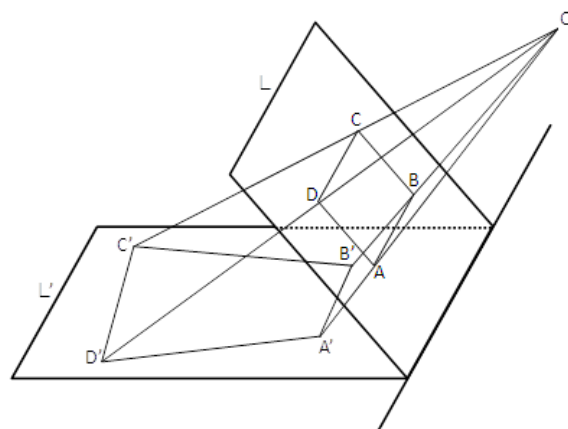


図-3 射影変換

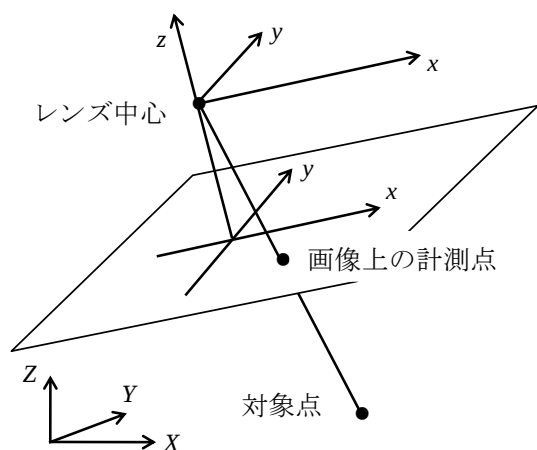


図-4 共線条件

$$x' = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1} \quad (3)$$

$$y' = \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \quad (4)$$

を基準点として印刷した。

最後に、ひび割れの両側のターゲットの円の重心間距離を計算し、その距離の変化により、ひび割れ幅の変位を評価する。

3. 室内試験結果

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結果を示す。

(1) 実験概要

先述の通り、本計測手法の計測精度は、ターゲット円の重心検出の読取精度に大きく依存する。読取精度は、画像上の円の半径と相関関係があり、画像上の円の半径は撮影距離が長くなるにつれて小さくなっていく。また、撮影角度が大きくなるにつれて読取精度が落ちていく。従って、本研究ではこれら撮影位置、具体的には撮影距離と撮影角度と計測精度の関係を検証した。

実験方法は以下の通りである。2枚の反射ターゲットのうち、1枚は完全に固定し、もう一方を0.1mm単位で強制変位させる。撮影距離 L 及び撮影角度 α は、図-5に示す通り定義した。本研究では、計測精度を評価するために2つの指標を用いた。1つ目は、強制変位量と測定変位量との差の平均値であり、外的精度と定義する。外的精度は、計測の「正確性」を表す。2つ目は、強制変位量と測定変位量の差の標準偏差であり、内的精度と定義する。内的精度は、計測の「精密性」を表す。

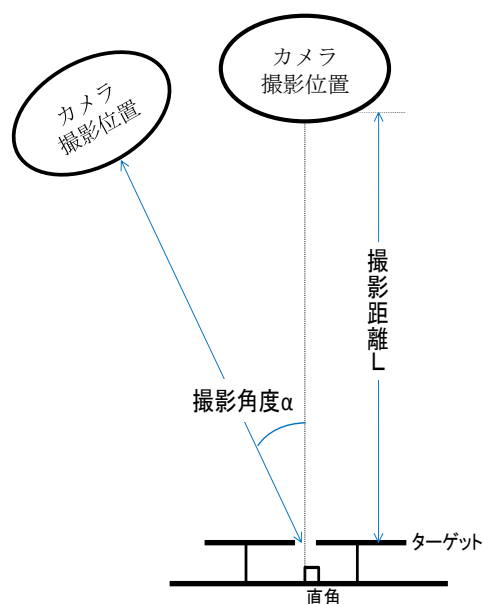


図-5 撮影距離と撮影角度の定義

(2) 撮影角度と精度の関係の検証

一般に単写真測量では、撮影角度 α が大きくなるにつれて計測精度が低下する。本研究で用いた射影変換は、任意の撮影角度から撮影された画像を正対した画像に変換する技術であり、この要素技術により撮影精度の低下を防ぐことを目的としている。本節では、この射影変換の有用性を検証するために、室内試験により得られた撮影角度と計測精度の関係を検証した実験結果を示す。

実験の概要であるが、撮影距離 L は、0.36mで一定とし、撮影角度 α を0度から60度まで変化させて変位検出実験を行った。ターゲット変位量を横軸に、計測変位量を縦軸に取り、撮影角度別にまとめたものが、図-6である。また、撮影角度と外的・内的精度の関係を表-1に示す。表-1より、撮影角度が20度までは、計測精度が一切低下していないことがわか

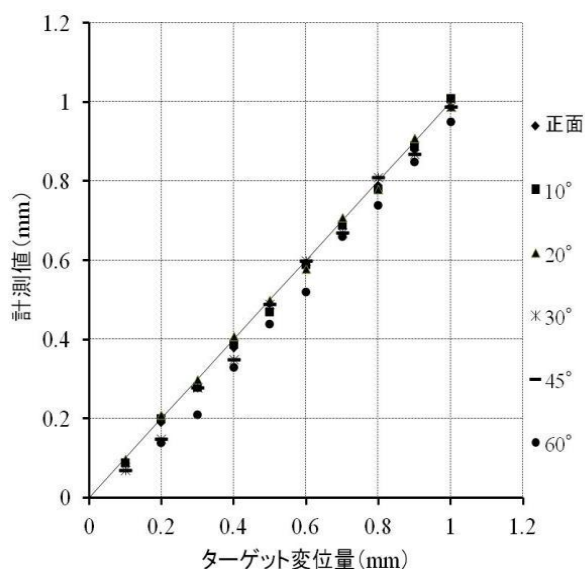


図-6 撮影角度別の計測結果

表-1 撮影角度と計測精度 (単位: mm)

撮影角度	0	10	20	30	45	60
外的精度	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.06
内的精度	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

る。また、射影変換技術により、撮影角度が60度の場合、正面から写真計測を行った場合を比較し、外的精度の低下を0.05mm、内的精度の低下を0.01mmに抑えている。この結果より、射影変換技術が任意の撮影位置から行われる計測の精度低下を防ぐことが確認することができたと考ええる。

(3) 撮影距離と精度の関係の検証

撮影距離 L の増加も計測精度の低下の一因となる。従って、本節では撮影距離と計測精度の関係を室内実験により検証し結果を示す。撮影角度は0度で一定とし、撮影距離を0.5m, 1.0m, 1.5mと変化した。表-2に撮影距離と計測精度の関係を示す。この結果より、計測精度は撮影距離に依存することがわかるが、撮影距離が0.5mであれば、計測精度は0.01mmと高精度で計測可能であることを示した。

(4) 二方向の変位と計測精度の関係の検証

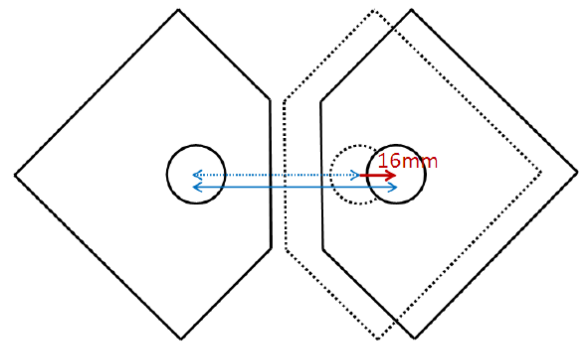
一般に、ノギスを用いた計測手法では、ひび割れが開く方向1方向の変位のみ捉えることが可能である。しかしながら、例えばターゲット距離間の変位計測の結果が16mmと検出された場合を考えると、図7-(a)は1方向にのみ変位してターゲット間距離が16mm開いた場合であるのに対し、図7-(b)は、ひび割れが開く方向とずれる方向にそれぞれ10mm開いた場合であり、ノギスを用いた従来の計測手法では、ターゲット間距離の16mmの変位を検出しても(a)、(b)どちらの動きによるものなのかが判断できない。本計測手法は、ターゲットの二次元座標を算出するという特徴を備えていることを考慮し、室内実験により、二方向の変位をそれぞれ同時に計測可能かどうかを検証した。撮影距離 L を0.5mで一定とし、撮影角度 α も0度で固定した。ターゲットはx方向(開口方向)とy方向(ずれ方向)それぞれ等しい変位量を同時に与えた。結果を表-3に示す。この結果より、x方向及びy方向それぞれ同等の精度で変位を測定することが可能であることが示された。

表-2 撮影距離と計測精度 (単位: mm)

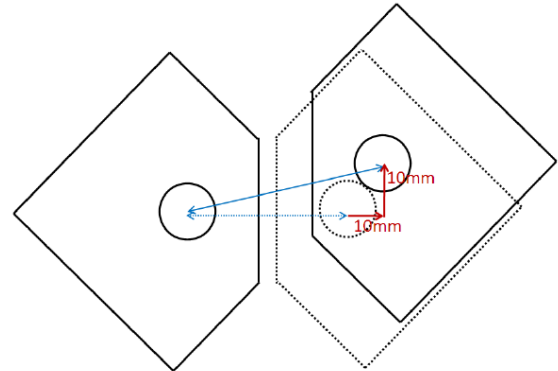
撮影距離	0.5m	1m	1.5m
外的精度	0.02	0.04	0.08
内的精度	0.01	0.02	0.04

表-3 変位方向別の計測精度 (単位: mm)

	x	y
外的精度	0.04	0.02
内的精度	0.03	0.02



(a) 1方向にのみ変位



(b) 2方向にのみ変位

図-7 変位パターンの相違の概念

4. 実際のトンネルでの計測例

本研究のトンネルへの具体的適用例を示す。対象とするトンネルは、20年前に長大斜面の地すべりを防ぐことを目的とし、施工された水抜き坑である。この長大斜面は、伸縮計などを用いた計測により年2~3mmの変位が確認されており、水抜き坑内にも数多くのひび割れが視認されている。このような現状にも関わらず、現在は半年に一度程度の目視による点検しか実施されていなかった。図-9は坑内入口のひび割れのスケッチ図であり、たくさんのひび割れが存在していることがわかる。以上の現状から、これらのひび割れから適当な30ヶ所を選びターゲットを設置し、2ヶ月ごとの写真計測を開始した。

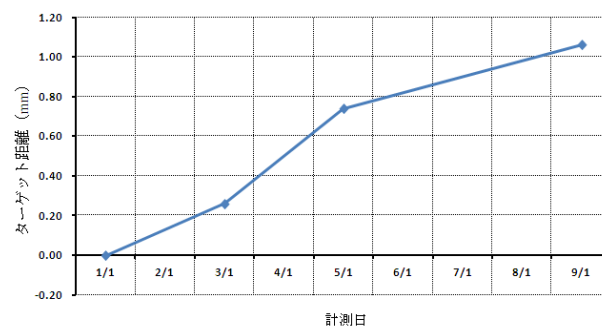


図-8 ひび割れ計測結果の一例

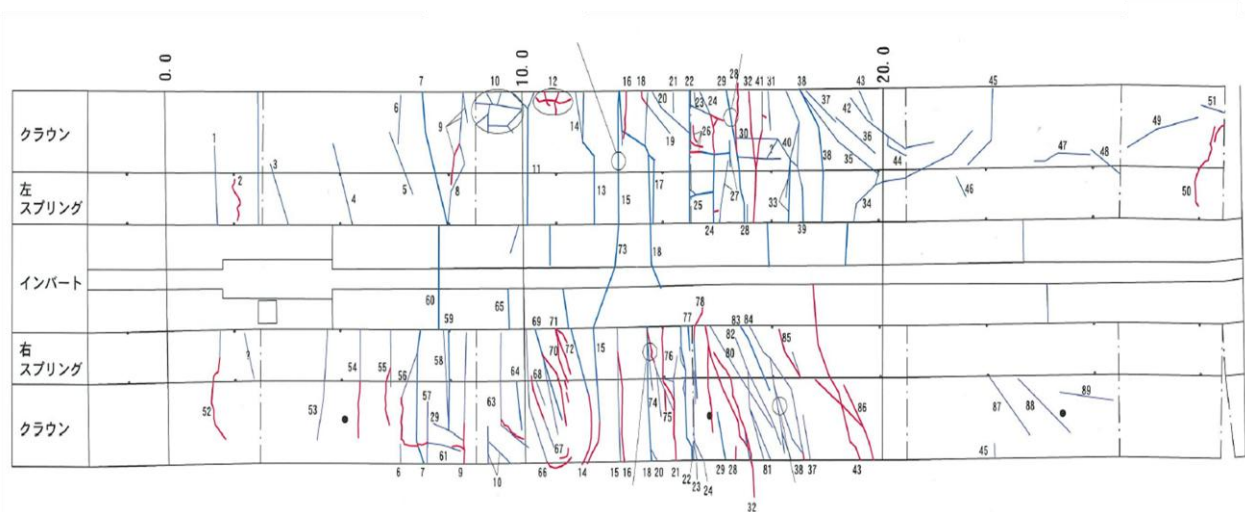


図-9 坑内入口のひび割れスケッチ図

図-8 に過去 4 回の計測結果の代表例を示す。このように、我々の計測手法を用いて、トンネルの健全性評価を定量的に評価することが可能であることが示された。

5. 結論

本研究は、デジタル画像を用いたひび割れ幅の変状のモニタリングのための計測技術の開発を目的とした。計測手法の特徴は、反射ターゲットをひび割れ箇所基準として設置し、任意の撮影位置から計測を行うことが可能である点である。以下、室内試験によって得られた結論を示す。

- 1) 撮影距離が 1m 以内であれば、1000 万画素クラスのデジタルカメラを用いて、0.02mm 程度の高精度でひび割れ幅の変位を検出することが可能である。
- 2) 画像処理技術の一つである射影変換を用いることで、ターゲットに正対した位置から 60 度角度がついた位置からの計測でも、計測精度の低下は 0.05mm 以下である。
- 3) 二方向（ひび割れが開く方向とずれる方向）の変位をそれぞれ同時に同精度で計測することが可能である。

参考文献

- 1) 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, Vol.63, No.1, pp.86-96, 2007
- 2) 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割れ計測の実用化に関する基礎研究, 26 th Fuzzy System Symposium Hiroshima, 2010
- 3) Fraser, C.S. :High Accuracy Ground Surface Displacement Monitoring. *Photogrammetric Record*, Vol.14, No.81, pp505-521, 1993
- 4) 龍明治, 大西有三, 西山哲: 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, pp109-119, 2008
- 5) Franklin, J.A. and Dusseault, M.B. : *Rock Engineering*, p.296, Mc Graw Hill, 1989.
- 6) Smith, W. : Cellular phone positioning and travel times estimates, *Proc. of 8th ITS World Congress*, CD-ROM, 2000.

MEASUREMENT OF THE CRACK DISPLACEMENT USING DIGITAL IMAGES FOR EVALUATION OF THE STABILITY OF INFRASTRUCTURES

Akira KANAZAWA, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO and Teruyuki KIKUCHI

The objective of the study is to develop a measurement technique for crack deformation monitoring by using a digital camera image. In the measurement technique proposed here, reflective targets are established at the measurement points around the crack as gauges and the digital camera image of the targets is subjected to a process that consists of image processing and photogrammetry, and the two dimensional displacement of the crack is calculated based on the coordinates of targets. Experiments were performed to verify the accuracy/precision of the measurement and the results showed that the changes of the tensile and shear displacement of the crack we could measure were found to be about 20 m by using the image taken 1m away from the crack. This paper also presents the actual tunnel measurement results to demonstrate that the cracks on the tunnel wall can be identified through simple measurements.