(42) 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 博士前期過程 岡山大学大学院環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1) E-mail:pxhy5vnf@s.okayama-u.ac.jp

> ²正会員 岡山大学大学院教授 岡山大学大学院環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)
> ³非会員 (株)開発設計コンサルタント地質部

本研究は、コンクリート構造物に発生したひび割れ幅のモニタリング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割れを写し、ひび割れ幅の変位を計算する.本研究では、撮影距離、撮影角度と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°以内でひび割れの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割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. そのため, これ らの構造物の維持管理が重要な課題となっている. 土木 構造物において、我々が最初に得られる劣化の情報はひ び割れである、維持管理上、ひび割れ状況を把握し、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り), その中においてひび割 れの"幅"は近接目視作業が必要となる。この作業は技 術者判断によるところが大きく、定性的かつ非効率であ る². 本研究では、ひび割れの進行性に着目し、写真撮 影という簡易作業により、反射ターゲットを用いたひび 割れ幅の経時変化を計測する手法を構造物のひび割れモ ニタリングに適用するためのものである、本研究は、撮 影距離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 離を変更し精度の低下について検証を行った.

2. ひび割れ幅計測の理論

本章では、計測手法の手順およびその基本理論につい て記述する.本計測手法では、反射ターゲットを用いて ひび割れ幅の変位量を計測し、その進行性について評価 する.

- (1) 計測手順
- 計測手順を以下に示す.
- 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割れの両側に設置する.反射ターゲットはガラス製で、カメラのフラッシュに対して、強い再帰反射するように作られている.またターゲット上の4点の白円は、正確な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2次元座標を算出する.
- 2) 射影変換技術を用いて,任意の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割れ両側のターゲットの 円の重心の2次元座標を算出する.



図-1 計測に用いる反射ターゲット



図-2 明度分布の一例

4) 算出された2点の円の重心間距離を計算し、ひび割 れの変位量を計測する.

(2) 基本理論

デジタル画像計測を高精度で計測するには、唯一の観 測地であるターゲット円の2次元重心座標 p(x, y)の 計測精度をいかに高めるかが重要である³. 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 計算を行い、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、閾値以上の明度を持 つ画素に対しては、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⁴.

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

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

ここで, (xa,yo)は重心計算範囲の原点, (ax,ay)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.

その後,射影変換技術を用いて元画像を修正,正対化 する.対象空間点と画面画像上の点,およびカメラの原 点,すなわちレンズの中心は,図-3に示すような幾何学 的関係を持つ.これを共線条件といい,次のような式で 表せる.

$$\mathbf{x} = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$
(3)

$$y = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$
(4)

式(3)および(4)を共線条件式といい、これらから以下の 射影変換式が導出される⁹.

$$x = \frac{h_1 X + h_2 Y + h_3}{h_7 X + h_8 Y + 1}$$
(5)

$$y = \frac{h_4 X + h_5 Y + h_6}{h_7 X + h_8 Y + 1} \tag{6}$$

これにより、斜めから撮影された画像を正対位置から撮影した画像に変換する.この式には8個の未知係数が存在しており、4点の基準点の測定値の組(X_i,Y_i) (i = 1-4)と変換後の写真座標(x_i)から連立方程式を立てて、それを解



図-4 射影変換の概念

くことにより求められる.したがって本研究では、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.

最後に、ひび割れの両側のターゲット円の重心間距離 を計算し、その距離の変化によりひび割れ幅の変化を評 価する.

3. 室内実験結果

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ト 円の重心の読取精度に強く依存する.読み取り精度は画 像上の円の半径と相関関係があり,画像上の円の半径は 撮影距離が大きくなるにつれ,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を検証した.

実験方法は次のとおりである.2枚の反射ターゲット のうち,1枚を固定し,もう一方をマイクロメーターを 用いて,0.2mm単位で変位させる.撮影距離および撮影 角度は図-5に示すように定義した.撮影距離は10m~



図-5 撮影距離と撮影角度の定義



図-6 撮影距離と計測精度

100m, 撮影角度は正対(0°~60°)実験機器として, 1800 万画素デジタル一眼レフカメラ,250mm,600mm のカメラレンズ,反射ターゲットは55mm 角と110mm 角のものを使用した.本研究の計測精度の評価には,

「系統誤差」と「偶然誤差」を定義した.系統誤差はマ イクロメーターにより与えたターゲット変位量と計測値 の差の平均値を示し,系統誤差が小さいほど計測の「正 確性」が高いことを表す.偶然誤差はターゲット変位量 と計測値の差の標準偏差を表し,偶然誤差が小さいほど 計測の「精密性」が高いことを表す.

(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、ターゲ ットサイズ、レンズの焦点距離を変更することで実験を 実施した.図-6に実験結果を示す.撮影距離が大きくな るにつれ、計測精度も低下していることがわかる.撮影 距離が 50m までであれば、ターゲットサイズ、レンズ の焦点距離を大きくすることにより、計測精度を 0.2mm 以下に抑えている.また、撮影距離 50m~80mにおいて も焦点距離を 600mm に大きくすることで、0.2mm 以下 の計測精度を得ている.

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	系統誤差(mm)	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
TOM	偶然誤差(mm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
20	系統誤差(mm)	0.06	0.06	0.07	0.10	0.18
30m	偶然誤差(mm)	0.03	0.05	0.08	0.08	0.16
F.0	系統誤差(mm)	0.09	0.24	0.48	0.2	1.47
JOM	偶然誤差(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	系統誤差(mm)	0.02	0.01	0.01	0.01	0.06
	偶然誤差(mm)	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03
30m	系統誤差(mm)	0.04	0.06	0.01	0.26	0.25
	偶然誤差(mm)	0.03	0.01	0.01	0.03	0.13
50	系統誤差(mm)	0.07	0.05	0.04	0.10	0.20
50m	偶然誤差(mm)	0.06	0.03	0.03	0.06	0.10
100	系統誤差(mm)	0.12	0.27	0.16	0.30	0.31
TOOM	偶然誤差(mm)	0.12	0.09	0.08	0.25	0.22



図-7 直径ピクセル数と系統誤差

(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 100m までで,撮影角度を 0°~60°まで与え,ターゲットサイズは 110mm 角,レンズの焦点距離は 250mm と 600mm とした. 表-1 および表-2 にその結果を示す.撮影距離,撮影角度が大きくなると計測精度は低下していくが,600mm レンズの方が精度の低下は小さい.

(4) 精度低下の要因

精度低下の要因として考えられるものに直径ピクセル 数がある. 図-7 に直径ピクセル数と誤差のグラフを示 す. 直径ピクセル数が 50pixel 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 はピクセル数減少に伴う重心座標の読取誤差の拡大であ る. 撮影距離が大きくなるにつれ,ターゲット円の解像 度が低下し,円の形状を保つことができず読取誤差が拡 大し,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,レンズの焦点距離を大きくすること により,計測精度の低下を抑えられている. 2 つ目は射 影変換を行うことにより計測値の誤差が伝播され拡大す ることである. 計測のばらつきが大きいために誤差が大

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

きく発生していると考えられる.そのため,射影変換を 行わずに計測を行うことによって表-3に示すように撮影 距離が 100m においても撮影角度が 30°以内であれば, 計測精度 0.1mm 以下での計測結果となった.

4. 現場計測における実用性の検証

実際のインフラ構造物の健全性を評価するためのひび 割れ幅の変化の計測を実構造物に対して実施し、本手法 の有用性について考察した.

計測対象とした現場は,新宮川水系の橋梁コンクリー ト基礎に発生しているひび割れである。 周辺は深層崩壊 や斜面崩壊が発生することが多く、土石流が橋梁に対し て影響を与えることを想定し、データの取得を行った. 計測対象のターゲットは、図-8に示すように川中の橋脚 に設置されている. 撮影距離は約 40m あり, 焦点距離 250mm のレンズを用いて川岸より計測を実施している. 対象としたひび割れは、構造物全体に対し非貫通で密着 しているが、延長数 m に及ぶものである. 図-9 に計測 結果を示す. 計測は約3年間不定期に実施した. 現在ま での累積変位量は-0.4mm, 最大変位量は-1.8mm である. 初期値からは収縮する傾向にあるが、ひび割れ幅が開口 する傾向は見られない. 計測対象地点における気温デー タも掲載しているが、温度変化による影響も認められな い. よって初期値は安定していると判断した. そのため, 今後も不定期に計測を実施し、地震等の災害時に計測す ることによりひび割れ挙動を監視することとなった.

5. まとめ

本研究は、デジタル画像を用いたひび割れ幅の変化量 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、精度検証実験を行い、実際のインフラ構造物 に適用した.本計測手法の特徴は、反射ターゲットをひ び割れ計測点に設置し、任意の撮影位置から計測を行う という簡便な手法ながら高精度でひび割れ幅の変位量を 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.





図-9 直径ピクセル数と系統誤差

- 撮影距離が 100m においても、ターゲットサイズ、 焦点距離を大きくすることにより、計測精度の低下 を抑えられる.
- 2) 実際の構造物に適用した結果、遠距離計測において も温度変化による収縮・膨張の影響を受けてひび割 れ幅が変化したものかを識別できる程度の高精度で の計測が可能である。

今後,長期的に計測を継続して本計測手法の有用性を確認していく.

参考文献

- 山田隆昭・佐野信夫・馬場弘二・吉武勇・中川浩二,西村和夫:トンネル覆エコンクリートの定量的な健全度評価基準,pp.86-96,土木学会論文集, 第 63 巻,1号,2007.
- 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,26th Fuzzy System Symposium Hiroshima 2010.
- Franklin, J.A. and Dusseault, M.B. : Rock Engineering, p.296, Mc Graw Hill, 1989.
- ・
 ・
 ・
 ・
 ・

 ・
 ・
 ・

 ・
 ・
 ・

 ・
 ・

 ・
 ・
 ・

 ・
 ・

 ・
 ・

 ・
 ・

 ・
 ・

 ・
 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・

 ・
- 5) 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:デジタル写真測量の理論と実践,2004.