

モアレを利用した変位計測システム

堀内 宏信

正会員 山形設計株式会社 技術部 (〒990-2481 山形市あかねヶ丘三丁目8番4号)

老朽化などによる劣化や変状が発生したコンクリート構造物の維持管理、あるいは岩盤斜面の安定性評価などの目的で、ひびわれなどの2点間の相対変位を長期間定点観測することが必要となる場合がある。このようなひびわれなどの微小変位を対象として、光学的な干渉により生じるモアレ縞を利用して離れた地点から画像撮影により計測を行う簡易な変位計測システムの開発を行った。本報告は、このシステムの概要と計測事例について紹介するもので、高所や障害物を跨いだ場所などにおけるひびわれや変位の定点観測に有益であると考えられる。

キーワード: 維持管理, 現場計測, ひび割れ

1. はじめに

高度成長期に建設した社会基盤の多くが急速に老朽化を迎えつつあり、これにはトンネル、橋梁、法面工などのコンクリート構造物が多く含まれている。老朽化による劣化や想定外の外力による変状などが生じた構造物の適切な維持管理のためには、ひびわれや変位などのモニタリングが重要となる。また岩盤斜面などでは、特定の岩塊あるいは斜面全体が不安定になる兆候として亀裂が進展したり、変位が生じることがある。このように建設分野においては、構造物や斜面の維持管理、あるいは安定性評価などの目的で、ひびわれなどの2点間の相対変位を長期間にわたり定点観測するケースは少なくない。

このようなひびわれなどの微小変位を対象として、モアレ縞を利用することにより、離れた地点から画像撮影することで現場計測を行う簡易な変位計測システムを開発したので、その概要と計測事例などについて本稿にて報告する。

2. 現状と課題

(1) ひびわれ計測の現状

従来、簡易な計測の場合には、計測地点にチョークで目印をつけておいてその都度クラックスケールやクラックゲージなどで手作業により計測を行い、高い精度が必要となる場合には、ひずみゲージや伸縮計などの機器を設置して計測を行うことが一般的

であった。しかし前者の方法では、計測精度やばらつきが測定者に強く依存するため計測毎に異なる結果を示すことがあり、またごく近傍まで寄らないと計測できないため現場状況によっては作業に危険を伴う、作業効率が低いなどの問題がある。一方後者の方法では、計測精度は高いものの一般に機材が高価で複雑であるため多地点の計測には向かず、また測定レンジが狭いためひびわれが大きく進展すると計測不能となるなどの問題がある。

(2) 画像計測の精度と課題

昨今、デジタルカメラなどで撮影した画像を基にひびわれ幅を計測するシステムが数多く提案されている。このようなシステムでは、画素数を数えることで距離を計測することを基本原理としているものが多く、撮影画像の画角と画素数から求まる1画素あたりの実距離(解像度)が最小分解能となる。

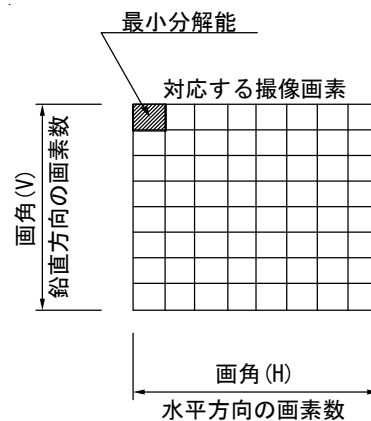


図-1 画角と解像度の関係

このため、一般に市販されているデジタルカメラの画素数では数10cmの距離から撮影しても解像度は0.05~0.1mm/pixel程度が限界となる。例えば1200万画素(B×H=4000×3000pixel)のデジタルカメラと焦点距離f=50mm(35mm版換算)のレンズを組み合わせる場合の距離と解像度の関係を表-1に示している。この表から、解像度0.05mm/pixelを満足するためには30cm以下の距離から撮影する必要がある、1mからの撮影では0.18mm/pixelまで低下してしまうことが伺える。

表-1 デジタルカメラの撮影距離と解像度の一例

画素数	水平	pix	4000				
	垂直	pix	3000				
焦点距離	mm		50				
撮影範囲	水平	rad	0.69				
	垂直	rad	0.53				
撮影距離	mm		100	300	500	1000	2000
画角	H	mm	72	216	360	720	1440
	V	mm	54	162	270	540	1080
解像度	mm/pix		0.018	0.054	0.090	0.180	0.360

コンクリート構造物のひびわれの経時変化を計測するためには0.1mmより高い精度が必要となることが多いので、測定者は計測地点のごく近傍まで寄る必要がある。このようなシステムで精度を2倍にするためには単純に2倍の解像度、同一画角で4倍の画素数が必要となるが、現在のデジタルカメラは既に高画素化が進んでいることから、今後精度を大きく向上させることは原理的に難しいと思われる。また1画素よりも小さなひびわれについては、明暗により存在を検知することは可能であるが、定量的な計測は技術的に難しい点が多い。

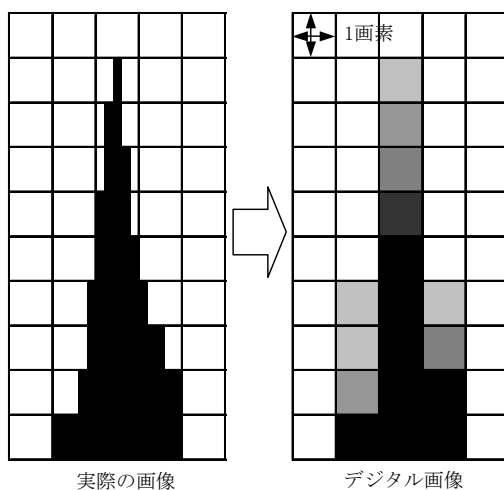


図-2 1画素より小さいひびわれのデジタル画像

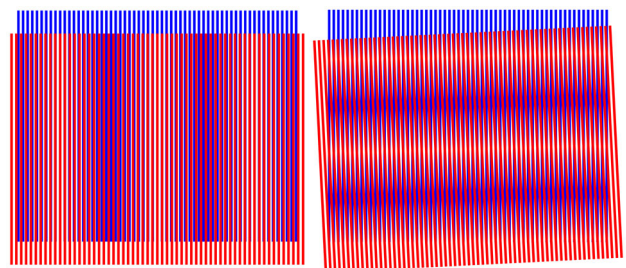
これは、デジタル画像における各画素の明るさは、その画素に対応する撮像素子に入力された光の量で決まるため、構造物表面のひびわれや欠陥など背景と大きく明るさに違いがある対象物を撮影した場合、対象物が1画素に満たない大きさであっても入力される光の量が周囲より相対的に少なくなるので、これが画素の明暗として記録されるためである¹⁾。この現象を利用すると1画素よりも小さなひびわれを計測することが原理的には可能となる。しかし実際には、コンクリートはセメントと細骨材、粗骨材の混合体であり表面の色調や明るさは一様でなく、壁面やひびわれの明るさは撮影条件などによりその都度変化し、また計測結果の検証が難しい、などの理由から定量的な計測への適用は今回は難しいと判断した。

以上のことから、離れた地点からの画像撮影により高精度な変位計測を実現するためには、何らかの方法で1画素よりも小さな変位を計測する技術の実現が課題となる。

3. システムの概要

(1) 基本原理

今回、このような課題を解決するために、モアレ(moiré)の特性に着目した。モアレ縞とは、周期性のある直線群や曲線群などのパターンを2枚重ね合わせた時に、パターン同士の光学的な干渉により発生する縞模様のことである。モアレ縞を生じるパターンには多くの種類があるが、間隔の異なる平行する二つの直線群からなる平行格子、および同じ間隔で互いに傾斜する二つの直線群からなる傾斜格子などが代表的である。これらのモアレ縞を利用すると、格子同士の微小な相対変位をモアレ縞の移動量として大きく拡大表示することができるので、機械の位置決めなど精密加工の分野で古くから利用されている。



a) 平行格子

b) 傾斜格子

図-3 直線群からなる代表的なモアレ縞

格子同士の相対変位に対するモアレ縞の移動量の拡大倍率は、格子間隔や傾斜角をパラメータとして任意に設定することが可能である。例えば平行格子による方法では、それぞれの格子の間隔を d_1 、 $d_2 (> d_1)$ とすると、変位の拡大倍率 X およびモアレ縞の周期 D は次式のとおりである。

$$X = d_1 / (d_2 - d_1) \quad (1a)$$

$$D = d_1 \cdot d_2 / (d_2 - d_1) \quad (1b)$$

また傾斜格子による方法では、格子の間隔を d 、二つの格子がなす傾きを θ とすると、変位の拡大倍率 X およびモアレ縞の周期 D は次式のとおりであり、 θ が小さい場合にはそれぞれの式の最終項に示している近似値で表すことができる。

$$X = 1 / \{2 \cdot \sin(\theta / 2)\} \approx 1 / \theta \quad (2a)$$

$$D = d / \{2 \cdot \sin(\theta / 2)\} \approx d / \theta \quad (2b)$$

(2) 仕様の策定

開発にあたり、基本的な開発方針や精度目標を以下のように設定した。

- 最も基本となる1方向ゲージを対象とする。
- 計測装置は計測地点への据え置き型とする。
- 現場計測は離れた地点からの画像撮影とする。
- 一般的な道路トンネルを想定して高所作業車などを用いずに計測できるよう、5~7mの距離から0.05mmの計測精度を目標とする。
- 現場作業の効率化と測定者への依存を避けるため、後処理としてPC上で変位を読み取る。

上記の方針に基づき、模型による実験を行い、計測装置の材質、大きさ、色、目盛り・格子のパターン、拡大倍率などの仕様について検討を行い、併せて試作品を製作して構造や加工方法についても確認を行った。その結果、以下の構造や仕様を採用した。

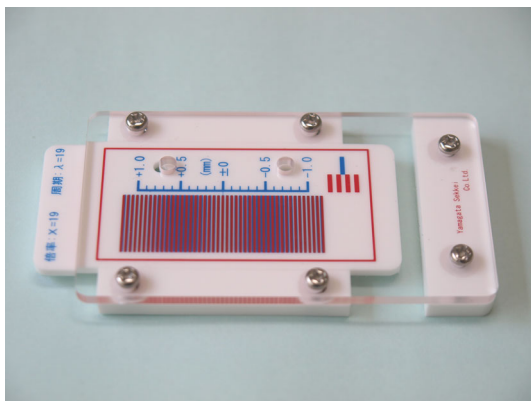


写真-1 計測装置

【モアレの諸元】

パターン	: 平行格子
格子間隔	: $d_1, d_2 = 0.95, 1.00\text{mm}$
変位の拡大倍率	: $X = 19$
モアレの周期	: $D = 19\text{mm}$
測定範囲	: $\pm 3\text{mm}$ または $-1\text{mm} \sim +5\text{mm}$

【本体構造】

材質・色	: アクリル(透明/白色)
目盛り・格子	: シルクスクリーン印刷

(3) 計測の手順

本システムは、**図-4**に示すように計測地点に設置する計測装置、これを離れた地点から撮影するデジタルカメラなどの撮影装置、撮影した画像データを補正し、補正したデータからモアレ縞の移動量を読み取り変位を算出するPCとソフトウェアからなる処理装置の3つより構成されている。

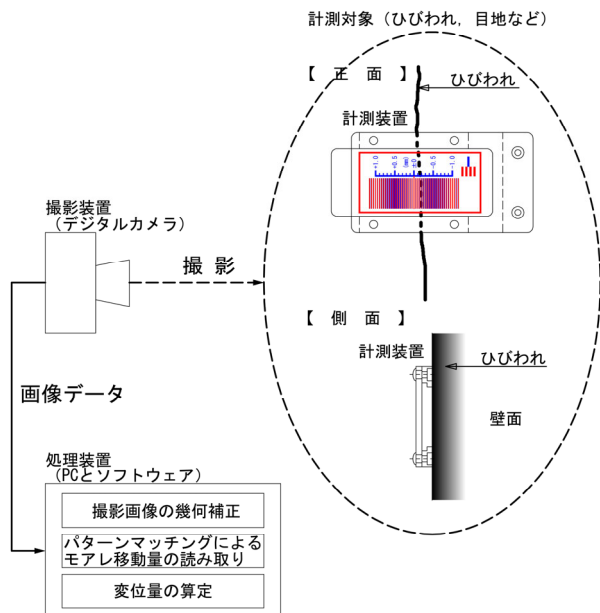


図-4 システムの概要図

計測装置は**写真-1**に示すように基本的には2枚の板状の部品からなり、ひびわれなどの計測対象を挟むように貼付けて設置する。それぞれの板には間隔の異なる直線群からなる平行格子が印刷してあり、格子同士が光学的に干渉することで明暗パターンからなるモアレ縞を生じる現象を利用して、ひびわれの変位を格子同士の相対変位を介してモアレ縞の移動量として拡大表示させている。計測装置を離れた地点から撮影装置により撮影することで計測を行うが、このように離れた地点からの撮影では計測装置に完全に正対することは難しいので、撮影角度の傾

きに起因して計測装置は一般に台形状に歪んだ画像として記録される．このままではモアレ縞の移動量を正確に読み取ることができないので，画像データを処理装置に取り込み本来の長方形に幾何補正を行い，併せて視認性を向上させるために明るさやコントラストなどの補正を行う．モアレ縞がなす明暗パターンの周期は既知なので，補正した画像データと理論パターンとをマッチングさせることでモアレ縞の移動量を読み取り，この移動量を拡大倍率で除することで最終的にひびわれの変位を求めている．

(4)理論パターンとのマッチング

今回作成した計測装置のモアレ縞の理論パターンを横方向に等分割して明るさの分布を求める．**図-5**ではモアレ1周期を10分割としている．

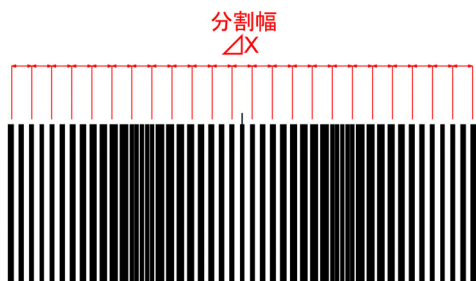


図-5 理論パターンの分割

ここで分割幅 ΔX において格子が占めていない背景の面積の割合を開口率 A_p と定義し，各分割幅ごとの開口率の分布を求めて**図-6**に示す．

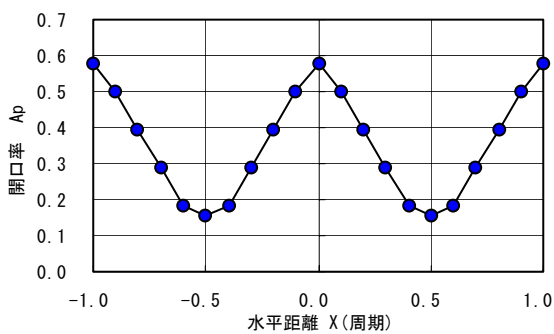


図-6 理論パターンの開口率の分布

一方，7mの距離から実際に計測装置を撮影した画像を基に，明るさの分布を求める．ここで撮影画像を**写真-2**に，幾何補正などの画像補正を行ったモアレ縞の中心部分($X \times Y = 60 \times 10 \text{ pixel}$)を切り出してグレースケール化した画像を**写真-3**に，この画像の画素ごとの明るさの分布を**図-7**に示す．

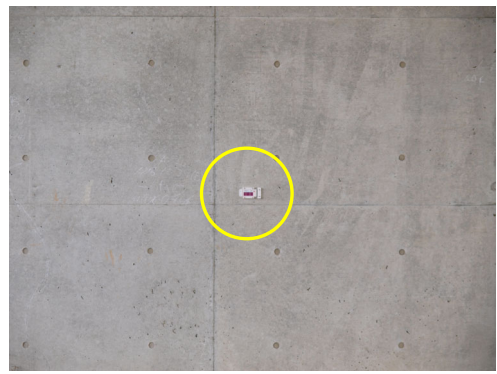


写真-2 L=7mより撮影した計測装置



写真-3 モアレ縞の中心部分($X \times Y = 60 \times 10 \text{ pixel}$)

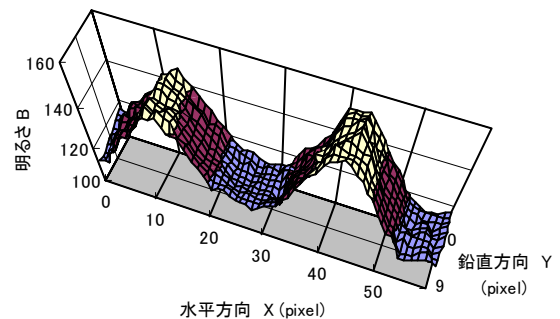


図-7 画素ごとの明るさの分布

図-7において，明暗のピーク付近で多少のばらつきが認められることから，鉛直方向の各列ごとに明るさを平均して整理したものを**図-8**に示す．

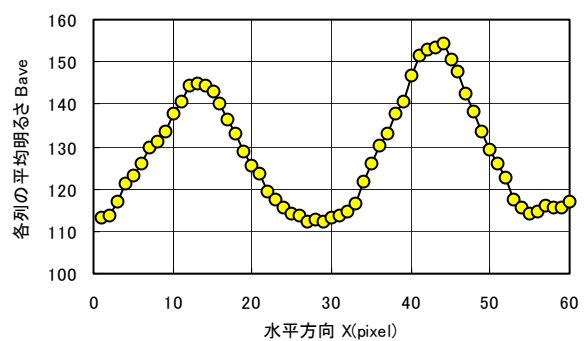


図-8 各列ごとの明るさの分布

両者の比較から，撮影画像の明るさの分布は開口率の分布と相似であり，明部のピークが鋭く中間部はほぼ直線的に変化していることを確認した．この特徴を利用して撮影画像と理論パターンとをマッチングさせることにより $\pm 1 \text{ pixel}$ 程度の精度でモアレ縞の移動量を読み取ることが可能となる．

(5) 計測精度

モアレ縞の明暗パターンを認識できる解像度であれば、格子を構成する個々の直線を識別できなくても計測可能である。これにより従来は困難であった1画素よりも小さい変位の計測を原理的に可能としている。モアレ縞の移動量の読み取り誤差を±1pixelとすると計測精度は計算上解像度の1/Xとなる。例えば表-1で示したデジタルカメラに焦点距離 $f=108\text{mm}$ (35mm版換算)の中望遠レンズを組み合わせた場合の撮影距離と解像度の関係は表-2となる。

表-2 中望遠レンズによる撮影距離と解像度

焦点距離	mm		108				
撮影範囲	水平	rad	0.33				
	垂直	rad	0.25				
撮影距離	mm	1000	3000	5000	7000	10000	
画角	H	mm	333	1000	1667	2333	3333
	V	mm	250	750	1250	1750	2500
解像度	mm/pixel	0.083	0.250	0.417	0.583	0.833	

この表より精度を解像度の1/Xと仮定すると、今回製作した計測装置の拡大倍率 $X=19$ から、距離10mからでも0.05mmの精度を満足する結果となる。しかし実際の精度は、計測装置の加工精度、照明状況、撮影装置の感度と解像度、レンズの解像力と収差、処理装置でのモアレ縞移動量の読み取り誤差など多くの要因の影響を受けて決定される。このため実際の精度はこれよりも低くなるが、計測実験などより一般的な条件下であれば解像度の1/10程度の精度は確保できると評価している。さらに高画素のカメラと焦点距離の長いレンズを用いることで、レンズの性能や空気の揺らぎなどによる限界はあるが、より遠方からの計測も可能である。

4. 計測事例

(1) 計測条件

実際のトンネルにおいて撮影距離を変化させて読み取り値の比較を行った計測実験の結果を示す。計測条件は以下のとおり。

- カメラ：デジタル一眼レフ
- 画素数：約1000万画素(3648×2736pixel)
- レンズ：108mm(35mm版換算)/F3.5
- 感度/露出：ISO200/+0.7EV
- 照明：トンネル照明のみ
- 撮影距離：L = 3m, 5m, 7m
- 画像解像度：0.27, 0.46, 0.64mm/pixel

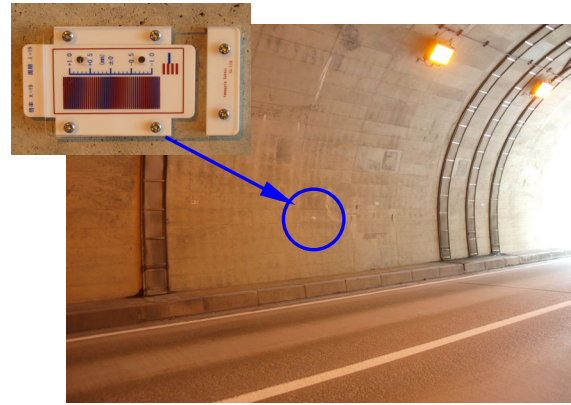


写真-4 計測装置設置状況

(2) 撮影画像

それぞれの距離から撮影した画像を以下に示す。



写真-5 撮影画像(L=3m, 0.27mm/pixel)

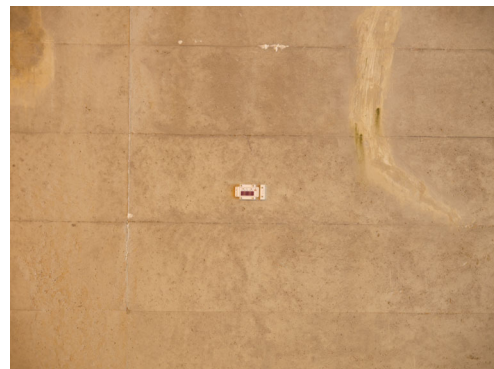


写真-6 撮影画像(L=5m, 0.46mm/pixel)



写真-7 撮影画像(L=7m, 0.64mm/pixel)

(3) 読み取り値の比較

各距離から撮影した画像を基に、幾何形状、明るさ、コントラストなどの補正を行い、理論パターンとのマッチングにより変位を読み取り比較した結果を図-9に示す。

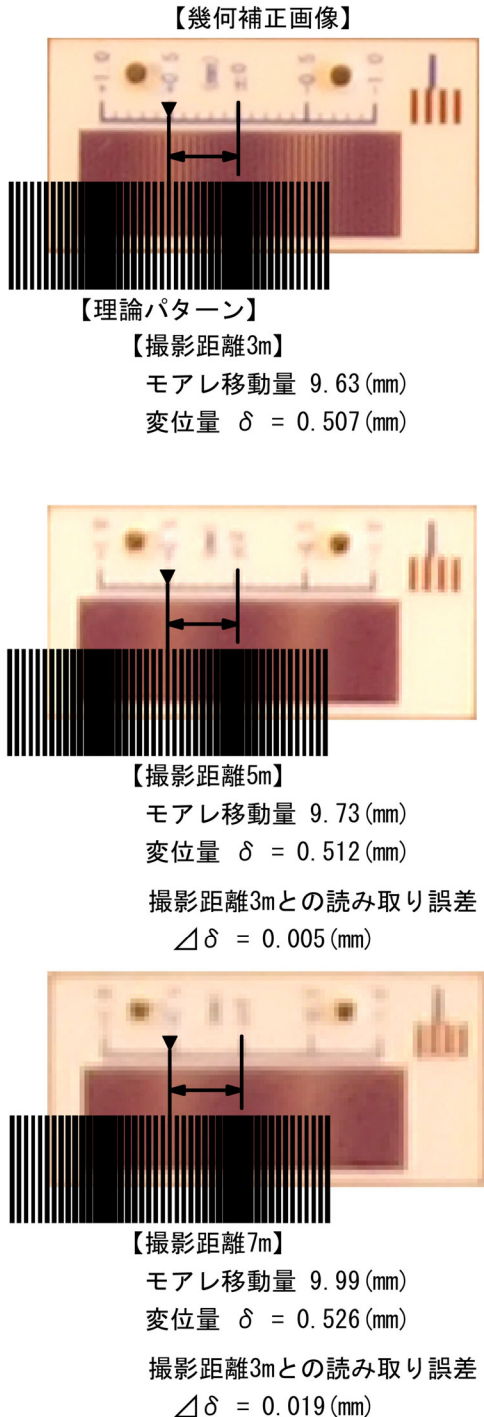


図-9 撮影距離による読み取り値の比較

撮影距離3mでは格子を構成する個々の直線を識別可能でありマッチングによる誤差は非常に少ないことから、この読み取り値を基準として比較した結果、読み取り誤差は $L=5m$ で $\Delta\delta=0.005mm$ 、 $L=7m$ でも $\Delta\delta=0.019mm$ にとどまり、十分な精度を確保していることを確認した。なお今回はトンネル内が比較的明るかったためトンネル照明のみとしたが、別途照明を併用するとモアレ縞の明暗の差が大きい画像を得ることができるので、補正や読み取りは容易となる。

5. おわりに

今回の開発によって、モアレ縞を利用した比較的簡単な構造の変位計測システムについて、基本技術を確認できたと考えている。本システムを利用することで、例えばトンネル、橋梁や法面工などのコンクリート構造物、または岩盤斜面などを対象として、ひびわれなどの微小変位を離れた地点からデジタルカメラによる撮影で計測することができるので、高所や障害物を跨いだ場所などにおいても効率的、簡便かつ安全な現場計測の実現に貢献できるものと期待している。

ただし計測装置の構造や、より視認性の良いパターンなどについては、今後も改良やノウハウの蓄積が必要である。特にトンネルなどで道路や軌道上となる位置に長期間の設置を想定した場合、落下などによるリスクを軽減するために計測装置の薄型化、軽量化は重要な課題である。今後は実際のフィールドに適用してシステムの改良と有用性の実証を行い、さらに2方向ゲージへの拡張についても検討を進めていきたいと考えている。

なお、今回の開発にあたっては社団法人東北建設協会より平成20年度建設事業に関する技術開発支援制度に選定いただき、多大なご支援を賜りました。この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 後藤和夫, 堀内宏信: デジタル画像を利用したひびわれ計測精度について, 平成16年度土木学会東北支部技術研究発表会, IV-7, 2005.