

## トンネル内空変位計測におけるデジタルカメラの適用に関する研究

畑 浩 二 丸山 誠  
鳥井原 誠

## Development of Tunnel Convergence Measurement by Digital Camera

Koji Hata Makoto Maruyama  
Makoto Toriihara

## Abstract

Tunnel convergence measurement has previously been carried out using steel tape and optical transit. The authors have carried out experiments to develop a new method using image processing and digital photography by CCD camera.

The following conclusions were obtained: (1) It is necessary to rectify distortion aberration since most photographs were distorted., (2) It was possible to measure to 0.004% of micro displacement by rectifying distortion aberration and performing suitable image processing., (3) It was verified that this new method was suitable for tunnel convergence measurement.

## 概 要

従来、トンネルの内空変位計測にはコンバージェンスメジャーや光波測距儀が利用されてきた。著者らは、デジタルカメラによる写真画像を利用した新しいトンネル内空変位計測方法を開発するため、歪曲収差確認、微小変位認識およびトンネル実規模モデル実験を実施した。この新しい変位計測方法は、従来の方法に比べて計測が簡便であるとともに、計測にかかる費用のコストダウンが可能である。

実験の結果、(1)写真画像には歪曲収差が生じるため、変位計測には歪曲収差の補正が必要であること、(2)歪曲収差を補正し、適切な画像処理を行えば画角に対して0.004%の微小変位評価が可能であること、(3)トンネル内空変位モデル実験と、大型の不連続体モデル実験から本方法の妥当性等が明らかになった。

## 1. はじめに

トンネルや地下発電所などの地下構造物では、掘削に伴い時々刻々と変化する切羽の状態および周辺地山の挙動と各支保部材の効果を把握し設計の妥当性を検討するとともに、工事の安全性および経済性を確保するため観察と計測を行う必要がある。観察は、切羽に現れる地山状況を目視により調査するもので、圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態ならびに湧水量などを対象にしている。一方、計測では内空変位、天端沈下、地中変位およびロックボルト軸力などが測られているが、内空変位と天端沈下は観察と同様に日常施工管理に必要な項目となっている。

従来、トンネルの内空変位計測にはスチールテープを利用した方法<sup>1)</sup>が一般的であった。しかし、計測時にはスチールテープに緊張力を作用させるため、測定用具は岩盤に固着していなければならず、測定用具が完全に固定されるまで内空変位計測はできなかった欠点があった。また、近年では光波測距儀を利用した方法<sup>2)</sup>が広く利用されつつあるが、スチールテープによる測定方法と同様、測定断面が多くなればるほど作業が煩雑になっているのが現況である。したがって、施工現場の環境状況(狭

空間、低照度、高粉塵、高湿度)を勘案すると、より取扱いが簡単で短時間のうちに計測が完了し、かつ掘削直後から計測できる方法の開発が急務である。

近年、デジタルカメラの高性能・低価格化が進んでいることから、取扱いが容易でかつ精度の高いトンネル内空変位計測法の確立を目的として、デジタルカメラと画像処理を用いたシステム構築(以下、画像変位計測法と略す)のための基礎的検討を実施したものである。本報告では、撮影画像のゆがみとその補正方法、画像における認識限界、低照度条件下でのターゲットの視認性および本計測方法の適用性について述べる。

2. 撮影画像のゆがみと補正<sup>3)</sup>

デジタルカメラであれ、通常の銀塩フィルム使用のカメラであれレンズを通して像を結ぶことに変わらない。理想的には1点から出た光はレンズによって1点に収束する前提があるが、現実はずかながら結像のずれが生じる。このずれのことを収差と称し、ザイデルの5収差(球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲および歪曲収差)<sup>4)</sup>が発生する。また、白色光に対しては色収差<sup>4)</sup>も生じることになる。現在市販されているレンズでは凹レ

レンズと凸レンズを組み合わせ、収差ができるだけ少なくなるような工夫をしているが、完全にこれらの収差を取り除くことは原理上不可能である。画像から対象物の形状や寸法を認識する場合、ザイデルの5収差と色収差の内、特に歪曲収差による影響を把握することが必要不可欠である。歪曲収差とは、像の大きさによる横倍率の違いによって方形の物体が方形に結像しない場合のずれのことである。一般的に被写体は、Fig.1に示す樽型もしくは糸巻型に変形するため、撮影画像から対象物の形状や寸法を測定することは容易ではない。

そこで、歪曲収差の確認実験を行った。実験概要をFig.2に示す。直径50mmの印5個と四隅に+印を印字したA3サイズのキャリブレーション板を、2車線道路トンネル断面を想定し建物壁面の高さ約5.5m、幅約13mの範囲に96枚配し、距離15mの離間で全景を1枚の写真で撮影した。キャリブレーション板中の印は画像解析におけるターゲットであり、+印はこのキャリブレーション板の3次元空間位置を決定する基準点である。キャリブレーション板中における印と+印の幾何学的位置関係は事前に明らかである。したがって、+印の3次元空間位置を光波測距儀により決定すると、直ちに印の3次元空間位置が明らかになる。なお、実験に使用したカメラシステムは、有効撮像素子が約600万（水平3,060ピクセル、垂直2,036ピクセル）のデジタルカメラと焦点距離28mmのレンズである。焦点距離28mmのレンズを使用した場合、撮影距離15mで高さ5.5m、幅13mの範囲(二車線道路トンネル断面)を1枚の画像として撮影することができる。

歪曲収差を表現する方法として、一般的には歪曲収差率が用いられる。レンズ光軸中心からの距離を像高と称する。ここで、ゆがみを受ける前の像高を $h$ 、ゆがみを受けた後の像高を $h'$ とすると、歪曲収差率は式(1)により定義される。Fig.1に示すように、この歪曲収差率が正(+ )の場合、画像は糸巻型に広がり、逆に負(- )の場合は樽型に縮むことになる。本実験では、印を計測ターゲットと考える。デジタルカメラによって得られる計測タ

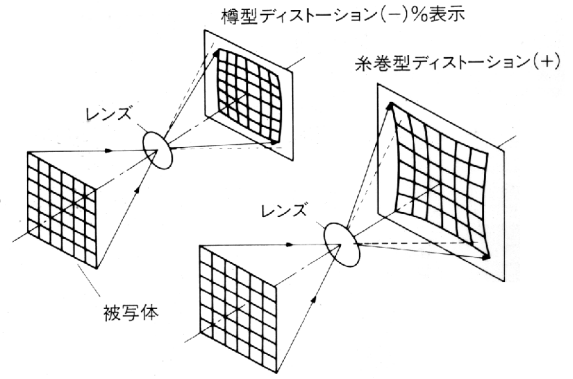


Fig.1 像面の歪曲  
Distortion of an Image

ーゲットの画像は、対象物の表面色や周辺照度の影響を受け、必ずしも全面が同一の輝度分布になることはない。特に、エッジ(計測ターゲット周辺部)部分はその影響が顕著に現れる。そこで、計測ターゲットの重心点に着目する方法が好都合である。重心点の算定に当たっては、輝度重み付けを考慮した式(2)を用いることにした。

$$\text{歪曲収差率 (\%)} = 100 \times \left( \frac{h' - h}{h} \right) \quad (1)$$

$$G = \frac{\sum_{j=0}^k I_j(x, y) \times P_j}{\sum_{j=0}^k I_j(x, y)} \quad (2)$$

ここで、 $G$  はターゲット重心の位置ベクトル、 $P_j$  は計算領域内における画素 $j$ の位置ベクトル、 $I_j(x, y)$  は面内位置 $(x, y)$ における画素 $j$ の輝度値、 $k$  は領域内画素数の総和である。

測定結果をFig.3に示す。図は、画像処理で求めたゆがみを受けた後の像高 $h'$ と歪曲収差率との関係を表わし

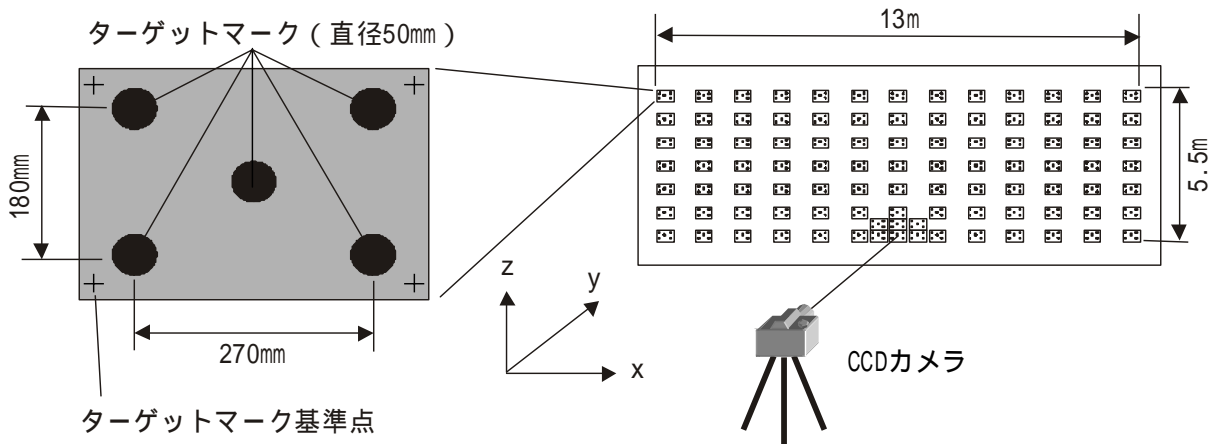


Fig.2 歪曲収差確認実験の概要  
The Outline of a Distortion Aberration Check Experiment

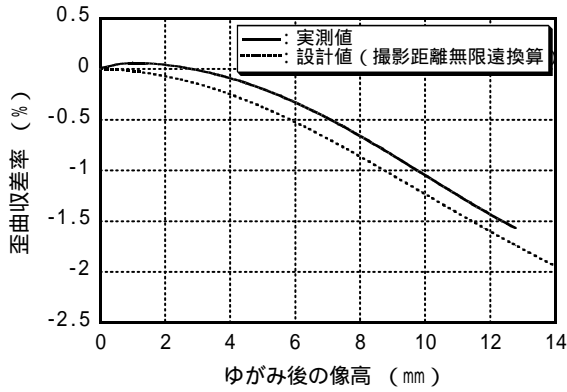


Fig.3 歪曲収差率

Rate of a Distortion Aberration

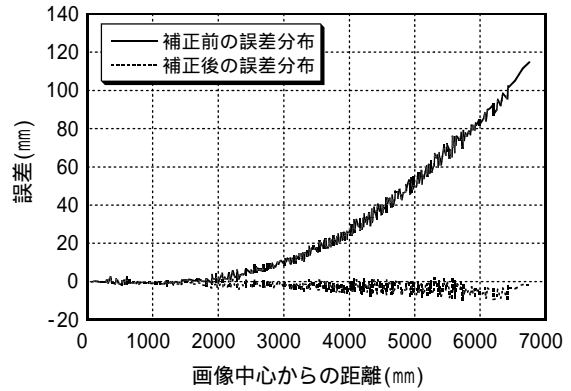


Fig.4 歪曲収差補正

Compensation of a Distortion Aberration

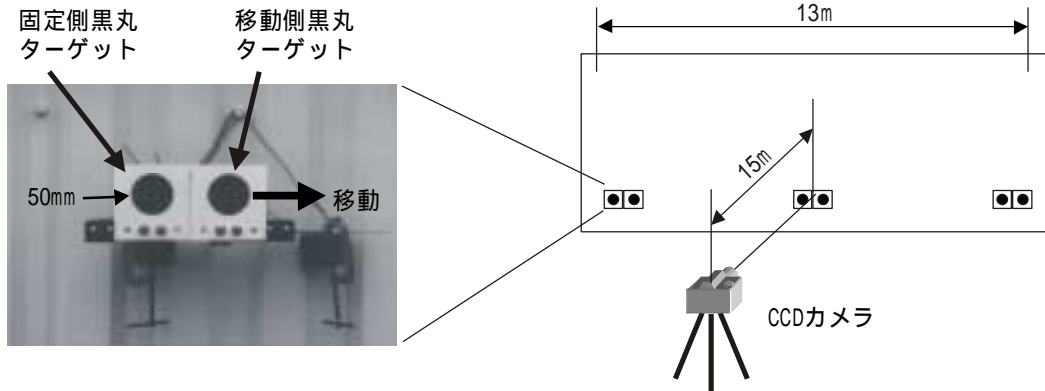


Fig.5 微小変位測定実験の概要

The Outline of a Micro Displacement Check Experiment

たものである。実線で、デジタルカメラとレンズ（焦点距離28mm）の組合せによる実測値を、点線でレンズの設計値（撮影距離無限遠に換算）を示した。すると、レンズ光軸中心から離れば離れるほど（像高が大きくなればなるほど）歪曲収差率は大きくなることがわかった。歪曲収差率の変化傾向は、設計値の変化傾向とほぼ同じであるが、ゆがみ後の像高が3mm程度までは歪曲収差率が正となり画像は糸巻き型に変形し、3mmを超えると歪曲収差率が負に転じ樽型に変形状況を変えることが明らかになった。設計値との差は約0.2%となった。一方、ターゲット図形の実測値と画像処理による測定値の差を誤差とし、画像中心からの関係で表わしたのがFig.4中の実線である。撮影対象が高さ約5.5m、幅約13mの場合、画像中心から1.5m程度までは真値との差異は小さいが、2mを越えると画像中心から離れば離れるほど、指数関数的に実測値との差異は大きくなることが判明した。今回の実験における最大画角（画像中心から6.5m）に至っては、真値との誤差が100mmにもなることが判明した。歪曲収差の補正方法<sup>5),6)</sup>は種々提案されているが、設計値と変化傾向が類似であることと取扱いが簡便であることを勘案し、式(3)の5次関数で与えた。

$$h = ah^5 + bh^4 + ch^3 + dh^2 + eh' \quad (3)$$

式中 $a, b, c, d, e$ は定数、 $h$ は真の像高、 $h'$ は画像処理で求めたゆがみを受けた後の像高さである。式(3)をもとに画像データを補正した結果をFig.4中点線で示す。最大画角（画像中心から6.5m）近傍になってくると若干ばらつきはあるものの、誤差はかなり取り除けたことがわかる。

### 3. 微小変位の認識限界<sup>7)</sup>

デジタルカメラは、銀塩フィルム使用のカメラと異なり電子の眼ともいべきCCD（電荷結合素子）によって光の強度から色情報を取得している。一般的には、CCDの総数が多いほど高解像の画像を取得することができる。また、画像処理技術の発展によりサブピクセルオーダーでの認識が可能になりつつある。しかし、同じ総画素数のデジタルカメラであっても、現実にはCCDの構成、感度、S/N比、画素間配線構造、さらにはカメラ内蔵の画像処理アルゴリズムによって解像度は大きく影響を受けることになる。そこで、本研究で目指すデジタルカメラと画像処理を組み合わせた変位計測システムにおいて、実質の認識限界を把握する目的で微小変位測定実験を実施した。

本実験では微小変位を正確に認識できることが必要に

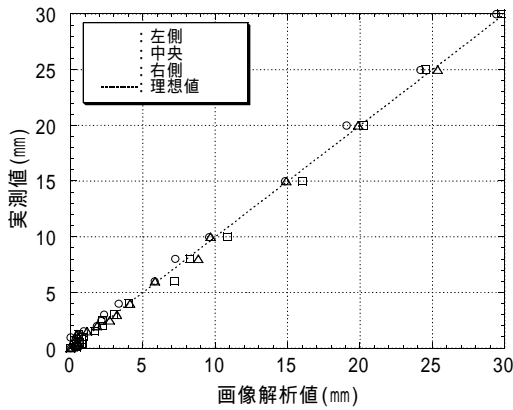


Fig.6 画像解析値と実測値の関係

Relation between a Picture Analysis Value and an Actual Measurement

なる。そこで、形状や寸法を測定するために通常利用されているデジタル式ノギスに直径50mmの印を印刷した板を固定側と可動側に取り付け利用することを考えた。使用したデジタル式ノギスの精度は0.01mmである。この装置を2車線道路トンネル断面を想定した幅約13mの建物壁面の3箇所（左端、中央、右端）に固定設置して使用した。設置高さは、デジタルカメラの視準が水平になるよう壁面底部から約160cmの高さである。撮影距離は、3箇所の測定装置を1枚の画角で撮影できることを念頭に約15mとした。測定装置と実験の概略をFig.5に示す。使用したデジタルカメラおよびレンズは上述の歪曲収差確認実験と同じである。実験は、デジタル式ノギスの可動側を0.1mm刻みで30mmまで移動させ、逐次3箇所の測定装置を1枚の画角に入るよう撮影した。

撮影された画像を用いて、固定側および移動側の印の重心座標を算定した。ここで利用した画像処理アルゴリズムは、重心座標をサブピクセル精度で算定するため輝度分布を考慮するとともに、メディアンフィルタと直線除去処理などを組み合わせたものとなっている。さらに、上述の歪曲収差確認実験で得た式(1)の補正関数を利用して歪曲収差の補正を行った。

画像解析から求めた画像解析値とデジタル式ノギスで求めた実測値の関係をFig.6に示す。図中、3箇所の測定結果を、 $\square$ 、 $\triangle$ 、 $\circ$ で示した。画像解析値と実測値が同一であれば、図中点線で示す関係になるが、画像解析値と実測値の間には差異が認められた。特に、実測値が0.5mmを下回る場合には、画像解析値のバラツキが大きくなるとともに再現性が乏しくなることが判明した。実測値に対する画像解析値の誤差を  $(\text{画像解析値} - \text{実測値}) / \text{実測値} \times 100\%$  として考え、実測値との関係で表わしたのがFig.7である。実測値が5mmを越える場合の誤差は10%を下回る（10mmを越える場合の誤差は1%を下回る）ようになるため、実測値5mmまでの範囲で表わした。すると、0.5mm程度を境にして実測値がそれより下回る場合には誤差が飛躍的に大きくなることを判明した。したがって、幅約13mの測定画角に対して実測値0.5mm程度ま

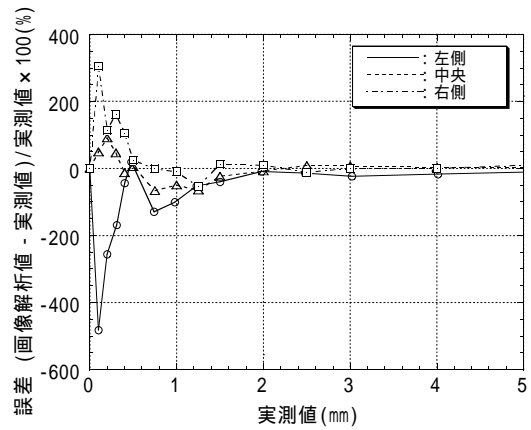


Fig.7 画像解析値の誤差

The Error of a Picture Analysis Value

では精度保証は可能であり、測定画角に対して0.004%程度までの変位はこのシステムによって測定することが可能と考えられる。

#### 4. 画像変位計測法の実務への適用

##### 4.1 トンネル内空変位計測への適用<sup>8)</sup>

トンネル内は通常粉塵が舞っているとともに、屋外に比較して20~70lxの照度しか得られない低照度条件下にある。したがって、このような環境条件下においてターゲットを明確に認識するためには何らかの工夫が必要になる。そこで、30lx程度の照度条件下で反射板、蛍光・夜光塗料および発光ダイオード（Light Emitting Diodes、以下LEDと略す）を用いてデジタルカメラへの写り込み実験を行った。その結果、ピーク発光波長660nm、平均発光光度20mcdの赤色LEDが最も発光状態が円形に近く、かつ発光レベルが均質であり画像処理に適することが判明した。そこで、トンネルにおける内空変位挙動をモデル化するために、この赤色LEDを7つ並べたFig.8のような装置を作製し、トンネル内空変位モデル実験に使用した。この装置は、板上のLEDをスイッチングによって任意に点灯させることができ、これにより仮想的にターゲットの位置を移動させるものである。この装置を、2車線道路トンネル断面を想定した幅約13mの建物壁面に20枚、アーチ状に配置した。なお、変形挙動はすべて内空内側に向かって変位が進むような方向で、逐次赤色LEDを点灯させ、全体を1枚の画角で撮影した。実際のトンネル内の照度を勘案し、本実験では周辺照度が同程度になった後撮影を行った。撮影画像はパソコンに取り込まれた後、フォトショップ等の画像処理ソフトで主にホワイトバランスなどの色調調整を行う。次いで、計測ターゲットをRGBの輝度値の違いに着目し抽出した。その後、式(2)を用いて重心点を算出し、式(3)で歪曲収差補正を行い、補正された重心点の座標値（ピクセル値）をピクセル換算係数で実変位データに変換しテキストデータとして出力した。なお、7つ取付けた赤色LEDの3次元空間

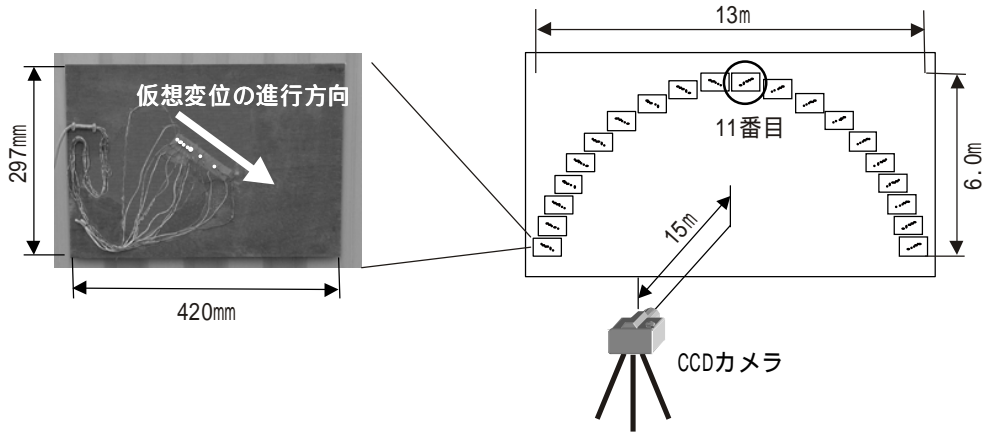


Fig.8 トンネル実規模モデルによる適用性実験の概要

The Outline of the Applicability Experiment by the Tunnel Real Scale Model

位置は光波測距儀により測定した。

最も外側の赤色LED位置を原点として、トンネル内空側へ位置する赤色LEDをトンネル内空への変位挙動とみなし、測定結果を整理した。測定結果の一例をFig.9に示す。この結果は天端に位置した11番目の装置の測定結果である。図中、画像から求めた計測ターゲットの変位距離を  $d_{img}$  で、光波測距儀から求めた計測ターゲットの変位距離を  $d_{act}$  で示した。両者の測定結果はほぼ同じであり、誤差は最大でも1.5mm程度であった。光波測距儀の測定精度を勘案すると、本測定方法で得られた結果は光波測距儀と同程度であると考えられる。この傾向は、他の19ヶ所に設置した装置すべての計測ターゲットについても成り立ったことから、トンネル実環境に近い環境にあっても、本画像変位計測法を用いれば実用レベルでの内空変位計測が可能であることが判明した。さらに、トンネルのような低照度条件下において自己発光型である赤色LEDを計測ターゲットとして用いることによって、光波測距儀と同程度の変位認識が可能であることが判明した。

#### 4.2 模型実験変位計測への適用<sup>9)</sup>

不連続性岩盤中における空洞の挙動解明を目的とした模型実験において、画像変位計測法を適用した。模型実験体の大きさは横幅約3m、高さ約2m、奥行き24cmであり、中央に幅25cm、高さ49cmの弾頭形空洞を配置している。また、空洞肩部から左右45°の方向に不連続面を設置している。この実験では、実験体を起立させ上方から油圧ジャッキによって載荷した。したがって、最終的には共役な不連続面のいずれかが滑動を起こすことになる。実験体の概要をFig.10に示す。実験体表面には、載荷に伴う供試体の変形を測定するために、1/500mmもしくは1/1000mm変位計を設置している。

本実験は室内のため、撮影に十分な照度を得ることができた。したがって、計測ターゲットとして試験体表面に直径20mmの緑丸 (No.1~12) と赤丸 (No.13~26)

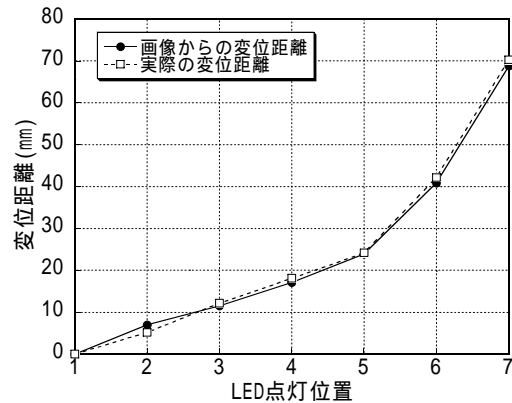


Fig.9 測定結果の一例

An Example of a Measurement Result

のシールを貼付した。デジタルカメラは実験体前面に離間約5mの位置に三脚で固定した。この場合の焦点距離は最大広角28mmであるため、撮影距離5mで実験体全面を包含できた。写真撮影は、不連続面の滑動を伴う巨視的破壊に至る過程で逐次行った。実験終了後の解析手順は、前節トンネル内空変位モデル実験と同様である。

今回の実験では、空洞の右側に位置する不連続面で滑動が生じ最終破壊に至った。そこで、空洞スプリングライン上 (S.L.: 上半アーチの始まる線) に貼付した20番ターゲットに着目し、解析した結果をFig.11に示す。図は不連続面を境に貼付した19番ターゲットを基準にした相対変位としてのせん断変位挙動である。変位計による測定結果を  $d_{act}$  で、画像解析による結果を  $d_{img}$  で示した。せん断変位が20mm未満では差異は0.3mm以下になっているが、20mmを超えた段階で差異は0.5mm~0.8mmと若干大きくなった。これは、せん断変位が20mmに達した段階で高感度変位計のもりかえ作業を施したことが原因となり、誤差が生じたものである。せん断変位が10mmを超えた領域では、誤差 ( (画像解析値 - 実測値) / 実測値 × 100% ) は2%程度以下に収まっていた。空洞右側

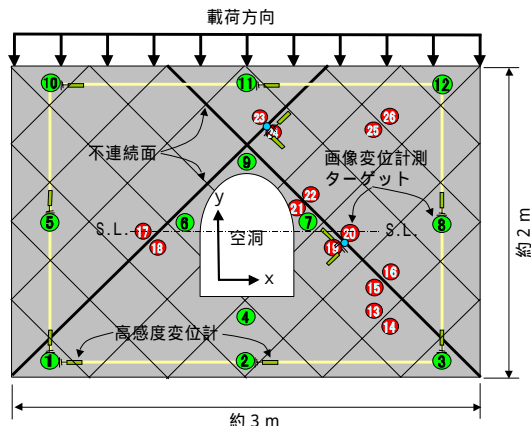


Fig.10 模型実験の概要  
The Outline of a Model Experiment

の不連続面を境にして右下方方向に開口変位を伴いすべり破壊した最終破壊状況を勘案すると、ここで得られた解析結果はすべり破壊の挙動を良く表していることが明らかになった。従来の変位計測の多くが変位計取付け方向を計測対象にした1次元的な評価であったが、本方法により2次元的な変位挙動状況を把握できる効果は大きい。

### 5. おわりに

通常、いかなるレンズとカメラの組合わせで被写体を撮影したとしても、撮影された画像には何らかのゆがみが生じることになる。画像のゆがみに対しては最も大きな影響を及ぼすのが、歪曲収差である。従来、このような歪曲収差に対して非球面レンズを使用したり、レンズ光軸を並行移動させて像変形を修正するハード的な方法が適用されているが、限界があるとともに実験による裏付けがないことから補正効果の把握ができなかった。したがって、定量的な物理量を測定する上で効果的な方法ではないことから、今回歪曲収差の確認実験を行った。また、デジタルカメラは電子の眼であるCCDによって光の強度から色情報を取得している。したがって、CCDの有効画素数と撮影画角の幅や高さの関係から自ずと1ピクセル当たりの換算長さ(精度)が決まってくるが、取得画像の処理方法によってサブピクセルオーダーの精度が期待できることから、微小変位測定実験を行った。さらに、実際の環境条件を考慮したトンネル内空変位モデル実験と、大型の不連続体モデル実験で本方法の適用性を検証した。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 歪曲収差の確認実験を通して、レンズ光軸中心から離れば離れるほど歪曲収差率は大きくなることが明らかになった。したがって、画像を利用した変位計測では歪曲収差を適切に補正することが重要であることがわかり、5次の補正関数を提案した。
- 2) 微小変位の測定実験を通して、取得画像に適切な歪曲収差補正を施すことにより測定画角に対し約0.004%

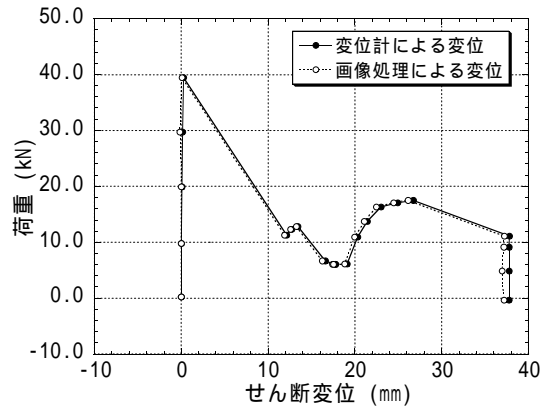


Fig.11 20番ターゲットにおけるせん断変位計測結果  
The Result of Shear Displacement in Target No.20

までの変位測定ができ、約1/9ピクセルとなるサブピクセルオーダーまでの認識が可能であることがわかった。

- 3) トンネルのような低照度条件下では、自己発光型の赤色LEDが計測用のターゲットとして利用可能であることがわかった。
- 4) トンネル内空変位モデル実験と、大型の不連続体モデル実験へ試行した結果、実用レベルでの内空変位計測が可能であることが明らかになった。

今後は、現場適用を踏まえトンネル内空変位計測システムを確立する予定である。なお、本研究は早稲田大学理工学部応用物理学科橋本周司教授の指導を受けて実施したものである。記して謝意を表わす。

### 参考文献

- 1) トンネル用語辞典 トンネル・ライブラリー 第3号,土木学会, pp.119, 1987.
- 2) 大規模地下空洞の情報化施工, 土木学会, pp.130~131, 1996.
- 3) 畑 浩二, 橋本周司, 青木義満: CCDカメラを利用したトンネル内空変位計測における歪曲収差の影響, 第36回地盤工学研究発表会, pp.197~198, 2001.
- 4) 鈴木達朗: 応用光学, pp.29~36, 朝倉書店, 1982.
- 5) 浅田尚樹: CVCV-WG特別報告(XI) カメラモデルとキャリブレーション手法, 情報処理学会CV研究会報告, CVIM-102-9, 1996.
- 6) J. Weng, P. Cohen and M. Herniou: Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, IEEE Trans, PAMI, Vol.14, No.10, pp.246~255, 1992.
- 7) 畑 浩二, 橋本周司, 青木義満: CCDカメラを利用したトンネル内空変位計測における測定精度, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集 共通セッション, pp.188~189, 2001.
- 8) 畑 浩二, 橋本周司, 中村真吾: CCDカメラを用いたトンネル内空変位計測法の開発, 第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, J01, 2002.
- 9) 畑 浩二, 橋本周司, 青木義満: CCDカメラと画像処理を利用した変位計測法の開発, 第3回最近の地盤計測シンポジウム, pp.45~50, 2001.