論文　画像計測による照明の陰影を利用した変状抽出手法の研究

塩崎　正人[*1]・石森　章之[*2]・菊地　典明[*3]・佐田　達典[*4]

要旨：高度成長期以降に整備された社会資本のひとつであるコンクリート構造物の老朽化が進んでおり，また年々増加する傾向にある。これらを維持管理するための調査手法の１つとして，デジタル撮影機器を用いた画像計測システムの開発が進められている。本手法は調査データの記録を残すことが可能であるが，変状の抽出には経験者の判断に頼る部分が多い。著者らは変状抽出の自動化について研究を進めており，撮影時に用いる照明の陰影が，変状のひとつである段差の抽出に有効であることを確認した。

キーワード：画像計測，デジタルカメラ，変状抽出，二値化，RGB 単色光

1. はじめに

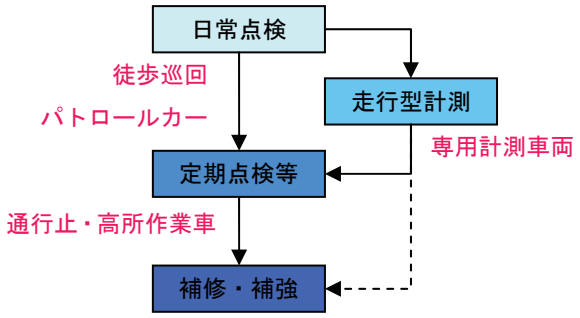
高度成長期に集中的に整備された社会資本が今後急速に老朽化する。これらの社会資本は，今後 20 年で老朽化が加速度的に進展し，例えば道路橋では，建設後 50 年を経過する橋梁が 2030 年に 50 %を超えることとなり，トンネル構造物では 40 %を超える。

国土交通省では，老朽化した社会資本の維持管理・更新を進めることを目的とした「社会資本の老朽化対策会議」を 2013 年 1 月に設置した。この対策会議の方針のひとつに『モニタリングシステムの開発』があり，IT 等の先端的技術の適用性検討が挙げられている。

トンネル構造物について調査・点検を行う場合，目視点検が一般的である。目視点検には遠望目視と近接目視がある。遠望目視は，日常点検として施設管理者が実施するもので，徒歩やパトロールカーによる点検を行う（**図－１**）。一方，近接目視は，定期点検や異常時点検等で実施するもので，トンネル内を通行止めにして高所作業車を用いることが多い [1)]。この点検の記録について，近接目視点検ではクラックスケッチ（カルテ）として位置やサイズの記録が残るが，日常点検として実施される遠望目視点検では細部の記録が残らないことが多く，記録が電子化されていないケースもある。

維持管理を目的とする場合，経時変化を捉えるために調査・点検の記録が時系列で継続されていることが望ましい。調査・点検結果はデータベースとして活用するため，管理が容易なデジタル記録がよい。

このため，最近ではデジタル撮影機器を用いた画像計測システムの運用が進んでいる。デジタルカメラやデジタルビデオカメラを用いることで，点検記録を残すことが容易となった。また，デジタル撮影機器は撮像素子の性能が向上しており，高解像度の画像データからひび割れ幅を算定するシステムも実用化されている [2), 3)]。



図－１　トンネル維持管理の流れ

また，通行止めを伴う近接目視点検を代替する調査・点検手法として，複数のデジタルビデオカメラと照明機材を搭載した撮影専用車両でトンネル壁面を動画撮影する走行型計測システムの運用も始まっている [4)]。このシステムでは 50 km/h での走行撮影が可能であり，トンネル全種を撮影した動画を元にパノラマ画像を作成することが特徴である。後継機種の運用も進められており高速道路においても調査・点検への運用が始まっている。

一方で，ひび割れ幅の算定手法や撮影方法では高速化・省力化が進んでいることに対して，段差やひび割れの抽出は，撮影画像を確認する経験者の判断に任せている現状で，変状抽出を行う解析時間の省力化は進んでいない。経験者の判断に頼る場合，個人差によって抽出精度にも差が生じることが考えられる。また，道路トンネルではコンクリート表面に付着する煤や汚れの問題がある。これは自動車排気ガスに起因するもので，煤や汚れが付着したトンネルでは，画像計測での抽出精度は低下する。

著者らは変状抽出を自動化することで，抽出精度のば

*1 三井住友建設（株）　技術開発センター情報化技術グループ　(正会員)
*2 日本大学　理工学研究科社会交通工学専攻
*3（有）テクノフラッシュ　マネージャー
*4 日本大学　理工学部交通システム工学科教授　工博

らつきを減らし解析作業の省力化を図ることができると考えている。そこで，トンネル撮影時に用いる照明によって生じるコンクリート表面の陰影に着目した。投光方法によって陰影に変化が起きることを確認し，画像処理によって段差を自動抽出する可能性を見いだした。また，著者らは煤や汚れへの対策として，通常撮影に使用する白色光ではなく赤色・緑色および青色といった RGB 単色光を用いて撮影した画像を，HSL 色空間の「彩度」の値の差違から煤や汚れを解析的に除去する研究を行っている。

今回は，HSL 色空間ではなく二値化処理によって段差を抽出する実験を行った。これは自動処理プログラムを作成する際に，より簡単な計算処理から解析速度の向上を図ることを目指したものであり，その有効性を確認できたため，ここに報告する。

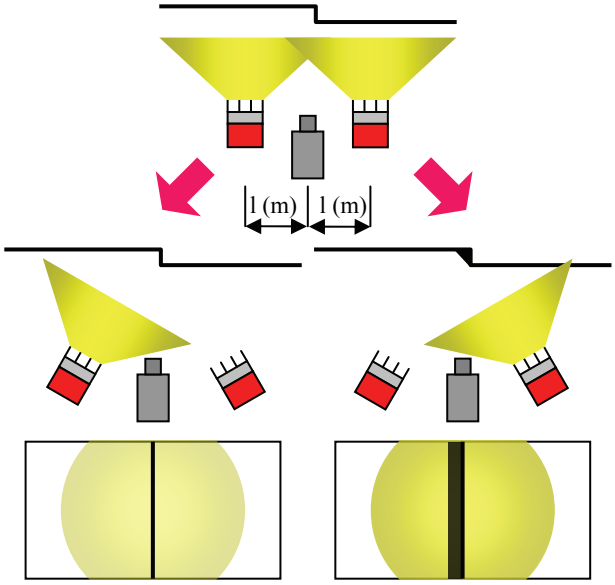
2. 陰影を利用した変状抽出手法

2.1 抽出手法の概要

ここで，本手法の考え方について説明する。

変状の抽出のため，計測対象物に正対した位置にデジタル撮影機材を設置する。撮影機材を挟んで左右に投光器を設置した場合，通常は左右両方を同時点灯させて撮影を行うが，本手法では最初に右側のみ点灯，次に左側のみ点灯，と条件を変えて照射する。各ケースで照明方向が異なるため，段差・ひび割れといった変状が発生している箇所では異なった形状の陰影が現れる（**図－２**）。

照射パターンごとに撮影を行った場合，同じカメラ位置から照明方向が異なる 2 種類の画像を撮影することとなる。変状箇所では陰影の形状が異なってくるため，この形状の違いによって変状を抽出できるという考え方である。



図－２　陰影による段差の抽出

段差がある部分では，段差箇所で陰影が現れる。**図－２**に示す左図のように「段差の低い側」から照射した画像では段差による陰影はほとんど現れない。一方，**図－２**に示す右図のように「段差の高い側」から照射した画像では，陰影の幅が広く現れることとなる。

ここで使用する 2 台の投光器は，左右の位置の違い以外全て同じ条件であった場合，左右別々に照射した場合であっても同一箇所では照度の減衰も含めて全て同じ輝度となる。一方で，変状箇所は陰影が発生しているため，輝度に差が生じることとなる。照明箇所の異なる画像を同じしきい値で二値化し，画素ごとの差分を算出した場合，変状箇所以外は差がゼロとなり，変状箇所のみが特異点として画像に現れるため，画像処理によって変状の抽出が可能であると考え検証実験を行った。

2.2 検証実験

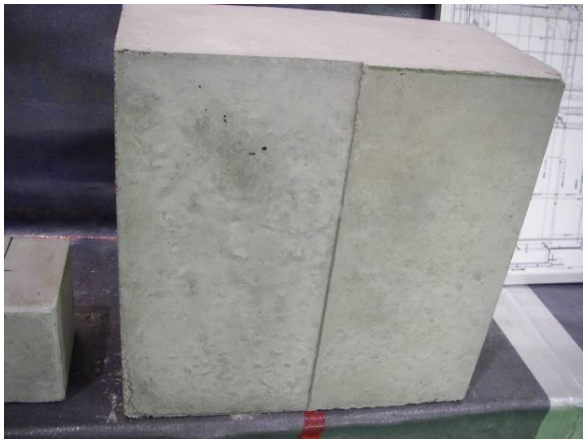
検証実験に際しては，1240 万画素のデジタル一眼レフカメラと焦点距離 500 mm の望遠ズームレンズを使用した（**図－３**）。この時の画素分解能は 0.028 mm/pixel である。投光器にはハロゲン投光器（500W/100V）を 2 台使用し，カメラを挟む形で左右に設置した。

実験は，投光器の効果を確認するため暗室で行い，投光器以外の光源を排除している。

撮影対象物として，中央に 1 mm の段差（左側：低・右側：高）を設けたコンクリート供試体を製作し，これを変状と模擬した（**図－４**）。

実験では，三脚に据えたカメラから左右 1 m ずつ離した位置にハロゲン投光器を設置した。これは，ハロゲン

図－３　デジタルカメラとレンズ



図－４　段差を設けたコンクリート供試体

投光器は照射の際の放熱温度が高く，カメラと隣接させた場合，熱暴走といわれる内部基盤の故障を引き起こす可能性があるためである [5]。また，本手法はトンネル等の閉暗所での計測へ適用することを想定しているため，トンネル車道からコンクリート壁面までの距離を想定して供試体までの距離は 3 m とした。

撮影は，**図－２**の示すように左右のハロゲン投光器を別々に供試体へ照射し撮影を行った。この時のカメラの位置は固定している。

2.3 実験結果

二値化処理では，目視でしきい値を求めた場合，個人差が生じる。このため，輝度値の度数を求め，その累積曲線からしきい値を求める方法を採用した [6]。しきい値は輝度値 0 から段階的にしきい値を大きくしながら，輝度値と累積度数の相関を調べ，この時点の累積度数を総画素数で除した割合からしきい値を求める。今回の実験では割合が 1.0 %となるしきい値を採用した。この際，画素ごとの RGB 平均値を画素値としている。

図－５は，左右の照明を片方ずつ照射した際の撮影画像と，その二値化処理結果である。右側から照射した場合，段差箇所において，縦の陰影が現れている。**図－６**は，その二値化処理画像の差分値を表したものである。左右の照明によって段差箇所にのみ大きな明度差が生じるため，段差箇所が特異点として強調されて差分画像に現れた。

この実験から，照明による陰影を二値化処理することで段差が特異点として抽出できることを確認した。

3. 単色光を用いた変状抽出手法

3.1 抽出手法の概要

道路トンネルにおける画像計測の課題として，自動車の排気ガスを要因とするコンクリート表面に付着した煤・汚れがある（**図－７**）。2 章で報告した陰影を利用した変状抽出手法の場合，陰影となる黒色と煤・汚れの黒色が同化することで，変状抽出が困難となることが予想された。

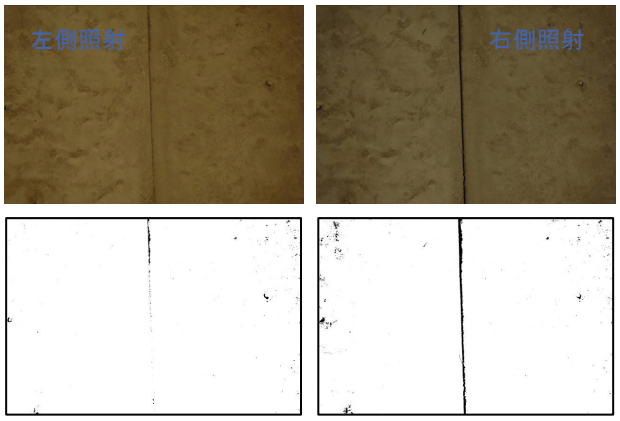
一般的に投光器を指す場合，ハロゲンや LED といった色温度 2400～6000 K の白色光を用いることが多い。この白色光は「光の三原色」である R（赤色）・G（緑色）・B（青色）の波長を含んでいる。波長の短い光は物質に吸収されやすいため，波長の長い光は煤・汚れを透過して変状抽出が可能になると考えた（**図－８**）。このため波長の異なる RGB 単色光を製作し比較実験を行った。

3.2 検証実験

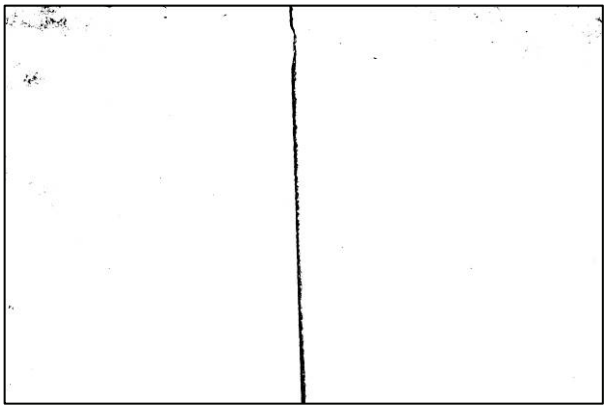
検証実験には，2 章と同じ撮影機材を使用した。

RGB 単色光の製作には，光源として LED を使用し，比較のため白色 LED を併せて製作した。

撮影対象物として，前回使用したコンクリート供試体

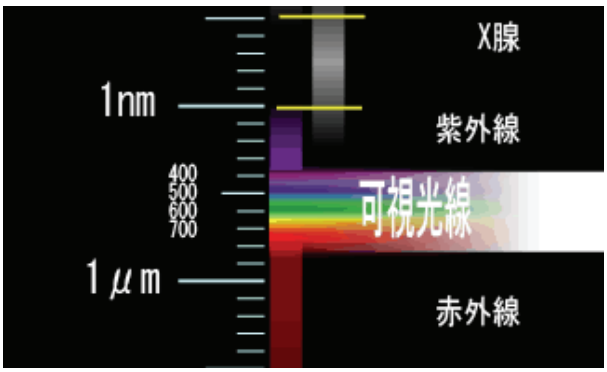


図－５　左右個別照明による画像と二値化画像

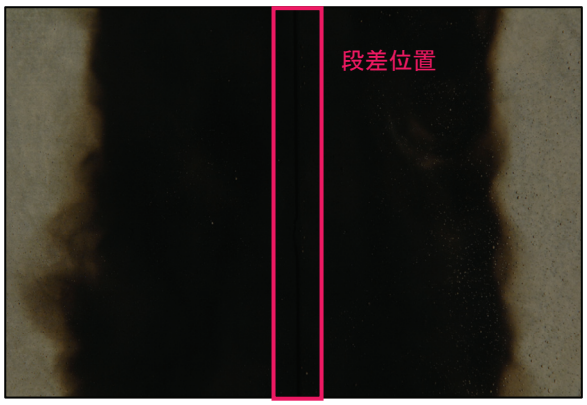


図－６　差分画像

図－７　煤の付着したトンネル壁面



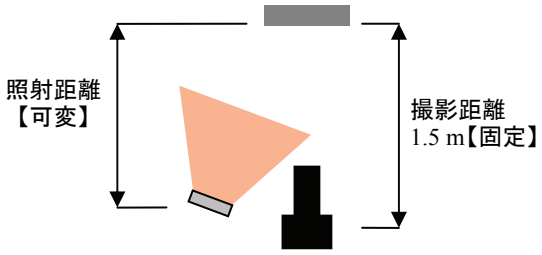
図－８　可視光線の波長

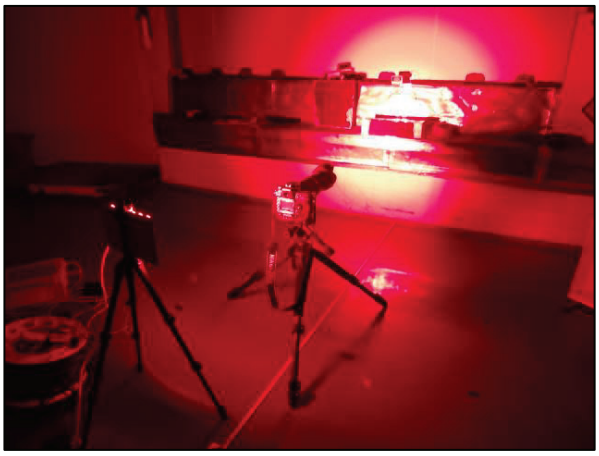


図－９　ロウソクの煤を付着させた供試体

表－１　照度 2000 lx となる照射距離

	白色光	赤色光	緑色光	青色光
照射距離(m)	1.10	2.06	2.00	0.40

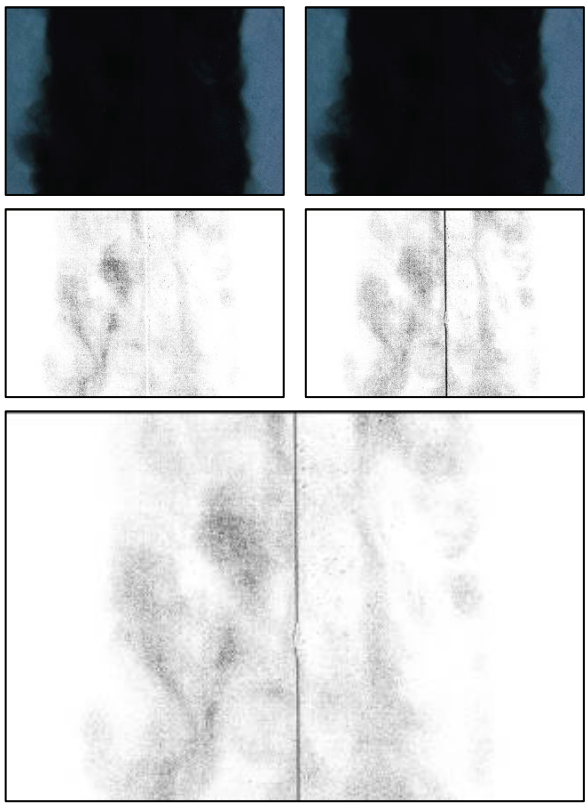




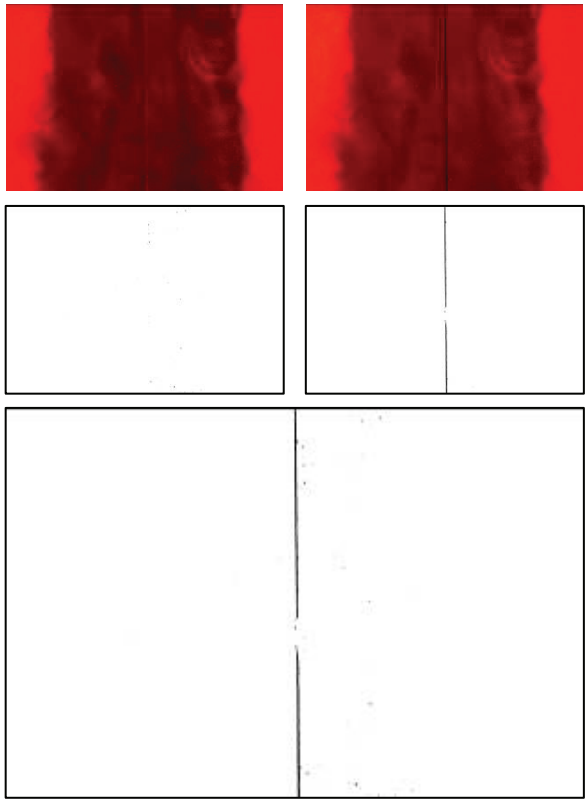
図－１０　撮影方法と撮影状況（赤色光）

（図－４）を使用した。ただし，今回は煤・汚れの付着したコンクリート表面を模擬する必要があるため，コンクリート表面にある段差部分を中心にロウソクの煤を付着させることで，トンネルの煤を模擬している。ロウソクの煤が付着した状態では，自然光による撮影の場合，中央の段差が視認困難であることが解る（図－９）。

この供試体を白色光および RGB 単色光で撮影するのであるが，各投光器の照度が異なっていたため，コンクリート段差部での照度を 2000 lx に統一し，照射条件を揃えて撮影を行った（表－１）。撮影距離は照度確保の関係から 1.5 m とし，照明はカメラから左右 1 m ずつ離した（図－１０）。なお，RGB 単色光は LED 素子確保の問題から各色 1 灯を製作したため，都度所定の位置に移動して撮影を行った。



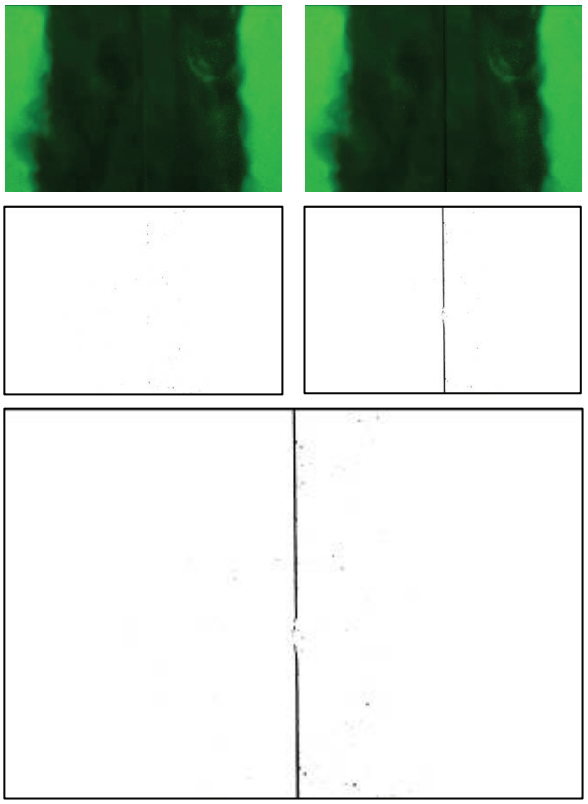
図－１１　二値化画像と差分画像【白色光】



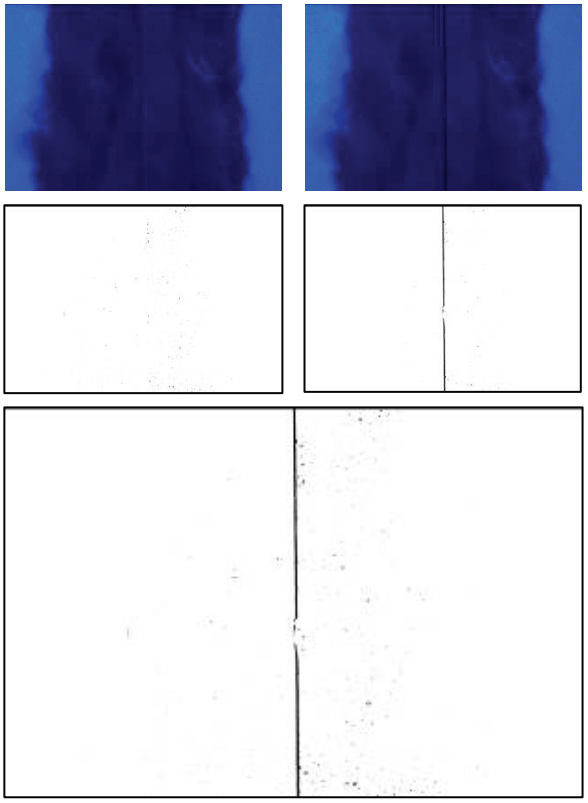
図－１２　二値化画像と差分画像【赤色光】

3.3 実験結果

2 章と同様，撮影画像の二値化処理を行い差分画像を



図－１３　二値化画像と差分画像【緑色光】



図－１４　二値化画像と差分画像【青色光】

作成した。

図－１１は白色光を用いた場合の画像処理結果である。上段は左右別々の照射で撮影した画像，中断は二値化処理画像である。二値化処理によって段差を識別することが可能となったが，差分画像にも周辺の煤の部分が残っている。今回の画像処理では，0～255 階調の二値化を行っているが，煤の値と段差の値が近似していたため，段差のみを抽出するための適当なしきい値の設定ができなかった。煤と陰影の値が近似する場合，特異点として抽出することが困難であることを確認した。

図－１２～図－１４は RGB 単色光を用いた場合の画像処理結果である。オリジナル画像からも段差を視認することができるが，差分画像では段差のみが強調され特異点として現れていることが解る。二値化処理は各色成分のみで画像処理を行い，RGB 単色光でのしきい値は同じ値に統一している。

今回の実験から，煤の付着したコンクリートでは，白色光よりも RGB 単色光の方が抽出精度が高いことを確認した。

ただし，単色光での波長の違いによる抽出精度の良否は二値化処理では判定がつかなかった。一方で，照明色による照射距離に大きな差が生じた。今回製作した LED 投光器は，屋外使用を前提としたため 12V バッテリーで駆動することを条件に製作したことから，全て定電圧で動作しているが，同じメーカーの LED 素子を用いた場合でも，青色光では照射距離が極端に短くなることを確認した。

4. 結論

本研究で得られた知見をまとめて以下に示す。

(a) コンクリート表面の段差抽出に対して，照明による陰影を利用した手法が有効であることを確認した。

(b) 段差抽出は二値化処理という簡単な手法であるため，プログラム化が容易である。

(c) 煤・汚れが付着したコンクリートの段差抽出には，白色光よりも RGB 単色光の方が有効であることを確認した。

(d) RGB 単色光による波長の違いや照射距離といった各色の特徴を明確化できておらず，今後も引き続き研究を進める必要がある。

今回の実験では，照射角度を一定にして撮影を行っている。より効率的な照明配置を決めるためにも照射角度の深浅による陰影の抽出精度についても検証が必要である。

RGB 単色光については，各色の特徴を捉えることができなかった。これまでは照度【lx】の違いに着目して実験を行ってきたが，照度は『人間の感じる量を表す心理物理量のひとつ』[7]とあるように，人間の感覚を数値化したものであることから，放射照度【W/m^2】のような工学的物理量のパラメータに統一して検証を進める必要が

あると考えている。

5. 今後の課題

今回の報告では，段差に着目して検証を行った。しかし，実際の変状調査ではひび割れの抽出が重要である。陰影が明瞭に現れる段差と異なり，ひび割れはV字型の溝と考えることができるため，照明の位置・角度によって陰影の現れ方が変化すると推測している。ひび割れを抽出するために有効な撮影方法・画像処理手法について今後研究を進める必要がある。

カメラ・照明および画像の二値化処理で変状を抽出するという本手法は，コンクリート表面に発生する様々な変状に適用可能と考えている。維持管理を前提としたトンネルのモニタリングでは，トンネル全線を画像計測できる走行型計測が，今後の主流になると予測している。この走行型計測では，複数台のデジタルビデオカメラを利用することから，膨大な画像データを結合処理し，変状抽出を行う必要がある。この時，変状を自動抽出するシステムが必要となる。本手法は，二値化処理といった簡単な処理で変状抽出が可能であることから，簡易なプログラムとして変状の自動抽出に寄与できるものと期待している。

本手法は，走行型計測の「廉価版」として撮影・解析の簡略化・低コスト化を図ることを目的としている。このため，現時点では変状の「有無」を捉えることに特化した研究を行っている。「サイズ」については，別途詳細調査を実施することが前提となるが，先ず変状の有無だけでも簡便に捉えることで，崩落事故の防止や維持管理の省力化に寄与するものと考えている。本研究が維持管理技術の発展の一助となることを期待している。

参考文献

1) 財団法人　道路保全技術センター：道路トンネル点検・補修の手引き【近畿地方整備局版】，2001
2) 石川裕治，布留川信吾，宮崎早苗，佐々木栄一，三木千壽：デジタルカメラ画像を用いたコンクリートひびの幅と長さの自動計測，第 60 回土木学会年次学術講演会，2005. 9
3) 丸屋　剛，堀口賢一，三桶達夫，小山　哲：構造実験を対象にしたひび割れ画像解析によるひび割れの定量化，第 63 回土木学会年次学術講演会，2008. 9
4) 後藤和夫，篠原秀明，下澤正道，堀内宏信：デジタル画像を用いたトンネルの変状調査・管理支援システムの開発，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.12，pp.189-194, 2007.1
5) 日経 BP 社：日経パソコン 2006 年 11 月 13 日号，No.517，p.48，2006. 11
6) 塩崎正人，大谷優輔，菊地典明，佐田達典，石坂哲宏：照明による陰影を利用した変状抽出の自動化に関する研究，第 65 回土木学会年次学術講演会，2010.9
7) 一般社団法人照明学会：照明ハンドブック第２版，オーム社，2003