

報告 赤外線画像と可視画像を併用した画像診断技術の開発

久保 昌史^{*1}・天野 勲^{*2}・中山 聡子^{*3}・ファン ユイ ウォック^{*4}

要旨：現在、構造物の点検は調査員が目視や打音等により変状を現地で確認し、スケッチ等に記録した後、図化する方法が一般的である。これに対し、筆者らはコンクリート構造物の赤外線画像（パッシブ法）と可視画像を重畳することでハイブリッド画像とし、この画像に基づいてコンクリート構造物のひび割れやはく離等の表面劣化を診断する手法を開発した。この手法は調査対象より離れた位置から、非接触、非破壊かつ面的な診断が可能であり、効率的で安全性に優れている。本報では、この診断技術を、護岸やトンネルにおいて適用し、この効果を確認した。

キーワード：可視画像、画像診断、コンクリート構造物、赤外線画像、ハイブリッド

1. はじめに

高度成長期以降に整備された社会資本ストックは、現在、建設後 40 年以上経過したものも多く、今後急速に老朽化することが危惧されている。このため、社会資本の安全性・機能性を今後も持続させていくためには、膨大な維持管理費や更新費が必要になると予想されている。しかしながら、我が国の財政は少子高齢化による社会保障費の増大や、景気の長期低迷等により逼迫しており、社会資本の維持管理に要する予算の確保が困難な状況にある。

こうした状況の下、今後は効率的な維持管理による構造物の延命化が重視されるとともに、LCC（ライフサイクルコスト）やアセットマネジメントの導入が始まっている。また、従来の損傷等が発生してから対処する事後保全から、致命的な損傷が発生する前に速やかに措置を行う予防保全への転換が必要である。予防保全を行うためには、定期的な点検・診断によって構造物の状態を常に正確に把握することが重要となる。

現在、構造物の点検は主に調査員による目視や打音調査によって、ひび割れ、ジャンカ、鉄筋露出、浮き、はく離等の変状を現地で確認し、スケッチ等に記録した後、図化する方法が一般的である。この方法では、以下のような課題がある。

- ・調査員の主観により診断結果にばらつきが生じ、再現性や進行性の特定等の客観的な評価が難しい。
- ・見落とし等によるヒューマンエラーの可能性がある。
- ・高所の打音や近接目視では梯子や足場等が必要になり現地作業に時間を要する。
- ・高所における作業は危険である。
- ・点検結果は紙の書類として保管され、デジタル化されていない場合がある。

これらの課題を解決するためには、対象構造物を画像撮影し、一定のルールに基づいた画像処理により変状の抽出を行い、記録してデータを蓄積することが有効であると考えられる。

現在、主にトンネルや橋梁、吹付け法面等を対象とした画像撮影システムが実用化されている¹⁾。これらは、カメラやビデオカメラを用いた可視画像撮影方式やレーザー方式、赤外線方式、それらを組み合わせた方式と様々な手法がとられており、車載型で道路を走行しながらの撮影が一般的である。これらのシステムは、撮影するための設備が大掛かりであることに加え、撮影する画像は可視画像のみ、または赤外線画像のみである場合が多い。

こうした状況の中、筆者らは、比較的コンパクトな撮影装置を用いて、赤外線画像と可視画像を撮影し、これらの画像を重畳して画像解析することにより、構造物のひび割れやはく離等の変状を抽出できるハイブリッド画像診断システムを開発した。このシステムは、離れた位置から非接触、非破壊かつ面的な調査が可能であるため、効率性、安全性に優れている。ここでは、開発した技術の概要、開発の経緯、護岸およびトンネルでの適用事例を紹介する。

2. 画像診断システムの概要

2.1 概要

画像診断システムは、コンクリート構造物の赤外線画像と可視画像を撮影し、これらの画像を重畳したハイブリッド画像を用いて診断を行う手法である。ここで、2つの画像の重畳によるハイブリッド画像とは、赤外線画像と可視画像上の全ての点が双方でお互いに重なり合うようにすることである。本システムは、人力により機材

*1 清水建設（株） 土木技術本部（正会員）

*2 （株）保全工学研究所（正会員）

*3 （株）保全工学研究所

*4 清水建設（株） 土木技術本部 工博(正会員)

の搬入や搬出、運搬ができ、短時間で装置の組立が可能な比較的コンパクトな撮影装置を用いているため、現地での作業が省力化できる。

本システムは、高感度赤外線サーモグラフィ（以下、赤外線カメラ）による熱画像（パッシブ法）と市販のデジタルカメラによる可視画像を、画角（撮影範囲）を合わせて連続撮影し、重畳、画像補正、縮尺補正、画像接合、画像処理を行うことにより、コンクリートの表層部に生じる浮き、はく離やひび割れ等の変状を効率的に抽出、図化するものである。撮影画像のうち、赤外線画像によって浮き、はく離、表層部の内部空洞、漏水等を抽出し、デジタルカメラによる可視画像によってひび割れ、ジャンカ、鉄筋露出、遊離石灰等の変状を抽出する。

本システムによる診断フローを図-1に示す。

2.2 測定原理

(1) 赤外線法（パッシブ法）

赤外線法とは、測定対象物からの放射赤外線熱量をもとに表面温度を測定し、熱画像として表示することで異常部の検出を行うものである。

タイルやモルタルの浮き部、コンクリートのジャンカ、空洞、漏水等、構造物に欠陥が存在する場合は、熱伝導率、比熱等、熱的性質が健全部と異なる。健全部と欠陥部の熱的性質の違いは、気温や日射、あるいは人工的な加熱・冷却に起因して生じる構造物の温度変化の中で表面温度の差となって現れる。この表面温度分布状態を赤外線映像装置により測定し、表面温度の異常部を内部欠陥箇所と推定する。

浮き・はく離の場合、図-2に示すように、背面に厚さ数mmの空気層が介在するため、健全部に比べて温まりやすく冷めやすい特徴を有している。このため、日射や気温変化によって健全部との温度差が生じる。この表面の温度分布を高感度の赤外線カメラで面的に撮影し、画像解析により周りとの温度差が大きい箇所を浮き・はく離として抽出する。一般に赤外線法の検出限界は、深さ10cm程度といわれている²⁾が、はく離や浮きはかぶりコンクリートに生じることが多いため実用上問題ない。

また、赤外線法では、気温や日射といった自然現象による表面温度差を測定するパッシブ法と、対象を人工的に強制加熱（冷却）して測定するアクティブ法がある。

本システムでは、温度分解能 0.02℃、撮影速度 1/60～1/900secの赤外線カメラにより、強制的な加熱や冷却が不要なパッシブ法を採用し、省力化を図っている。

(2) 可視画像法

デジタルカメラでコンクリート表面の可視画像を撮影し、コンクリート表面のひび割れ部の濃淡特性から、デジタル画像処理を行うことで、ひび割れ幅と長さを自動抽出する。

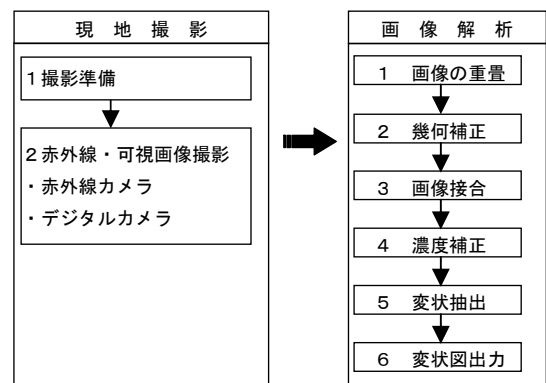


図-1 調査診断フロー

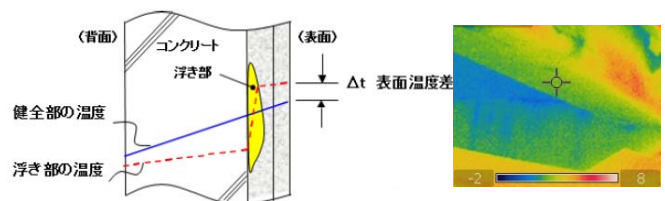


図-2 浮きの測定原理および赤外線画像の例

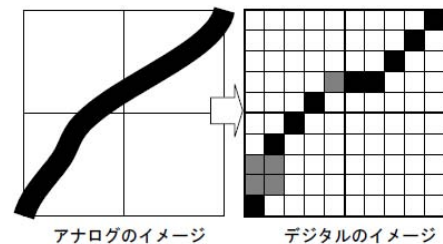


図-3 デジタル画像上のひび割れイメージ

一般にひび割れ部は外光反射がなく黒色を呈するため、可視画像では、灰色のコンクリート面にひび割れが黒色の線状に映った画像となる。その画像を画像処理により1画素をさらに細分化すると、図-3に示すひび割れを含む細分化した画素の色調に変化が生じる。この画素の色調の変化により、ひび割れ幅の抽出を行う。抽出したひび割れの連続性を自動認識して、ひび割れの幅や長さを自動抽出することができ、コンクリート表面の汚れや光の影響が少なければ、理論的には1画素の1/5（20%）の幅を持つひび割れの抽出が可能である³⁾。例えば、1200万画素（3000×4000画素）のデジタルカメラを用いて1枚の撮影範囲を3.0×4.0mとなるよう調整して撮影すれば、1画素が1mmとなり幅0.2mmのひび割れを抽出することができる。

また、ひび割れ以外の変状で、浮きや内部空洞を除くはく離、ジャンカ、鉄筋露出、遊離石灰、漏水等は可視画像からその範囲を測定する。ただし、これらのうち、はく離や漏水については赤外線画像でも検出される場合があるため、双方の画像から判定する。

2.3 測定方法

(1) 現地撮影

現地撮影は、移動式架台に搭載した赤外線カメラとデジタルカメラにより行う。また、移動式架台には移動距離を測定するためのロータリーエンコーダ（距離計）や撮影の制御や記録を行うためのパソコン等を搭載する（写真-1）。これらの装備は、分割することにより人力での運搬、組立をできるようにした。

撮影対象となる構造物に対し、赤外線カメラとデジタルカメラは、画像接合の効率化を図るために、同方向を向け、画角（撮影範囲）を合わせるようにそれぞれ調整する。赤外線画像と可視画像を撮影後、撮影対象面と一定の距離を保ったまま、次の撮影範囲まで所定の距離を移動し、同様の方向・画角で撮影する。その際、隣り合う画像が重なるように前回の撮影範囲とラップさせるようにする。これらの作業を繰返し、連続撮影することによって必要範囲の画像を撮影する。また、最初の画像を撮影する場合のみ、位置合わせのための基準となる目印を画像中に入れるようする。本システムをトンネルの覆工コンクリートに適用した場合の撮影概要を図-4に示す。

(2) 画像接合および画像解析

現地で撮影した赤外線画像と可視画像を接合し、画像解析を行って変状を抽出する。

まず、撮影した画像のひずみを除去して正対した平面展開図となるように画像の幾何補正（あおり補正やたる型補正等）を行い、その後に撮影画像の接合を行う。ここで、現地での撮影距離や画角、方向等の条件が画像毎に異なると、それぞれの画像に対して異なった幾何補正が必要になるため非効率となる。

これに対し、本手法ではこれらの条件が撮影範囲内で同一となるため、最初の赤外線画像と可視画像の幾何補正を行えば、それ以降は同様の処理を行えばよい。また、赤外線画像と可視画像を重畳するためにはそれぞれの画像の大きさをそろえる必要があるが、これも最初の画像で縮尺補正を行えばそれ以降も同様の処理を行えばよいこととなる。

このようにして複数の画像を効率的に接合し赤外線および可視画像からなる1枚のハイブリッド画像とする（図-5）。その後、劣化抽出結果のばらつきを抑えるために画像の濃淡補正を行った後、画像解析ソフトを使用して、浮き、はく離およびひび割れ等の変状を自動抽出する。ここで、赤外線画像からは、対象画像内の平均的な温度からある温度差を超える部分が浮き、はく離として抽出し、可視画像からはひび割れ長さや幅を抽出する。これ以外の変状（漏水、ジャンカ、鉄筋露出、遊離石灰等）については、撮影した画像を見て判断する。

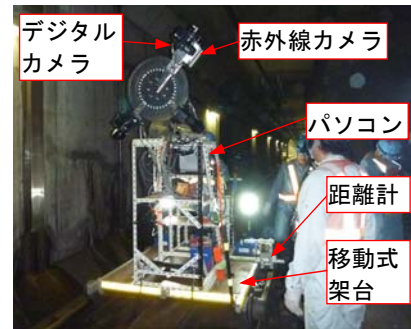


写真-1 トンネルでの撮影事例

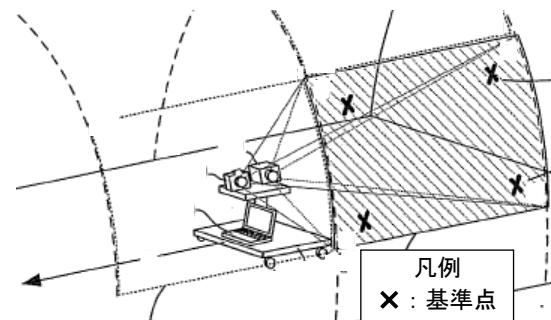


図-4 トンネルに適用した場合の撮影概要

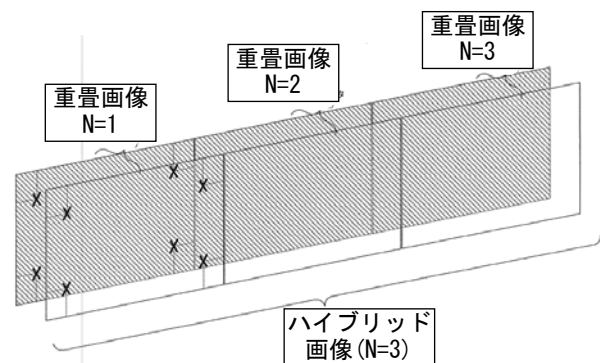


図-5 重畳・接合データ

3. 開発の経緯

3.1 経緯

システムを開発するにあたり、劣化や補修を模擬した試験体を用いて抽出性能の適用性試験を行い実構造物での適用性を確認した。

適用性試験では、赤外線法および可視画像法それぞれについて、撮影時の速度や撮影機材による変状抽出の性能を検証した。

3.2 抽出性能の適用性試験

(1) 試験概要

コンクリートにひび割れ、浮き、錆汁、補修跡、ジャンカ、汚れ等の状態を生じさせた試験体を製作し、撮影機材や移動速度を変えて撮影し、変状抽出の性能や適用性を検証した。

表－1 試験水準

	対象	試験水準
赤外線法	浮き	表層から 1cm, 5cm, 膨れ
	ジャンカ	表層部, 表層から 5cm
可視画像法	ひび割れ	幅 0.3mm 以上

(2) 撮影条件および評価項目

撮影機材は、赤外線法については赤外線カメラを、可視画像法については、静止（移動速度 0km/h）時はデジタルカメラ、移動速度 5～40km/h 時はデジタルハイビジョンカメラを使用した。

赤外線法により浮きおよびジャンカを、可視画像法により 0.3mm 以上のひび割れ長さを抽出することとした。撮影条件および試験水準を、表－1 に示す。

(3) 撮影方法

軽貨物車両に赤外線カメラおよび可視カメラを搭載し、所定の速度で試験体の前を通過して撮影を行った。撮影時の試験体とカメラとの距離は 10m とした。

(4) 試験体

浮きについては、予め、厚み 1mm の発泡スチロールを深さ 1cm, 5cm の位置に設置してコンクリートを打設した。ジャンカについては、幅 10×高 10×深さ 5cm の箱抜きを設け、コンクリート打設後に、砂利を詰めてセメントペーストで固めた。ひび割れについては、コンクリート打設後に押し抜き荷重を行って発生させた。

なお、試験体側面の半分には炭素繊維シート接着工法による補修を施した。シートには部分的に厚み 1mm の発泡スチロールによる膨れを作成した。

試験体の概要を写真-2 に示す。

(5) 画像解析結果

撮影した赤外線画像から、浮き、ジャンカを抽出し、その面積を比較することにより移動速度の解析精度への影響を検討した。

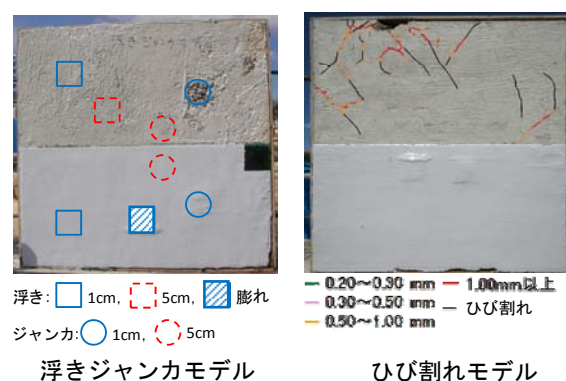
検討にあたり、静止（移動速度 0km/h）時に抽出した浮き面積やひび割れ長さに対する各速度での抽出した値の割合を「検出率」と定義した。

抽出結果を写真-3、図-6 に示す。写真より、浮きについては、移動速度に関わらず、全ての水準を抽出できた。なお、ジャンカについては、深さ 5cm のものを除き、移動速度にかかわらず抽出できた。

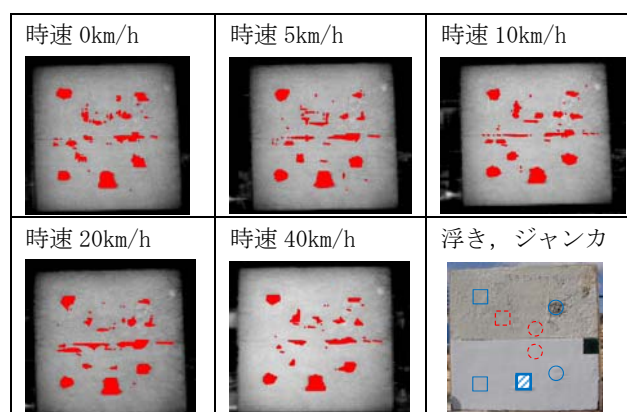
一方、可視画像から、ひび割れを抽出した。

抽出結果を写真-4、図-7 に示す。これらの結果から、ひび割れ抽出長さは、移動速度が速くなるほど短くなり、時速 0km/h の静止画と比較すると時速 40km/h では 40% 程度まで低下した。

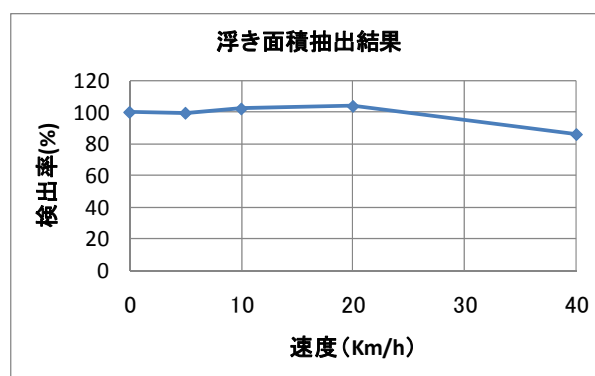
これらの結果から、赤外線画像による浮きやジャンカの抽出精度は移動速度に大きく影響されないが、可視画



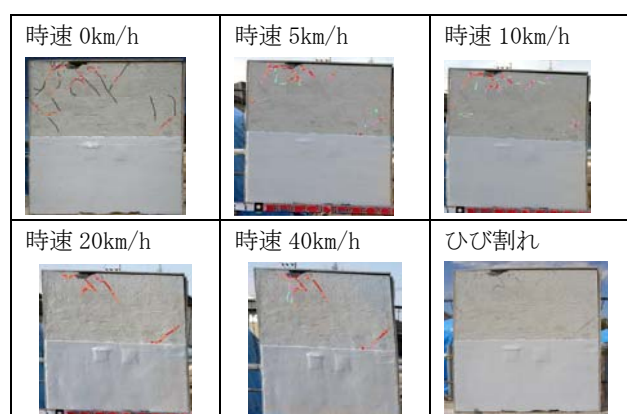
写真－2 走行試験用試験体



写真－3 浮き、ジャンカ抽出結果



図－6 移動速度と浮きの抽出面積の検出率



写真－4 ひび割れ抽出結果

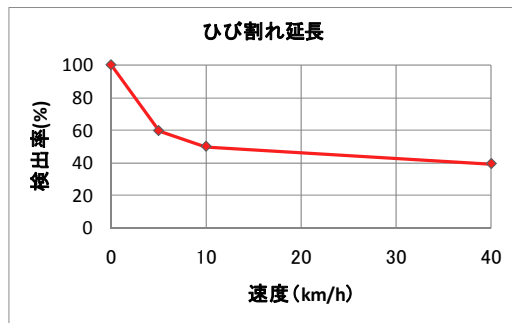


図-7 移動速度とひび割れ検出率



写真-6 撮影状況

像によるひび割れ抽出については移動速度の影響を考慮する必要があるものと考えられる。

3.3 実構造物への適用性確認

(1) 概要

昭和 30 年代に建設された護岸コンクリートに対し、延長 315m を対象として本システムによる調査を実施し、実構造物への適用性を確認した。

(2) 撮影条件および評価

写真-5、写真-6 に護岸および撮影状況を示す。

撮影は、小型船舶に調査機器を搭載して対象となるコンクリート面から約 10m の距離を保ちながら、時速約 8km/h で航行し、赤外線画像と可視画像を同時に連続撮影した。撮影には望遠レンズを使用し、1mm/画素となるように画角を調整した。

また、撮影後、部分的な近接目視を行い、解析結果と比較した。

(3) 画像解析結果

撮影した画像をハイブリッド化して変状を抽出した。結果の一事例を図-8 に示す。図-8 より、浮きやはく離、ひび割れ等の変状を抽出することができたと考える。

次に、近接目視の点検結果と、変状抽出結果の比較を図-9 に示す。近接目視の点検結果と、本システムによる画像解析結果は概ね一致している。

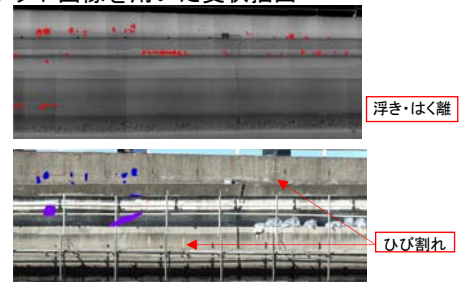
しかしながら、本システムのひび割れ幅については 1.0mm 以上の箇所があり、目視点検結果よりも幅が太く抽出されている。これは、移動速度の影響を受けているためと考えられる。

これらの結果から、本システムでは可視画像の移動速度の影響を考慮し、撮影時は静止することを原則とする。



写真-5 対象護岸

ハイブリッド画像を用いた変状抽出



変状展開図出力

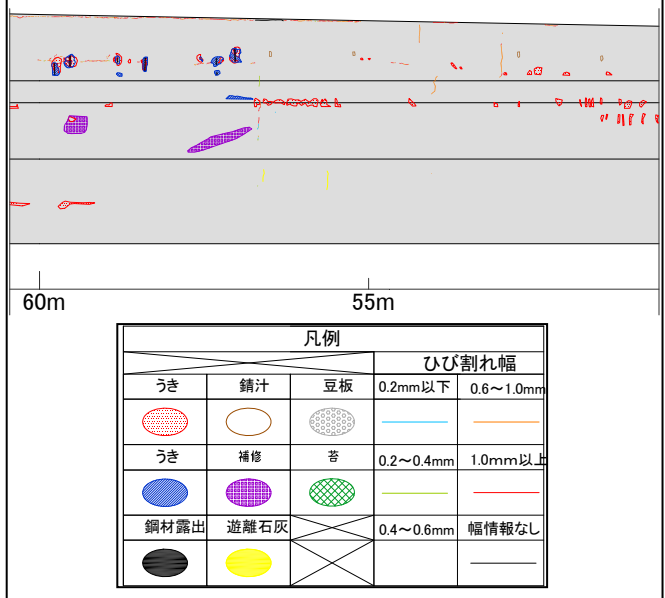
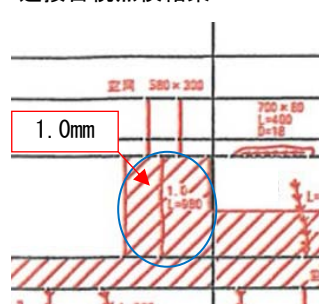


図-8 変状抽出結果の一例

近接目視点検結果



変状抽出結果



— : 0.6~1.0mm
— : 幅 1mm 以上

図-9 近接目視点検との比較

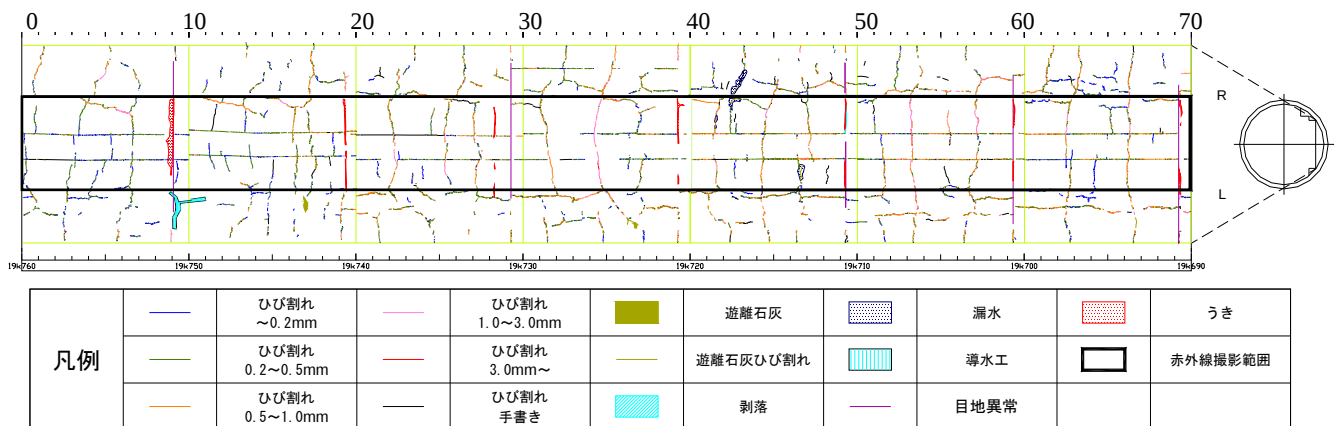


図-10 変状展開図

4. トンネル覆工への適用

4.1 撮影

鉄道トンネルの覆工コンクリートに対し、延長70mを対象として調査を実施した。ここで、内径φ4,800mmの覆工コンクリートのうち、コンクリートはく落により鉄道運行に支障が生じる恐れがある上面150°の範囲は赤外線画像と可視画像を、その他の範囲は可視画像のみ撮影した。写真-7に撮影状況を示す。

現地での撮影時間は、最終電車出発後から始発電車到着1時間前までの約3.5時間であったが、機材搬入、組立て、搬出を含め時間内に全ての撮影を完了することができた。なお、坑内の温度変化を測定した結果、一日の温度差は4.8℃であった。また、浮き部と健全部との温度差は0.08℃であった。

4.2 画像解析結果

変状抽出結果の一事例を写真-8、図-10に示す。これらの結果から、可視画像からは、0.2mm以上のひび割れが抽出された。また、赤外線画像からコンクリートの浮きやはく落も抽出されており、温度変化の小さいトンネル内においても本システムが適用可能であると考えられる。

5. おわりに

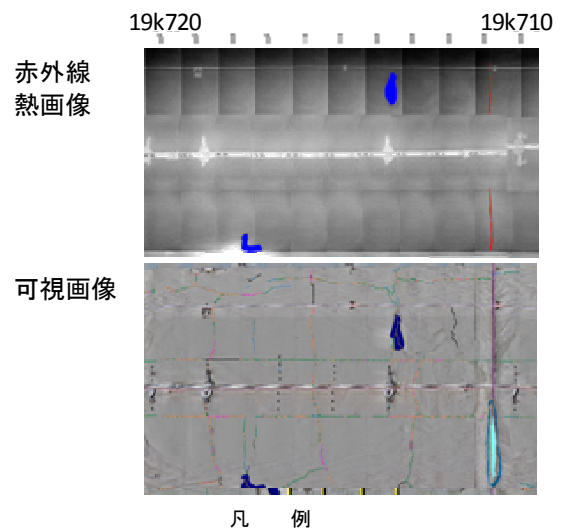
本報で得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 今回の撮影条件では、デジタルビデオカメラを用いた動画による可視画像撮影では、十分な精度を得ることが困難である。
- (2) 護岸などの海洋構造物を対象とする場合には、船舶上からの撮影が可能である。
- (3) トンネル内部などの温度変化が小さい場合でも本システムの適用が可能である。

今後も、様々な構造物に対して適用事例を増やし、ブラッシュアップを図っていきたい。



写真-7 調査機器および撮影状況



凡 例					
ひび割れ ~0.2mm	ひび割れ 1.0~3.0mm	剥落	ひび割れ 0.2~0.5mm	ひび割れ 3.0mm~	漏水
ひび割れ 0.5~1.0mm	ひび割れ 手書き	うき			

写真-8 ハイブリッド画像を用いた変状抽出

参考文献

- 1) 例えば、奥野昇，嶋津幸一，伊藤哲男，馬場弘二，吉武勇，中川浩二：レーザー光線による覆工コンクリートのひび割れ調査法の高性能化，土木学会論文集，No.788/V-67，pp.195-200，2005.5
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02，pp.104，2001.3
- 3) 武田篤史，山田守，大内一：RC 構造実験におけるひび割れ計測の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1177-1182，2001