

34. 画像診断によるコンクリートの点検、劣化調査技術の開発と適用

清水建設株式会社
清水建設株式会社
清水建設株式会社

○ 久保 昌史
ファン ウォック
前田 敏也

1. はじめに

現在、構造物の点検は、主に点検者及び診断者による目視・打音調査に頼っている。しかし、この方法では点検者及び診断者の能力の違いにより診断結果にばらつきが生じたり、構造物の大きさによっては大掛かりな足場が必要となり効率が低下する、データ整理やその図化が煩雑になるといった課題がある。

こうした課題を解決するため、筆者らは対象となるコンクリート構造物に対して赤外線熱画像と可視画像を連続的に同時撮影し、その画像を接合して画像解析することにより、構造物のひび割れや浮き・はく離などの表面劣化を効率的に抽出する画像診断システムを開発した。本報では、本技術の概要および適用事例について報告する。

2. 開発した技術の概要¹⁾

2.1 概要

本技術は、従来の目視・打音調査の代替となる画像解析を用いたコンクリート構造物の調査診断システムである。

撮影架台に固定した高感度赤外線サーモグラフィ（以下、赤外線カメラ）とデジタルカメラを用いて、赤外線熱画像と可視画像を同じ画角で同時に撮影し、これらの画像を重畳（それぞれの画像の座標を一致させ重ね合わせる）して画像解析することにより、構造物のひび割れや浮き・はく離などの変状を抽出する。

変状の抽出にあたっては、赤外線法（パッシブ法）と可視画像法の測定原理を用いる。ここで、赤外線法（パッシブ法）とは、測定対象物の表面温度を強制的な加熱や冷却をせずに自然の状態で測定し、熱画像として表示することでその温度差から異常部の検出を行う手法である。

また、可視画像法とはデジタルカメラで撮影した可視画像から、ひび割れ、浮きや内部空洞を除くはく離、豆板、鉄筋露出、遊離石灰および漏水などのコンクリート表面の変状を検出する手法である。

抽出可能な具体的な変状は、赤外線熱画像により、浮き・はく離、表層部の内部空洞および漏水

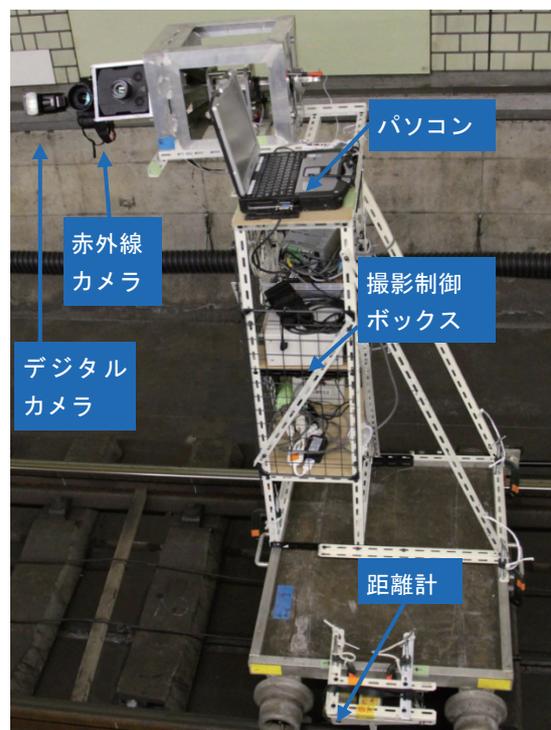


写真-1 撮影装置

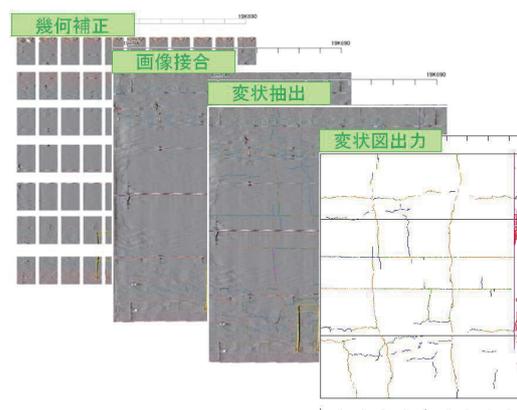


図-1 画像解析のイメージ

など、可視画像により、ひび割れ、豆板、鉄筋露出および遊離石灰などである。

写真-1 に撮影状況を、図-1 に画像解析のイメージを示す。

本システムの特長を、以下に示す。

- ① 人力により機材の搬入・搬出および運搬ができ、短時間で装置の組立てが可能で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。
- ② 赤外線カメラによる熱画像とデジタルカメラによる可視画像を同じ画角で連続撮影し、重畳画像補正、縮尺補正、画像接合および画像処理を行い、コンクリートの表層部に生じているひび割れや浮き・はく離などの変状を効率的に抽出し図化できる。
- ③ 非接触のため足場が不要であり、現地作業時間が短く構造物の供用に影響が少ない。

2.2 測定方法

(1) 現地撮影

初期の開発段階において実施した試験により、移動速度が精度に及ぼす影響が大きいことが明らかとなったため、本技術において、撮影は静止画像により行うこととしている。

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。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（回転式距離計）、撮影の制御・記録を行うためのパソコンなどを搭載する。

これらの装備は、分割して人力で運搬できるため、調査する構造物を選ばない。

撮影対象となる構造物に対し、撮影範囲を同画角に調整した赤外線カメラとデジタルカメラで静止して撮影する。撮影後、一定間隔の距離移動を繰り返し所定の範囲を全面撮影する。その際、隣り合う画像が重なるように前回の撮影範囲と20%以上ラップさせる。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、矩形変形の情報として、最初の画像を撮影する際に、位置合わせのための目印を画像中に写しこむ。

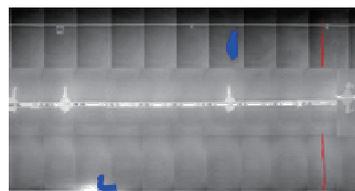
(2) 画像接合および画像解析

現地で撮影した赤外線熱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。

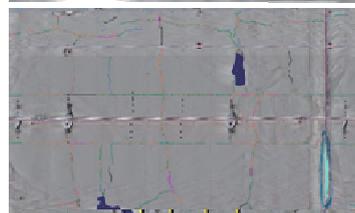
まず、撮影した赤外線熱画像と可視画像のひずみを除去し、赤外線熱画像と可視画像の重畳を行う。その後可視画像から対象物に正対した形の平面展開図となるように画像の幾何補正（あおり補正、たる型補正など）を行い、撮影画像の接合を行う。

この際、現地での撮影距離や画角および方向など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り非効率となる。また、赤外線熱画像のみでは温度差を生じた特徴点が画像毎に少なく接合に時間を要する。これに対して、本システムでは、撮影条件が現地での撮影範囲内で同一となっているため、最初の赤外線熱画像と可視画像を重畳後、幾何補正さえ行

赤外線
熱画像



可視画像



凡 例

	ひび割れ ~0.2mm		ひび割れ 1.0~3.0mm		はく離
	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		浮き

図-2 画像解析による変状抽出の例

えば、それ以降は同様の処理でよい。また、重畳された特徴点の多い可視画像を用いて接合を行う事により、赤外線熱画像の接合を効率的に行うことが可能である。

このようにして複数の画像を効率的に接合し、赤外線熱画像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。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い、画像解析ソフトを使用して、浮き・はく離およびひび割れなどの変状を自動抽出する。ここで、赤外線熱画像から、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を浮き・はく離として抽出し、可視画像からひび割れ長さと幅を抽出する。

なお、その他の変状（漏水、豆板、鉄筋露出、遊離石灰など）については点検者及び診断者が撮影した画像を見て判定する。図-2に画像解析による変状抽出の例を示す。

3. 適用事例

3.1 鉄道トンネル

(1) 概要

シールド工法で施工された鉄道トンネルの二次覆工コンクリートを対象として調査を実施した。

この調査は、トンネル直上での鋼管杭打設および地盤改良工事による近接施工の影響の有無を確認したもので、工事の進捗に合わせて、平成22年7月~平成24年6月にかけて合計6回実施した。

調査の結果、工事によるひび割れ発生は見られなかったものの、東日本大震災後の調査では地震の影響によるものと考えられる新たなひび割れの発生や、工事着手前より生じていたひび割れの進展を適切に抽出できた。

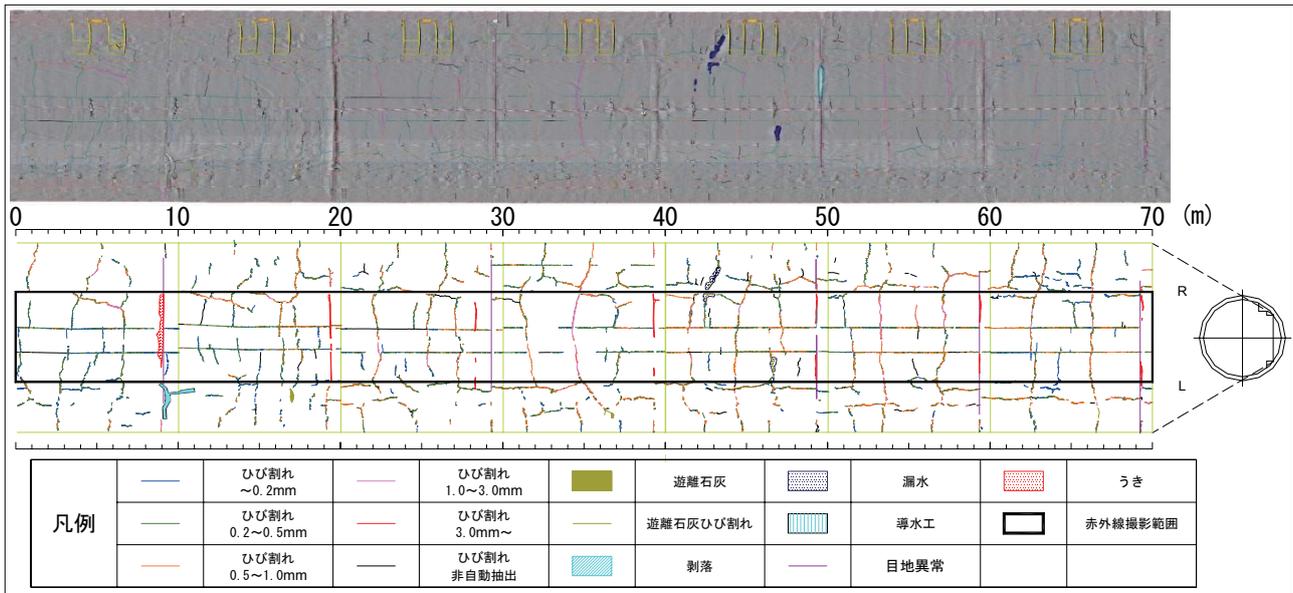


図-3 変状抽出接合画像と変状展開図

(2) 撮影

撮影は、内径φ4,800mmの覆工コンクリートのうち、コンクリートのはく落により鉄道運行に支障が生じる恐れがある上面約90°の範囲については赤外線熱画像と可視画像を、その他の範囲は可視画像のみを撮影した。また、撮影延長は工事の影響がある70m区間とした。表-1に調査実施時期と工事状況を示す。

現地での作業時間は、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すべての撮影を完了することができた。なお、トンネル内の温度変化を測定した結果、1日の温度差は4.8℃と小さかった。また、浮き部と健全部との温度差は最も低い箇所で0.08℃であった。写真-2~3に撮影状況を示す。



写真-2 撮影装置の組立て



写真-3 撮影状況

表-1 調査実施時期と工事状況

	調査実施日	坑内温度	工事進捗
1回目	H22.07.13	28℃	着手前
2回目	H22.10.15	28℃	鋼管杭打設
3回目	H23.03.03	22℃	
4回目	H23.06.03	25℃	地盤改良 (高圧噴射工法)
5回目	H23.08.05	29℃	
6回目	H24.06.07	25℃	施工完了

(3) 画像解析

図-3に変状抽出接合画像と変状展開図を示す。また、表-2にひび割れ浮き集計結果を示す。ただし、これらの結果は1回目のものである。

可視画像からは、ひび割れ、エフロッセンスおよび、はく離などが抽出された。また、赤外線熱画像からは、コンクリートの浮きが抽出できた。このことより、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ことが実証された。

(4) 近接施工影響調査

図-4に調査延長10m毎のひび割れ長さおよび全体の平均ひび割れ幅の変化を示す。ここで、東日本大震災は3回目の調査後に発生している。

1~3回目の期間は、ひび割れ長さに大きな変化は見られていない。

また、ひび割れ幅は、2~3回目にかけて大きく

表-2 ひび割れ浮き集計結果

ひび割れ	延長(m)
幅0.2mm未満	86.39
幅0.2mm以上0.5mm未満	227.08
幅0.5mm以上1.0mm未満	181.99
幅1.0mm以上3.0mm未満	43.30
幅3.0mm以上	4.80
非自動抽出*	32.66
エフロッセンスを伴う	3.45
合計	579.68
浮き	総面積(m ²)
	1.74

*非自動抽出：ひび割れの明確な濃淡特性が生じなかったため画像解析ソフトでは抽出できなかったが、調査員が画像を確認することで抽出したひび割れ

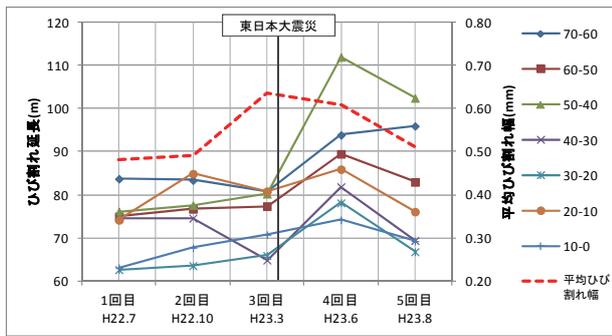


図-4 ひび割れ長さおよびひび割れ幅の変化

なっている。コンクリートは温度により伸縮しその熱膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度である。測定時の坑内温度は前2回と比較して約 6°C 低下した。

覆工コンクリートは1スパン10mで、線路直角方向のひび割れは1スパンに平均4本程度発生しているため平均ひび割れ間隔は2.0mとなる。コンクリートの収縮はスパン内で均等に生じると仮定するとひび割れ間隔2.0mでは、約 0.12mm 収縮する ($2,000\text{mm} \times 6^{\circ}\text{C} \times 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} = 0.12\text{mm}$)。これは計測値の約 0.15mm ($0.63\text{-}0.48\text{mm}$) にも近い値である。よって、ひび割れ幅の増加は、温度低下によるコンクリートの収縮が原因と考えられる。

3~4回目の期間はすべての範囲でひび割れ長さが増加している。写真-4にこの期間に新たに見つかったひび割れの例を示す。ひび割れ幅は、坑内温度が 3°C 上昇していることから、計算上コンクリートの膨張により約 0.06mm 小さくなるはずであるが、計測値は約 0.03mm でここまで小さくなっていない。温度変化が原因であれば、ひび割れ長さが短くなり、幅も小さくなるがこの期間では、そういった傾向はみられなかった。

4~5回目の期間は、全体的にひび割れ長さが短くなり、かつひび割れ幅も小さくなっている。坑内温度が 4°C 上昇していたため、温度変化の影響が原因として考えられる。

3~5回目の期間は同一工事(地盤改良)が行われたにもかかわらず、3~4回目は温度変化で説明できないようなひび割れ長さの増加が生じ、4~5回目では温度変化によるひび割れの減少が生じている。これらを勘案するとひび割れ長さの増加は、東日本大震災の影響があったと推定することが妥当と考えられる。

3.2 コンクリート壁

(1) 概要

平面形状は1辺長さ100mの正方形、高さ約8mのコンクリート壁に対して、西面全面100mと南面の一部15m、合計約 900m^2 を対象として調査を実施した。この調査では、別途、点検者による近接目視および打音調査も行い、調査時間および調査

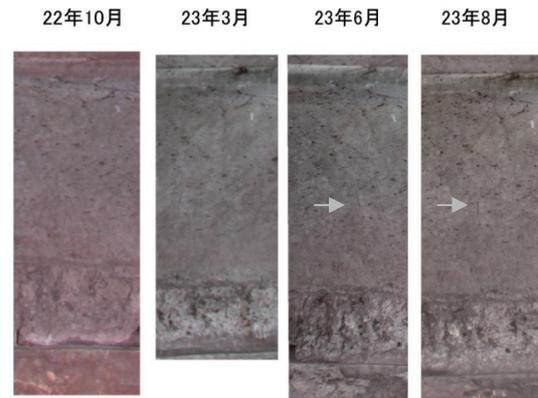


写真-4 新たに見つかったひび割れ



写真-5 撮影状況

費用の比較を行った。その結果、本技術は点検者による調査と比較して、現地調査に要する時間は1/8、調査全体の費用は同等であることを確認した。

(2) 撮影

写真-5~6に撮影状況を示す。撮影は、撮影機材を搭載した台車を用いて、長さ方向に2m間隔で移動しながら行った。高さ方向については、1回で撮影できる高さが壁面高さの1/3程度であったため、上、中、下に分割して行った。撮影に要した時間は合計80分程度であった。

撮影当日の天候は晴れ時々曇り、日較差は 4.1°C で、撮影時間帯のコンクリート表面温度は上昇傾向にあり $1\sim 2^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ 程度の温度勾配がみられた。

(3) 画像解析

写真-6~7に可視画像と赤外線熱画像の接合画像(画像解析後)を、図-5に変状図をそれぞれ示す。また、表-3に抽出されたひび割れ浮き集計結果を示す。ひび割れは水平および鉛直方向ともに微細なものが多く見られ、ひび割れ密度は 0.81m^2 であった。また、浮きは、大きさ5cm以上のものが鉄筋露出箇所やその周辺に多く、それ以下の小さな浮きはセパレータ頭部の後埋めモルタル部に多く見られた。なお、これ以外に、ジャンカやエフロレッセンス等も見られた。

(4) 目視・打音調査との比較

本調査では、別途、4面全てに対して点検者による目視・打音調査を実施した。目視・打音調査は、



写真-6 可視画像

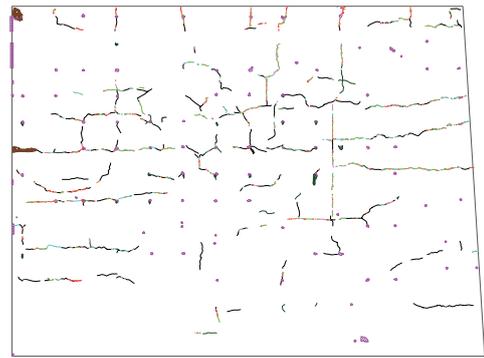


写真-7 赤外線熱画像

凡例		
	ひび割れ0.2mm未満	ひび割れ0.3~0.4mm
	ひび割れ0.2~0.3mm	ひび割れ0.4~0.5mm
	遊離石灰を伴うひび割れ	剥落
	遊離石灰	鉄筋露出
		ジャンカ
		微細なひび割れ(技術員の判別による)
		浮き

図-5 変状図



写真-8 本技術で判明した浮き箇所の確認状況

表-3 ひび割れ浮き集計結果

ひび割れ	延長(m)
幅 0.2mm 未満	6.17
幅 0.2mm 以上 0.3mm 未満	9.28
幅 0.3mm 以上 0.4mm 未満	5.79
幅 0.4mm 以上 0.5mm 未満	3.01
幅 0.5mm 以上	2.78
非自動抽出	33.57
補修されたひび割れ	4.42
ひび割れ長さ合計	65.01
抽出面積	80
ひび割れ密度 (m/m ²)	0.81
浮き	総面積(m ²)
	0.26

1パーティ（点検員4名）で行った。

本技術を実施した範囲において、調査結果を比較したところ、変状の抽出結果はほぼ一致しており本手法の妥当性が確認された。さらに、浮きに関して打音調査では検出されなかった変状を本手法で抽出できた箇所（写真-8）もあり、本手法の精度の高さを実証できた。

現地調査時間について、西面を対象として比較を行った。本技術では約1時間、目視・打音調査では約8時間を要した。現地調査に要する時間は1/8であった。

また、調査にかかった費用は同等であった。今回の調査では交通規制などは不要であったが、これらが必要な箇所で調査を行う場合は、現地調査時間が短いため、間接的なコストを削減できる可能性が高い。

現地では足場や高所作業車等が不要なため、安全面でも優れており、構造物の変状箇所にチョークで印を付ける必要もないため、美観上も問題が生じないと考えられる。

3.3 コンクリートスラブ

(1) 概要

浄水場のコンクリートスラブ（約52×75m）を対象として調査を実施した。

調査の結果、撮影方法に課題が生じたものの、本技術は、線状構造物だけでなく、平面的に広い形状でも適用可能であることを確認した。

(2) 撮影

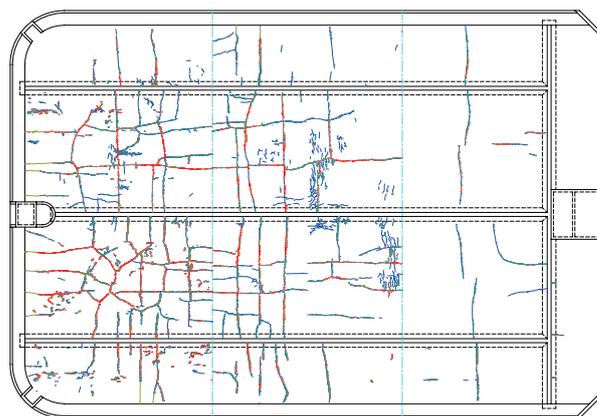
撮影は、クローラー式垂直昇降型高所作業車を使用して、地上6mの高さからスラブ面を連続撮影した。撮影機材は、撮影架台に搭載した2台のデジタルカメラと1台の赤外線カメラ、パソコン、コントロールボックス、バッテリーなどで、撮影架台は固定バンドを用いて作業床に固定した。ひび割れ幅0.2mmを抽出するために必要な画角は6.0×5.0mであったため、ラップする範囲を考慮して1回の撮影範囲は長辺方向に5.0m、短辺方向に4.0mとした。撮影は、スラブの長辺方向に設定し



写真-9 カメラ設置状況



写真-10 撮影状況



凡例

—	0.2mm未満のひび割れ	—	0.5mm以上のひび割れ
—	0.2~0.3mmのひび割れ	—	幅情報の無いひび割れ
—	0.3~0.4mmのひび割れ	—	補修済みのひび割れ
—	0.4~0.5mmのひび割れ		

図-6 変状図

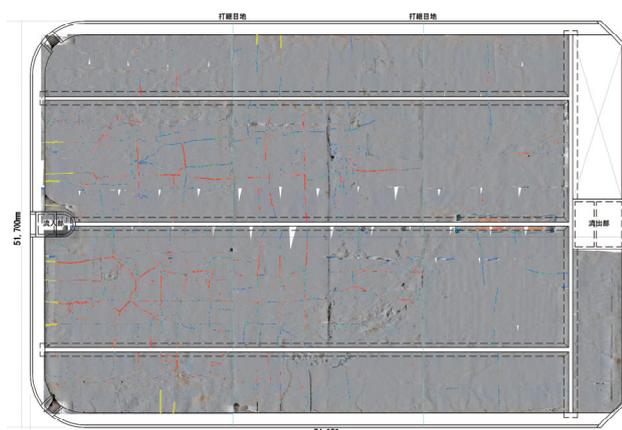


写真-11 可視画像

表-4 ひび割れ集計結果

ひび割れ	延長(m)
幅 0.2mm 未満	147.7
幅 0.2mm 以上 0.3mm 未満	145.9
幅 0.3mm 以上 0.4mm 未満	104.9
幅 0.4mm 以上 0.5mm 未満	64.0
幅 0.5mm 以上	120.9
非自動抽出*	438.7
補修されたひび割れ	10.5
ひび割れ長さ合計	1022.1
抽出面積	3177.4
ひび割れ密度 (m/m ²)	0.32

た測線毎に連続して行った。この測線は4m間隔で全12測線とした。高所作業車を測線の始端部に移動させ、測線に沿って5m間隔で移動・作業床上昇・撮影・作業床降下の作業を繰り返した。測線の終端部まで撮影し、隣の測線に移動し同様の手順を全測線で行い、スラブ全面を撮影した。

写真-9にカメラ設置状況を、写真-10に撮影状況をそれぞれ示す。

(3) 画像解析

画像解析の結果、本コンクリートスラブには、ひび割れ以外の変状は見られなかった。写真-11に可視画像の接合画像(画像解析後)を、図-6に変状図をそれぞれ示す。可視画像には、色の濃い部分が見られるがこれは汚れや打継ぎ目が画像処理上強調されたもので損傷ではない。赤外線熱画像から、浮きやはく離などの変状がみられなかった。表-4に抽出されたひび割れ集計結果を示す。

ひび割れは長辺方向、短辺方向ともに見られるが、短辺方向により多い傾向があった。スラブ全体のひび割れ密度は0.32m/m²であった。

5. おわりに

本技術は、点検箇所を画像化して解析し記録に残すため、診断結果のばらつきがほとんどなく、

特に複数回の点検を実施する場合は、撮影したすべての箇所において前後の比較ができるため変状の進展や変化が把握しやすい。

また、今回紹介した構造物だけでなく、建築構造物のタイルの浮き、ダム堤体のような近づきにくい構造物などにも適用できる。

今後は、様々なコンクリート構造物の点検・診断に対して本技術の適用を積極的に提案していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 久保, 天野, 中山, ファン: 赤外線画像と可視画像を併用した画像診断技術の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1847~1852, 2011