

論文 アクティブサーモグラフィによる塗膜系仕上材料下のコンクリートひび割れ位置の推定法の提案

塚越 雅幸*1・細川 明香里*2・上田 隆雄*3・石川 真志*4

要旨：コンクリート構造物の美観性や耐久性向上を目的に仕上材料が施工される。しかし、仕上材料施工後にコンクリートにひび割れが発生した場合、外観の目視調査でひび割れの発生を確認することは困難である。本研究では、アクティブサーモグラフィ法によるコンクリートに発生したひび割れの位置の推定の可能性について検討した。実験では熱源となるハロゲンランプの照射位置と、加熱から冷却までのコンクリート表面の熱変化に着目して検討した結果、一定の塗膜厚さとひび割れ幅であれば、ひび割れ位置を境界とした熱分布に不連続性が生じることが確認され、本手法によりひび割れ位置推定の可能性を示した。

キーワード：アクティブサーモグラフィ、非破壊試験、仕上げ材料、ひび割れ

1. はじめに

コンクリート構造物は様々な原因で劣化が進行する。現在、建設後数十年を経過したコンクリート構造物の維持管理が課題となっている。適切な維持管理を行うためには、正しく劣化原因を推定し、また劣化程度の把握が重要である。そこで、国土交通省は長さ2m以上の橋と全てのトンネルについて、5年に1度の近接目視を基本とする点検を省令で規定している。

一方で、美観性や劣化防止や補修などを目的に、コンクリート表面になんらかの表面仕上材料が塗布される。このような場合、コンクリート自体を直接目視による検査は困難であり、写真-1に示すように劣化が進行してから発見されるケースがある。今後、切迫する予算の中で定期点検を続けてゆくことは非常に厳しく、さらにコンクリート構造物の劣化診断を行える技術者の数も不足しているのが現状である。そのため、簡便に行える非破壊でのコンクリート構造物のひび割れ・剥離検査として、超音波法や、弾性波法、AE法など様々な方法が提案されているが¹⁾²⁾、その操作やデータの判断には高度な技術と知識が必要であり、また近接目視と同様コンクリート構造物に触れられる位置まで近づく必要がある。

そこで本研究では、非接触で測定が可能なサーモグラフィ法に着目した。本手法はこれまで、コンクリート内の空洞³⁾や、タイルの剥離部の推定に利用されてきた。ひび割れに対しては、かぶりコンクリートの剥離を伴うケースや水平ひび割れについては検討されてきたものの⁴⁾⁵⁾、コンクリート表面に垂直方向に発生したひび割れの場合や、表面仕上げ材料が施工されている場合については検討された事例は少ない。ここでは、仕上げ材料

が施工された場合でのサーモグラフィ法による、垂直ひび割れ位置の推定法について検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体の作製

(1) コンクリートの調合と形状

コンクリート用材料には、普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³，比表面積：3280 cm²/g）、徳島県鳴門市撫養町産砕砂（密度：2.56 g/cm³，F.M.：2.79）鳴門市撫養町産砕石（密度：2.55 g/cm³/G_{max}：15mm）を用いた。試験体の形状は図-1に示す通り10×10×30 cmの角柱コンクリート(W/C=55%)とし、長手方向中央あたりに設



写真-1 表面仕上材が施工されたコンクリートへのひび割れの発生

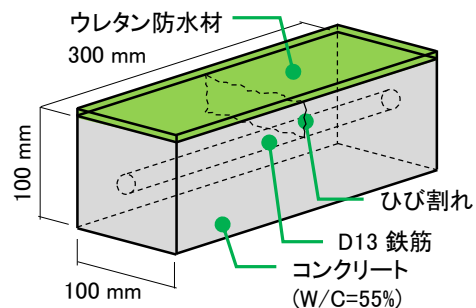


図-1 試験体の形状と寸法

*1 徳島大学大学院 理工学部研究部理工学部門社会基盤デザイン系助教 博士(工学) (正会員)

*2 徳島大学 工学部建設工学科

*3 徳島大学大学院 理工学部研究部理工学部門社会基盤デザイン系教授 博士(工学) (正会員)

*4 徳島大学大学院 理工学部研究部理工学部門機械科学系講師 博士(工学)

けるひび割れ幅を制御するため、 10×10 cm 断面の中心に D13 鉄筋を配置した。打込み翌日、脱型を行い、 20°C 環境下で 28 日間の封緘養生を行った。

(2) 表面仕上材料とコンクリートへのひび割れ

表面仕上材料には、下地となるコンクリートにひび割れが発生した際に破断しないよう、一定の伸び性能が必要である。本研究では比較的伸び性能の高いとされる市販のウレタンゴム系塗膜防水材とアクリル系ポリマーセメント系塗膜防水材を用いた。防水材の塗布は、コンクリート打設時の型枠側面 1 面に対して $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、 $60 \pm 10\%\text{R.H.}$ の実験室内で行い、1 週間養生した。なお、塗膜厚さは 1.0、2.0 mm の 2 段階とし、施工時の塗布量で管理しており全ての試験体で目標厚 ± 0.1 mm 内で施工されていることを、硬化後に試験体長手方向側面より 10 箇所ノギスで測定する事で確認した。

下地コンクリートへのひび割れは、防水層の養生後、油圧式圧縮試験装置にて 3 点曲げ試験にて、試験体長手方向の中央部分に発生させた。曲げ载荷中、試験体にひび割れが発生した際に一旦装置を停止し、クラックスケールにて測定面となる面のひび割れ幅を確認しながら、所定の幅となるように徐々に载荷し、ひび割れにステンレス製のスペーサーを挿入しひび割れ幅を固定した。発生させたひび割れ幅は 0.2、0.5、1.0 mm の 3 段階とした。また、ひび割れ幅 0.5 mm の試験体については、エポキシ樹脂注入後に防水層を施工した試験体も準備した。

2.2 アクティブサーモグラフィ法

本研究では、熱源を利用し強制的に対象表面に温度変化を与えるアクティブサーモグラフィ法を用いて防水層が施工された後のコンクリートに生じたひび割れの位置の推定を試みた。

アクティブサーモグラフィ法は写真-2 に示すように、熱励起源として 1,000W のハロゲンランプ、赤外線サーモグラフィカメラ、および画像表示・データ処理用の PC で構成される。本実験では長さ 20 cm 程度の棒状のハロゲンランプを用い、照射面から高さ方向に 25 cm の位置に、ランプの長手方向がひび割れと並行になるように設置した。ランプによる照射幅はランプ中央より片側 7.5 cm である。ランプのひび割れから横方向の位置と、加熱・冷却時間については試験ごとに示す。ランプでの加熱中および加熱終了後は実験室内での自然冷却過程を赤外線サーモグラフィカメラにより観察した。用いたカメラの温度分解能は 0.05°C 、解像度 $640 \times 480\text{pix}$ であり、サンプリング周波数は 30 Hz とした。本試験体のサイズとカメラの設置位置・解像度の関係から、画像 1pix 分解能はおよそ 0.8×0.8 mm 角である。なお、カメラはランプからの直接光の影響を受けないよう、試験体に対して傾斜させて設置しており、試験体が若干台形に歪んで撮

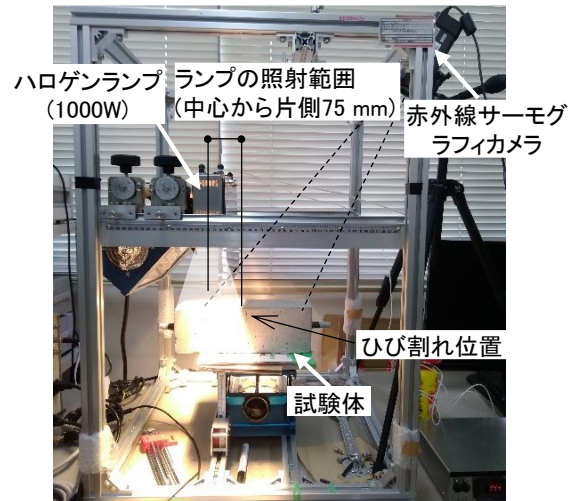


写真-2 測定時の熱源と赤外線サーモグラフィカメラの配置状況

影されるため、以後示す表面温度分布画像は画像ソフトにて台形補正処理を行ったものである。なお、温度の高低はカラースケール画像で表示した。

3. 実験結果と考察

3.1 照射位置と時間の検討

表面仕上材料を施工していない幅 0.5 mm のひび割れを有するコンクリートに対して、照射光端部より内側におよそ 10 mm の距離にひび割れが位置するようにハロゲンランプを設置した際の試験結果をまとめて図-2 に示す。図-2(a)の通常のカメラで撮影した試験体表面の状況では視認可能なひび割れでも、図-2(b)の照射 60 秒後の温度分布画像からはひび割れを識別するのが困難であった。図-2(b)の A-B ライン上での加熱中の温度履歴について示す図-2(c)を見ても、加熱中ひび割れ部とその近傍部のコンクリートの温度に差は見られない。

同試験体に対して、ひび割れ自体を照射しないよう、照射光端部より外側におよそ 25 mm の距離にひび割れが位置するようにハロゲンランプを設置して 60 秒照射した後 180 秒自然冷却した試験結果をまとめて図-3 に示す。図-3 (a)の照射 60 秒後の温度分布画像を見ても、ひび割れを境界に照射側と非照射側とで温度差は確認できない。また図-3 (b)の A_H-B_H ライン上の温度分布を見ると照射位置からひび割れまで加熱 60 秒では熱が達していない事が分かった。そこで、自然冷却を 180 秒した結果を見ると、ひび割れを境界に照射側と非照射側とで温度差が生じていることを表面の温度分布画像で確認できた。また図-3 (c)の A_C-B_C ライン上の温度分布をみると、ひび割れを境界に照射側と非照射側とでの温度差(ΔT)が 0.9°C ほど生じており、ひび割れを境界に図-3 (a)の温度分布画像からもひび割れの輪郭が確認できる。比較のためにひび割れの無い試験体で同様の照射

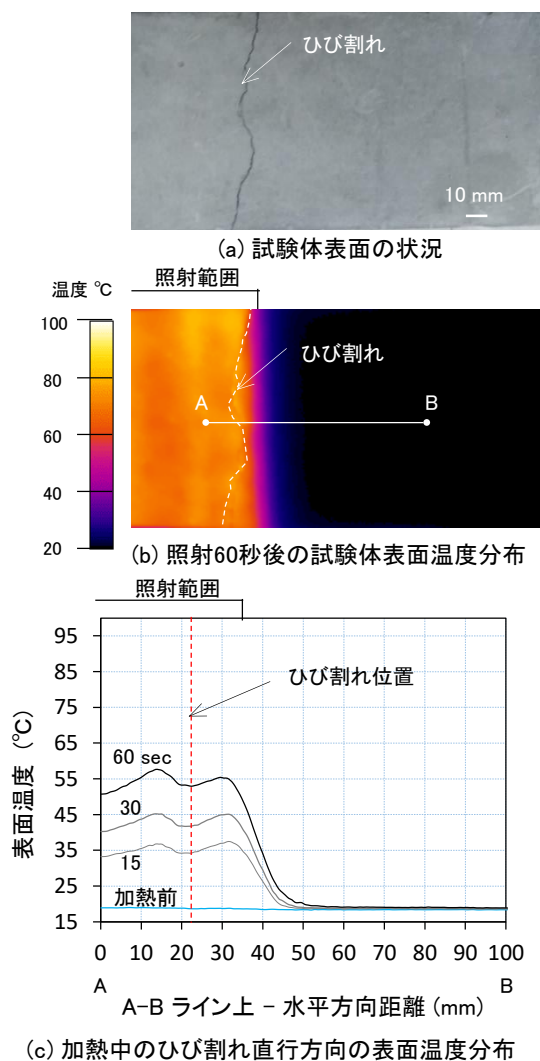


図-2 ひび割れ上を照射した試験結果
(表面仕上なし、ひび割れ幅0.5mm)

と冷却試験を行った結果を図-4 に示すが、加熱から冷却期間で滑らかな温度分布となっている。

3.2 表面仕上材料の影響

表面仕上材料としてウレタン系塗膜防水材を 1.0 mm 施工したコンクリートに、0.5 mm のひび割れを発生させた試験体に対して、照射光端部より外側におよそ 25 mm の距離にひび割れが位置するようにハロゲンランプを設置して 60 秒照射後 180 秒自然冷却した時の測定結果について、まとめて図-5 に示す。本実験で用いた試験体においては、ひび割れ幅が 0.5 mm の場合、ひび割れに追従し引き伸ばされて薄く変形している箇所が微かではあるが目視で確認できる状態にあった。

図-5(a) に示す試験体の表面温度分布では、防水層なしの試験体同様に 180 秒の冷却の間に、ひび割れを境界に照射側と非照射側とで明らかな温度差が表面の温度分布画像に表れた。加熱から冷却過程の温度変化履歴をそれぞれ図-5(b) と(c)に示す。コンクリート単体の試験体では照射範囲での表面の温度は平均で 55°C 程度まで上昇したのに対し、ウレタン系塗膜防水層を施工し

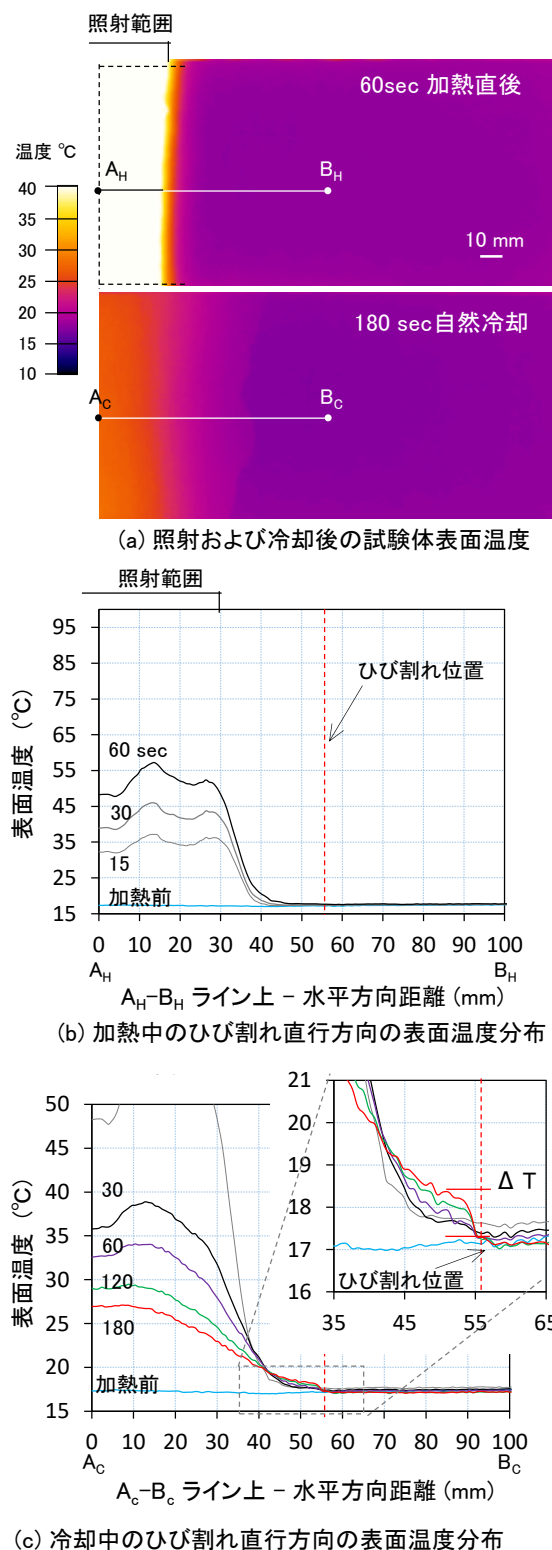
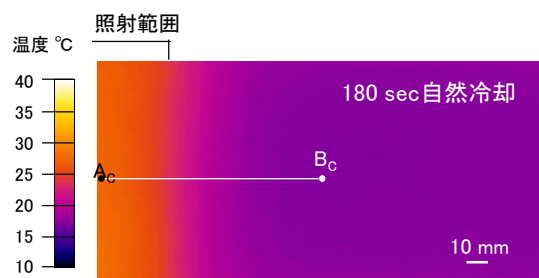
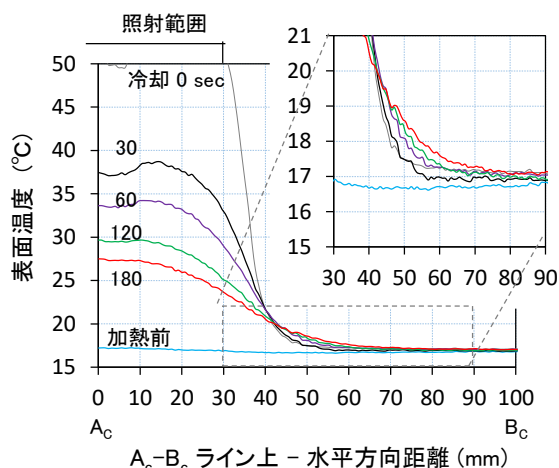


図-3 照射部より外側25mmにひび割れが位置する場合の試験結果(表面仕上なし、ひび割れ幅0.5mm)

た試験体ではおよそ 80°C 程度まで上昇した。これは、ウレタンの方が熱伝導率が小さいために表面付近に蓄熱されているためだと思われる。ただし、60 秒間の加熱では防水層なしの試験体と同様、ひび割れを境に照射側と非照射側での温度差は生じなかったが、冷却することで徐々に温度差が生じ 180 秒で 0.6°C の温度差となった。ここで、ひび割れより 2.4 mm 間隔でそれぞれ照射側、非



(a) 照射後180秒冷却後の試験体表面温度

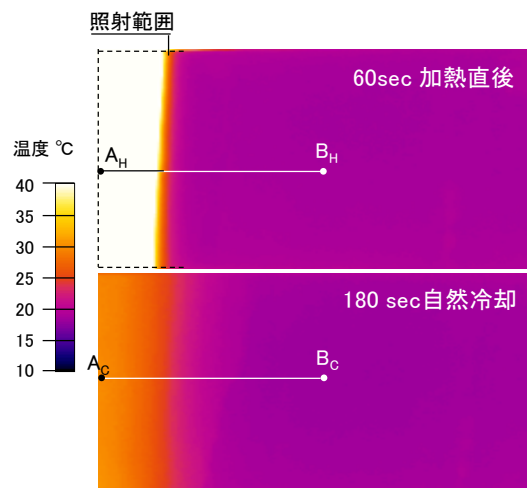


(b) 冷却中のひび割れ直行方向の表面温度分布

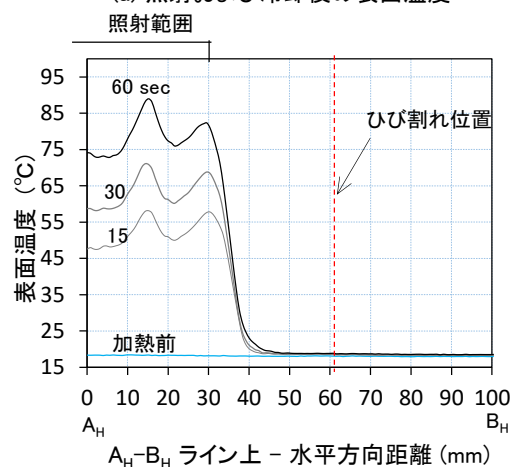
図-4 表面仕上とひび割れの無い試験体の試験結果

照射側 3 点ずつ最大 7.2 mm の位置までの温度の経時変化を図-6 に示す。先に述べた通り、照射期間 60 秒の間では照射光端部より外側におよそ 25 mm の距離にあるひび割れまで熱はほとんど到達しておらず 1°C 程度の上昇温度であった。また、ひび割れを境に非照射側の位置では照射終了後にわずかに温度が低下しその後は温度がほとんど変化していない。一方で、ひび割れから照射側では、照射終了後の上昇温度はほぼ同程度であったが、冷却中にも温度の上昇がみられた。これは照射時にコンクリートおよび防水層が蓄えた熱が伝導したためであると思われる。この熱伝導が生じている際、ひび割れ内の空気が断熱材のように作用し、ひび割れを境界に照射側から非照射側には熱が伝わらず、冷却中で両者の温度差が徐々に大きくなったものと思われる。

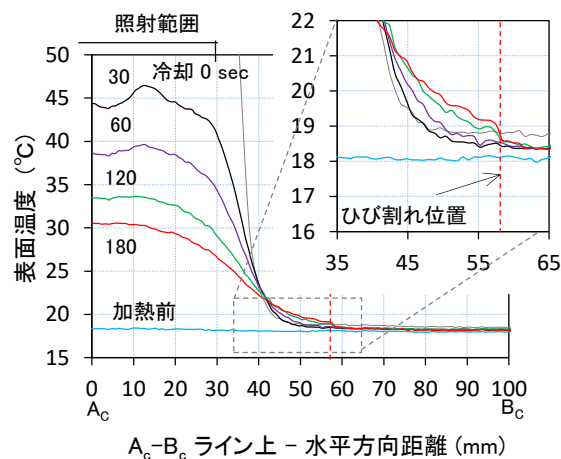
同試験体に対して、照射光端部より外側におよそ 50 mm の距離にひび割れが位置するようにハロゲンランプを設置して 60 秒照射後 180 秒自然冷却した時の結果について図-7 に示す。冷却後も熱がひび割れ位置までほとんど伝わらず、温度差よりひび割れ位置を推定することは難しかった。今回行った実験条件下で、ひび割れを判定可能な照射光端部からひび割れまでの距離の限界は、温度分布から推定すると 30 mm 程度であり、実現場での応用について、熱源の強度や距離など今後検討する必要がある。なお、本研究では以降の試験条件としては、



(a) 照射および冷却後の表面温度



(b) 加熱中のひび割れ直行方向の表面温度分布



(c) 冷却中のひび割れ直行方向の表面温度分布

図-5 照射部より外側25mmにひび割れが位置する場合の試験結果 (ウレタン1.0mm, ひび割れ幅0.5mm)

照射光端部より外側におよそ 25 mm の距離にひび割れが位置するようにハロゲンランプを設置して 60 秒照射後 180 秒自然冷却することとした。

防水材の厚さの影響をみるため、ウレタン系塗膜防水材を 2.0 mm 施工したコンクリートに、0.5 mm のひび割れを発生させた試験体の測定結果について、まとめて図

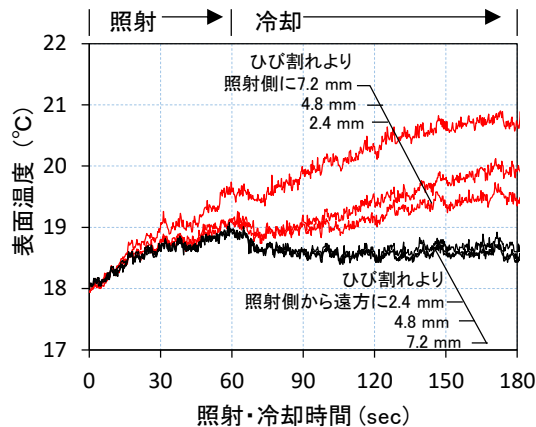


図-6 ひび割れ近傍部の温度の経時変化

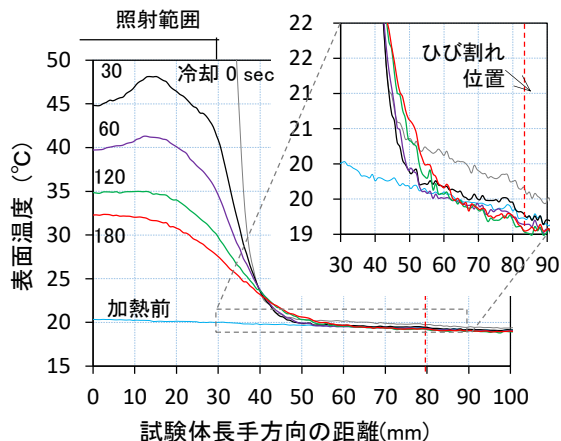


図-7 照射部より外側50mmにひび割れが位置する場合の試験結果 (ウレタン1.0mm, ひび割れ幅0.5mm)

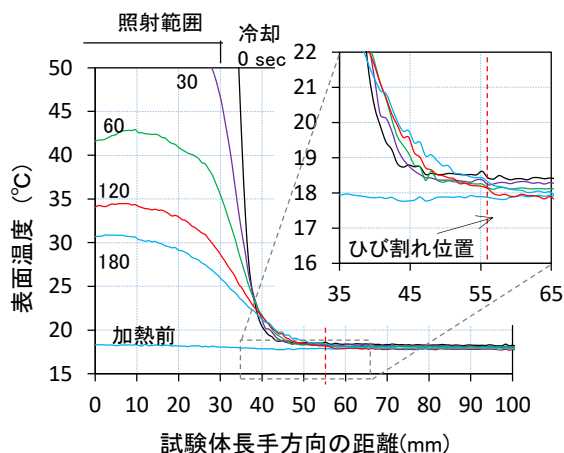


図-8 照射部より外側25mmにひび割れが位置する場合の試験結果 (ウレタン2.0mm, ひび割れ幅0.5mm)

図-8 に示す。ひび割れを境界に照射側と非照射側での温度差はほとんどみられなかった。ここで、ひび割れ近傍部の温度差を、塗膜の有無と厚さの違いごとに冷却時間でまとめて図-9 に示す。ウレタンが施工された試験体の方が、コンクリート単体の試験体よりも照射範囲の温度上昇は大きくなったが、ひび割れを境界に照射側と非照射側での温度差は小さくなった。また、塗膜厚さの厚いものほど小さくなった。これは、ウレタンの方が熱伝

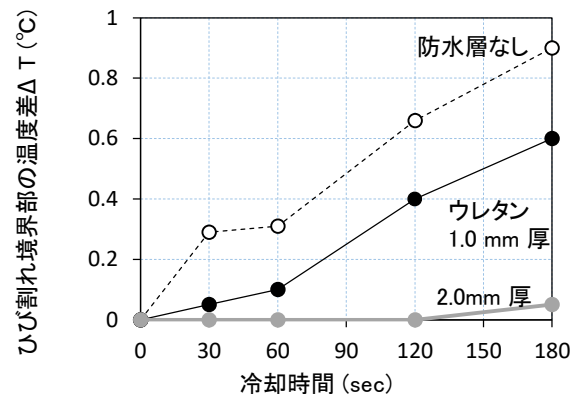


図-9 ひび割れ境界部の温度差と防水層の厚さの関係 (全てひび割れ幅0.5mm)

導率が小さいため、下面にあるコンクリートとひび割れの熱の影響が見えにくくなっているためと思われる。

3.3 コンクリートのひび割れ幅の影響

ウレタン系塗膜防水材を 1.0 mm 施工したコンクリートに、0.2, 1.0 mm 幅のひび割れを発生させた試験体の試験結果をそれぞれ図-10, 11 に示す。ひび割れ幅が 1.0 mm の試験体は 0.5 mm の場合とほぼ同様の結果が得られたが、ひび割れ幅が 0.2 mm の試験体ではひび割れを境界に照射側と非照射側の温度差は小さくなり、180 秒の冷却時間でも 0.3°C 程度であった。なお今回用いた試験装置で得られた温度分布画像からひび割れ位置を推定するには 0.2°C 程度の温度差が必要であり、ウレタンゴム系塗膜防水材の塗膜厚さが 1.0 mm の場合、幅 0.2 mm 以上ひび割れの位置の特定が可能であると言える。

3.4 コンクリートのひび割れ補修の影響

コンクリートに幅 0.5 mm のひび割れを発生させた後にエポキシ樹脂を注入してから養生し、ウレタン系塗膜防水材を 1.0 mm 施工した試験体の試験結果を図-12 に示す。エポキシ樹脂が注入されることにより、空気と比べて若干熱伝導率が高くなったためか、ひび割れを境界に照射側と非照射側での温度差は、エポキシ樹脂を注入していない場合と比べて小さい値となったが、温度差はおおよそ 0.5°C 程度生じており、表面の温度分布画像よりエポキシ樹脂が注入されたひび割れの位置についても推定が可能であった。なお、エポキシ注入した試験体については、先の試験体のようにひび割れによる防水材の伸長変形はしておらず滑らかな表面形状で、目視ではひび割れ位置を把握することは出来ない状態であった。

3.5 表面仕上材料の種類の影響

ポリマーセメント系塗膜防水材 1.0 mm, 下地ひび割れ幅 0.5 mm の場合について試験を行った結果を図-13 に示す。ポリマーセメント系塗膜防水材の方がウレタン系塗膜防水層よりも熱伝導率は大きく、かつ表面の光沢度も低いいため、照射位置の表面温度は 100°C 程度と高温と

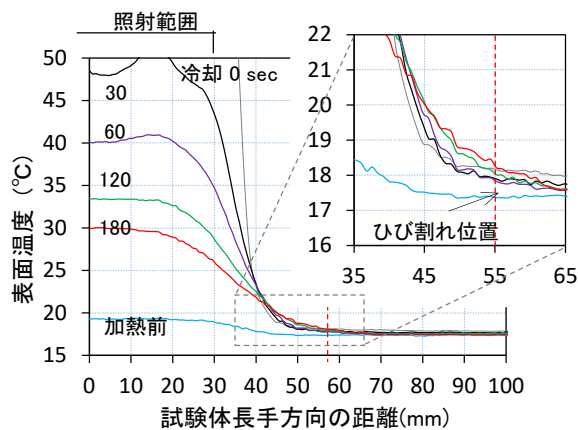


図-10 照射部より外側25mmにひび割れが位置する場合の試験結果(ウレタン1.0mm, ひび割れ幅0.2mm)

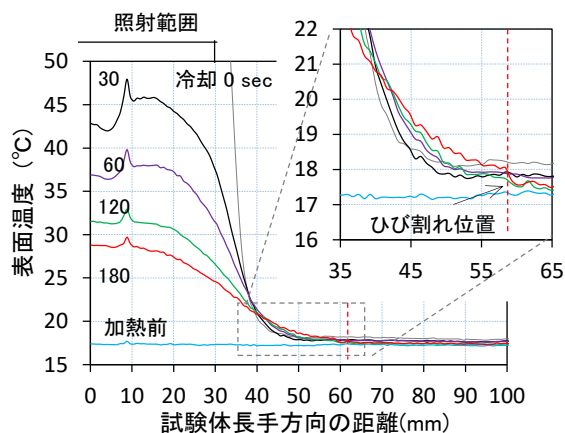


図-11 照射部より外側25mmにひび割れが位置する場合の試験結果(ウレタン1.0mm, ひび割れ幅1.0mm)

なった。また、境界に照射側と非照射側での温度差も1.0℃以上と大きく表れ、表面温度分布画像からも非常に精度よくひび割れの位置が推定できた。

4. 結論

アクティブサーモグラフィ法を用いた、表面仕上材料下のコンクリートに垂直に発生したひび割れの位置特定法について提案した。

- 1) 密着仕様のウレタンゴム系およびポリマーセメント系塗膜防水材を対象にした場合、熱源の照射位置より30mm程度と近傍にあるひび割れに限定されるが、塗膜厚さ1.0mm程度、ひび割れ幅0.2～1.0mmの範囲のものの位置を特定が可能となった。この時、熱伝導率の大きいポリマーセメントの方が判定精度は高かった。
- 2) ひび割れ幅0.5mm程度と大きい場合、表面仕上材が施される前に、エポキシ樹脂が注入された状態でも、そのひび割れの位置の特定が可能であった。

謝辞 本研究は、JCI 四国支部、次世代のコンクリート構造物の劣化診断に関する特別研究委員会での成果の一部である。

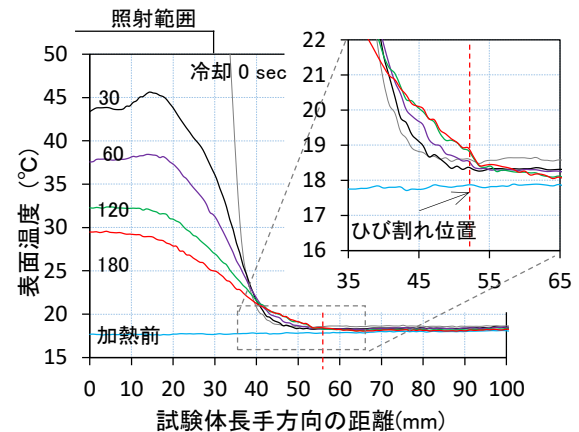


図-12 エポキシ樹脂によるひび割れ補修の影響(ウレタン1.0mm, ひび割れ幅0.5mm)

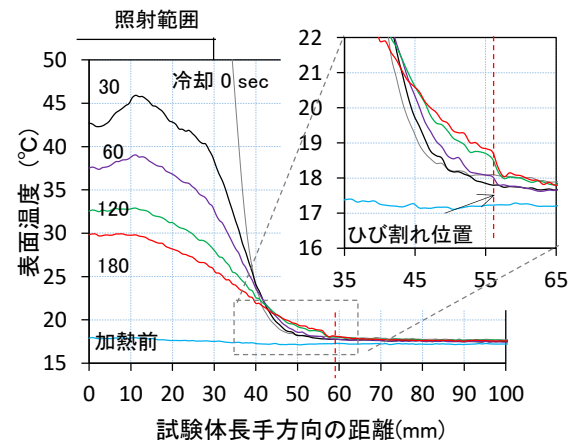


図-13 表面仕上材料の種類の影響(ポリマーセメント1.0mm, ひび割れ幅0.5mm)

参考文献

- 1) 渡辺 健, 久保 陽平, 二羽 淳一郎, 横田 弘: AE法を用いたコンクリート床版のひび割れ診断に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1723-1728, 2005
- 2) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 田中洋輔, 皆木卓士: 鉄筋コンクリート管に生じるひび割れの方向性と弾性波伝播特性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1961-1966, 2006
- 3) 中村繁貴, 高谷哲, 前田良文, 山本貴士, 宮川豊章: 赤外線サーモグラフィによるかぶりコンクリートはく落予測手法, 土木学会論文集, Vol.69, No.4, pp.450-461, 2013
- 4) 高羅信彦, 魚本健人: 温度解析に基づいたサーモグラフィ法によるコンクリート中の空隙および斜めひび割れの検査方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.613-618, 2001
- 5) 関俊力, 山田和夫: 赤外線サーモグラフィ法によるコンクリートの内部評価に関する研究: コンクリートの熱伝導特性と内部評価の推定精度, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.681, pp.1605-1612, 2012