

論文 赤外線サーモグラフィを用いた熱応答解析に基づく内部欠陥推定に関する研究

中村 士郎^{*1}・阪上 隆英^{*2}・原田 修輔^{*3}・久保 司郎^{*4}

要旨：コンクリート検査面を強制加熱し，赤外線サーモグラフィにより撮影した時系列表面温度データから欠陥深さを精度良く推定するデータ解析方法に関する研究を行った。断熱挙動を示す欠陥の存在及びその深さに応じた表面熱応答の変化は，熱応答のフーリエ級数係数により抽出可能であった。欠陥寸法の影響の小さい深さ推定パラメータとして周辺健全部との位相差が最大となる処理期間を提案し，実構造物の欠陥形状を模した模擬欠陥の検査結果により妥当性を検証した。

キーワード：赤外線サーモグラフィ，非破壊検査，熱応答，フーリエ変換，はく離深さ

1. 緒言

近年コンクリート構造物の耐久性への関心が高まり，効率的な維持管理を実現するための非破壊検査手法に関する研究が盛んに行われている。中でも赤外線サーモグラフィにより表面近傍の健全性を診断する手法（以下，赤外線法）は，大規模なコンクリート構造物を非破壊・非接触で検査可能であり，その効率の良さや安全性から従来良く用いられる建築物の外壁診断に加えて土木構造物への適用事例も増加している。しかし，日射などのパッシブ環境のもと，欠陥の有無の概略調査を目的とした用途が多く，損傷原因の調査や補修の要否などの診断を行うためには必要に応じて超音波法，弾性波法による欠陥深さの測定，はつりなどを別途行う必要があるのが現状である。

筆者らは強制加熱を行うアクティブ赤外線サーモグラフィ法により，検出欠陥の3次元形状を推定する方法を検討している。強制加熱後の表面熱応答と参照信号の同期処理を用いたロックイン赤外線サーモグラフィにより，参照信号に対する表面熱応答の位相遅れから欠陥深さを

推定できることが明らかになっている¹⁾。しかし，位相遅れと欠陥深さの関係を定式化できておらず，また，1つの検査面に対して複数回の加熱-冷却過程の測定を要するため検査効率に劣るといった問題点が残されていた。本研究では，検査時間を短縮すべく，1回の加熱-冷却過程の測定データに適用が可能な既報²⁾のデータ処理方法を用いて，簡便な欠陥深さの推定方法を提案することを目的とした。解析による検討から欠陥深さを定式化できる推定パラメータを検討し，実欠陥を想定した模擬欠陥試験体を用いた検証を行った。

2. 研究方法

2.1 検査方法

本研究における赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート中の欠陥の検出及び深さの推定では，対象面に強制加熱を行い，その後の冷却過程の時系列データを撮影する。この時系列データは図-1に示すような $I \times J$ ピクセルにおいて得られる冷却期間 T_0 分間の時間-表面温度曲線（以下，温度変化曲線）から成る。各ピクセル

*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科機械工学科助教授 工博 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所副所長 工修 (正会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科機械工学科教授 工博

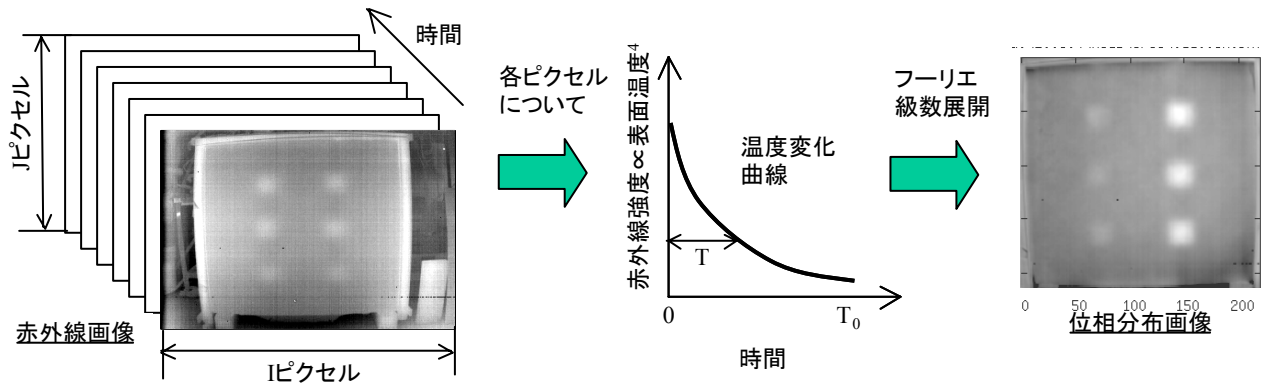


図-1 赤外線データを用いた熱応答処理方法

の温度変化曲線に対してそれぞれ式(1)～式(4)の処理を行い、フーリエ級数係数を算出する。

n次のcos成分

$$An(x) = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^T f(t, x) \times \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (1)$$

n次のsin成分

$$Bn(x) = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^T f(t, x) \times \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \quad (2)$$

$$\text{振幅 } Rn(x) = \sqrt{An^2 + Bn^2} \quad (3)$$

$$\text{位相 } \theta n(x) = \tan^{-1}\left(\frac{Bn}{An}\right) \quad (4)$$

t:経過時間 x:位置 T:処理期間

f(t, x): 表面接点温度データ

フーリエ級数展開するデータの処理範囲 T が小さいほど冷却初期の、大きいほど長期の温度変化曲線の特徴がフーリエ級数に反映されると考えられる。温度変化曲線に欠陥の影響が現れる時間は欠陥の深さにより変化し、表面に近く深さの小さい欠陥ほど早期に大きな影響を示す。したがって、フーリエ級数係数とデータの処理範囲 T の関係には欠陥の深さ情報が含まれていることを既報²⁾で報告している。本研究ではフーリエ級数係数のうち、1 次の位相値 θ_1 を用いて欠陥深さを推定する方法を検討した。

2.2 温度解析による検討

温度解析により得られた温度変化曲線を用いて欠陥深さ、寸法及び形状が位相値の挙動に与える影響を調べた。解析モデルを図-2 に、解析

に用いた材料物性を表-1 に示す。表面に対して平行な平欠陥 ($\alpha=90^\circ$) と鉄筋腐食に起因して面外方向から 70° ³⁾ で表面付近(5mm)まで進展したはく離を簡略化した斜め欠陥 ($\alpha=70^\circ$) の 2 種類を含むコンクリートの 1/2 対称モデルを想定している。解析は 2 次元 FEM 解析で行い、表面を除く 5 面を断熱境界とした。表面の熱伝達境界では最初の 2 分間が外気温 70°C の強制加熱過程、以後 60 分までは 20°C の自然冷却過程とし、表面の 91 接点の温度変化曲線を得た。

2.3 模擬欠陥試験体による実験的検討

温度解析と同様の平欠陥及び斜め欠陥をポリエチレンシートにより模擬したコンクリート試験体の測定を行った。試験体の概要を図-3 に示す。深さ 20, 30, 50, 100mm の表面に平行な模

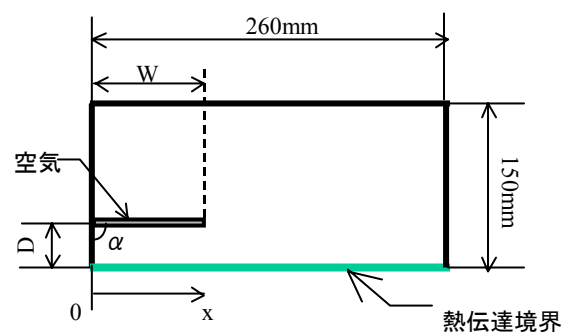


図-2 温度解析モデル

表-1 解析に用いた熱特性⁴⁾

熱伝導率 [W/m/K]	コンクリート	1.5
	空気	0.04
密度 [kg/m ³]	コンクリート	2300
	空気	20
比熱 [J/kg/K]	コンクリート	1050
	空気	1250
表面熱伝達率 [W/m ² /K]		20

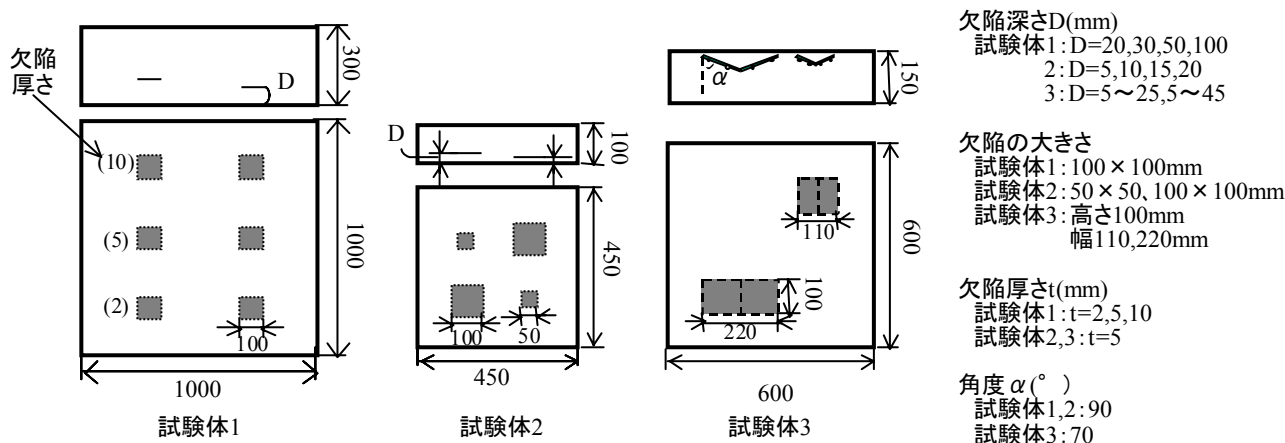


図-3 模擬欠陥試験体

擬欠陥を含む大型の試験体 1、深さ 5、10、15、20mm の表面に平行な模擬欠陥を含む小型の試験体 2、温度解析に対応した $\alpha=70^{\circ}$ の斜め模擬欠陥を含む中型の試験体 3 の 3 種類を用いた。3 種類の試験体の作製時期は異なるが、セメント種類、骨材などの材料及び水セメント比は同一である。また、試験体 2 は小型でごく表層部に模擬欠陥を配置するためにモルタルで作製し、試験体 1、3 は最大骨材寸法 20mm のコンクリートとした。模擬欠陥は鉄筋に結束し、鉄筋を型枠に固定してモルタル及びコンクリートを打設することによりコンクリート内部に埋設した。

強制加熱には灯油焚きの放射式直火型ヒータ(熱出力 38.8kW)を使用し、表面から 50cm 離して 2 分間の加熱を行った。加熱時の表面近傍の温度は最大 70℃程度であることを確認している。赤外線画像の測定はマイクロボロメータ素子を搭載する非冷却型の赤外線カメラ(320×240 画素、NETD 値 0.1℃)を用いて 2 秒間隔で行った。

3. フーリエ係数を用いた欠陥深さ推定

3.1 フーリエ係数の特性

表面に対して平行で深さが 20mm の模擬欠陥を含む解析モデルと図-3 の試験体 2 の健全部及び欠陥部中心の温度変化曲線を図-4 に示す。図-4(b)の赤外線カメラの測定結果では、試験体に近接させたヒータが障害となるため加熱時のデータは取得していない。解析結果では縦軸が表面温度、実験結果では赤外線強度値と次元が異

なるものの、いずれも欠陥部が健全部に比べて高温となり、温度変化曲線の形状も同様であり、解析の妥当性が確認された。次に、解析と実験で得られた温度変化曲線のフーリエ級数係数をそれぞれ算出した。欠陥、健全部を含む直線上の位相の算出結果の一例を図-5 に示す。図-5 は算出した位相値を健全部の値で差し引き位相差として表している。解析値、実験値いずれも健全部と欠陥部の間に位相差が生じており、欠陥を検出することが可能である。図-5 にはデータの処理期間を $T=3.6, 7.3, 14.8, 29.5$ 分とした位相差を示しているが、解析、実験結果ともに欠陥深

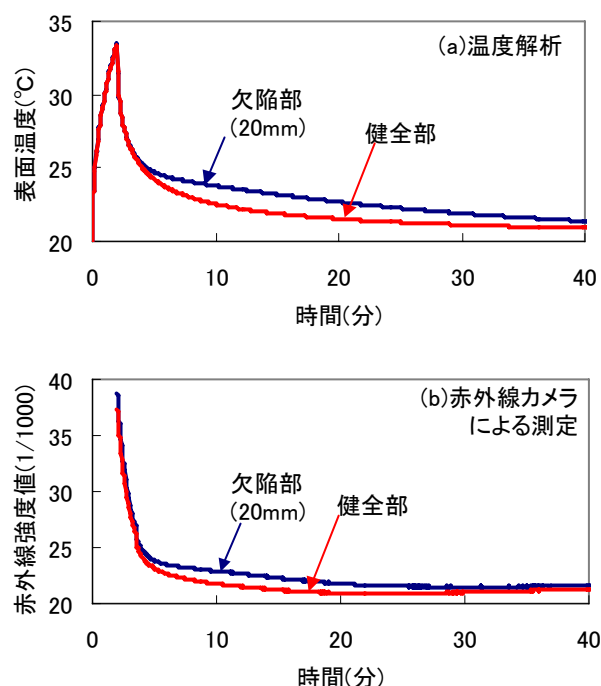
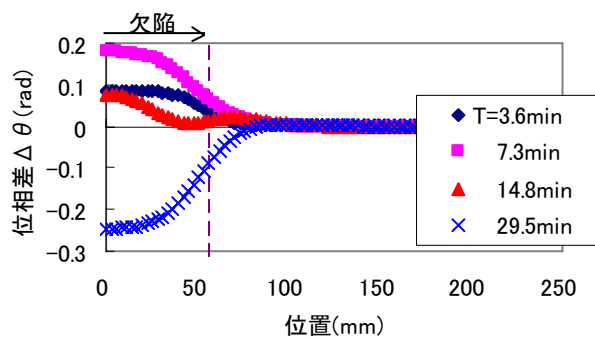
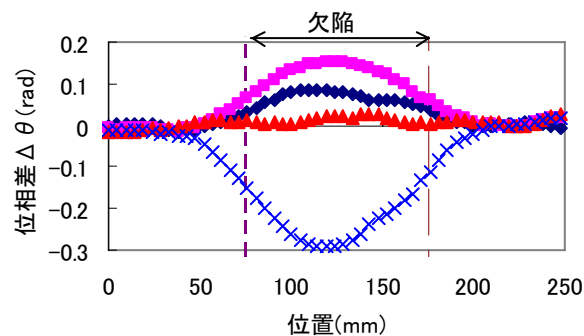


図-4 温度変化曲線の一例(深さ20mm平欠陥)



(a)温度解析



(b)赤外線カメラを用いた実験

図-5 位相差の算出結果(深さ20mm平欠陥、処理期間T=3.6,7.3,14.8,29.5分)

さが 20mm の場合、処理期間 T の増加により $T=7.3$ 分まで位相差は増加し以後は減少する傾向にあった。このように欠陥部に生じる位相差が処理期間に伴い変化するの、健全部と欠陥部の温度変化曲線の違いによるものと考えられる。したがって、処理期間と位相差の関係は欠陥の深さ、大きさにも影響されると考えられ、位相値から欠陥深さを推定する方法の検討を行う。

3.2 深さ推定方法の検討

欠陥深さ、寸法が位相差と処理期間の関係に与える影響を解析結果より検討した。2次元解析モデル中の表面に平行な模擬欠陥の幅 W と深さ D の比 W/D をパラメータとし、 $D=20, 40, 60\text{mm}$ における処理期間 T と位相差 $\Delta\theta$ の関係を整理した結果を図-6 に示す。位相差は図-2 における $x=0, 260\text{mm}$ の地点、つまり、欠陥中心部と健全部端の位相値の差で表し、処理期間 T を 1 分ずつ変化させて算出した。図-6 より、前節の深さ 20mm の結果と同様、欠陥深さ、幅深さ比に関わらず処理周期の増加とともに位相差が増大して最大値を示した。欠陥深さが大きいほど、位相差の最大値 $\Delta\theta_p$ は減少し、その時の処理期間 T_p (以下、ピーク処理期間) は大きくなった。また、幅深さ比 W/D が小さいほど位相差の最大値 $\Delta\theta_p$ は減少し、ピーク処理期間 T_p は若干減少した。位相差の最大値 $\Delta\theta_p$ は欠陥深さだけでなく、幅深さ比によっても大きく変化するため、任意の深さ、寸法の欠陥の深さを推定するのは困難であると考えられる。一方、ピーク処理期間 T_p に

対しては欠陥の深さの影響が支配的であると判断され、図-7 に示すピーク処理期間 T_p と欠陥深さの関係を表(5)のように定式化した。

$$T_p = 0.050 \times D^{1.69} \quad (5)$$

T_p : ピーク処理期間(分)、 D : 欠陥深さ(mm)

定式化には深さが 5, 10, 20, 40, 60mm で幅深さ比 W/D が 0.7, 1.4, 2.7 の解析モデルで得られた結果を用いた。図-7 に示すように幅深さ比の広い範囲で式(5)が適用可能であると考えられる。一方、幅深さ比 W/D が 0.7 より小さくなると欠陥部に現れる位相差が小さく、処理周期と位相差の関係におけるピークも判別が困難であった。幅深さ比の小さい欠陥では、コンクリート内部の欠陥地点に生じた温度差が面内熱拡散の影響により表面ではほとんど消失してしまうため、従来の赤外線法においても検出は困難であ

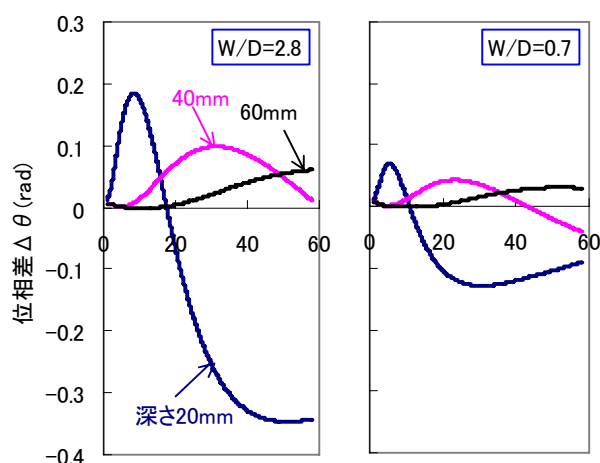


図-6 欠陥部位相差と処理期間の関係(温度解析)

った。熱応答解析による位相差を用いた本手法においても、幅深さ比の小さい欠陥の検出及び深さの推定は難しいと考えられる。

3.3 深さ推定結果

面外方向との角度 $\alpha = 70^\circ$ で最大欠陥深さを 65mm とした斜め欠陥モデルの解析結果からピーク処理期間 T_p を算出し、式(5)による深さ推定を行った。推定結果と真値の関係を図-8 に示す。深さが 5mm から 65mm までの広い範囲で良好に推定することが可能であった。深さの推定値が階段状に変化するのピーク処理期間の算出に伴う誤差のためであり、処理期間 T を細かく変化させるほどこの誤差は縮小する。図-8 の推定では各接点の温度変化曲線に対して、処理期間が小さい範囲ではその変化刻みを細かく (0.5 分)、大きい範囲では荒く (5 分) 算出してピークを算出したが、式(5)に代入すると推定分解能は最大で 5mm 程度と実用上十分なものと考えられる。

次に、ピーク処理期間 T_p を用いた欠陥の深さ推定方法の妥当性を実験データで検証した。平欠陥の実験データにおけるピーク処理周期と欠陥深さの関係を図-9 に示す。解析データの場合とほぼ同様の傾向を示したが、推定式の係数は若干異なり式(6)のようになった。

$$T_p = 0.029 \times D^{1.80} \quad (6)$$

図-9 には欠陥寸法 $100 \times 100\text{mm}$ 、模擬欠陥のポリエチレンシートの厚さが 5mm で欠陥深さが 5, 10, 15, 20, 30, 50mm のデータを用いている。欠陥の幅深さ比は、対称性を考慮すると寸法 $100 \times 100\text{mm}$ 、深さ 50mm の場合が最小で $W/D=1$ となり、式(5)の算出に用いた解析データの幅深さ比の最小値 0.7 とほぼ同等である。欠陥深さとピーク処理期間の関係が解析結果と実験結果で異なった原因として、欠陥部やコンクリートの熱物性や加熱条件が解析と実験では完全には一致しないこと、2次元の熱伝導現象を対象とした解析と 3次元の実験では面内熱伝導の影響が異なることなどが考えられる。

最大深さ 45mm の模擬斜め欠陥を含む図-3 の

試験体 3 の測定結果を用いて、式(5)、(6)による深さ推定方法の検証を行った。位相差の分布画像の一例を図-10 に示す。左下の深さ 5~45mm、右上の深さ 5~25mm の模擬斜め欠陥部に位相差が生じ欠陥の平面配置は容易に認識可能である。画像左下の深さが 5~45mm の欠陥に着目すると、処理期間 $T=3.3$ 分の位相差画像では、深さの小さい欠陥端部は黒い、負の位相差を示して既にピーク最大周期を過ぎていることがわかる。一方、 $T=10$ 分の位相差画像では、欠陥深さの大き

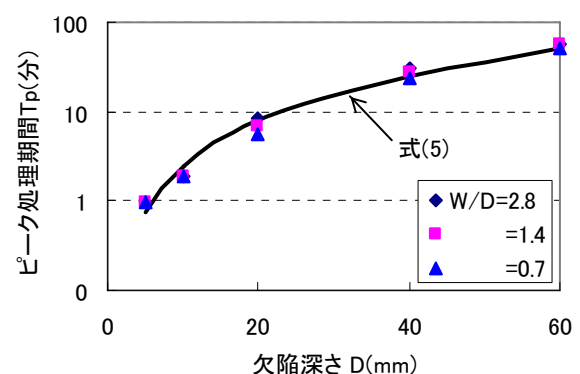


図-7 欠陥深さとピーク処理期間の関係(温度解析)

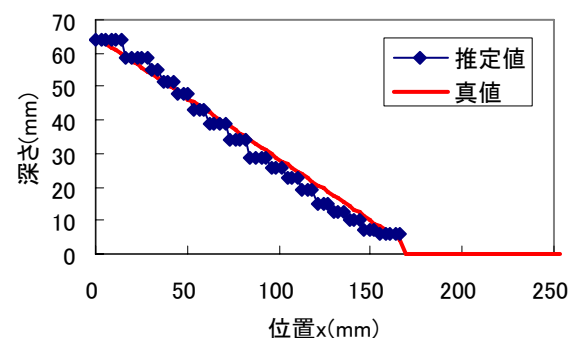


図-8 斜め解析モデルの深さ推定結果

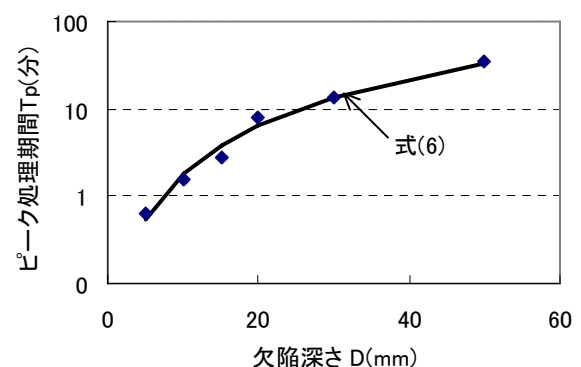


図-9 欠陥深さとピーク処理期間の関係(実験)

い欠陥中心付近でも白い、正の位相差が若干生じている。処理期間を更に長くすると中心部付近の位相差は徐々に増加する傾向であった。次に、欠陥を横切り深さが連続的に変化する図-10中の点線で示したラインの各画素に関する深さの推定結果を図-11に示す。表面近傍から深さが漸増する対称形状の推定結果は実際の模擬欠陥形状と良く一致している。しかし、欠陥中心部に近づき深さが増すほど推定値は真値に比べて小さく、深さを過小に推定する傾向であった。実験データに基づく式(6)を用いた場合、解析データによる式(5)に比べて若干真値に近づくものの、45mmの最深部に対して推定値は34mmと約10mm小さい。今回実験を行った斜め欠陥の形状では、深さが最大となる欠陥中心部に向かい面内熱拡散により熱が集まる点が平欠陥と異なる。これが、欠陥中心部に近づくほど深さを過小推定した原因の1つと考えられるが、同様の面内熱拡散が生じる斜め欠陥解析モデルにおける図-8の推定結果では欠陥の深い地点まで良好な推定結果が得られている。実験における推定誤差が解析の場合に比べて大きくなった原因は今後の検討課題であり、欠陥形状を変化させたデータによる検証を引き続き行い、実測定での精度向上方法を検討する予定である。しかし、本研究で提案した温度変化曲線の1次の位相値に関するピーク処理周期により、単純な実験式から任意の欠陥の深さ分布を定量化できる可能性は示したものと考えられる。

4. 結言

強制加熱後の温度変化曲線を赤外線カメラで測定し、フーリエ変換に基づく位相値から欠陥の深さを定量化するデータ処理方法に関する検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 温度変化曲線の1次の位相値により欠陥部の抽出が可能であり、データの処理期間を変化させると健全-欠陥部間の位相差は変化する。
- (2) コンクリート表面に平行な欠陥モデルにお

いて、欠陥の幅深さ比が0.7以上の範囲では、欠陥の大きさに関わらず位相差が最大値を示すピーク処理周期と欠陥深さを累乗式で表すことが可能である。

- (3) 上記の平欠陥で得られた関係式を用いて、任意の形状の欠陥深さ分布を推定できる可能性がある。

参考文献

- 1) 中村士郎, 阪上隆英, 久保司郎, 鈴木宏信: ロックイン赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査, セメントコンクリート論文集, No.57, pp.514-520, 2003
- 2) 中村士郎, 阪上隆英, 久保司郎: 改良ロックイン赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1857-1862, 2004
- 3) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532, pp.159-163, 1996
- 4) 日本機械学会: 伝熱ハンドブック, 2001

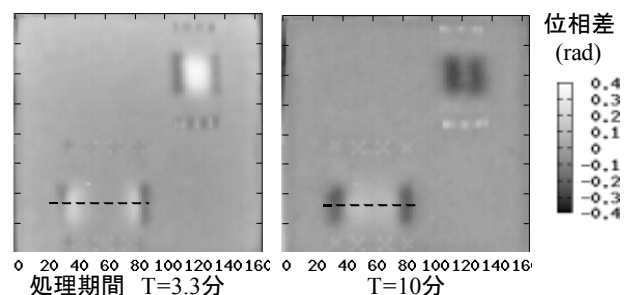


図-10 位相差の分布画像(試験体3)

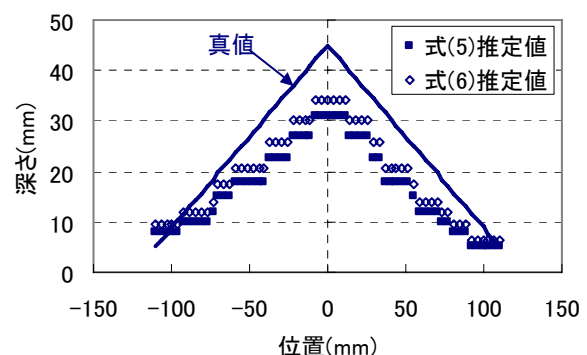


図-11 斜め欠陥試験体の深さ推定結果(実験)