

熱赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート構造物内部の欠陥の評価方法に関する基礎的考察

九州大学大学院 学生会員 ○渡邊 達郎  
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 目的

近年、老朽化した RC 構造物における被りコンクリートの剥離事故などの多発にとともに、老朽化した構造物に対する適切な維持管理の重要性が認識されると同時に非破壊検査法への関心が高まっている。非破壊検査法の中の一つに健全部と欠陥部の熱伝導率の差を利用したサーモグラフィ法がある。サーモグラフィ法は、健全部と欠陥部の表面温度に有意な差が生じた場合に、欠陥範囲を視覚的に容易に判断できる特長を有しているが、コンクリート表面の温度は、欠陥の状態だけでなく周囲環境の影響を大きく受けるため、サーモグラフィによるデータから欠陥の状態を推定することは困難な場合もある。そこで本研究では、まず初めに模擬欠陥として発泡スチロールを用いた供試体による簡易実験と有限要素法を用いた解析の結果を比較し、数値解析の定量的精度の評価を行った。次に、四季の季節別に一日の気温変化に関する統計データを利用し、有限要素解析によるサーモグラフィ試験のシミュレーションを行い、現場調査に適した季節、時間帯、気象状態について考察した。

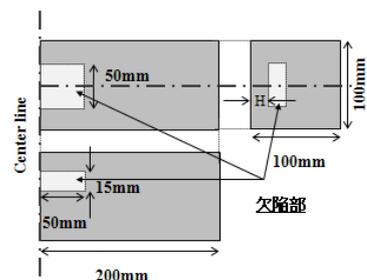


図-1 供試体の概略図

2. 内容

2.1 供試体実験

今回の実験では、内部欠陥を模擬した発泡スチロール製の板を 3 種類の深さ (H=5, 10, 15 mm) に配置した矩形型モルタル供試体 (図-1) を製作した。そして、その供試体から 15cm 離れた位置から、ドライヤーを用いて均等に加熱 (加熱時間, 10, 20, 40 秒) を行い、サーモグラフィを用いて欠陥部と健全部の表面温度を、加熱直後から 10 秒間隔で 10 分間測定した。なお、供試体には加熱面以外からの熱の出入りを無くすために、断熱材として段ボールを用いて加熱面以外を被覆した。

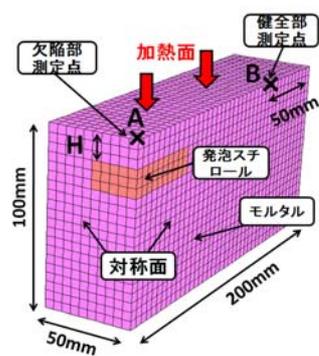


図-2 解析モデル (No. 1)

2.2 熱伝導解析

2.2.1 供試体実験の解析シミュレーション

供試体実験に対する解析シミュレーションでは、実験で用いた矩形型供試体の対称性を利用して、図-2 に示すような 1/4 モデルで解析を行った。境界条件について、加熱面は空気を媒体とした熱伝達境界とし、他の境界面は断熱境界とした。解析に使用した供試体の材料定数、熱伝達率、周囲温度は一定の値を仮定し、表-1、表-2 に示すような値を用いた。

表-1 供試体の材料定数

	モルタル	発泡スチロール
熱伝導率(W/m・K)	3	0.035
比熱(kJ/kg・K)	1.373	1.13
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2207	20

表-2 熱伝達率と周囲温度

	加熱時	冷却時
周囲温度(°C)	35	7
熱伝達率(W/m <sup>2</sup> ・K)	151	30

2.2.2 サーモグラフィ検査に適した時間帯の検討

サーモグラフィ検査に適した時間帯の検討には、図-3 に示す解析モデルに、2.2.1 と同様の材料定数を用い、熱伝達率には常に 3.0 (W/m<sup>2</sup>・K) を仮定した。また加熱には季節ごとの 1 日の快晴時の気温や日射条件 (熱流束) の相違を考慮し、気温の変化のみを考慮した日射なしと気温の変化に加えて日射の影響を考慮した日射有りの 2 通りの場合について、検査に適した時間帯の検討を行った。なお、解析条件に用いた気象データには、気象庁による統計的なデータを採用した。

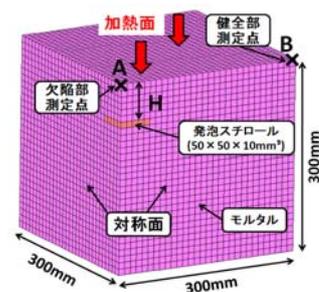


図-3 解析モデル (No. 2)

キーワード サーモグラフィ, コンクリート, 熱伝導, 非破壊検査

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 電話 : 092-802-3370

2.2.3 日射量と判別可能な欠陥深さの関係

サーモグラフィ法において、どの程度の日射があればどの程度の深さの欠陥を判別可能か、両者の関係について数値解析による検討を試みた。解析モデルは図-3に示す。境界条件、材料定数、熱伝達率は2.2.2と同様である。

2.3 実験結果と解析の比較および検証

実験結果と解析の比較には、欠陥部と健全部の表面温度を測定し、その時間変化を用いた。表面温度の測定点には実験、解析ともに図-2におけるA点を欠陥部、B点を健全部として用いた。表面温度の時間変化の一例を図-4に示す。図-4より、実験値、解析値ともに同等な時間変化をなし、サーモグラフィ検査を解析によって再現可能であることが確認された。また、加熱後には健全部が低温を、欠陥部が高温を示しており、温度差に明確な相違が生じていることから、赤外線サーモグラフィを用いた欠陥判別の有効性が数値計算上でも確認された。次に、欠陥深さと健全部と欠陥部の最大温度差の関係を図-5に実験値、解析値ともに示す。図-5より、実験、解析ともに欠陥深さが大きくなるほど、また加熱時間が短くなるほど最大温度差が小さくなることが確認できた。実験値と解析値には若干の相違が有り、特にH=5mmの供試体は相違が大きいが、これは欠陥部表面に達するひび割れが供試体には生じていたが、その状態の熱伝導条件を有限要素モデルで表現することができなかつたためであると考えられる。

2.4 解析による検査に適した時間帯の検討

検査ケースを昼間と夜間に分け、それぞれで欠陥部(図-3, A点)と健全部(図-3, B点)で得られた温度差がサーモグラフィによって欠陥判別が確実に行える1°C以上を示す時間帯を、当該ケースの中で検査に適している時間とみなした。表-3に日射の有無における昼間と夜間の最大温度差を示す。表-3より、日射なしの場合には温度差が1°C以上を示しているケースが少なく、検査時間の選択が重要であることがわかる。次に、日射有りの条件で、四季別に検査に適した時間帯を検討した結果を図-6に示す。図-6より、検査に適した時間帯は昼間においては季節に関係無く9時から16時頃となり、夜間においては、春から夏では18時から日の出頃まで、秋は18時から1時頃となった。また、冬期の夜間は検査に適していない結果が得られた。時間帯別に評価すると、表-3(日射を受けていた箇所)に示すように、昼間の計測であれば春、夜間計測であれば夏が最大温度差を示すことがわかる。単純に昼間と夜間の適否を比較すると、全ての季節で昼間は夜間に比べ約3倍の最大温度差があり、昼間の方が望ましいことが認められた。

2.5 日射量とかぶりの関係

季節別に健全部と欠陥部の温度差と欠陥深さの関係を図-7に示す。赤外線サーモグラフィによる調査で、温度差が1°Cあれば欠陥判別が確実に行えると仮定すると、最大温度差を示す時間に計測を行えば、1月と10月では50mm、4月と7月では60mmまでの深さまで判別可能である結果が得られた。

3. 結論

本研究で数値解析による赤外線サーモグラフィ試験を再現可能であることが確認された。また、検査に適した時間帯を考察し、一般的な見解(晴天時の日中で日射有りの条件が良い)と同じ結果を得ることを確認した後に、季節別に日射有りの条件下で判別可能な欠陥深さを推定することができた。

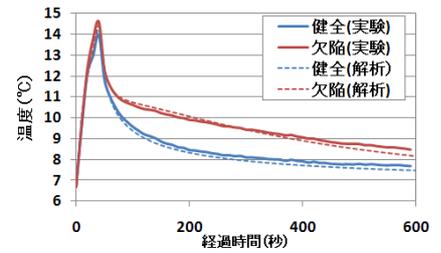


図-4 表面温度の時間変化

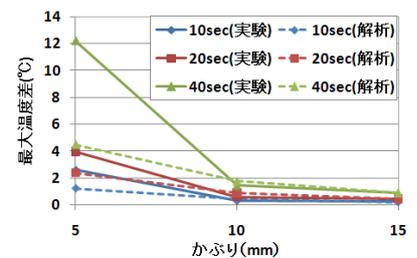


図-5 かぶりと最大温度差

表-3 最大温度差  
上：日射なし 下：日射有り

日射なし	冬(1月)	春(4月)	夏(7月)	秋(10月)
昼間(°C)	0.89	1.00	0.54	0.71
夜間(°C)	-0.49	-0.30	-0.44	-0.37

日射有り	冬(1月)	春(4月)	夏(7月)	秋(10月)
昼間(°C)	3.41	4.94	4.21	3.97
夜間(°C)	-1.01	-1.61	-1.72	-1.32

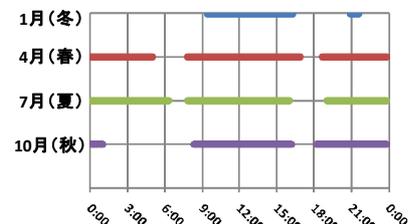


図-6 検査に適した時間帯

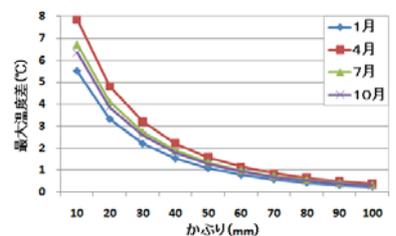


図-7 かぶりと温度差