

論文 逆解析手法を適用したサーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査

勝見 隆*¹・山田 和夫*²・桃木 昌子*³

要旨：本研究では、サーモグラフィー法によるコンクリートの内部評価に対する逆解析手法の適用性を解析的な観点から一連の検討を行った。その結果、本研究で提案した逆解析手法を用いることによって、コンクリート表面の温度分布状況から内部に埋設されている空隙の埋設深さ、厚さおよび大きさを定量的に推定できること、サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査結果の信頼性が格段に向上する可能性があること、などが明らかとなった。

キーワード：サーモグラフィー法、コンクリート、内部評価、逆解析法、有限要素法

1. はじめに

筆者らは、これまでにサーモグラフィー法を適用したコンクリートの内部探査に関する一連の実験的および解析的な検討を行い、その可能性について報告した[1]-[5]。しかし、コンクリートの表面温度の分布状況と内部に存在する介在物との関係は、気象環境などの外的条件が同一であっても、介在物の種類、大きさ、厚さ、埋設深さなどによって複雑に影響を受けるため、計測によって得られる表面温度の情報だけからコンクリートの内部状況を的確に評価することは困難であり、このことがサーモグラフィー法による内部探査の定量的な評価の妨げとなっている。

そのため、本研究では表面温度の分布性状からコンクリート内部の状況を定量的に評価する方法を確立し、サーモグラフィー法をコンクリートの非破壊試験法の一つとして実用化することを目的とした研究の第一段階として、逆解析手法の適用性を数値実験によって検証した。

2. 逆問題の設定および最適化手法

逆問題とは、結果から原因を推定する問題の総称であり、広い意味でいえば得られた計測結果から未知の内部状況を推定しようとする非破壊試験は全て逆問題といえる。本研究では、計測結果として与えられるコンクリートの表面温度分布から、内部に存在する空隙を定量的に評価する問題を取り扱う。すなわち、既知量および未知量を、それぞれ以下のように設定した。

既知量：表面温度（温度データ数は多いほど良いが、最低空隙部表面と健全部表面との2箇所の温度が必要）、構成材料の熱特性（密度、比熱、熱伝導率、熱伝達率、日射吸収率）、気象環境などの外的条件（内・外気温、日射量）

未知量：空隙の厚さ、大きさ、埋設深さ

上記の逆問題は、具体的には式(1)に示すようなコンクリートの表面温度に関する計測結果（ $eTemp(i)$ ）と推定結果（ $aTemp(i)$ ）との残差の2乗和を最小にする最適問題と等価となる。

$$\min\{\sum(eTemp(i)-aTemp(i))^2\} \dots\dots\dots (1)$$

* 1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻（正会員）

* 2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

* 3 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻（正会員）

ここに、 $eTemp.(i)$ はコンクリート表面上の*i*点における表面温度の実測値であり、 $aTemp.(i)$ は仮定した未知パラメータを用いて計算された同じ位置の表面温度であるが、コンクリートの表面温度に関する計測結果と筆者らが従来から用いている3次元熱伝導有限要素解析の結果とは比較的良好に一致することがわかっている[1]-[5]ため、本研究では、 $aTemp.(i)$ として3次元熱伝導有限要素解析によって求めた値を用いた。なお、式(1)は一般的に非線形となるため、式(1)の解法には非線形最適化手法を用いる必要があるが、本研究では非線形性の強い問題に対しても比較的安定した収束状況を示すといわれているマルカート法を用いた。

3. 数値シミュレーション

逆解析においては、一般的に設定した逆問題の解が一意的でかつ安定して存在するか否かという本質的な問題を含んでいる。例えば、計測結果には通常測定誤差が含まれているため、必ずしも解の唯一性が保障されるとは限らない。しかし、設定した逆問題における解の安定性が良好であれば、測定結果の精度を考慮することで、有意性のある解を得ることは可能となる。したがって、サーモグラフィー法による内部評価に対する逆解析手法の適用性を検討するためには、まず設定した逆問題の性質を的確に把握しておく必要がある。そのため、本研究では、3次元熱伝導有限要素解析によって得られた結果を入力データ（測定結果）とみなして、まず解の安定性と精度について検討することとした。

3.1 解析モデル

本研究では、寸法 (m) 300x300x100mmの空隙が埋設されているコンクリートの熱解析モデルとして、図-1に示すような9(縦)x9(横)x5(高さ)個の8節点アイソパラメトリック要素からなる3次元熱伝導有限要素モデルを用いた。すなわち、空隙層を上面（外部）から3層目に設定して、空隙の埋設深さ（1層+2層の厚さで $t=t_1+t_2$ 、ここに $t_1=t_2$ ）、空隙の厚さ（ d ）および大きさ（ S ）を未知量とした。なお、本解析モデルは、対称性を考慮して1/4解析モデルとし、対称2側面を断熱側面に設定してある。本解析では、表-1に示すように空隙の厚さ（ $d=0.5, 1.0, 1.5$ および 2.0 cmの4種類）、埋設深さ（ $t=1.0, 2.0, 4.0$ および 8.0 cmの4種類）および大きさ（ $s=1 \times 1, 3 \times 3, 5 \times 5$ および 7×7 要素の4種類）を解析要因として取り上げた。本解析で用いた構成材料の各種物性値を表-2に示す。なお、

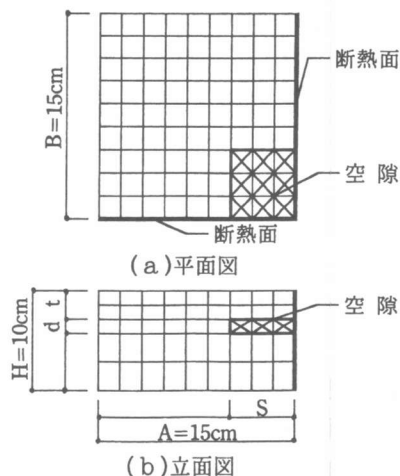


図-1 解析モデル

表-1 解析の概要

解析モデル (寸法、要素数)	空隙の寸法・埋設状況 (cm)		
	厚さ(d)	埋設深さ(t)	大きさ(s)
AxBxH =15X15X10cm (9x9x5=405要素)	0.5(0.05H)	1.0(0.1H)	1x1*(0/9~1/9B)
	1.0(0.10H)	2.0(0.2H)	3x3*(2/9~3/9B)
	1.5(0.15H)	4.0(0.4H)	5x5*(4/9~5/9B)
	2.0(0.20H)	8.0(0.8H)	7x7*(6/9~7/9B)

【注】*: 要素数。

表-2 構成材料の熱的特性

材 料	密度 ρ (g/cm ³)	比熱 c (cal/g·°C)	熱伝導率 κ (cal/cm·s·°C)	熱伝達率 α (cal/cm ² ·s·°C)
コンクリート	2.000	0.19	0.003100	外壁面: 0.00072 中間層: 0.00010 内壁面: 0.00024
空 隙	0.028	0.30	0.000088	

本解析では、コンクリートの表面温度分布と埋設空隙との関係を調査するために、表－１に示した要因以外にも空隙の大きさ、厚さおよび埋設深さを要因とした数値解析も同時に行った。

解析に際しては、上面および下面の境界条件を熱伝達境界、外気温（上面）および内気温（下面）をそれぞれ30.0および20.0℃に設定して定常熱伝導解析を行った。

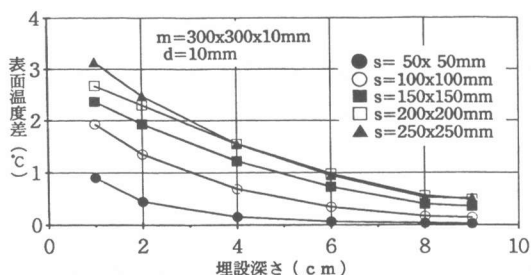
3.2 逆解析の手順

本研究では、まず所定寸法の空隙が内在する熱解析モデルに対して定常熱伝導解析を行い、得られた結果を表面温度に関する計測結果（eTemp.(i)）とみなした。次に、推定の対象とした各未知変数の重みが同程度となるように、逆解析によって求める空隙の埋設深さ、厚さおよび大きさを、それぞれの方向の寸法（コンクリートの高さ(H)および横(B)）で除して正規化した相対値で評価して、各未知変数の変化量が1%以下に収束するまで定常熱伝導解析を繰返し行った。なお、式(1)の残差を求めるのに使用した節点は、前掲の図－１(a)に示す解析モデルの下端の10節点とし、解析の際に用いた初期値は、原則として空隙の埋設深さおよび大きさが0.5、空隙の厚さが0.05とした。また、本熱伝導有限要素解析では、空隙の大きさを要素数で評価しているため、逆解析によって得られた空隙の大きさを直接熱伝導解析に反映させるのではなく、この値を用いて離散的に空隙要素の割付けを行っている。例えば、逆解析の結果、 $3/9 \cdot B < s \leq 4/9 \cdot B$ なる範囲の空隙の大きさ（s）が得られた場合には、何れの場合も空隙要素数は同じ4x4要素となるように設定してあるため、熱伝導解析の結果は全て同一となる。従って、逆解析の結果得られた空隙の大きさが、前掲の表－１に示されている範囲内であれば正解ということになる。

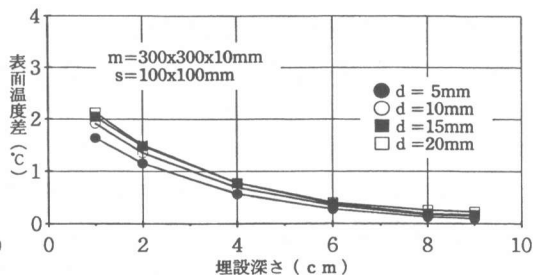
4. シミュレーション結果とその考察

4.1 コンクリートの表面温度と空隙との関係

図－２および図－３は、それぞれコンクリートモデル試験体の表面温度差（モデル表面の中心位置（図－１(a)に示すモデルの右下の1節点）と周端部（図－１(a)に示すモデルの左端および上端の19節点）との温度差）と空隙の埋設深さとの関係に及ぼす埋設空隙の大きさ（s）および厚さ（d）の影響を数値計算によって調べた結果の例である。これらの図から明らかなように、コンクリートの表面温度差は、空隙の埋設深さ、大きさおよび厚さによって影響を受けるが、これらの影響は埋設深さが大きくなるに従って次第に小さくなる傾向を示している。特に、表面温度差に及ぼす空隙厚さの影響は、空隙の埋設深さや大きさの影響と比較して著しく小さくなっており、空隙厚さの推定精度が他の空隙の埋設深さや大きさの推定精度と比較して悪くなる可能性のあることを示唆している。



図－２ 表面温度差と埋設深さとの関係に及ぼす空隙の大きさの影響



図－３ 表面温度差と埋設深さとの関係に及ぼす空隙の厚さの影響

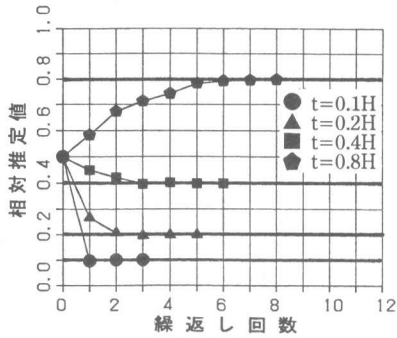


図-4 空隙の埋設深さが未知の場合
の解の収束状況
($d=0.1H$, $s=0.33B$ の場合)

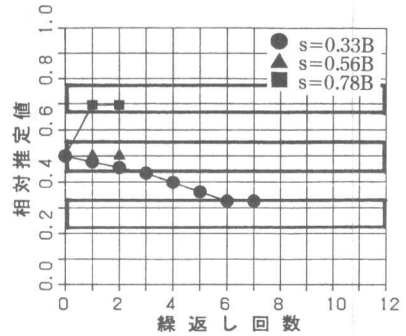


図-5 空隙の大きさが未知の場合
の解の収束状況
($d=0.1H$, $t=0.2H$ の場合)

4.2 未知量が1変数の場合の推定結果

図-4～図-6は、それぞれ空隙の埋設深さ、大きさおよび厚さを未知量とした場合の逆解析結果を示した例である。なお、図中の太線は未知変数の真値を示している（ただし、空隙の大きさについては真値を範囲で示してある（表-1参照）。以下、各要因毎に解析結果の傾向について示すことにする。

(1) 空隙の埋設深さが未知の場合

図-4は、空隙の埋設深さを未知量とした場合の推定値の収束状況を埋設深さ別に示したものである。図によれば、いずれの場合も埋設深さを正確に推定できているが、一般的に空隙の埋設深さが大きく表面の温度変化が小さくなるほど収束までの繰返し回数が増大する傾向を示している。

(2) 空隙の大きさが未知の場合

図-5は、空隙の大きさを未知量とした場合の推定値の収束状況を大きさ別に示したものである。本解析では、空隙の大きさの真値は一定の範囲を有している（表-1参照）が、図から明らかに、得られた解は初期値に近い側の境界値近傍に収束している。なお、この場合も空隙の埋設深さが未知の場合と同様に、空隙寸法が小さく表面の温度変化が小さくなるに従って収束までの繰返し回数が増大する傾向を示している。

(3) 空隙の厚さが未知の場合

図-6は、空隙の厚さを未知量とした場合の推定値の収束状況を空隙厚さ別に示したものである。前掲の図-3によれば、表面温度差に及ぼす空隙の厚さの影響は、空隙の埋設深さや大きさの影響と比較して著しく小さいが、このように表面温度差の変化が著しく小さい場合であっても空隙の厚さを正確に推定できているのがわかる。

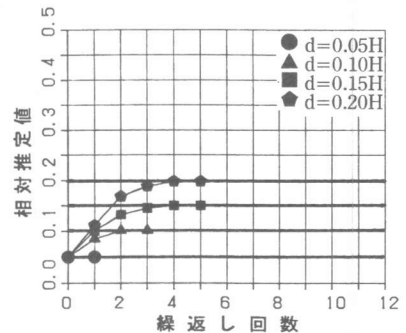
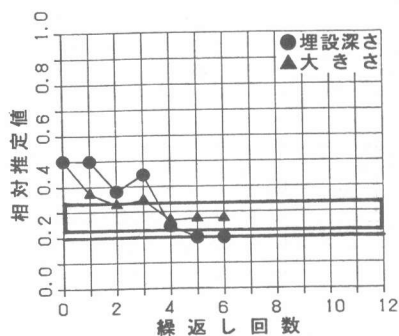


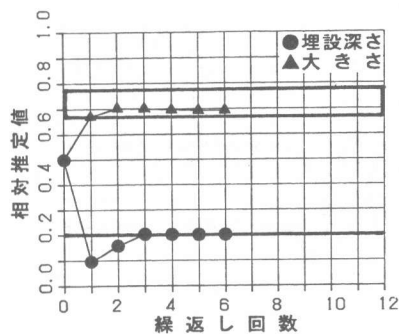
図-6 空隙の厚さが未知の場合
の解の収束状況
($t=0.2H$, $s=0.33B$ の場合)

4.3 未知量が2変数の場合の推定結果

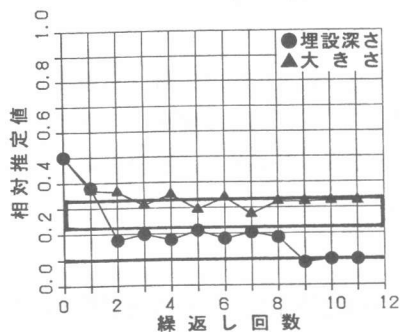
図-7(a)～(d)は、未知量を空隙の埋設深さと大きさの2変数とした場合の推定値の収束状況を要因別に示したものである。これらの図によれば、収束までの繰返し回数は、一般的に未知量が1変数の場合に比べて増大する傾向を示しているものの、得られた解はそれぞれの真値に安



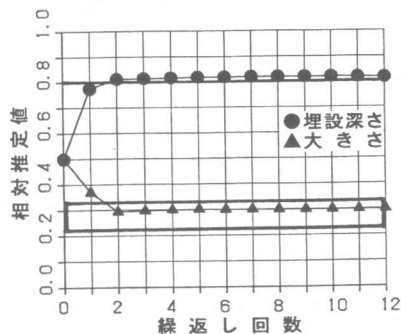
(a) $t=0.2H$, $s=0.33B$ の場合



(b) $t=0.2H$, $s=0.78B$ の場合



(c) $t=0.1H$, $s=0.33B$ の場合



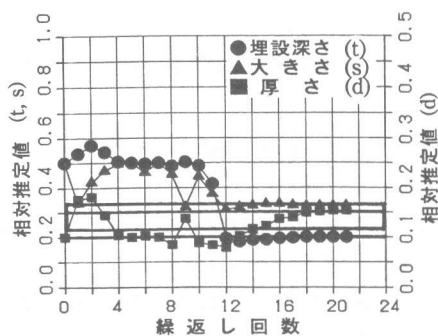
(d) $t=0.8H$, $s=0.33B$ の場合

図-7 空隙の埋設深さと大きさが未知の場合の解の収束状況 ($d=0.1H$ の場合)

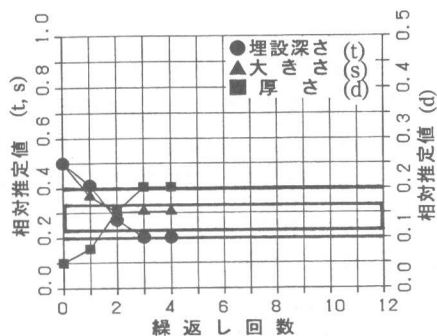
定して収束しており、未知量が2変数であれば逆解析手法の適用が比較的容易であることがわかる。なお、初期値を種々変えた場合の逆解析も行ったが、推定結果は何れの場合も良好であった。

4.4 未知量が3変数の場合の推定結果

図-8および図-9は、未知量を空隙の埋設深さ、大きさおよび厚さの3変数とした場合の推定値の収束状況を要因別に示したものである。図から明らかなように、未知量が3変数の場合には、解の収束状況が前述の未知量が1および2変数の場合と比較して不安定で、収束するまでの



(a) $t=0.2H$, $s=0.33B$, $d=0.15H$ の場合



(b) $t=0.2H$, $s=0.33B$, $d=0.2H$ の場合

図-8 空隙の埋設深さ、大きさ、厚さが未知の場合の解の収束状況

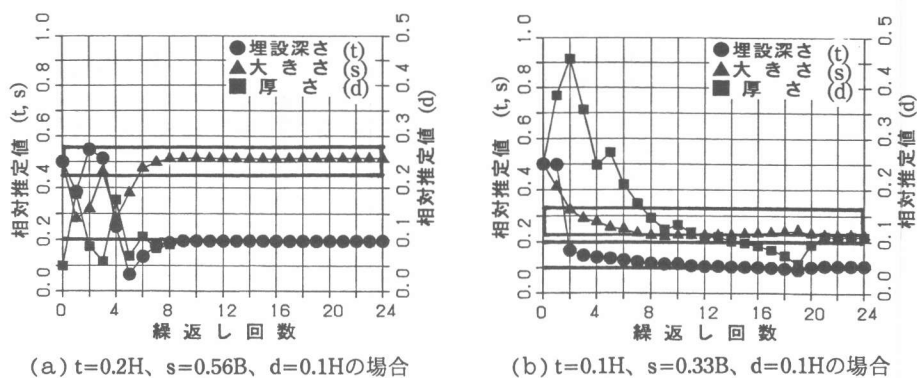


図-9 空隙の埋設深さ、大きさ、厚さが未知の場合の解の収束状況

繰返し回数もかなり増大しているものも認められる。また、殆どの場合、解は真値に収束しているが、一部真値が得られていない場合もある。このことは、未知量が3変数になると、未知変数の初期値が収束結果に影響を及ぼす可能性のあることを示唆しており、逆解析手法を用いてコンクリートの内部探査を行う際に注意を払う必要のある点といえる。

5. 結 論

本研究では、サーモグラフィー法によるコンクリートの内部評価に対する逆解析手法の適用性を解析的な観点から検討した。本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- 1) コンクリート表面の温度分布性状は、埋設されている空隙の埋設深さ、厚さおよび大きさによって影響を受けるが、これらのうち空隙厚さの影響は比較的小さい。
- 2) 本研究で提案した逆解析手法を用いることによって、コンクリート表面の温度分布状況から内部に埋設されている空隙の埋設深さ、厚さおよび大きさを定量的に推定できる。
- 3) サーモグラフィー法による内部探査結果の信頼性は、本研究で提案した逆解析手法を用いることによって格段に向上する可能性がある。

謝 辞

本研究に際してご助力を得た愛知工業大学学部学生の青山健史君、大箸道春君および分部丈裕君に対して謝意を表します。

引用文献

- [1] 山田和夫・桃木佳子・小林 健:サーモグラフィー法を適用したコンクリートの内部探査に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.48、pp.180-185、1994.12
- [2] 桃木昌子・山田和夫・桃木佳子:コンクリートの表面温度に及ぼす内部空隙の影響に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.655-660、1995.6
- [3] 山田和夫・桃木佳子・桃木昌子:サーモグラフィー法を適用した非破壊検査結果に及ぼす測定表面色の影響に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.49、pp.540-545、1995.12
- [4] 桃木昌子・山田和夫:サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査結果に及ぼす日射量の影響に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.1215-1220、1996.6
- [5] 山田和夫・桃木昌子:サーモグラフィー法を適用した非破壊検査結果に及ぼす日射吸収率の影響に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.868-873、1996.12