赤外線サーモグラフィー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

STUDY ON INTERNAL EVALUATION OF CONCRETE BY INFRARED THERMOGRAPHY

Thermal conductivity characteristics and accuracy of internal evaluation of concrete

関 俊力*, 山田 和夫**

Toshikatsu SEKI and Kazuo YAMADA

In this study, the effects of various factors on the thermal conductivity characteristics of concrete and the accuracy of internal evaluation by using the inverse analysis for an infrared thermography were investigated for the purpose of quantification of the internal evaluation of concrete. As a result, the following conclusions were obtained by this study: The thermal conductivity characteristics of concrete are affected by the mix proportion and the drying condition of concrete. The thermal diffusivities of concrete obtained from the uniaxial unsteady heat conduction experiments are available for simulating the heat transfer in concrete, and the accuracy of internal evaluation can be improved.

Keywords : Concrete, Non-destructive test, Infrared thermography, Thermal diffusivity, Heat conductivity, Inverse analysis
コンクリート, 非破壊試験, 赤外線サーモグラフィー法, 熱拡散率, 熱伝導率, 逆解析

1. はじめに

近年, 環境問題に関連して持続型社会を構築し地球環境を維持していくための技術の開発が急務となっている。とりわけ, 建築分野では環境負荷低減型建築技術として建築物の循環化・長寿命化技術および膨大なストック量のある既存コンクリート造建築物の合理的なストックマネジメント技術の開発・実用化が求められているが, 既存コンクリート造建築物の合理的な長寿命化を図るには, 建築物の現状把握, 残存寿命の判定, 劣化状況に応じた適切な補修・補強対策の策定などの一連の検査・診断技術を確立する必要がある。

筆者らは, 上記の点を踏まえて, 従来から既存コンクリート造建築物の検査・診断方法の確立を目的として, 各種の非破壊試験方法に関する研究を行っており, 一部の試験方法は, 関連する学・協会の規格・基準として標準化されている^{1)~5)}。ただし, これらの規格・基準は, 多くが試験手順を規定するに留まっており, 既存コンクリート造建築物の変状を直接評価する方法まで規定したものではないため, 結果の評価・判定の信頼性について問題となることが多く, 結果の評価方法を含む試験方法の規格・基準化が急務となっている。

非破壊試験を利用した評価手順は, 基本的には測定結果からその原因となる未知量を推定する逆問題であるため, 測定結果とその原因とを関連付ける法則と特性値を確定することによって, 人的誤差を含まない結果の定量化が可能である。この点を踏まえて, 本研究では, 筆者らが従来から検討を行っている赤外線サーモグラフィー法による内部探査結果の定量化を目的として, 測定結果に影響を及ぼすコンクリート内部の熱特性値のモデル化, 並びにこれらの熱特性値が内部探査結果に及ぼす影響について一連の検討を行った。

コンクリートの内部探査を目的とした赤外線サーモグラフィー法に関する既往の研究は, 大別すると①要因分析によって内部探査精

度の向上を図った研究^{6)~12)}, ②熱源の工夫によって内部探査精度の向上を図った研究^{13)~18)}, ③数値解析の併用によって内部探査精度の向上を図った研究^{19)~25)}に分類できる。これらのうち, ①に関連する研究は, コンクリート表面の温度分布と内部欠陥との関係に及ぼす各種要因の影響を検討したもので, 例えば中村ら⁹⁾は, 表面温度分布と内部温度分布との関係に着目することによって, 測定環境条件に関わらず, 欠陥表面部に生じる温度差の推定が可能であることを明らかにしている。また, ②に関連する研究は, 内部探査精度を向上させるための熱源について検討したもので, 従来から用いられている気温・日射を利用したパッシブな熱源以外の強制加熱や冷却を利用したアクティブな各種熱源の効果が検討されている。例えば, 田中ら¹⁷⁾は, キセノンランプを用いた照射実験を行い, 照射エネルギー密度が小さくても, 繰り返し照射することによって健全部と欠陥部との温度差は次第に増大していき, 従来から用いられている1/3程度の照射エネルギー密度で欠陥が検出可能であることを明らかにしている。③に関連する研究は, 内部探査精度を向上させるための計測データの解析手法について検討したものが多く, 鄭子ら²⁵⁾は, 逆解析手法を適用することにより, パッシブな熱源を利用した場合でも気象条件の影響が軽減できることを明らかにしている。

以上のように, 内部探査を目的とした赤外線サーモグラフィー法については, 既に数多くの研究が行われ各種の有用な知見も得られているが, コンクリートの熱伝導特性に及ぼす各種要因の影響やこれらが内部探査精度に及ぼす影響などについては不明な点が多い。

2. コンクリートの熱特性値が測定結果に及ぼす影響

コンクリートの内部探査を目的とした赤外線サーモグラフィー法は, 計測された気温, 日射量および表面温度差, 並びに対象コンク

* 愛知工業大学大学院工学研究科 研究生・修士(工学)

** 愛知工業大学工学部 教授・工博

Research Student, Graduate School of Eng., Aichi Institute of Technology, M. Eng.
Prof., Faculty of Eng., Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

図1 表面温度と介在物の埋設深さおよび大きさとの関係の例

表1 実験要因

表1 実験要因

(a) 実験－Ⅰ

試験体 記号	種 類	目標 空気量 (%)	実測 空気量 (%)
A00	モルタル (W/C=80% S/C=3.5)*	0	0
A20		20	21
A40		40	31
A60		60	36

(b) 実験－Ⅱ

試験体 記号	種 類	W/C (%)	粗骨材 畚容積 (%)
K00	コンクリート (S/C=2.3)	60	0
K25			25
K50			50
K100			100

(c) 実験－Ⅲ

試験体 記号	種 類	W/C (%)	S/C
M40	モルタル (Vg/Va=0.0)	40	1.25
M65		65	3.00
M90		90	4.50

(d) 実験－Ⅳ

試験体 記号	種 類	W/C (%)	S/C
C40	コンクリート (Vg/Va=0.4)	40	1.25
C65		65	3.00
C90		90	4.50

(e) 実験－Ⅴ

試験体 記号	種 類	W/C (%)	状態
D65	モルタル (S/C=3.0)	65	乾燥
W65			湿潤

[注] W/C : 水セメント比,
S/C : 細骨材セメント質量比,
Vg/Va : 粗骨材容積比,
*: 空気量0%については,
W/C=60%およびS/C=2.3。

[注] W/C : 水セメント比,
S/C : 細骨材セメント質量比,
Vg/Va : 粗骨材容積比,
*: 空気量0%については,
W/C=60%およびS/C=2.3。

リートの各種熱特性を用いて逆解析的に空隙などの介在物の位置や大きさを評価する試験方法であるが、計測された気温、日射量および表面温度差が同じであっても、測定対象の熱特性値が正確に把握できないと、介在物の埋設深さや大きさの推定結果に誤差が生じる。

例えば、図1は、欠陥として厚さ5mmの空隙が埋設された後掲の図11に示す解析モデルと図12の気象条件の基で非定常熱伝導解析を行った時刻13時における表面温度と介在物の埋設深さおよび大きさとの関係に及ぼす構成材料の熱伝導率 (k) と熱拡散率 (D) の影響の例を示したものである。なお、解析に用いた k 値 (1.25と2.50 W/mk) および D 値 (0.002と0.004 m²/hr) は、一般的に使用されている概略の上下限值とした。まず、熱伝導率の影響を示した図1(a)によれば、健全部表面温度 (●と■印) は、熱伝導率の影響を受けないが、欠陥部については、表面温度 (○と□印) が同じでも熱伝導率の違いにより、埋設深さで8~16mm、大きさで20~35mm程度の相違が認められる。また、熱拡散率の影響を示した図1(b)によれば、欠陥部表面温度 (○と□印) が同じ場合の埋設深さおよび大きさは、熱拡散率の違いにより、それぞれ30mmおよび80mm程度の相違が認められる。これらの結果から、表面温度からコンクリート内部の変状を逆解析的に推定する場合には、測定対象の熱特性を

図2 試験体の形状寸法および熱電対の設置位置

図3 計測要領

表2 コンクリートおよびモルタルの標準調合表

実験シリーズ	試験体記号	W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)					増粘剤 (外割) (kg/m ³)
				水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	起泡剤 (FA)	
実験-I	A00	60	2.30	333	555	1277	—	0.0	0.0
	A20	80	3.50	260	325	1136	—	1.0	0.4
	A40	80	3.50	194	243	850	—	1.7	0.4
	A60	80	3.50	178	222	778	—	2.4	0.4
実験-II	K00	60	2.30	333	555	1277	0	—	—
	K25	60	2.30	283	472	1086	388	—	—
	K50	60	2.30	234	389	896	776	—	—
	K100	60	2.30	134	224	515	1552	—	—
実験-III	M40	40	1.25	334	835	1044	—	—	—
	M65	65	3.00	307	472	1415	—	—	—
	M90	90	4.50	305	339	1527	—	—	—
実験-IV	C40	40	1.25	200	501	626	1064	—	—
	C65	65	3.00	184	283	849	1064	—	—
	C90	90	4.50	183	204	916	1064	—	—
実験-V	W65	65	3.00	307	472	1415	—	—	—
	D65	65	3.00	307	472	1415	—	—	—

正確に把握しておく必要があるといえる。この点を踏まえて、本研究では、まず各種コンクリートの熱伝導特性について把握することを目的として、広範囲の実験を実施して熱特性値の定量化を試みた。

3. コンクリートの熱特性に及ぼす各種要因の影響に関する検討

3.1 実験方法

(1) 実験の概要

表1に本実験の実験要因の概要を示す。本実験では、目的に応じて5シリーズの実験を行った。すなわち、実験-Iでは空気量 (0, 20, 40および60%の4種類)、実験-IIでは粗骨材量 (蓄容積として0, 25, 50および100%の4種類)、実験-IIIではモルタルを対象とした水セメント比 (40, 65および90%の3種類)、実験-IVではコンクリートを対象とした水セメント比 (40, 65および90%の3種類)、実験-Vでは試験体の乾湿状態 (乾燥状態および湿潤状態の2種類) を、それぞれ実験要因として取り上げて熱特性値を算定するとともに、測定された熱特性値に及ぼす本実験要因の影響について一連の検討を行った。表2に各実験シリーズで用いた標準調合表を示す。なお、

図4 測定結果の例(M00試験体)

図5 表面温度の推定結果の例(A00試験体)

(3) 熱拡散率

本実験は、前掲の図2および図3に示したように、1次元非定常熱伝導実験であるため、熱拡散率 (D) は、1次元非定常熱伝導問題に対する解である以下に示す式(2)を用いることによって算定できる。

$$C(x,t) = C_0(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}) \quad \dots (2)$$

ここに、 $C(x,t)$: 時刻(t)における任意の位置(x)の温度(°C)、 C_0 : 時刻(t)における表面温度(°C)、 x : 表面からの深さ(m)、 t : 経過時間(hr)、 D : 熱拡散率(m^2/hr)、 $\operatorname{erf}(s)$: 誤差関数。

ただし、上記の式(2)によれば、表面からの深さが $x \rightarrow \infty$ のとき、内部温度が $C(x,t) \rightarrow 0^\circ\text{C}$ に収束することになり、熱拡散率(D)の算定結果に問題のあることがわかったため^{27), 28)}、本研究では、式(2)の問題点を改善した次の式を用いて熱拡散率(D)を算定した。

$$C(x,t) = (C_0 - C_0')(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}) + C_0' \quad \dots (3)$$

ここに、 C_0' : 初期(収束)温度(°C)。なお、 $\operatorname{erf}(s)$ は相補誤差関数($\operatorname{erfc}(s) = 1 - \operatorname{erf}(s)$)が式(4)で近似できることを利用して算定した。

$$1 - \operatorname{erf}(s) = 1 / (1 + 0.278393s + 0.230389s^2 + 0.000972s^3 + 0.078108s^4) \quad \dots (4)$$

式(3)を解く際に、各内部温度測定時刻における表面温度(C_0)が必要となるが、本研究では、各測定時刻の内部温度測定値を用いて、残差が最も小さかった3次の多項式で最小二乗近似することにより C_0 値を算定した。表面温度の推定結果の例を図5に示す。熱拡散率(D)は、各測定時刻における上記表面温度の推定値および内部温度の実測値と計算値との差の2乗和が最小となる値として、非線形最適化手法(マルカート法²⁹⁾)を適用した逆解析により算定した。

3.3 実験結果とその考察

(1) 加熱による内部温度上昇の経時変化

図6(a)～(e)は、加熱開始後の内部温度上昇と経過時間との関係を実験要因別に示したものである。これらの図のうち、まず空気量の影響(実験-I)を示した図6(a)によれば、加熱面に近い熱電対の埋設深さが10mmの位置では、試験体内部の空気量が多い試験体ほど温度上昇が大きくなっているが、加熱面からの深さが深くなるにつれその差は小さくなり、深さが100mmの位置では空気量に関わらず温度上昇の経時変化はほぼ同じ傾向を示している。これは、試験体内部に存在する微細な空隙が試験体内部への熱伝達を妨ぐため、空気量の多い試験体ほど加熱面近傍に熱が蓄積されるためと考えられる。これに対して、粗骨材量の影響(実験-II)を示した図6(b)によれば、加熱面に最も近い熱電対の埋設深さが10mmの位置では、粗骨材を混入していないK00試験体の温度上昇が最も高くなっているが、加熱面からの深さが深くなると、逆に粗骨材量の多い試験体ほど温度上昇が著しくなる傾向を示している。これは、熱伝導率の大きい粗骨材が熱伝導を促進させるためと考えられる。次に、モルタルおよびコンクリートの水セメント比の影響(実験-IIIおよび実験-IV)を示した図6(c)および(d)によれば、粗骨材混入の有無および加熱面からの深さに関わらず、水セメント比の大きい試験体ほど温度上昇が著しくなる傾向を示している。これは、本実験で

使用材料として、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂・川砂利を使用した。また、実験-Iでは、20%以上の所定空気量を連行させるのに、起泡剤と増粘剤の使用量を調整するとともに、二軸強制練りミキサーとハンドミキサーを併用して混練を行い、目標空気量を20, 40および60%に設定した場合の質量法による実測空気量は、それぞれ21, 31および36%であった(表1(a)および2参照)。

(2) 計測方法

本実験では、図2に示すように、一辺が150mmの立方試験体の内部に熱電対を埋設(表面から10, 20, 40, 70および100mmの深さの対角線方向に等間隔で各3点の合計15箇所)した試験体を用いて、各種モルタルおよびコンクリートの熱伝導特性の測定を行った。図3に計測要領を示す。本実験は、いずれも温度20°C、湿度60%に制御された実験室内で実施し、この図に示すように、試験体の加熱面以外の5面を厚さ100mmの発泡スチロールで断熱した後、加熱面から100mmの位置に温度制御が可能なホットプレートを設置して試験体上面の空気層の温度が60°C一定になるように温度管理をしながら160分間の加熱実験を行った。加熱実験は、原則として試験体の脱型後、養生室内で試験体の質量が変化しなくなるまで空中養生を行った後に実施したが、実験-VのW65試験体は、脱型後から実験直前まで水中養生を行い、計測中も水分移動を避けるために加熱面をラップで覆って実験を行った。なお、W65試験体については、実験の直前と直後に試験体の質量を測定し、加熱実験中に水分が蒸発していないことを確認した。図4に計測結果の一例を示す。

3.2 熱特性値の算定方法

(1) 熱伝導支配方程式

既存コンクリート造建築物の内部探査を目的とした赤外線サーモグラフィ法のように、熱の供給が外部のみで内部発熱が無い熱伝導問題の支配方程式は、一般的に以下に示す式(1)で与えられる。

$$k \cdot \nabla^2 T - \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \dots (1)$$

ここに、 T : 温度、 t : 時間、 k : 熱伝導率、 ρ : 密度、 c : 比熱。

内部探査を目的とした赤外線サーモグラフィ法は、得られた表面温度情報から推定したい内部の変状を未知量として上式を逆解析的に解く問題に相当するため、コンクリートの熱特性値が推定結果に直接影響することになる。上記の式(1)を支配する熱特性値は、 k と $\rho \cdot c$ であるが、本研究では、 $\rho \cdot c = k/D$ なる関係にあることを踏まえて、熱伝導率(k)と熱拡散率(D)を調査対象の熱特性とした。

(2) 熱伝導率

本実験では、各試験体の熱伝導率(k)は、非定常熱線法を改良したプローブ法²⁶⁾に基づく迅速熱伝導率計を用いて測定した。

図6 加熱による試験体内部の温度上昇の経時変化に関する実験結果

はベースモルタルのフロー値を一律に200となるように、水セメント比の大きい試験体ほど細骨材量を多くしてある（前掲の表2参照）ため、内部温度上昇に及ぼす水セメント比の影響は、上述の相異なる空隙量と骨材量の影響による複合効果として観察されたためではないかと考えられる。また、養生以外の条件を同一に設定した試験体の乾湿の影響（実験Ⅴ）を示した図6(e)によれば、加熱面からの深さに関わらず湿潤状態よりも乾燥状態の試験体の方が内部温度の上昇は著しくなっているが、加熱面からの深さが深くなるに従ってその差は次第に小さくなっており、湿潤状態の方が試験体内部での温度勾配が小さく熱を伝え易いことがわかる。これは、試験体内部の水分が、骨材と同様に熱伝導を促進させるためと考えられる。

(2) 熱拡散係数の算定結果

図7 熱拡散率の算定結果

図7は、前述の「3.2 熱特性値の算定方法」の「(3) 熱拡散係数」に示した手順に従って算定した熱拡散率の収束過程を実験シリーズ別に示したものである。図によれば、試験体内部の最も深い位置に設置した熱電対（加熱面から100mmの深さ（前掲の図2参照））の温度上昇が認められない加熱開始から40分以内の時間帯（前掲の図6参照）では、算定された熱拡散率は安定せず一定値

を示していない。しかし、加熱面から最も深い位置の熱電対まで熱が伝導した40分以降の時間帯になると、試験体内部の温度上昇が遅い湿潤状態のW65試験体（前掲の図6(e)参照）を除けば、いずれの試験体もほぼ一定値に収束しているのが読み取れる。この点を踏まえて、本研究では、湿潤状態のW65試験体を除く試験体の熱拡散率は、加熱開始から40分以降の時間帯、またW65試験体は、内部水分の影響により収束する時間が他の試験体に比べて遅れたため、加熱開始から80分以降の時間帯で算定した値の平均値とした。

(3) 熱特性値に及ぼす各種要因の影響

図8(a)および(b)は、それぞれ熱伝導率および熱拡散率と本実験要因との関係を示したものである。これらの図によれば、本実験要因のうち空気量の影響（実験Ⅰ）については、試験体内部の空気量が多くなるに従って熱拡散率および熱伝導率の値は共に小さくなる傾向を示しており、空気量が約0→36%に変化することによって熱拡散率は約 $0.44 \times 10^{-3} (m^2/hr)$ 、熱伝導率は約 $1.05 (W/mk)$ の減少がみられる。これに対して、粗骨材量の影響（実験Ⅱ）については、粗骨材量の増加に伴って熱拡散率および熱伝導率は、上記の空気量の場合とは逆に大きくなる傾向を示しており、粗

図8 熱特性値に及ぼす各種要因の影響

骨材容積比が0→0.59に変化することによって熱拡散率は 1.69×10^{-3} (m^2/hr)、熱伝導率は 0.34 (W/mk)の増大がみられる。また、モルタルおよびコンクリートの水セメント比の影響（それぞれ実験Ⅲおよび実験Ⅳ）については、いずれの場合も熱拡散率は水セメント比が大きくなるに従って増大しているが、熱伝導率は逆に減小する傾向を示しており、水セメント比が40→90%に変化することによって、モルタルの熱拡散率および熱伝導率は、それぞれ 0.98×10^{-3} (m^2/hr)および 0.17 (W/mk)の増減、またコンクリートの場合は、それぞれ 0.76×10^{-3} (m^2/hr)および 0.39 (W/mk)の増減が認められる。さらに、乾湿の影響（実験Ⅴ）については、湿潤状態の試験体の熱拡散率および熱伝導率は、乾燥状態の試験体よりも大きくなる傾向を示しており、内部空隙が水で満たされることによって熱拡散率は 0.54×10^{-3} (m^2/hr)、熱伝導率は 0.25 (W/mk)の増大が認められる。以上の結果から、モルタルおよびコンクリートの熱特性値は、本実験で取り上げた内的要因によって大きく影響を受けることがわかる。

4. 算定した熱特性値の適用性に関する検討

ここでは、第3章で算定した熱特性値の妥当性を確認するために、以下に示す熱伝導有限要素法による解析を行い、外部加熱を受ける

図9 3次元熱伝導有限要素解析用の解析モデル

表3 本研究で得られた熱特性値一覧

実験 シリーズ	試験体 記号	熱伝導率 K (W/mk)	比熱 C ($cal/g \cdot ^\circ C$)	密度 ρ (g/cm^3)	熱拡散率 D (m^2/hr)	$\rho \cdot C$
実験Ⅰ	A00	1.63	0.348	2.10	0.00192	0.730
	A20	0.79	0.262	1.60	0.00162	0.419
	A40	0.63	0.241	1.40	0.00159	0.338
	A60	0.58	0.258	1.30	0.00148	0.336
実験Ⅱ	K00	1.63	0.348	2.10	0.00192	0.730
	K25	1.54	0.273	2.20	0.00221	0.601
	K50	1.81	0.246	2.20	0.00288	0.541
	K100	1.88	0.187	2.40	0.00361	0.449
実験Ⅲ	M40	1.54	0.340	2.13	0.00183	0.724
	M65	1.68	0.307	2.16	0.00218	0.663
	M90	1.51	0.221	2.09	0.00281	0.462
実験Ⅳ	C40	1.81	0.264	2.38	0.00148	0.628
	C65	1.70	0.206	2.30	0.00309	0.473
	C90	1.42	0.167	2.26	0.00324	0.377
実験Ⅴ	W65	1.93	0.272	2.24	0.00272	0.610
	D65	1.68	0.307	2.16	0.00218	0.663

試験体の内部温度の経時変化に関する実験結果への適用性を示す。

4.1 解析方法

本解析では、8節点アイソパラメトリック要素を用いた3次元非定常熱伝導有限要素解析³⁰⁾を行った。解析に際しては、前掲の図2に示した立方試験体の対称性を考慮して図9に示す1/4解析モデルを使用し、前掲の式(1)に示す非定常熱伝導解析に必要な熱伝導率(k)および密度×比熱($\rho \cdot c = k/D$)は、本実験で算定した値を用いた。解析に用いた熱特性値の一覧を表3に示す。なお、加熱条件として必要な各時刻の加熱面上部の空気層温度は、実測値を用いた。本解析では、まず試験体および発泡スチロールの初期内部温度を $20^\circ C$ に設定した後、実測の試験体上部空気層の温度（目標温度は $60^\circ C$ であるが、実際の空気層温度は変動があった（前掲の図4参照））を加熱データとして、加熱開始後160分が経過するまで時間増分を5分に設定した増分非定常熱伝導有限要素解析を行った。なお、加熱空気層と加熱試験体表面との境界条件は、熱伝達境界に設定した。

4.2 解析結果とその考察

図10は、第3章で示した各試験体の内部温度の経時変化に関する実験結果と解析結果とを比較したものである。これらの図によれば、熱拡散率の算定結果が安定しなかった加熱開始から40分以内の時間帯も含めて、内部温度の経時変化に関する解析結果は、乾湿条件および調査要因を広範囲に変化させた試験体に対しても実験結果を

図10 加熱による試験体内部の温度上昇の経時変化に関する実験結果と解析結果との比較

精度良く再現できており、本研究で提案した手法を用いて算定した熱拡散率および熱伝導率の適用性が確認できたと判断できる。また、加熱開始から40分以内の時間帯において、熱拡散率の算定値が安定しなかったのは、本質的な熱特性値の非線形性によるものではなく、熱拡散率を算定するのに使用した熱電対の位置まで熱が伝わっていなかったことによるデータ処理上の理由によるものといえる。

5. 内部探査精度に及ぼす熱特性値の影響に関する検討

内部探査を目的とした赤外線サーモグラフィ法は、前述のよう

に、表面温度から内部の変状を逆解析的に推定する試験方法であるため、測定対象の熱特性値を正確に把握しておくことが必要である。この点を踏まえて、第3章および第4章では、モルタルおよびコンクリートの熱特性値と各種要因との関係について検討を行った。ここでは、内部探査を目的とした赤外線サーモグラフィ法による逆解析手法を提案するとともに、介在物の埋設深さおよび大きさの推定を対象とした内部探査結果と熱特性値との関係について述べる。

5.1 逆解析方法

本逆解析では、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、内部に存在する介在物を定量的に評価する問題を取り扱う。すなわち、既知量と未知量をそれぞれ以下のように設定した。

- ・既知量：表面温度分布，構成材料の熱特性，測定表面の日射吸収率，気象環境，などの外的条件
- ・未知量：介在物の大きさおよび埋設深さの2変数

上記の逆問題は，具体的には式(5)に示すようなコンクリート表面の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乗和を最小にする非線形最適化問題と等価となる。

$$\min[\sum\{eTemp.(i) - aTemp.(i)\}^2] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに， $aTemp.(i)$ は仮定した未知パラメータ値（介在物の大きさおよび埋設深さ）を用いて計算された*i*節点の表面温度であり，

図11 逆解析による内部探索用の解析モデル

図12 計測日の気象条件（晴天）

図13 逆解析による介在物の埋設深さと大きさの推定結果に及ぼす熱特性値の影響の例

図14 逆解析によって得られた表面温度分布に及ぼす熱特性値の影響の例

本研究では，3次元非定常熱伝導有限要素解析によって求め，式(5)の解法としては，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²⁹⁾を用いた。本解析で用いた解析モデルを図11に，解析に用いた気象条件を図12に示す。

本解析では，推定の対象とした未知パラメータ（正解値：埋設深さが20mm，大きさが100mmの空隙）の重みが同程度となるように，逆解析によって求める介在物の埋設深さおよび大きさを，それぞれの方向の寸法（試験体の高さ×横=100×300mm）で除した相対値で評価して，未知パラメータの変化量が1%以下になるまで3次元非定常熱伝導解析を繰返し行った。なお，式(5)の残差を求めるのに使用した節点は，図11の解析モデルの□で囲った下端13節点とした。

5.2 内部探索結果とその考察

図13は，時刻10時までの気象条件を考慮に入れた非定常逆解析による内部探索結果と試験体種類（試験体記号は，第3章に示した試験体の記号と対応）との関係を解析に用いた熱特性値別に示した例である。図によれば，本研究で得られた熱特性値（前掲の表3参照）を用いた場合の内部探索結果は，いずれの試験体も空隙モデルの埋設深さと大きさの正解値である20mmと100mmに収束しているが，熱特性値として従来から一般的に用いられている値^{15), 25)}（熱拡散率：0.27×10⁻³(m²/hr)，熱伝導率：1.4(W/mk)）を使用して逆解析を行うと，正解値に収束しない試験体もあることがわかる。例えば，正確でない熱拡散率を用いた場合には，A60試験体の埋設深さは7mm浅く評価されているが，W65試験体は逆に5mm深く評価され，更にK100およびM90試験体については，大きさが20mm小さく評価されている。一方，正確でない熱伝導率を用いた場合には，A60試験体は大きさが30mm小さく，M90およびW65試験体については，大きさがいずれも20mm程度小さく評価されているのがわかる。

図14は，非定常逆解析によって得られた時刻10時におけるA60試験体の表面温度分布に関する推定結果を示したものである。図から明らかなように，熱特性値として正確な値を使用していない場合に

は、表面温度分布もかなり異なった性状となることがわかる。以上のことから、赤外線サーモグラフィ法による内部探査精度を向上させるためには、測定対象の熱特性値の把握が重要であるといえる。

6. 結論

本研究では、赤外線サーモグラフィ法による内部探査結果の精度向上を目的として、コンクリートの熱特性値に及ぼす各種要因の影響、並びにこれらの熱特性値が内部探査結果に及ぼす影響について検討を行った。得られた結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) コンクリートの熱伝導特性値（熱拡散率および熱伝導率）は、空気量、骨材量、水セメント比などの調査要因、並びに測定時の試験体の乾湿の影響を受け、一般的に母材と異なる空気、水、骨材の混入量とそれらの熱特性値によって関係付けられる。
- (2) 1次元非定常熱伝導実験によって算定した熱拡散率を用いることにより、コンクリート試験体内部の熱伝導特性に及ぼす各種調査要因および乾湿の影響を合理的に説明することができる。
- (3) 本研究で提案した逆解析手法を用いることで、赤外線サーモグラフィ法による定量的な内部探査が可能となるが、精度の良い推定結果を得るには、正確な熱特性値の把握が重要である。

7. 今後の課題

以上のように、本研究では、赤外線サーモグラフィ法による精度良い内部探査を行うためには、構成材料の正確な熱特性値の把握が重要であることを指摘したが、既存建築物のコンクリートに対して、個々に熱特性値を測定することは容易ではない。そのため、本提案の内部探査方法を実用化するためには、今後、既存建築物の健全部における表面温度変化の測定結果を対象として、未知量を熱特性値に設定した非定常逆解析を行い、調査対象のコンクリートの熱特性値を個々に評価する方法の可能性について検討するとともに、その適用性および適用限界を明らかにしていくことが必要である。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル，丸善，77pp.，1983.2
- 2) 日本コンクリート工学会編：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，297pp.，1992.3
- 3) 日本コンクリート工学会編：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，237pp.，2001.3
- 4) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法，丸善，440pp.，2007.3
- 5) 日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の弾性波による試験方法（第1部：超音波法，第2部：衝撃弾性波法および第3部：打音法），NDIS2426-1(11pp.)，NDIS2426-2(11pp.)およびNDIS2426-3(4pp.)，2009.6
- 6) 込山貴仁，中野米蔵，谷川恭雄：サーモグラフィ法による外壁仕上げ材の剥離検知の適用限界に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第484号，pp.13-20，1996.6
- 7) 込山貴仁，谷川恭雄：赤外線映像装置の特性と外界ノイズがサーモグラフィ法の信頼性に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，第8巻，第1号，pp.109-119，1997.1
- 8) 勝見隆，山田和夫：サーモグラフィ法によるコンクリートの充填性評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.1285-1290，1999.7
- 9) 中村士郎，ほか3名：内部温度測定を併用した赤外線サーモグラフィ法

- に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No1，pp.1745-1750，2003.7
- 10) 関俊力，山田和夫：サーモグラフィ法による内部探査結果に及ぼす風速の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1751-1756，2010.7
- 11) 川久保政亮，ほか3名：パッシブサーモグラフィ法によるコンクリート表面の水分状態が及ぼす欠陥部の蓄熱特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No1，pp.1781-1786，2011.7
- 12) Ghosh, K.K. and Karbhari, V.M.: Use of Infrared Thermography for Quantitative Non-destructive Evaluation in FRP Strengthened Bridge Systems, Materials and Structures, Vol.44, No.1, pp.169-185, 2011.1
- 13) 鎌田敏郎，ほか3名：サーモグラフィによる鋼-コンクリート間空隙の平面寸法および厚さの推定，土木学会論文集，655巻，V-48号，pp.75-82，2000.8
- 14) 山田和夫，安藤秀則：強制加熱を利用したサーモグラフィ法によるコンクリートの内部評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1485-1490，2002.6
- 15) 金光寿一，柳内睦人，木田哲量：舗装熱を利用したサーモグラフィ法による床版内部の欠陥形状と温度分布変化の関係，コンクリート工学論文集，第16巻，第1号，pp.31-44，2005.1
- 16) 金光寿一，柳内睦人，木田哲量：酸化反応熱を利用したサーモグラフィ法による損傷度評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1759-1764，2005.6
- 17) 田中寿志，ほか3名：アクティブ赤外線法における照射光源の影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No1，pp.1753-1758，2005.6
- 18) Brown, J.R. and Hamilton, H.R.: Heating Methods and Detection Limits for Infrared Thermography Inspection of Fiber-Reinforced Polymer Composites, ACI Materials Journal, Vol.104, No.5, pp.481-490, 2007.9
- 19) 勝見隆，山田和夫，桃木昌子：逆解析手法を適用したサーモグラフィ法によるコンクリートの内部探査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No1，pp.1315-1320，1997.6
- 20) 込山貴仁，谷川恭雄：スモージング技術を用いた熱画像シミュレーションによるサーモグラフィ法の適用限界に関する研究，コンクリート工学論文集，第8巻，第1号，pp.95-107，1997.1
- 21) 黒川善幸，藤森繁，谷川恭雄：サーモグラフィの画像処理を目的とした壁表面温度分布の簡易解析手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No1，pp.1747-1752，2005.6
- 22) 今西直人，曾根彰，増田新：赤外線映像装置で測定したコンクリート表面温度分布に含まれるノイズのウェーブレット変換による除去，日本機械学会論文集（C編），71巻，705号，pp.205-212，2005.5
- 23) 中村士郎，ほか3名：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No2，pp.679-684，2007.7
- 24) 佐藤大輔，ほか3名：パッシブロックイン赤外線サーモグラフィ法の開発とこれによる内部欠陥検出精度の向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No2，pp.667-672，2007.7
- 25) 鄭子揚，阪上隆英，久保司郎：逆解析手法を用いたパッシブ赤外線サーモグラフィによるコンクリートの剥離深さ同定に関する研究，日本機械学会論文集（A編），76巻，772号，pp.1541-1546，2010.12
- 26) 王徳東，ほか4名：ポリマーセメントモルタルの燃焼特性および熱伝導率に関する研究 その3：熱伝導率の温度依存性，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.163-164，2008.9
- 27) 関俊力，山田和夫：コンクリートの熱伝導特性に及ぼす割合の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.543-548，2008.7
- 28) 関俊力，山田和夫：加力により損傷を受けたコンクリートの熱伝導特性に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.219-226，2010.2
- 29) 渡部力，名取亮，小国力：Fortran77による数値解析ソフトウェア 15.9 マルカート法(MARQ)，丸善，pp.237-240，1989.12
- 30) 矢川元基：有限要素法の基礎と応用シリーズ8－流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，342pp.，1990.10

(2012年2月3日原稿受理，2012年8月1日採用決定)