

熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内 空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究

柳内睦人*・魚本健人**

本論文は、熱伝導率の異なる球形物体を内部に埋設した供試体を用い、その表面を人工的に一定時間加熱した後の冷却時における表面温度分布を熱赤外線センサで測定し、時系列的に得られる熱画像から、表層部の多孔質な部分、空洞および鉄筋の位置、形などが定量的に判読できることを明らかにした。また、熱拡散方程式の境界要素法による非定常熱伝導現象の数値的シミュレーションを行い理論的に検証したものである。

Keywords: thermal infrared scanner, non destructive testing, image analysis, temperature distribution, boundary element method

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の耐久性や劣化が問題になり、これらに対処する非破壊検査の必要性が大きな話題になっている。特に、スクラップ・アンド・ビルトが簡単に行えない土木関係の大型構造物に対しては、欠陥による劣化の進行を防止して構造物の延命をはかるための、早期調査、診断そして手当てをする技術の確立が急務となってきた。コンクリート構造物内部における空洞やかぶり厚不足などの施工不良個所の検出には、超音波などによる非破壊試験法^{1), 2)}が利用されてきた。さらに、最近になって、山腹斜面の吹付け面、道路床版のアスファルト面および建築構造物の壁面の剝離、浮きおよびタイル裏面の内部不充填部などの個所を見出す調査に熱赤外線センサ^{3), 4)}が利用され、有益な成果をあげているが、鉄筋位置の判読までは為されていないのが現状である。

本研究は、熱赤外線センサと近代化した画像解析機器で構成された表面温度測定システムによって得られる熱画像を利用して、コンクリート構造物内の空隙および鉄筋の状態を判読する方法を確立することを目標として実施した基礎的な研究である。この研究目標のなかに、このシステムを使用することによって得られる熱画像および内部温度の変化から、熱伝導に代表されるコンクリートの熱的性質を定量的に解析し、これらの結果を利用してコンクリート内部の状態をできるだけ精度良く検査する方法を確立することも含めている。

2. 本研究の特色

コンクリート構造物の表面を熱赤外線センサで観測して得られる熱画像には、高温部と低温部の混在した温度



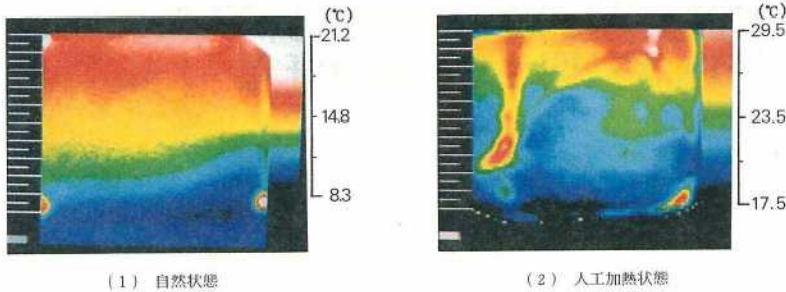
写真-1 ひびわれのある擁壁表面の可視状況

分布パターンが見られる。このような温度分布パターンは、構造物表層部の空隙、剝離および湿潤状態の違いに伴う熱伝導率や比熱などの熱特性が、コンクリートに与えられる気温や日射による輻射熱の変化に応じて現れるためと思われる。しかし、コンクリートへの熱供給源として単に日射だけを考えて場合、コンクリートは熱容量が大きく表面での反射による影響も大きいため、これだけでは内部状態を表す温度分布を得るに十分な熱涵養を確保することが困難になる場合が多い。そこで、内部状態を判読するために必要なコンクリートへの熱供給源として、自然の輻射熱を利用するだけではなく、コンクリート構造物の表面を人工的に一定時間加熱する方法を考えた。この方法は、従来の方法と比べてコンクリート構造物の表面だけではなく、内部状態が3次元的にある程度判読できる利点がある。

気温や日射などによる輻射熱（自然加熱）と人工的な一定時間加熱（人工加熱）によって現れるコンクリート構造物表面の温度分布には、どのような違いがあるかを示す実験例として、幅約 10 mm、深さ約 100 mm のひびわれが生じている砂利置き場の擁壁（写真-1 参照）を

* 正会員 工修 日本大学専任講師 生産工学部土木工学科 (〒275 習志野市泉町 1-2-1)

** 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所第 5 部



写真—2 ひびわれのある擁壁表面の熱画像

熱赤外線センサで観測して得た熱カラー画像を写真—2に示した。この熱カラー画像は、ひびわれが生じている部分を含む横1.90 m×縦1.80 mの範囲の表面温度をレインボーカラーで表しており、赤に近づく色ほど高温である。

写真—2(1)は、壁体からの熱放射が最も多い晴天日没時に観測した自然加熱時の熱画像であり、写真—2(2)は、晴天日没時に壁面をアスファルト舗装時に使用するアセチレンガスバーナーで様に10分間加熱した後、加熱を停止して4分後に観測した人工加熱時の熱画像である。両画像に現れている上部ほど高温になる段階的で平行な温度分布は、日中熱せられた壁体の内部温度の違いが原因と思われる。なお、自然加熱時の熱画像に現れている四隅の高温部は、観測範囲を示すために置いた温度指標跡である。

この例から、コンクリート構造物の表面の人工的な一定時間加熱によって現れる熱画像上の温度分布パターンの特徴は、ひびわれのような表面欠陥部が温度分布の乱れとして明瞭に識別できること、肉眼では表面に何の異常も見られない個所に高温部や、低温部(写真—2(2)中央右側にある緑色の高温域および中央左側の水色の縦に広がった低温域)が現れることなどが挙げられる。これらは、表面から与えられた熱が熱伝導率の違いにより内部への熱伝導速度が異なり表面に残る温度に差が生ずるためと考えられる。この簡単な実験が、コンクリート内部の状態を熱赤外線センサで判読する際の重要なポイントとなる。

3. 本研究で使用した熱赤外線センサ

ある温度以上に熱せられた物体は、それに応じた熱エネルギーを放射する。放射する熱エネルギーは、ある波長分布を持ち、その中心波長と物体温度との関係は、次式に示されるウィーンの変位則で表される⁵⁾。

$$\lambda_m \times T \approx \text{Constant} = 2898 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 λ_m ：放射エネルギーが最大の時の波長(μm)

T ：物体の温度(絶対温度°K)

本研究の実験においては、約20°C～80°Cのコンク

表—1 本研究で使用した熱赤外線センサの仕様

赤外線検知器	水銀・カドミウム・テルライド・光導電型		
応答波長域	8.0μm～12.0μm	測定温度範囲	-20℃～+80℃
感 度	30℃で0.1℃	装置作動範囲	-15℃～+55℃
映像周波数	25 Hz	解 像 度	100 画素/ ライン
ライン周波数	2500 Hz	レ ン ズ	焦点距離: 35mm 撮影至近距離: 0.5m

リートが対象となるので、この温度に対応する波長として、式(1)から9.9μm～8.2μmの遠赤外線波長域を観測範囲とすることになる。したがって、この波長領域に应答する熱赤外線センサとして、表—1に示す仕様を持つスウェーデン AGA 社製の遠赤外線センサを使用した。この熱赤外線センサを利用した本研究の表面温度測定システムは、基本的には熱赤外線センサと画像解析コンピューターで構成されており、測定物体の表面からの放射エネルギーを観測して温度に変換して記録するとともに、画像解析ソフトウェアを用いて必要に応じた温度分布画像をディスプレイ上に出力することができる。なお、熱赤外線センサによる温度測定値に影響を及ぼすと考えられるセンサと被写体間の大気による放射エネルギーの吸収や被写体周辺からの反射光などは、メーカーが用意したレンズの絞り、フィルターおよびスキャナーなどによって定めた校正曲線で補正するようになってい

4. 人工加熱したコンクリートの熱的性質に関する基礎実験

表面を人工的に一定時間加熱したコンクリートの冷却時における表面温度と内部温度を熱赤外線センサおよび内部埋設温度計で測定し、その表面温度変化と内部状態との関連性を検討するために、内部に熱伝導率の異なる球形異物を埋設した供試体を用いた。

(1) 実験の際に考慮した基本条件

熱赤外線センサを利用して物体の表面温度を観測する場合、センサと被写体との間にある熱吸収物質、観測角度および被写体周辺の環境などが測定結果に影響を及ぼ

表-2 供試体のコンクリート材料および配合

材 料	配 合	
普通ポルトランドセメント 比重: 3.16	水セメント比	50.0%
	細骨材率	45.0%
君津産川砂 比重: 2.60 粗粒率: 2.60	スランブ	8.0cm
	空気量	2.0%
	単位水量	160 kg/m ³
鹿島産陸砂利 最大寸法: 20mm 比重: 2.70 粗粒率: 7.40	単位セメント量	320 kg/m ³
	単位細骨材量	844 kg/m ³
	単位粗骨材	1020 kg/m ³

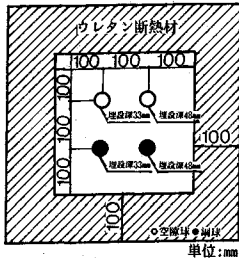


図-1 供試体の平面図

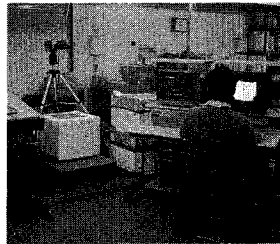


写真-3 熱赤外線センサによる観測状況

すことが考えられるので、本実験では、センサと被写体間の距離、観測角度および被写体周辺温度などの条件を同一に設定し、なおかつ測定供試体のそばに設置した標準温度体を用いて繰り返して得られる実験データの測定精度が同一になるようにした。

(2) 実験概要

本実験で使用した供試体は、コンクリートと異なる熱伝導率を持つ発泡スチロール製の直径 35 mm の球（以後、空隙球と呼ぶ）および炭素クロム鋼製の直径 35 mm の球（以後、鋼球と呼ぶ）を図-1 に示すように表面から深さを変えてそれぞれ 2 個ずつ計 4 個埋設した立方体のコンクリートである。加熱面（熱赤外線センサによる表面温度観測面）を除いた残り 5 面は、周辺温度の影響を受けないように厚さ 10 cm のウレタン断熱材で覆った。供試体内部には、内部の熱伝導状態を検証するために空隙球および鋼球を挟んだ上部および下部（表面から 7.5 mm および 90 mm）に熱電対を埋めた。供試体は、表-2 に示した材料および配合により JIS A 1132 に準じて製作した。

加熱装置は、長さ 50 cm の棒状遠赤外線ヒーター 3 本を 10 cm 間隔に並べ、ステンレス製熱反射板により約 300°C の熱が供試体の測定面を一樣に加熱できるような構造を持つ遠赤外線ヒーターである。

熱赤外線センサによる観測は、恒温恒湿室（室温 20 ± 3°C、湿度 80%）において遠赤外線ヒーターを用いて 10 分、20 分および 30 分間加熱した供試体に対して行った。なお、供試体は所定の 28 日間養生を行った後、110°C の電気乾燥器で 48 時間乾燥させて測定に供した。

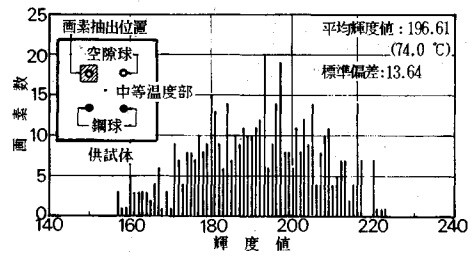
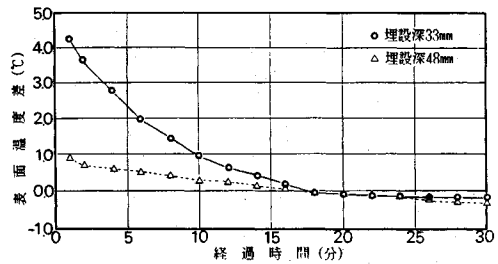
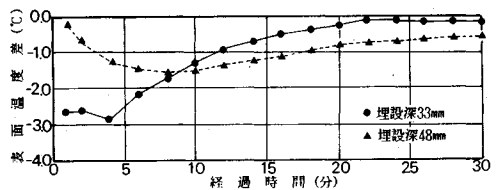


図-2 抽出画素のヒストグラム



(1) 空隙球埋設位置の特性曲線



(2) 鋼球埋設位置の特性曲線

図-3 20分間加熱による空隙球および鋼球埋設位置の特性曲線

遠赤外線ヒーターと供試体加熱面との距離は 20 cm、熱赤外線センサと被写体との距離は 90 cm、観測間隔は 1 分である。さらに、観測時には、室内の空気の流れによる観測結果への影響を排除するために供試体周辺を遮風した。

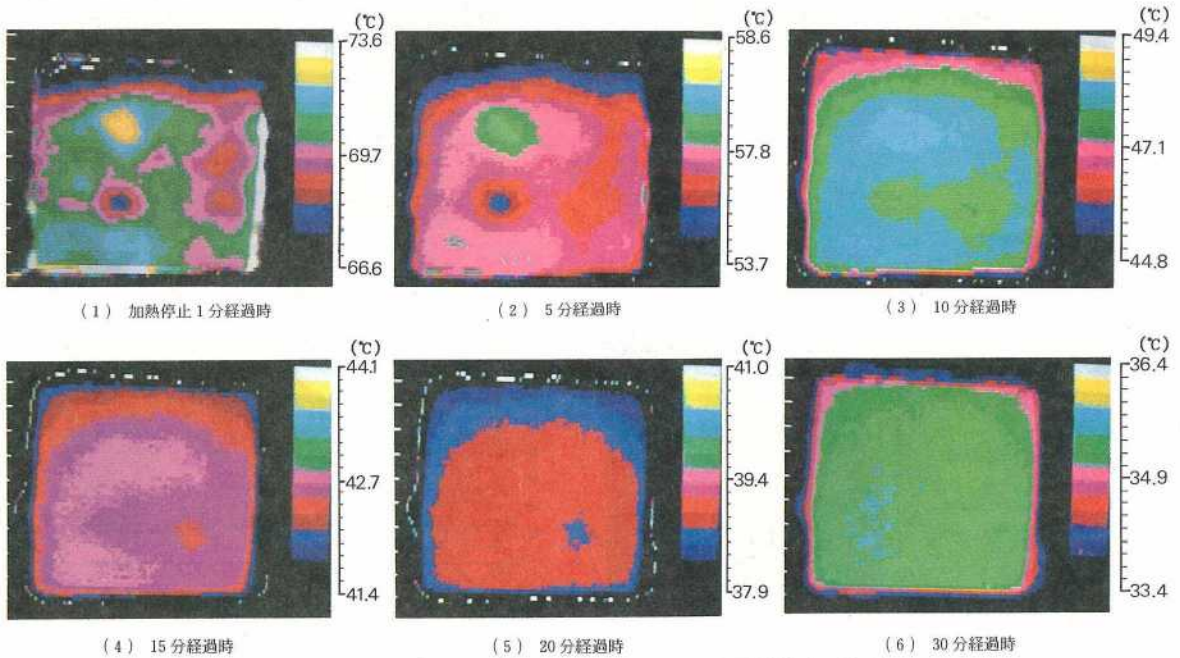
写真-3 は、熱赤外線センサによる観測状況である。

(3) 熱赤外線センサで得られた熱画像

一定時間加熱して放置した後、加熱面を熱赤外線センサで観測して得られた各経過時の熱画像には、環状および帯状の高温および低温域を含む温度分布パターンが現れた。供試体表面を 10 分、20 分および 30 分間加熱して放置した後、加熱面を熱赤外線センサで観測して得られた熱画像のなかから、20 分間加熱時の観測を例にとって加熱停止後 1 分、5 分、10 分、15 分 20 分および 30 分経過時の熱カラー画像を写真-4 に示した。各熱カラー画像の温度とカラーとの関係は、画像右側にカラーバーで表示した。

(4) 空隙球および鋼球埋設位置の表面温度経時変化

画像解析機器を用いて熱画像上の空隙球ならびに鋼球の埋設位置および何も埋設していない画像真中を中心と



写真—4 20分加熱時の空隙球および鋼球を埋設した供試体表面の熱画像

した横 39 画素×縦 35 画素範囲内（供試体上では 5 cm×5 cm の範囲）の各画素を抽出し、各画素が示す輝度値から図—2 に示すようなヒストグラムを作成し、これを基に抽出範囲内画素の平均輝度値を求め、測定条件により決定される式（2）に示す計算式を用いて平均輝度値から平均温度を算定した。なお、画素抽出範囲を供試体上で 5 cm×5 cm と設定したのは、いくつかの抽出範囲に対するヒストグラムを求めたところ、その標準偏差が最も小さくなったためである。

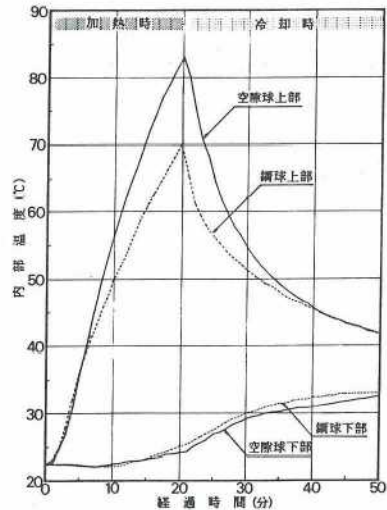
$$T_s = 2.65 B_s \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 T_s ：画素抽出範囲内の平均表面温度（°C）

B_s ：画素抽出範囲内の平均輝度値

図—3 は、熱画像から求めた画像中心位置の平均温度に対する空隙球埋設位置および鋼球埋設位置の平均温度との差を経過時間毎に示したものである。図に示される埋設深の異なる空隙球および鋼球位置の表面温度経時変化曲線は、供試体内部の空隙球および鋼球の埋設位置が関与して現れた表面温度の変化を示す特性曲線と言べきものである。この曲線は、加熱停止直後に現れる表面温度（イニシャルポイント）と冷却時の表面温度変化の違いに特徴がある。なお、10 分、20 分および 30 分間の加熱時における特性曲線を求めたところ、20 分間加熱時における表面温度変化が最も顕著に現れ、外部から与える熱量が最適であることが実験で確認された。

この特性曲線を参考にして、コンクリート表面を一定時間加熱した後には得られる供試体の表面温度と内部状態との関連を調べると、次のような関係があることが分



図—4 供試体内部実測温度の経時変化（埋設深 33 mm の空隙球および鋼球の上下部）

かった。

- a) 空隙球埋設位置の加熱停止直後における表面温度は、何も埋設していない位置より高温になる。
- b) 埋設深の異なる空隙球埋設位置の加熱停止直後における表面温度は、埋設深の浅い位置のほうが深い位置より高温になる。
- c) 埋設深の異なる空隙球埋設位置の冷却時の表面温度は、埋設深が深くなるほど温度降下速度が緩慢になる規則的な変化を示す。
- d) 鋼球埋設位置の加熱停止直後における表面温度

は、何も埋設していない位置より低温になる。

e) 埋設深の異なる鋼球埋設位置の加熱停止直後における表面温度は、埋設深の浅い位置のほうが深い位置より低温になる。

f) 埋設深の異なる鋼球埋設位置の冷却時の表面温度は、埋設深の深い位置のほうが浅い位置より温度降下速度は緩慢で、何も埋設していない位置の表面温度と同温になる収斂時間が長くなる。このため、埋設深の相違によっては、途中から埋設深の深い位置のほうが浅い位置より表面温度が低くなる可能性がある。

以上に示した表面温度変化の諸現象は、加熱時における供試体内部の熱伝導が空隙球による阻害および鋼球による促進、冷却時における空隙球および鋼球埋設位置の貯留熱の相違などに起因しているものと考えられる。供試体内部における空隙球および鋼球による熱伝導の阻害および促進の状態は、供試体の表面から 33 mm の深さに埋設した空隙球および鋼球を挟む上下部（表面から 7.5 mm および 90 mm の位置）に埋め込んだ熱電対によって測定した供試体加熱時および冷却時の内部温度の違いによって検証される（図-4 参照）。

5. 人工加熱したコンクリートの表面温度変化に関する理論解析

前項で示した実験結果を検証する目的で、実験で用いたコンクリート供試体を対象として一定時間加熱時における熱伝導方程式の境界要素法による非定常熱伝導現象の数値的シミュレーションを行い、空隙球および鋼球埋設位置の表面温度変化を示す特性曲線を求めた。

(1) 熱伝導方程式の境界要素法による近似解析

対象とする物体を均質で等方とし、熱的物性値（密度 ρ 、比熱 c 、熱伝導係数 k ）の温度依存性を無視し、さらに内部発熱源がないとした時、時間 t における物体内の任意の点 χ における温度 $u(\chi, t)$ に関する次のような非定常熱伝導方程式の初期値—境界値問題を考える。

熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial u}{\partial t} = k \nabla^2 u \quad \Omega \text{ 内} \dots\dots (3)$$

初期条件

$$u(\chi, 0) = u_0(\chi) \dots\dots (4)$$

境界条件

$$u(\chi, t) = \bar{u} \quad \Gamma_1 \text{ 上} \dots\dots (5)$$

$$q(\chi, t) \equiv -k \frac{\partial u}{\partial n} = \bar{q} \quad \Gamma_2 \text{ 上} \dots\dots (6)$$

$$q(\chi, t) = h(u_s - u) \quad \Gamma_3 \text{ 上} \dots\dots (7)$$

ただし、境界 $\Gamma(\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3)$ で囲まれた領域を Ω とし、 u_s は外部雰囲気温度、 h は熱伝達係数、 $\partial/\partial n$ は法線方向微分を表し、 \sim つき量は既知であることを示す。

上記の非定常問題を境界要素法を用いて近似解析する

際いくつかの手法が存在している⁶⁾。本論では、取り扱いが簡単である 2 重相反法⁷⁾を採用する。

式 (3) のラプラス変換の基本解 $w^*(k \nabla^2 w^* = \delta(\chi - \xi))$ に関する次の積分表現式を与える。

$$\int_{\Omega} (k \nabla^2 u - \rho c \frac{\partial u}{\partial t}) w^* d\Omega = 0 \dots\dots (8)$$

上式に発散定理を適用することによって次式を得る。

$$u(\xi) + \int_{\Gamma} q^* u d\Gamma - \int_{\Gamma} w^* q d\Gamma = \int_{\Omega} \rho c \frac{\partial u}{\partial t} w^* d\Omega \dots\dots (9)$$

ただし、

$$q^* = -k \frac{\partial w^*}{\partial n}, \quad w^* = \frac{1}{4\pi k \gamma}, \quad \gamma = \|\chi - \xi\|$$

上式の右辺の領域積分項を境界積分項に変換するため、次のような 2 重相反手法を用いる。温度の時間導関数を N 個の座標関数 $f^j(\chi)$ と時間関数 $\alpha^j(t)$ との線形和として次のように表現する。

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\chi, t) = \sum_{j=1}^N f^j(\chi) \alpha^j(t) \dots\dots (10)$$

さらに、この $f^j(\chi)$ に対して

$$\nabla^2 \psi^j(\chi) = f^j(\chi) \dots\dots (11)$$

を満足する関数 $\psi^j(\chi)$ を導入し、源点 ξ を境界上の点として選ぶことによって、積分方程式 (9) は次の境界積分方程式となる。

$$\begin{aligned} C u(\xi) + \int_{\Gamma} q^* u d\Gamma - \int_{\Gamma} w^* q d\Gamma \\ = \frac{1}{\kappa} \sum_{j=1}^N (C \psi^j(\xi) + \int_{\Gamma} \psi^j q^* d\Gamma - \int_{\Gamma} \tau^j w^* d\Gamma) \alpha^j(t) \end{aligned} \dots\dots (12)$$

ただし、 C は形状係数 $\kappa (\equiv \kappa/\rho c)$ は温度伝導率、 $\tau^j = -\kappa \partial \psi^j / \partial n$ とする。

この境界積分方程式を離散化することによって節点における未知ベクトルに対する次の行列表現を得る。

$$[H]\{u\} - [G]\{q\} = \frac{1}{\kappa} ([H]\{\psi\} - [G]\{\eta\})\{\alpha\} \dots\dots (13)$$

ただし、 $[H]$ 、 $[G]$ は基本解 w^* を用いて与えられる影響行列とする。ここで、 \dot{u} の表現式 (10) に注意し、 $\{\alpha\}$ を $\{\dot{u}\}$ で表現することによって式 (13) は次のようになる。

$$[C]\{\dot{u}\} + [H]\{u\} = [G]\{q\} \dots\dots (14)$$

ただし、

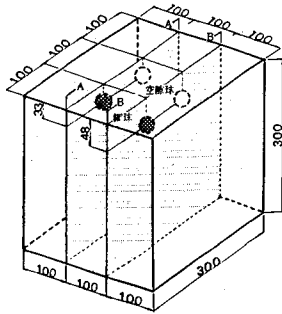
$$[C] = -\frac{1}{\kappa} ([H]\{\psi\} - [G]\{\eta\}) [F]^{-1} \dots\dots (15)$$

式 (14) を解くためには、各未知ベクトル $\{u\}$ 、 $\{q\}$ および $\{\dot{u}\}$ を次のような時間に対する線形補間を導入することにする。

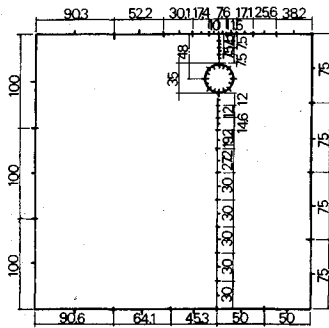
$$\left. \begin{aligned} \{u\} &= (1-\theta)\{u\}^m + \theta\{u\}^{m+1} \\ \{q\} &= (1-\theta)\{q\}^m + \theta\{q\}^{m+1} \quad (0 \leq \theta \leq 1) \\ \{\dot{u}\} &= \frac{1}{\Delta t} (\{u\}^{m+1} - \{u\}^m) \end{aligned} \right\} \dots\dots (16)$$

表—3 理論解析の諸条件

	コンクリート	鋼球	空隙球
熱伝導率 (W/mm·k)	1.6×10^{-3}	83.5×10^{-3}	0.0
質量密度 (g/mm ³)	2.30×10^{-3}	7.86×10^{-3}	0.0
比熱 (J/g·k)	0.840	0.435	0.0
計算条件	初期温度	19.0℃	
	加熱過程時	表面より熱流束 3.0×10^{-4} W/mm ² 20分間	
	冷却過程時	周辺温度 19.0℃ 表面における熱伝達係数 5.0×10^{-4} W/mm ² ·k	



図—5 解析モデルと解析対象面



図—6 要素分割図 (空隙球を 48 mm の位置に埋設時)

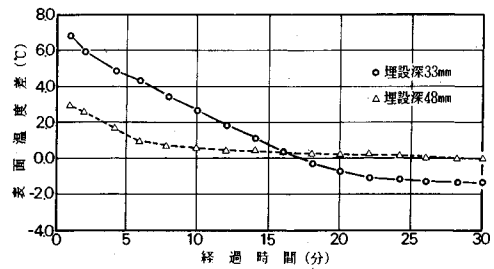
ただし、上付き添字は m 時間ステップにおける値を表し、 Δt は時間増分とする。この式 (16) を式 (14) に代入することによって次式となる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t}[C] + \theta[H]\right)\{u\}^{m+1} - \theta[G]\{q\}^{m+1} \\ & = \left(\frac{1}{\Delta t}[C] - (1-\theta)[H]\right)\{u\}^m + (1-\theta)[G]\{q\}^m \end{aligned} \quad (17)$$

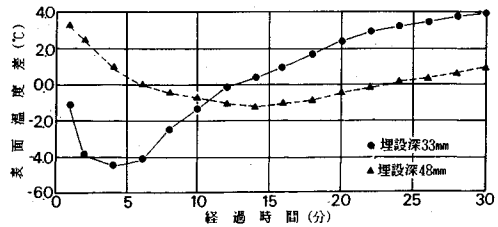
ここで、右辺の $\{u\}^m$ と $\{q\}^m$ は、 m タイムステップにおける境界上の温度と熱流束である。これらの量は、既知であるから式 (17) より $(m+1)$ タイムステップにおける温度と熱流束を決定できる。

(2) 解析条件

計算対象とした供試体の材料物性値、計算条件を表—3に、数値計算に用いた解析モデルを図—5にそれぞれ示した。熱の流れは主として表面から内部に向かうと考



(1) 空隙球埋設位置の特性曲線



(2) 鋼球埋設位置の特性曲線

図—7 数値解析による空隙球および鋼球埋設位置の特性曲線

え、供試体の空隙球および鋼球の中央を通る断面を対象とした2次元解析とし、熱の流れの激しい表面近傍では比較的細かく、内部へいくほど粗い要素分割 (図—6参照) とした。さらに、2重相反法における N は、境界上の未知数評価の個数であり、ここでは二次要素を使用するため6とし、タイムステップは $\Delta t = 60_{sec}$ で20ステップの計算を行った。

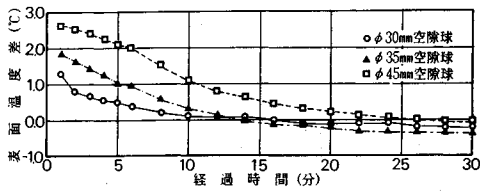
(3) 計算結果

図—7は、理論解析により求めた供試体中心位置の平均温度と空隙球および鋼球埋設位置の平均温度との差の経時変化である。なお、図中の温度は実験時の計測タイムスケールに合わせて計算値から抽出した値である。理論解析で求めた各埋設位置での特性曲線の相違は、インシヤルポイントに多少の差があるが実験で求めた特性曲線の相違 (図—3参照) と同じ傾向を示しており、実験結果を理論的に検証できたものと考えられる。

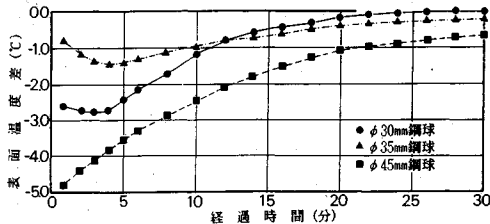
6. 大きさおよび埋設深の異なる空隙球・鋼球埋設位置の表面温度経時変化

直径 35 mm の空隙球および鋼球を表面から 33 mm と 48 mm の深さに埋設した供試体を利用した人工加熱による実験の結果、それぞれの埋設球の位置における表面温度変化を特性曲線として捉えることができた。ここでは、さらに、大きさや埋設深を変えた空隙球および鋼球を挿入した供試体を用意し、それぞれの埋設位置での表面温度変化を示す特性曲線を求めた。なお、供試体への加熱条件、供試体の材料および形状は4章(2)項と同—である。

図—8は、表面から 33 mm の深さに埋設した直径 30

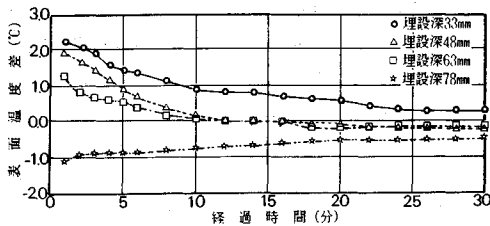


(1) 空隙球埋設位置の特性曲線

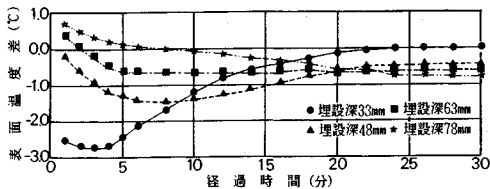


(2) 鋼球埋設位置の特性曲線

図-8 大きさの異なる空隙球および鋼球の特性曲線



(1) 空隙球埋設位置の特性曲線



(2) 鋼球埋設位置の特性曲線

図-9 埋設深の異なる空隙球および鋼球の特性曲線

mm, 35 mm および 45 mm の空隙球および鋼球位置と、何も埋設していない位置との表面温度差の時間変化を示す特性曲線である。空隙球および鋼球ともに形状が大きなほど経時温度変化が大きい特性曲線が得られることが認められた。

図-9は、直径 30 mm の空隙球および鋼球を、表面から 33 mm, 48 mm, 63 mm および 78 mm の深さに埋設した場合と、何も埋設していない場合との表面温度差の時間変化を示す特性曲線である。空隙球および鋼球を埋設した場合は、埋設深が浅いほど顕著な特性曲線が得られることが認められた。ただし、埋設深 78 mm の空隙球位置の特性曲線は、埋設深が深すぎるために空隙球位置を示す特徴的な形状を示さなかった。

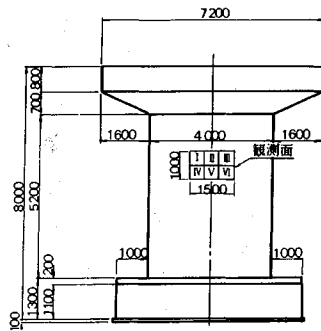


図-10 熱赤外線センサで観測した橋脚の断面図

7. 人工加熱した実構造物における特性曲線

一定時間加熱した実構造物を熱赤外線センサで観測して得られる温度分布画像から高温部および低温部を抽出し、その位置における温度変化を示す特性曲線を求めて内部の空隙や鉄筋の状態との関連を調べた。対象とした実構造物は、築後約 30 年の橋梁で架け替えが必要となった橋脚である。実構造物を対象にする場合、内部状態が未知なので判読に適する表面温度分布が現れる加熱時間の選定が重要な要因となる。本実験では、測定を実施する前に任意に決めた時間で数回加熱した後の 5 分間を熱赤外線センサで観測することにより、空洞および多孔質部などの高温部および鉄筋部の低温部が判読できる温度分布が最も顕著に現れる加熱時間を試行錯誤的に決めた。

(1) 熱赤外線センサで得られた熱画像

熱赤外線センサによる表面温度は、横 1.5 m × 縦 1.0 m の範囲を 50 cm × 50 cm の正方形に 6 分割 (I ~ VI 断面、図-10 参照) し、それぞれの分割範囲をアセチレンガスバーナーを用いて一様に 10 分間加熱した後、分割域毎に 1 分間隔で測定した。熱赤外線センサで観測する分割範囲への加熱は、各断面に隣接して置いた温度測定体の加熱終了時の表面初期温度が等しくなるように、また、加熱むらがないように観測範囲の四隅および中心温度を熱赤外線センサで注視しながらコントロールした。測定時の天候は、気温 5°C および湿度 75% の曇天で、被写体周辺は無風であった。

写真-5は、熱赤外線センサによる観測結果の一例として、6 分割したうちの I 断面の加熱停止直後、2 分, 4 分, 6 分, 8 分および 10 分経過時の熱カラー画像である。カラーバーの温度範囲の測定は、幾つかの画像のなかから、目視により画像内の温度分布パターンが顕著な現れ方をするレンジを選択した。この断面を含めた全分割断面の熱画像には、大小さまざまな環状や帯状の高温域や低温域が現れて消えてゆく明瞭な温度分布パターンの変化が現れた。画像外縁部の低温部は、観測範囲外なので加熱していないために現れた個所である。なお、温度分

○低温部 ●高温部 ⊕中等温度部

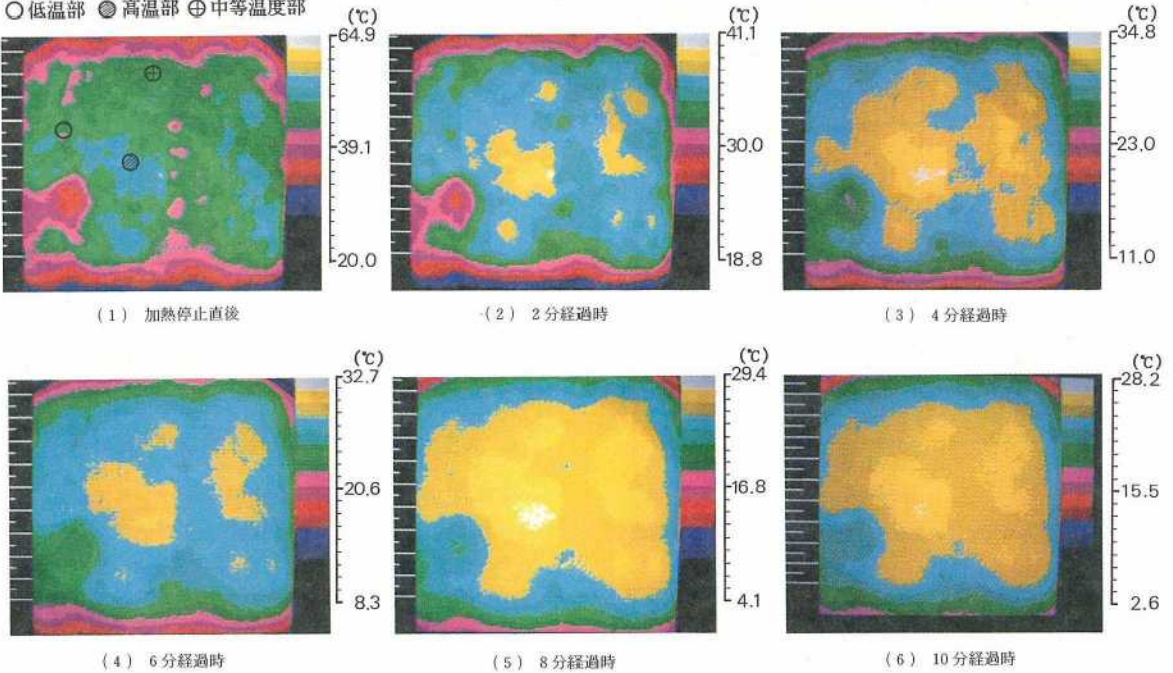


写真-5 10分間加熱時の実構造物（橋脚の一部）の熱画像（断面Ⅰ）

布パターンの変化のなかには、内部の空隙や鉄筋などが存在しない個所が現れる場合があったが、これは表面に付着した塵や水、無意識に手が触れていた個所などであることが後に分かった。

(2) 内部状態と表面温度との関係

実構造物の測定対象範囲（Ⅰ～Ⅵ断面）の熱画像内の任意な位置における横23画素×縦21画素（被写体表面の5cm×5cm範囲）の平均温度で表す表面温度と内部状態との関連を調べた。

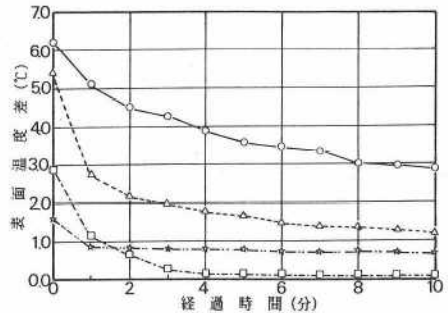
a) 鉄筋位置と表面温度との関連

熱画像内に現れている温度分布パターンのなかで局所的な低温部が線状に並んだり帯状に分布している個所（写真-5（1）のなかに○低温部、●高温部、⊕中等温度部を示した）は、内部に鉄筋がある位置であると考えられる。なお、低温部が鉄筋に沿って線状に並ばず、局所的に現れるのは実構造物のコンクリートが均質でなく、鉄筋上部および周辺のコンクリートが多孔質な個所が存在するためと考えられる。

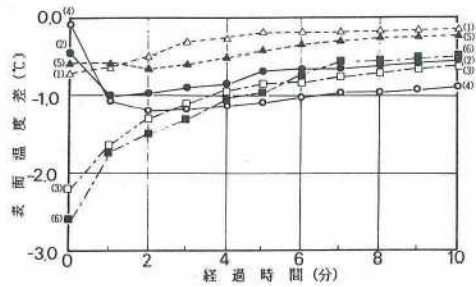
b) かぶり厚と表面温度との関連

加熱停止直後のⅠ～Ⅵ断面の熱画像を対象にして、局所および帯状の高温部ならびに低温部から任意に温度測定点（高温部4か所、低温部6か所）を選定し、画像内の中等温度部との温度差を計算し、その経時変化の特徴を表す特性曲線を求めて図-11に示した。

なお、図中の（ ）数字は、温度測定断面から採取した6個の供試体分類番号で、各々の供試体内部の鉄筋状



(1) 高温部が示す特性曲線



(2) 低温部が示す特性曲線

図-11 実構造物の熱映像から求めた高温部・低温部の特性曲線

態は表-4に示した。また、中等温度部とは、熱画像が示す温度分布の最高温度と、最低温度との平均値である。

実構造物で得た特性曲線と先に示した基礎実験で得た特性曲線（図-8および図-9参照）とを比較すると、

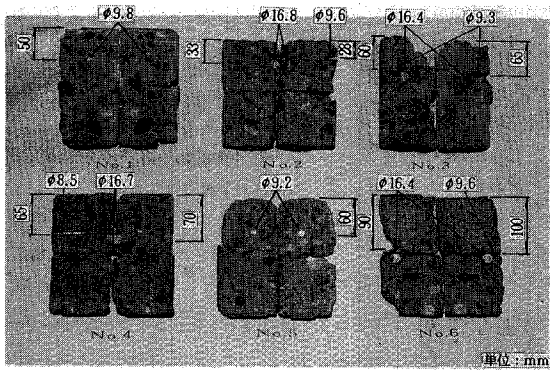


写真-6 温度測定箇所から採取した鉄筋のあるコア

表-4 表面温度測定箇所における鉄筋径とかぶり厚

コア供試体	鉄筋径 (mm)	かぶり厚 (mm)	コア供試体	鉄筋径 (mm)	かぶり厚 (mm)
No. 1	9.8	50	No. 4	8.5	65
	9.6	28		16.7	70
No. 2	16.8	33	No. 5	9.2	60
	9.3	60		9.6	90
No. 3	16.4	65	No. 6	16.4	100
	9.3	60			

隙・鉄筋の判読について行った本研究で得られた知見は以下のとおりである。

(1) 一定時間加熱して放置した状態にすると、表面に内部の状態に応じた高温域や低温域を持つ温度分布が得られる。

(2) 空隙量の多い個所の加熱停止直後における表面温度は、中等温度部より高温となる。これを利用すればコンクリート構造物の多孔質な部分の判読に利用できる。

(3) 内部に空洞のある個所には加熱停止直後に局所的な高温部が現れ、その表面温度は浅い個所に空洞のある位置ほど高くなる。これを利用すれば施工不良による空洞の判読に利用できる。

(4) 内部に鉄筋がある個所には加熱停止直後に局所的な低温部が現れ、その表面温度はコンクリート内部の材質が均一であれば浅い個所に鉄筋のある位置ほど低くなる。

(5) 内部に鉄筋がある個所の冷却時における表面温度変化は、かぶり厚が大きい鉄筋のある個所ほど中等温度部と同温度になる経時変化が小さい。これを利用すれば、かぶり厚不足の判読に利用できる。

以上のように、本研究で提案した熱赤外線計測技術を利用した人工的加熱によるコンクリート内部状態の検査法は、鉄筋コンクリート表層部の多孔質な部分、空洞および鉄筋の位置などの内部状態がある程度判読できることから、コンクリート構造物の耐久性診断法として有効的な手法であると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始変わらぬご指導、ご教示を賜り、本論文をまとめる機会を与えて頂きました丸安隆和先生ならびに小林一輔先生に深甚なる感謝の意を表す次第であります。また、境界要素法の理論的解析でご指導頂いた日本大学生産工学部登坂宣好先生、実験およびデータ整理にご協力頂いた日本大学生産工学部土木工学科コンクリート研究室の学生諸君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 笠井芳夫・富士 岳：コンクリート構造物の非破壊検査，

実構造物が示す特性曲線は、基礎実験の供試体が示す空隙球埋設位置および鋼球埋設位置の特性曲線と基本的にはほぼその形状が一致していることが認められた。したがって、実構造物の高温部が示す特性曲線形状は空隙量の違いに、また、低温部が示す特性曲線形状は鉄筋径およびかぶり厚の違いに起因しているものと考えられる。

本実験で得られた実構造物が示す高温部および低温部の特性曲線は、その測定位置により異なっていることが認められたが、特に、低温部が示す特性曲線の形状が大きく3つのグループに分けられることが特徴的である。すなわち、温度変化が少ないNo.1とNo.5測点の第1グループ、温度変化の大きいNo.3とNo.6測点の第2グループおよび中間のNo.2とNo.4測点の第3グループである。

以上の実構造物が示す特性曲線が、内部状態とどのような関わりをもつかを調べる目的で各温度測定点からコアを採取して検証した。この結果、高温部から採取したコアには、鉄筋の存在が認められなかったが、低温部から採取したコアには写真-6および表-4に示すような個所に鉄筋が認められた。各供試体の特性曲線は、第1グループが細い径の鉄筋がある位置、第2グループが太い径の鉄筋がある位置および第3グループが2本の鉄筋がある位置に対応していることが分かる。図-11(2)では、鉄筋径の順序が加熱停止後4分経過時の表面温度の違いに対応しており、また、かぶり厚の違いは加熱停止後6分経過時の表面温度に対応していることが分かる。したがって、加熱停止後4分経過時までの温度は、鉄筋径やかぶり厚などに対応しているのではなく、実構造物のコンクリートが均質でないことから、鉄筋周辺のコンクリートの空隙状態に影響された温度であると考えられる。

8. 結 論

熱赤外線計測技術を利用したコンクリート構造物の空

- 非破壊試験, pp.206~221, 1988.
- 2) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究，土木学会論文集，第390号，pp.1~22, 1988.
- 3) 日本写真測量学会編：熱赤外線リモートセンシングの技術と実際，p.30, 鹿島出版会 1986.
- 4) 新井洋一・江尻公一・立川道義・増谷光正・高恒信行：赤外計測によるコンクリート剝離の検出，赤外線技術，pp.98~101, 日本非破壊検査協会，1986.
- 5) 和田正信・中野朝安：赤外線工学，pp.17~18, 近代化学社，1963.
- 6) 登坂宣好・中山 司：境界要素法の基礎，日科技連出版社，1987.
- 7) Nowak, A.J. : Temperature fields in domain with heat sources using boundary-only formulation, in Boundary Elements X, pp.233~246 Springer-Verlag, 1988.

(1991.3.29 受付)

FUNDAMENTAL STUDIES ON THE USE OF HEAT-INFRARED RAY TECHNIQUE TO DETERMINE THE CONDITION OF VOIDS AND REINFORCEMENT IN CONCRETE STRUCTURES

Mutsuhito YANAI and Taketo UOMOTO

An existing method for inspection, which employs heat-infrared ray to detect the deteriorated portion of concrete surface makes it difficult to judge the internal conditions of concrete due to insufficiency of solar radiation heat at the job site. This paper discusses a new idea in which the surface of a concrete structure is heated artificially, for a specific time, applying the necessary heat source to concrete, for the detection of its internal conditions.

By analysing the temperature distribution of the surface of concrete immediately after the interruption of heating, and the temperature changes with cooling time, can be used to determine the internal condition of the structure. Whereas the existing methods can only analyze the surface condition of the concrete, the new method can be used to evaluate the structural members three-dimensionally.