

# 型わく面の熱画像解析によるコンクリート打込み時の欠陥検出法に関する研究

渡部 正\*・魚本健人\*\*

著者らは、コンクリート打込み時の型わく外面の熱画像を計測することによって、リアルタイムで空隙、豆板等の欠陥を検出する方法を提案している。

本研究では、この手法に対して画像処理法を適用し、欠陥の識別をより定量的、客観的に行うための検討を行ったものである。その結果、コンクリートを打込んだことによって生ずる型わく外面の温度変化量のみを画像間差分処理によって表示するとともに、その温度変化量にしきい値を設定して2値あるいは3値画像処理することにより、欠陥の検出を定量的に行うことができるこことを明らかにした。

**Key Words :** concrete placing, consolidation, form, thermogram, image analysis

## 1. はじめに

コンクリート構造物を高品質かつ耐久的に建設するためには、施工時の管理および検査が重要であり、欠陥のない所要の品質を有するコンクリートを打込むことが、早期劣化を予防する上での原点であると提言されている<sup>1)</sup>。

しかし、従来より、構造体品質を検査するための様々な手法が提案・適用されているものの、コンクリート打込み時に型わく内部の状況を、客観的かつリアルタイムで管理・検査を行うための手法が皆無であり、今だ技術者の経験的な判断に頼っているのが現状である。したがって、コンクリートの打込み状況、すなわち、締固めの良否、空隙や豆板の発生等をリアルタイムで監視することができれば、コンクリートがまだ固まらない時点での再度入念な締固めを行うなどの対処ができるため、施工不良による欠陥を未然に防止することが可能となるであろう。

そこで、著者らは、コンクリート打込み時の型わく外面の熱画像を計測することによって、型わく内部のコンクリートの打上がり高さや締固め不良、材料分離によって生ずる空隙や豆板等の欠陥をリアルタイムで検出する方法を既に提案した<sup>2)</sup>。そして、それが鋼製型わくや合板型わくであっても、検出に要する時間に多少の違いがあるものの、いずれの場合においても適用でき、かつ、実施工に対しても十分適用できることを検証した<sup>3),4)</sup>。しかしながら、この方法における欠陥等の判別は、測定された原画像で直接行っていたため、熱画像に関するある程度の専門的な知識が必要であり、また、測定者の主観的な判断が影響を及ぼす可能性があった<sup>2)~6)</sup>。

本研究では、この手法に対して画像解析技法を適用し、欠陥の識別をより定量的、客観的に行えるような手法に改善することを目的として実施したものである。

## 2. 本手法の概要

通常、コンクリート温度と外気温は、図-1に示した例のように異なっている場合が多い。したがって、コンクリートが打込まれる前の型わく温度と外気温とがほぼ同一であると考えると、コンクリートと型わくとには温度差が生じていることになる。本手法は、この温度差を利用してしたるものであり、コンクリートが打込まれることによって型わくの温度が変化するという現象を、赤外線映像装置を使用して非接触かつ二次元的に熱画像として撮影し、コンクリートが充填された部分とそうでない部分を判別するとともに、締固め不良箇所の検出を行うものである<sup>2)~6)</sup>。

打込み不良や材料分離等によって生ずる豆板は、充填された部分との型わく温度の違いとして検出できる。すなわち、コンクリートの締固めが不十分な部分では、その中に多量の空隙が存在している。この空隙は外気とほぼ等しい温度であるため、十分に締固められた部分のコンクリートとでは、全体の平均温度が異なると考えられる。したがって、コンクリート温度が型わく温度よりも高い場合には、コンクリートをただ単に型わく内に投入しただけでは空隙を含むため、全体の温度はその空隙量に応じた分だけ、十分に締固められた空隙の無いコンクリート部より低くなると考えることができる。

図-2は、このことを確かめるため、鋼製型わく内に型わくより2.5~5°C高い温度のコンクリートを投入し、締固めに伴ってどのように型わく外表面の温度が変化するのかを赤外線映像装置で計測した例を示したものである。ここで、縦軸の相対温度変化率とは、充填率100%、すなわち、締固めが十分に行われた部分の型わく

\* 正会員 前田建設工業（株）技術研究所主任研究員  
(〒179 東京都練馬区旭町1-39-16)

\*\* 正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授

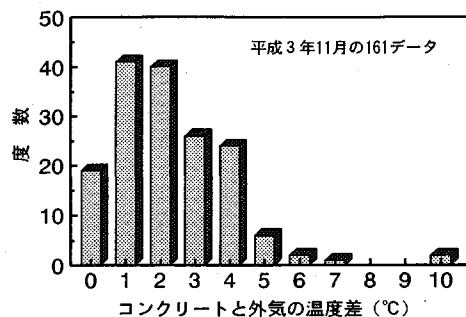


図-1 コンクリートと外気の温度差の測定例

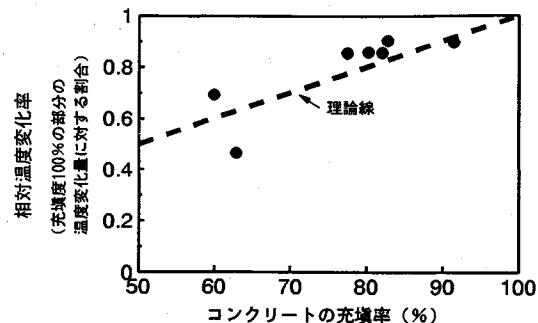


図-2 コンクリートの充填率による型わく表面温度の違い

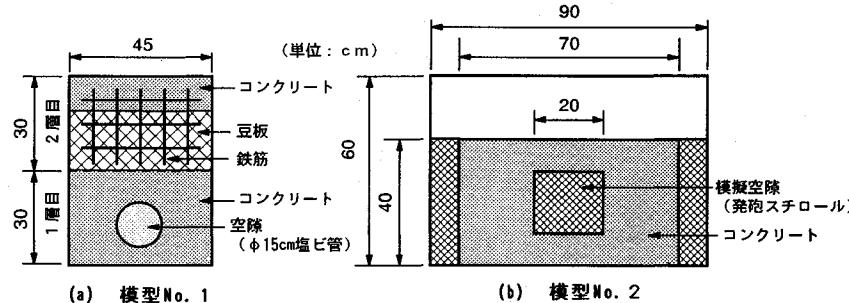


図-3 模型形状

く温度の上昇量に対する、充填不良部の温度上昇割合である。このように、多少のバラツキは有しているが、充填率と相対温度変化率はほぼ比例関係にあり、空隙部の温度が外気温に等しいとして求めた理論上の値ともほぼ一致している。したがって、このような現象を計測することによって、コンクリートの締固めの程度をも判定することができるることを示している。

### 3. 実験概要

実験は、図-3に示した2つの模型について実施した。模型No.1は、主に画像処理法を検討するためのものであり、模型No.2は、型わくに直射日光が当たっている場合への適用性についての検討を行うためのものである。いずれの模型も鋼製型わくを使用した。

模型No.1は、図-3(a)に示したような形状寸法であり、屋内に設置した型わく内にスランプが8cmのコンクリートを2層に分けて打込み、その時の型わく外面の熱画像を計測した。コンクリートは1層目を打込んだ後、直ちに2層目を打込んだ。1層目には、空隙を模擬した直径15cmの塩ビ管を埋設し、コンクリート投入後に棒状バイブレーターを使用して締固めを行った。2層目は、部分的に締固め不良による豆板を模擬するため、直径6mmの鉄筋を縦10cm間隔、横7.5cm間隔の格子状にかぶり厚20mmとして二重に配筋した。コンクリート投入後は、上部の約10cmのみを棒状バイブルー

表-1 使用した赤外線映像装置の性能

測定温度範囲	-40～950 °C
赤外線検知器	InSb、10素子アレイ
検知器冷却剤	アルゴンガス、チッソガス
検知波長帯	3～5.4 μm
瞬時視野角	2.2 mrad
フレームタイム	1/30 秒
走査線数	100 本
表示画素数	水平256×垂直200
設定感度	0.01 °C 以上

ターで締固めを行い、その下側約20cmの部分の締固めは実施しなかった。

模型No.2は、図-3(b)に示したような形状寸法であり、型わく中央に空隙を模擬するため発泡スチロールを設置した。型わくは、直射日光が当たる屋外に設置し、スランプフロー50cmのコンクリートを締固めを行わずに連続的に打込み、その時の型わく外面の熱画像を計測した。

熱画像の撮影に使用した赤外線映像装置の性能を表-1に示した。撮影した熱画像は、映像装置に内蔵されている記録装置にてフロッピーディスクに記録し、実験終了後に汎用のパーソナルコンピュータを使用して解析を行った。

### 4. 実験結果と画像処理結果

#### (1) 热画像の測定誤差

赤外線映像装置は、その機種に応じて性能が異なるた

め、このことを考慮して適切な計測条件を設定して撮影するとともに、適用の範囲、適用限界等を考える必要があると考えられる。性能を評価する指標としては、温度分解能、角度分解能、フレームタイム等がある<sup>7)~9)</sup>。

今回は、使用する赤外線映像装置に対して、画像の積算回数、設定感度、および、計測距離が、熱画像内における温度の計測誤差に及ぼす影響について事前に調べることとした。対象物体は、室内に設置した型わく表面に放射率が0.96の黒体テープを張り付けた面とし、上記の各種条件で撮影した熱画像内の50画素の温度の標準偏差を求めた。その結果は、図-4(a), (b), (c)に示すとおりであった。

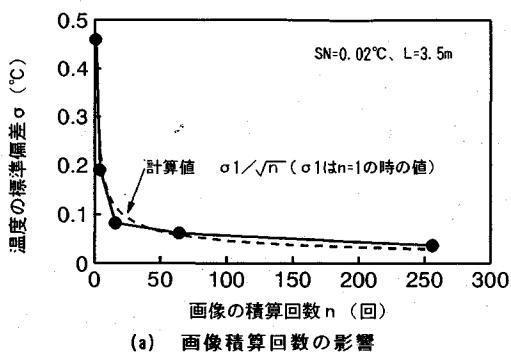
このように、測定された温度の標準偏差値は、画像の積算回数n、設定感度SNによって大きく変化しており、 $1/\sqrt{n}$ に反比例するとともに、SNに比例している。つまり、測定精度を上げるためにには、画像の積算回数を多くするとともに設定感度を小さくする必要があることを示している。また、計測距離の影響については、本実験の範囲内では認められないが、計測距離Lが長くなるにしたがって1画素当たりの対象物体の面積dが $L \cdot \omega / 1000$ ( $\omega$ は瞬時視野角(mrad))の如く大きくなるということの解釈上の留意が必要である。

ここで求めた標準偏差値には、温度の不均一性によるものと、装置が有する測定誤差の両方を含んでいると考えられる。しかしながら、これらの結果から言えることは、計測された熱画像内における相対的な温度差を利用して何等かの識別を行う手法の場合は、例え画像上での温度が均一であろうと思われても、実際にはこの程度の誤差が含まれていることを考慮して画像を理解する必要があることであろう。また、このような誤差は、対象物体の性質、すなわち、光沢、粗さ、汚れ等のバラツキによっても生ずることが予想される。よって、撮影した熱画像を解析する場合においても、記録された温度情報に装置の性能、計測条件、および、対象物体の性質等に起因する誤差がどの程度含まれているかを知った上で適用法を考える必要があるものと考えられる。

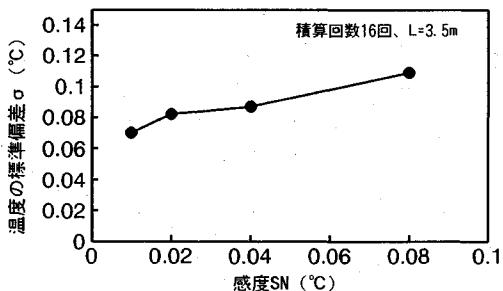
## (2) 热画像の撮影結果

写真-1は、模型No.1の実験に使用した型わくの外観を示したものであり、コンクリートの打込みは右側半分の部分のみを使用して行った。写真-2は、型わく脱型後の外観を示したものであり、下半分の1層目に空隙が、上半分の2層目に豆板が存在していることが分かる。

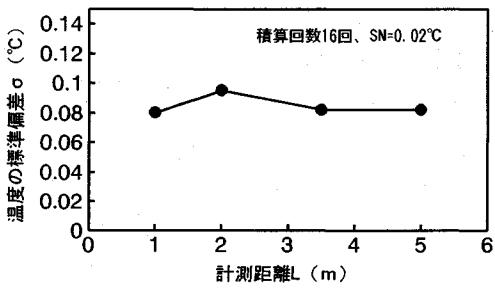
写真-3(a), (b)は、コンクリート打込み時に撮影した型わく外表面の熱画像である。実験時のコンクリート温度は20°C、打込み前の型わく温度(外気温)は15°Cであり、熱画像の撮影は、カラー256階調、画像積算回数32回、設定感度0.04°C、計測距離4.0mとして行った。



(a) 画像積算回数の影響



(b) 設定感度の影響



(c) 計測距離の影響

図-4 計測条件と熱画像内の温度測定誤差の関係

写真-3(a)は、1層目のコンクリートを投入して棒状バイブレーターで締固めを行った直後の熱画像であり、空隙部分が周辺部のコンクリートに比べて低い温度として表れていることが明確に認められる。写真-3(b)は、2層目のコンクリートを投入して上部の約10cmのみを締固めた直後の熱画像である。1層目の空隙部分は、その層が打込まれてから約5分経過した後に撮影しているため、空隙部の型わく温度が上昇してその認識が明確にはできない。2層目の豆板部分は、その上部より若干ではあるが温度が低く表れているものの、明確には認識できない。

## (3) 画像解析による欠陥の検出法の検討

前節のように、撮影された熱画像だけからでは、2層目の豆板部のように、明確には認識できない場合が生ずる。そこで、以下のような手順で画像処理を試みた。

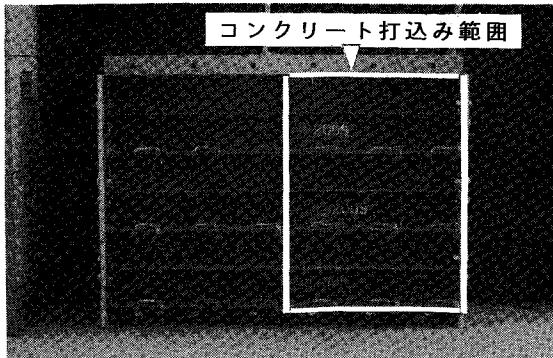


写真-1 型わくの外観

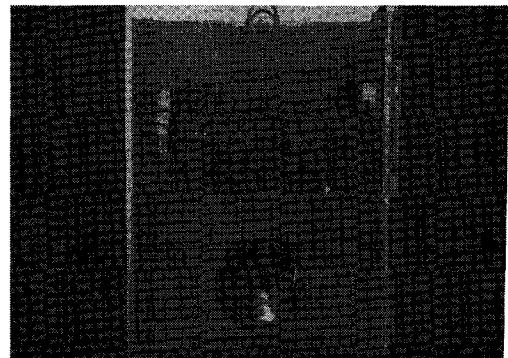
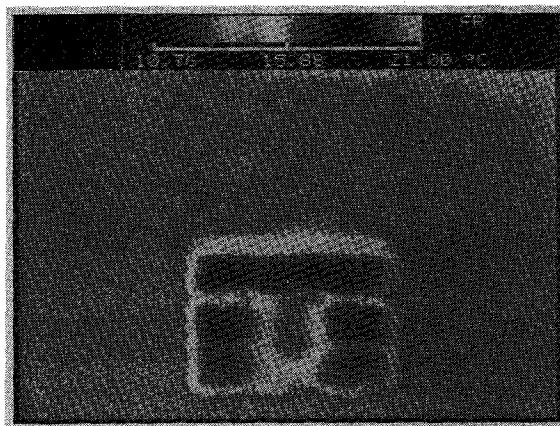
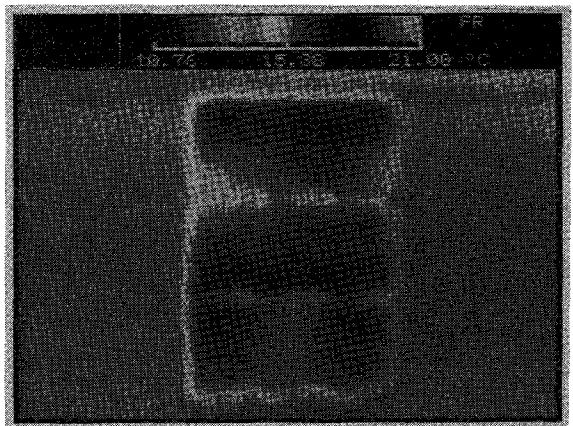


写真-2 脱型後の外観



(a) 1層目打込み後



(b) 2層目打込み後

写真-3 热画像の撮影結果

- (1) 時系列画像間演算を行い、コンクリートが打ち込まれたことによって生じた温度変化量のみを抽出する。
  - (2) 画像を見やすくするため、ダイナミック・レンジの許容される範囲内で、温度表示幅を変換してコントラストを強調させる処理を行う。
  - (3) 上記(2)の画像に対し、欠陥を客観的、定量的に識別するため、熱画像内の測定温度のバラツキを考慮したしきい値選択を行い、2値画像処理を行う。

以上の処理の具体的内容とその結果は次のとおりである。

### a) 画像間差分処理と温度変換処理

で表され、関数  $f$  は様々な式が提案されている<sup>10)</sup>。ここでは、コンクリート打込みによる温度上昇量を求めるため、差分演算処理 ( $X_A - X_B$ ) を行うこととした。なお、演算に際しては、計測条件である設定感度や表示温度幅が異なると対応する各画素の温度情報も異っているた

め、その場合にはそれぞれの画像を正規化してから行った。すなわち、記録されている下限温度と設定感度をそれぞれの画像同士が一致するような処理を行ってから差分処理を行った。

表示温度の変換は、設定感度を小さくして、各画素の温度  $z$  ( $a \leq z \leq b$ ) を次式によって  $z'$  に線形変換を行つ  
 $t^{(11)}$

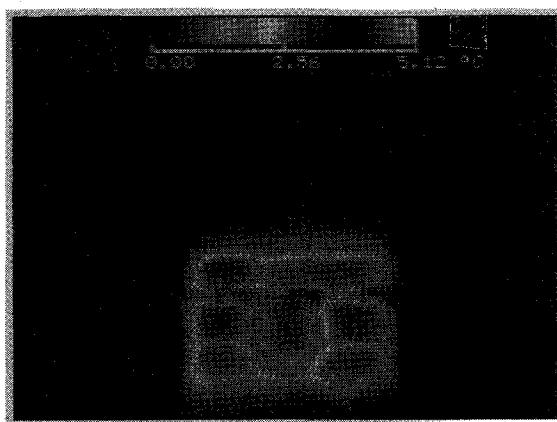
ここに、 $z'$ ：出力画像温度

$z$ : 输入画像温度

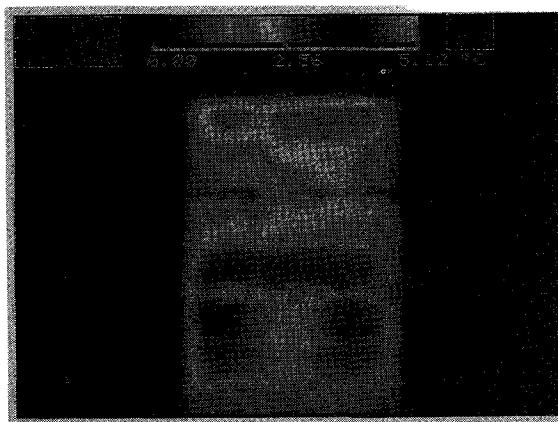
$z_1, z_k$ : 許容される温度範囲の最小値と最大値

$a, b$ : 入力された温度の最小値と最大値

写真-4 (a), (b) は、写真-3 (a), (b) の各層打込み直後の熱画像から打込み前の熱画像を減算して、さらに温度表示幅を、原画像の設定感度  $0.02^{\circ}\text{C}$  に変換処理した画像（差分画像）である。これらの写真より、画像間差分処理を施すと、時系列的に温度が変化した部分のみを抽出できるため、1層目の空隙部分、2層目の豆板部分が周辺のコンクリート部よりも低い温度となっているのが、原画像よりも明確に識別できるようになる、な

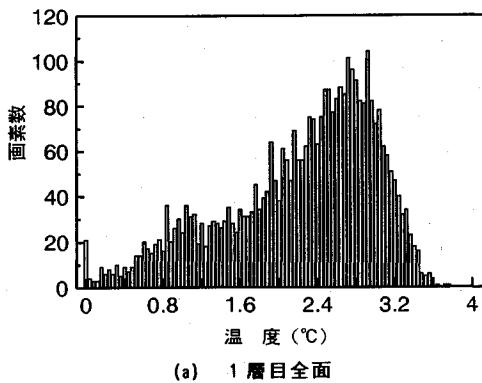


(a) 1層目打込み後

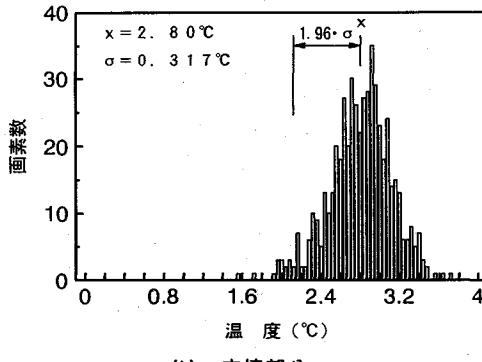


(b) 2層目打込み後

写真-4 画像間差分処理と温度変換処理した画像



(a) 1層目全面



(b) 充填部分

図-5 型わく面の温度のヒストグラム

お、画像中においてほとんど温度変化が生じていない部分は、型わく連結材の部分であり、そのような箇所の打込み状況までは既報<sup>2)-6)</sup>と同様検出できていない。このことは、欠陥が型わく連結材背面に存在する場合には、その大きさ以上でなければ検出できないことを意味している。

### b) 3値画像処理

次に、しきい値選択するための検討を行う。一般に、

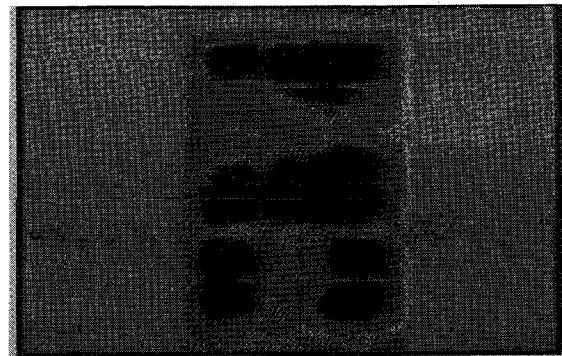


写真-5 3値画像処理結果

画像解析における2値化画像処理の際のしきい値選択の方法を大別すると、固定しきい値処理、しきい値自動決定法および動的しきい値処理等に分類される<sup>10), 11)</sup>。固定しきい値処理は、試行錯誤的に結果を見ながら決定し、対象画像の状態や撮影条件に変化がなければ、このしきい値を全ての画像に対して適用しようというものである。一方、しきい値自動決定法は、画像ごとにしきい値を自動決定する方法である。また、動的しきい値処理は、画像中の全画素で同じしきい値を使用するのではなく、各画素ごとにしきい値を変えるという方法である。いずれの場合においても、様々な手法が提案されている。

そこで、本研究では、

- ① (1) で述べたように、計測条件が異なると測定誤差も異なる。
  - ② コンクリートと型わくの温度差が常に一定というわけではない。
- 等を考慮する必要があり、また、動的しきい値処理のように画素単位までの処理を行うと膨大な計算時間を要するというような理由から、しきい値自動決定法に属する判別分析法を参考にして検討することとする。その方法

を以下に記す。

図-5 (a) は、差分画像である写真-4 (a) にて、1層目部分の型わく温度（画素の温度）のヒストグラムを示したものである。このように、温度が  $2.6^{\circ}\text{C}$  付近と  $1^{\circ}\text{C}$  付近とに2つのピークが認められる。高温の箇所がコンクリートが充填されている部分、低温の箇所が空隙に相当する部分であると推測される。この2つの山の間の谷のところの温度をしきい値とするのがモード法と称されるしきい値選択法である<sup>11)</sup>。しかしながらこの手法では、ヒストグラムに明確な谷ができる場合には適用できるが、対象とする画像内において、低温域と高温域の面積の割合が小さかったりすると明確な谷ができるない可能性があるため、汎用性のある選択法とは必ずしも言えない。

そこで、ここでは、画像内においてコンクリートが充填されていると判断される部分を基準としてしきい値を選択する方法を検討した。すなわち、コンクリートが充填された部分は、温度変化量が大きい高温域の部分であるため、写真-4 (a) 内の空隙部上部（約高さ 5 cm × 幅 40 cm の範囲）を基準範囲に選定した。その部分の画素温度のヒストグラムを求めると図-5 (b) のようになる。このように、画素温度はほぼ正規分布にしたがっており、平均が  $2.80^{\circ}\text{C}$ 、標準偏差が  $0.317^{\circ}\text{C}$  であった。標準偏差値は、(1) で述べた黒体テープを対象物体としたほぼ同一条件での値  $0.08 \sim 0.09^{\circ}\text{C}$  より大きい値となっている。これは、型わく表面の汚れやリブの存在等による誤差と画像間演算時に生ずる誤差伝播の影響であろうと考えられる。いずれにして、今回の計測条件下では、この程度の何らかの誤差を含んでいることを考慮する必要があることを意味している。

そこで、97.5% の信頼でコンクリートの充填部分を特定するため、平均温度  $X$  より  $1.96 \cdot \sigma$  ( $\sigma$ : 標準偏差) 低い温度、すなわち、 $2.80 - 1.96 \times 0.317 = 2.18^{\circ}\text{C}$  をしきい値  $t_1$  とすることとし、それ以下の温度の部分はコンクリートが十分充填されていない欠陥部分とみなすことにする。また、もう1つのしきい値  $t_2$  として、画像間演算による誤差を消去するため、 $1.96 \cdot \sigma = 1.96 \times 0.317 = 0.62^{\circ}\text{C}$  を設定することとする。すなわち、次のように温度変化量  $T$  に対してしきい値  $t_1$ 、 $t_2$  を設定して3値化（3色疑似カラー表示）することとする。

$T \geq t_1 (= 2.18^{\circ}\text{C})$  : コンクリート充填部

（赤色表示）

$t_1 > T > t_2$  : 充填不良部分（青色表示）

$T \leq t_2 (= 0.62^{\circ}\text{C})$  : 温度変化の生じていない部分

（主に背景（白色表示））

このような処理を行った画像を写真-5 に示す。これは、1層目のコンクリートを打込んだ直後の差分画像である写真-4 (a) を3値化し、2層目は1層目の処理し

た画像を固定表示した状態で、写真-4 (b) を同一のしきい値を使用して3値化したものである。この処理画像と写真-2 に示した型わく脱型後のコンクリートの外観を比較すると、1層目の空隙部の位置や大きさが良く一致している。また、2層目の豆板部分については、その右側上下の一部が充填部と判定されているものの、全体的には良い対応が認められる。

なお、処理画像中において、型わく連結材の部分は、温度変化量が小さいため、欠陥部分として判定されている。これは、画像処理の段階で消去することは可能であるが、熱画像の撮影時に可視像にてそのような部分を事前に判別しておくとともに、可視像も同時に撮影して処理画像とをマッチングさせることで識別可能であるため、今回はあえて特別な処理は実施しなかった。

以上のように、コンクリート打込み時の型わく外面の熱画像から打込み前の熱画像を減算した差分画像を表示することにより、温度が変化した部分のみを抽出でき、原画像に比べて欠陥の認識が容易となることが明らかとなった。そしてさらに、温度変化量にしきい値を設定して3値画像表示することにより、より明確かつ容易に欠陥の認識および判別を行えることが明らかとなった。

#### (4) 識別可能な充填率

本手法によって、コンクリートが充填されていない部分と判定される充填率がどの程度であるかの検討を行う。図-2 の如く充填率と相対温度変化率が比例関係にあることを利用し、充填された部分の型わくの平均温度  $X$ 、標準偏差  $\sigma$  と  $t$  分布表の  $t$  の値を用いて、相対温度変化率に対して片側検定を  $t \cdot \sigma / X$  として行い、充填された部分と充填不良部分などが判別できる境界を信頼確率との関係として求めると図-6 のようになる。なお、ここでは、変動係数である  $\sigma/X$  を  $2 \sim 10\%$  の間で 2% づつ変化させて試算した例を示した。

また、図-7 にはコンクリートの充填率と相対圧縮強度（充填率 100% 時の圧縮強度を 1.0 とした相対値）の関係も示した<sup>12)</sup>。このように、充填率の減少に伴い圧縮強度が著しく低下し、充填率が 90% ではなく  $1/2$  となつており、充填率が硬化後の品質に対して大きく影響を及ぼすことがわかる。

以上、図-6 と図-7 よりいえることは、個々の構造物の品質に対して問題となる充填率を設定することができれば、その充填率以下の部分を検出するのに必要な熱画像の撮影条件を事前に設定することにより定量的な管理ができるということである。つまり、打込み時における充填率の管理水準は構造性能や耐久性を加味して設定し、撮影条件は（1）で述べたように装置性能、計測条件および対象物体の性質を考慮して事前の調査により設定することが可能である。そして、設定した充填率以下の部分が検出された場合には、再度締固めを行う等の対

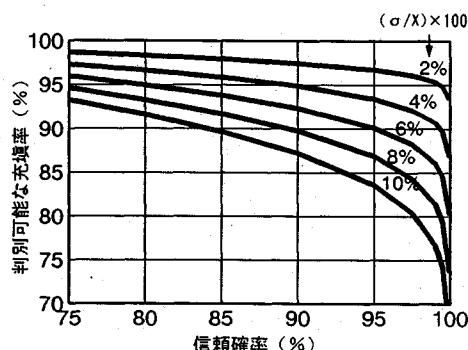


図-6 判別可能な充填率の試算例

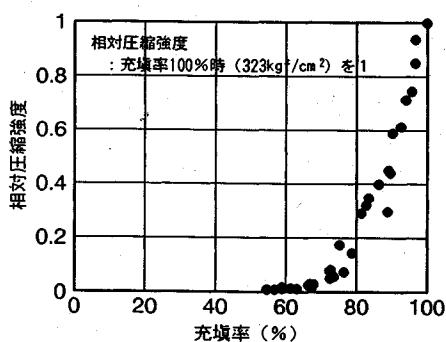


図-7 充填率と圧縮強度の関係

処を行うことにより、締固め不良による欠陥を未然に防止できるといえよう。

#### (5) 型わくに直射日光が当たっている場合への適用性の検討

実施工におけるコンクリート打込み時においては、型わく面に直射日光が当たっている場合があるため、そのような状況下でも前節で述べた画像処理法が適用できるかどうかの検討を行った。

実験には、模型 No. 2 を使用し、型わくに直射日光が当たる屋外に設置してコンクリートを打ち込んだ。実験時のコンクリート温度は 20.7°C、型わく周辺の外気温は 26.9°C、日陰の外気温は 19.0°C であった。熱画像の撮影は、カラー 256 階調、画像積算回数 16 回、設定感度 0.04°C あるいは 0.05°C、計測距離 4.5 m として行った。写真-6 には使用した型わくの外観を示した。また、写真-7 は、型わく脱型後の外観を示したものであり、空隙を模擬した発泡スチロールの左側に豆板が発生していた。

写真-8 (a) は、コンクリート打込み前の熱画像であり、写真-8 (b) はコンクリート打込み終了直前の熱画像である。これらの画像からわかるように、型わく面には温度のムラが認められる。これは、型わく面には直射日光が一様に当たっておらず、型わくのリブ等による陰が部分的に生じているためである。しかしながら、このような場合においても、コンクリートが打ち込まれた部分とそうでない部分には温度差が生じており、空隙を模擬した発泡スチロールの部分が識別できている。ここでは、型わく温度がコンクリート温度よりも高くなっているため、コンクリートが打ち込まれた部分が低温領域として検出されている。

撮影された熱画像に対し、前節と同様な画像処理を適用することとする。ただし、差分処理は、コンクリートが打ち込まれた部分の型わく温度が低下しているため、打込み前の画像である写真-8 (a) 画像から打込み終了直前の写真-8 (b) 画像を差し引いて温度変化量を抽出

出して温度変換（設定感度 0.03°C）を行った。その結果を示したものが写真-9 であり、この画像は、コンクリートが打ち込まれたことによって生じた型わく温度の低下量を示している。

次に、この画像においてコンクリートが充填された部分として、型わくの下部を選定して平均温度と標準偏差を求めたところ、平均温度が 5.310°C、標準偏差 0.747°C となった。標準偏差値は、前節での室内における実験結果よりも大きな値を示しているが、これらの値を使用して、しきい値  $t_1$  を  $5.310 - 1.96 \times 0.747 = 3.846^\circ\text{C}$  とする。ただし、もう 1 つのしきい値  $t_2$  は、前述した如く主に画像間演算処理に伴う誤差を消去するためのものであり、ここでは必要としない。すなわち、写真-8 (a) 画像の測定温度範囲は 24.23~34.47°C であり、写真-8 (b) 画像の測定温度範囲は 22.39~34.19°C であるため、前者の画像には 22.39~24.23°C の範囲の情報が含まれておらず、その範囲についての差分処理が行えないためである。このことは、撮影時の留意点であろう。

以上のことより、次のように温度変化量  $T$  に対してしきい値  $t_1$  を設定して 2 値化（2 色疑似カラー表示）することとする。

$$T \geq t_1 (= 3.846^\circ\text{C}) : \text{コンクリート充填部}$$

（赤色表示）

$$t_1 > T : \begin{aligned} &\text{充填不良部分あるいは背景} \\ &\text{部分（白色表示）} \end{aligned}$$

このような処理を行った画像を写真-10 に示す。このように、全体的には、脱型後の外観を示した写真-7 との対応は比較的良いものと判断できる。特に、打込みの際に生じた発泡スチロール左側の付近の豆板をも検出していることが分かる。

以上のように、型わく面に直射日光が当たっているような場合においても、(3) で述べた画像処理法を適用することにより、欠陥の定量的識別ができることが明らかとなつた。

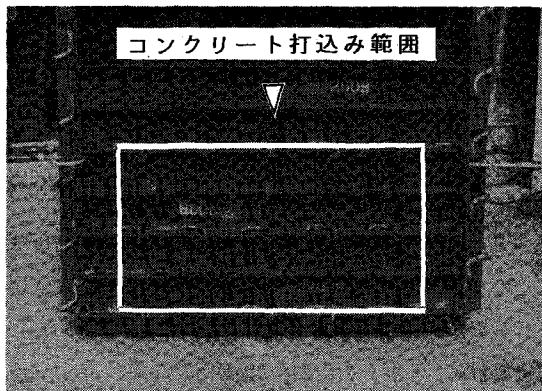


写真-6 型わくの外観

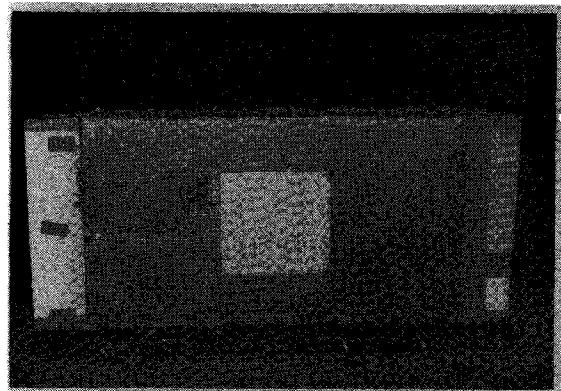
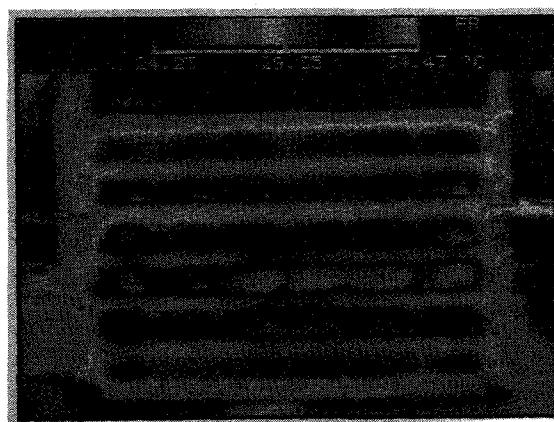
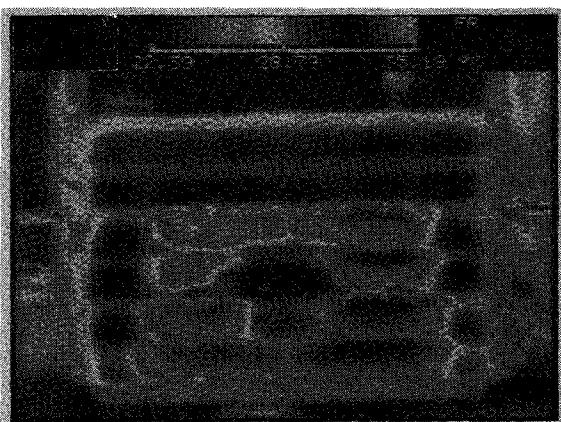


写真-7 脱型後の外観



(a) 打込み前



(b) 打込み終了直前

写真-8 热画像の撮影結果



写真-9 画像間差分処理と温度変換処理した画像

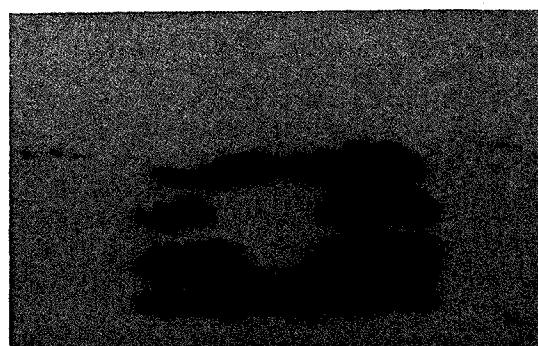


写真-10 2値画像処理結果

## 5. 結論

本研究は、コンクリート打込み時の型わく外面の熱画像を計測することによって、型わく内部のコンクリートの打込み状況をリアルタイムで検出する方法に対して、

画像解析技法を適用し、欠陥の識別をより定量的、客観的に行えるような手法に改善することを目的として実施したものである。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

(1) 撮影した熱画像、すなわち、記録された温度情報

には装置の性能、計測条件、および、対象物体の性質等に起因する誤差が含まれているため、画像を解釈する場合にはそのことを考慮する必要がある。

(2) コンクリート打込み前後の型わく外面の熱画像を画像間差分処理することにより、温度が変化した部分のみを抽出でき、原画像に比べて欠陥の認識が容易となることが明らかとなった。

(3) 差分画像に対し、温度変化量にしきい値を選択して疑似カラー表示した2値あるいは3値画像処理を行うことにより、欠陥の認識および判別が客観的に行えることが明らかとなった。

(4) しきい値選択は、コンクリートが充填された部分の温度変化量を基準とし、計測条件や対象とする型わく面の状態に起因する温度分布の誤差や計測誤差を考慮した方法により適切に行えることが明らかとなった。

(5) 上記画像処理法は、型わく面に直射日光が当たっている場合においても適用できることが確かめられた。

今回の研究における画像解析は、汎用のパソコン 컴퓨터により行った。適用した画像処理法は、比較的簡単な方法のものであるため、リアルタイム処理は十分可能である。また、赤外線映像装置本体への組み込みも比較的簡単に行えるものと考えられる。したがって、本手法を利用することにより、コンクリートの打込み時点にて、リアルタイムでコンクリートの締固め不良、材料分離等による欠陥を、赤外線映像装置についての専門的な知識がなくても容易に判別することができ、定量的な施工管理が可能になると言える。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金、試験研究(B)(課題番号 05555120、代表 魚本 健人)によって行ったものであることをここに付記する。

## 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会編：コンクリートの現状と将来、土木学会、コンクリートライブラー第68号、1991年。
- 2) 渡部正・魚本健人：型わく外面の熱赤外線画像によるコンクリートの打込み管理手法に関する基礎研究、土木学会論文集、No.435, VI-15, pp.121~128, 1991.9.
- 3) Taketo UOMOTO・Tadashi WATANABE : APPLICATION OF THERMOGRAPHY FOR MONITORING CONCRETE PLACING, FIRST FAR EAST NONDESTRUCTIVE TESTING CONFERENCE, pp.168~175, November, 14~16, 1991 (Seoul, Korea).
- 4) 魚本健人・渡部正：サーモグラフィーによるコンクリート打込み時の欠陥検出法に関する研究、日本コンクリート工学協会、サーモグラフィー法に関するコンファレンス論文集, pp.49~54, 1992年4月。
- 5) 魚本健人・渡部正・関口司：赤外線放射温度計によるコンクリートの打込み監視システムの研究、生産研究、第43巻、第5号、pp.21~24, 1991.5.
- 6) 渡部正・魚本健人：型わく面の熱赤外線画像によるコンクリート打込み時の欠陥検出法に関する研究、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, pp.482~483, 1992年9月。
- 7) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1992年。
- 8) 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、鹿島出版会、1986年。
- 9) 赤外線技術研究会編：赤外線工学（基礎と応用）、オーム社、1991年。
- 10) 高木幹雄・下田陽久監修：画像解析ハンドブック、東京大学出版会、1991年。
- 11) 田村秀行監修：コンピュータ画像処理入門、日本工業技術センター編、総研出版、1988年。
- 12) 近藤孝夫・矢島哲司・渡部正・魚本健人：サーモグラフィーによるコンクリートの充填度判定法に関する基礎的研究、第20回土木学会関東支部技術研究発表会、講演概要集, pp.472~473, 1992年度。

(1992.11.3受付)

## MONITORING CONCRETE PLACING BY INFRARED IMAGE ANALYSIS

Tadashi WATANABE and Taketo UOMOTO

We were proposed a practical monitoring method for concrete placing by thermography, using an infrared radiometer, for measuring the discrepancies of temperature on the external surface of forms. The height of concrete layer can be determined during placing, and voids and honeycombs caused due to poor consolidation in concrete can be located. In this paper we tried to find out the classification method for the defects in concrete. We applied the image processing and obtained satisfactory results to improve detection accuracy.