

論文

[1097] 型わく面の熱画像解析によるコンクリートの打設監視法に関する研究

渡部 正*1・魚本 健人*2

1. はじめに

コンクリート構造物を施工する際の型わく内へのコンクリートの打込みは、硬化後の構造物品質に対して極めて大きな影響を及ぼす重要な作業工程であり、その時に生ずる欠陥を未然に防止することが施工管理の本来あるべき姿と考える。そのためには、施工過程をモニタリングしてその品質を定量的に評価する技術が必要である。

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、打込み状況をモニタリングする方法を提案している[1][2]。この手法を用いれば、締固めが行なわれたかどうかの判定や空隙、豆板等の検出を打込み時にリアルタイムで行なうことができる。したがって、そのような欠陥が検出された場合には、その時点にて再度入念な締固めを行なうなどの対処ができるため、欠陥を未然に防止することが可能となる。

本手法に対し、欠陥の判別を定量的に行なうための画像処理法については、著者らが既に提案している[3][4]ものの、しきい値の合理的設定法については未検討であった。そこで、本研究では、熱画像内における温度の誤差に基づいて、コンクリートの充填度合がどの程度まで検出できるかを検討するとともに、3値化画像にて未充填部を客観的に抽出するためのしきい値設定法について検討したものである。

2. コンクリート打込み時の型わく外面の温度変化特性

通常、コンクリート温度と型わく温度は異なっているため、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。この現象を、赤外線映像装置にて熱画像として撮影することにより、コンクリートが充填された部分とそうでない部分との判別ができ、打込み状況を視覚的にモニタリングすることができる[1][2]。

図-1は、鋼製型わく内にそれより1.9℃高い温度のコンクリートを、締固めを行ないながら打込んだ場合、締固めを行わずただ単に投入しただけの場合、および、コンクリートを5mmふりいでウェットスクリーニングした粗骨材を投入した場合(豆板)の型わく外面の温度変化を測定した例である。この図から分かるように、いずれの場合にも約90秒後までは急激な温度上昇を示しており、その後ほぼ定常状態となっている。温度の上昇量は、締固めを行った部分に比較して、ただ単にコンクリートを投入しただけの部分が低く、そして、豆板部分の温度がさらに低くなっている。

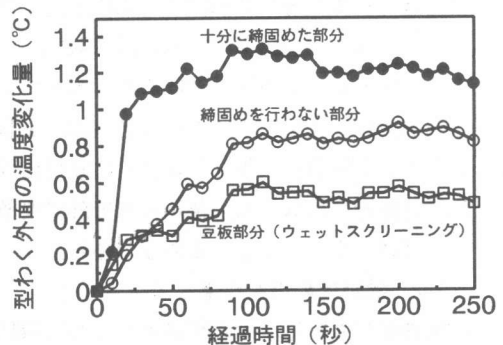


図-1 型わく外面の温度変化の例

このように、締固めが不十分で空隙の多いコンクリートの型わく部分は、充填部分の型わく温度

*1 前田建設工業(株)技術研究所土木材料研究室主任研究員(正会員)

*2 東京大学教授 生産技術研究所、工博(正会員)

より低くなる。著者らは、この現象を、締固めを十分に行った部分の型わく温度の上昇量に対する充填不良部の温度上昇割合（相対温度変化率）として種々の実験結果に対して図-2のように整理し、その値がコンクリートの充填率とほぼ比例関係にあることを明らかにしている[4]。

したがって、コンクリート打込み時の型わく外面の温度変化量を測定することにより、コンクリートが充填された部分とそうでない部分との判別のみならず、締固めの程度（充填率）をも定量的に評価できる可能性があるものと考えられる。

3. 熱画像解析による欠陥の抽出法

3.1 実験概要

熱画像解析によって欠陥を定量的に検出手法について検討するため、図-3および写真-1に示すような形状寸法の鋼製型わくを使用して室内にて実験を行なった。コンクリートはセメント量 300kg/m^3 、粗骨材最大寸法 20mm 、スランプ 10cm のものを、次のように2層に分けて打ち込んだ。

1層目は、左右に分割してそれぞれ同時に打ち込んだ。右側部分は棒状バイブレータで締固めを行ないながら打込み、左側部分は豆板を模擬するため、それと同一のコンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングした粗骨材を投入した。2層目は、左側部分に 50mm 間隔で二重配筋し（ $D6\text{mm}$ 、かぶり 20mm ）、左右同時に型わく天端までコンクリートを投入し、その後に締固めを行なった。

熱画像は、コンクリートの打込み前、1層目打込み後、2層目投入後、および、2層目締固め後に適時撮影を行なった。使用した赤外線映像装置の仕様は、表-1に示すとおりである。

3.2 熱画像の撮影結果

熱画像の撮影は、撮影距離 5m 、画像積算回数32回、設定感度 0.02°C 、256階調カラー表示として行なった。実験時のコンクリート温度は 27.5°C 、外気温は 22.8°C であった。

写真-2は、コンクリートを打込む前の型わく面の熱画像（初期画像）であり、写真-3は2層目のコンクリートを投入してから2分経過した後

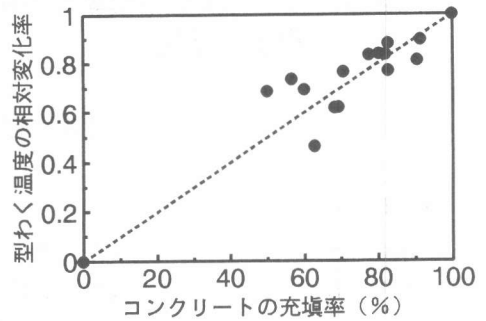


図-2 充填率と相対温度変化率の関係

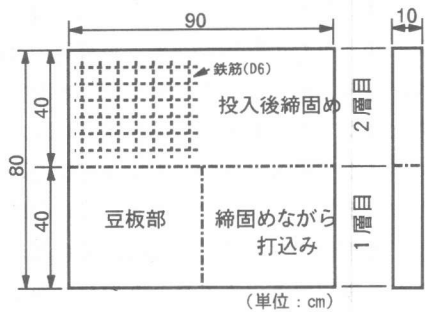


図-3 実験模型の形状

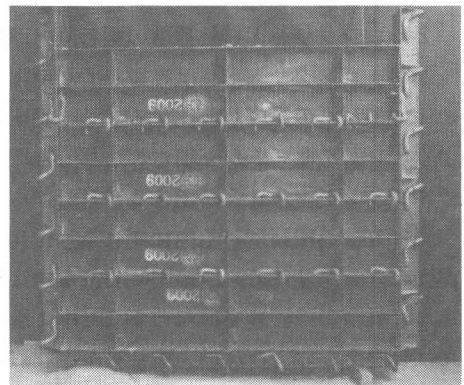


写真-1 型わくの外觀

表-1 赤外線映像装置の仕様

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

の熱画像である。これら画像は紙面の都合上モノクロになっていて不明瞭となっている部分もあるが、コンクリートを打込むことによって型わく面の温度が上昇しているのが分かる。この温度上昇量を画像上で観察すると、締固めを行なった部分（1層目右側）に比較して、締固めを行わずにただ単にコンクリートを投入した部分（2層目）が相対的に低く、そして、豆板部分（1層目左側）の温度がさらに低くなっている。

写真-4は、2層目のコンクリートを締固めてから2分経過した後の熱画像である。このように、締固めを行なうことによって、2層目部分の型わく温度が上昇して、1層目の右側部分の温度とほぼ同一となっているのが分かる。そして、2層目上部の温度が低下しており、締固めによってコンクリートが沈下した様子が検出されており、その高さは脱型後の外観を示した写真-5と良い対応が見られる。

以上、コンクリートの充填度合によって型わく面温度の変化量が異なることが熱画像上からも確かめられ、締固められた部分の温度変化量と比較することにより、締固めが行なわれたかどうかを判定することができる。しかしながら、原画像からだけで相対的な温度の違いを識別する場合には、撮影時の設定感度や設定温度幅等といった計測条件の違いの影響を受けるとともに、識別が主観的判断に頼らざるを得ないため、ある程度の熟練を要した者でないと正しい画像の解釈ができない場合があるということを留意する必要がある。

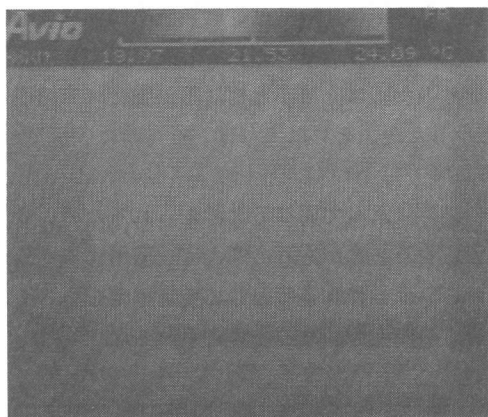


写真-2 打込み前の熱画像

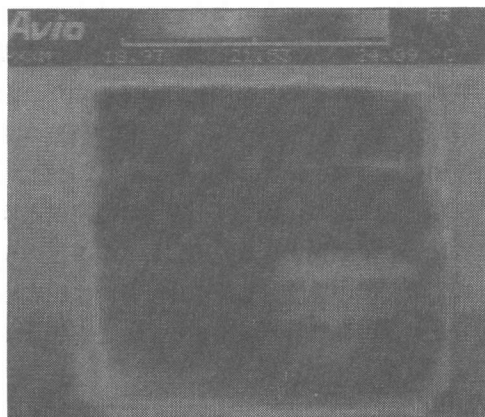


写真-3 2層目締固め前の熱画像

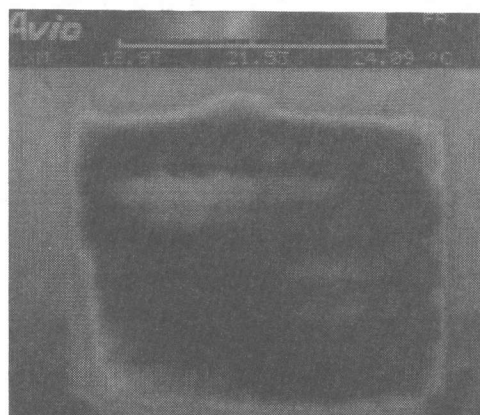


写真-4 2層目締固め後の熱画像

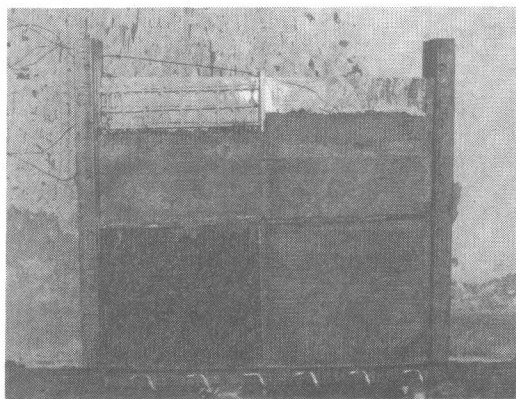


写真-5 脱型後の外観

3.3 検出可能な充填率に関する検討

本手法は、熱画像内の相対的な温度差を利用することによって、締固め不良箇所を識別しようとするものである。そこで、ここでは、締固めが行われて十分に充填された部分をどの程度の精度で特定できるかということと、どの程度の充填率であったら識別できるかの検討を、今回の実験結果ならびに図-2に示した充填率と相対温度変化率の関係を基にして行なう。

図-4は、コンクリートが充填されている1層目右側部分の型わく温度の上昇量をヒストグラムとして表したものである。温度上昇量は、コンクリート打込み後の写真-3の画像から打込み前の写真-1の画像を用いて、画像間差分処理を行って求めたものである。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3.28℃、標準偏差が0.23℃であった。このバラツキには、赤外線映像装置の性能とその計測条件（設定感度、画像積算回数等）に起因する誤差、対象物体の性質（粗さ、光沢、汚れ等）に起因する誤差、ならびに、画像間差分処理に伴う誤差等が含まれていると考えられ、コンクリートが充填されている部分を特定して充填不良部とを区別する場合にはこのようなバラツキを考慮する必要があることを示している。

そこで、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、図-4の平均温度 x 、標準偏差 σ 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、充填された部分とそうでない部分と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-5のようになる。このように、今回の実験の条件下においては、信頼確率95%にて充填部と充填不良部とを識別する場合には充填率94%が境界となり、その値以下の充填率であれば判別可能であることを示している。また、図中には参考のために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^[4]も示したが、それによれば、その時に判別できる相対圧縮強度は約0.8以下であることを示している。

なお、上述したように、温度の測定誤差は、種々の条件によって異なると考えられるため、それに応じて識別できる充填率も異なるということを留意する必要がある。例えば、使用する赤外線映像装置の温度分解能や角度分解能を高めたり、あるいは、計測条件として設定感度を小さくしたり、画像積算回数を多くすること等により識別能力の向上が図れると考えられる。

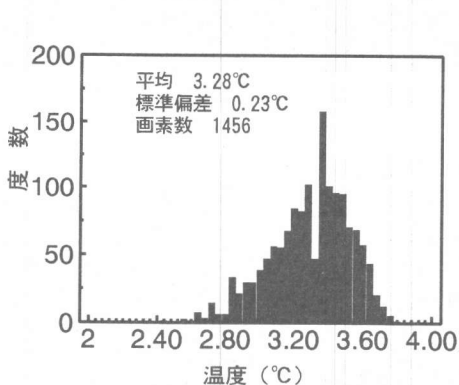


図-4 充填部の温度変化量のヒストグラム

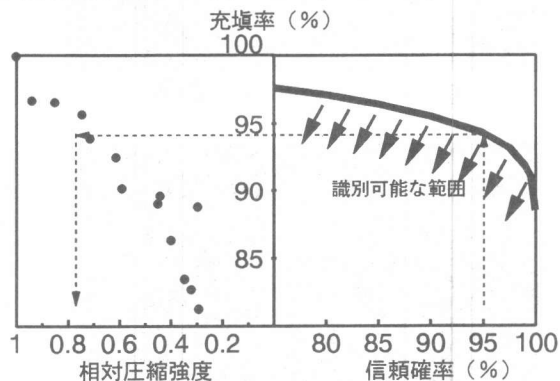


図-5 信頼確率と判別可能な充填率の関係

3.4 3値画像による欠陥の判別法

3.2で述べたように、撮影された熱画像だけからでは、充填不良部の判別を明確には行なえない場合があるため、以下のような画像処理を行ない、充填不良部の客観的かつ定量的な抽出法を検討した。

(1) 画像処理方法

初めに、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面の温度変化量のみを、時系列画像間演算^{[5][6]}を行って抽出表示する。この差分画像に対して、測定温度のバラツキを考慮したしきい値を設定して、充填部、充填不良部、背景というように3値化することによって3色疑似カラー画像を作成して分類表示することとする。

ここでは、95%の信頼確率でコンクリートの充填部分を特定し、それ以外の部分を充填不良箇所とみなして画像処理を行なうこととする。すなわち、しきい値は、前節と同様、コンクリート充填部分の温度変化量のヒストグラムを示した図-4に対して片側検定を行ない、平均温度 3.28°C より $1.645\cdot\sigma$ 低い温度 $3.28-1.645\times 0.23=2.90^{\circ}\text{C}$ 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の充填が不十分な欠陥部分とみなすことにする。また、温度変化が生じていない背景部分を抽出するため、その部分の温度の標準偏差が充填部と同一であると仮定して、もう1つのしきい値 t_2 を $1.645\cdot\sigma=1.645\times 0.23=0.38^{\circ}\text{C}$ のように設定する。すなわち、次のような2つのしきい値によって3値化画像を作成することとする。

$T \geq t_1 (=2.90^{\circ}\text{C})$: コンクリート充填部 (青色表示)

$t_1 > T > t_2$: 充填不良部分 (黄色表示)

$T \leq t_2 (=0.62^{\circ}\text{C})$: 温度変化の生じていない部分で主に背景 (黒色表示)

(2) 処理結果

写真-6は、2層目コンクリートを投入した後の原画像(写真-3)から打込み前の初期画像(写真-2)を減算して、その結果得られた温度変化量に上記しきい値を設定して処理した画像である。このように、締固めを行った1層目右側部分は充填部と判定されており、その左側の豆板部分とまだ締固めを行っていない2層目の大部分が充填不良箇所と判定されている。2層目左側の一部が充填部と判定されているものの、実際の打込み状況を良く表している。

写真-7は、同様な方法により、2層目コンクリートを締固めた後(原画像は写真-4)の処理結果を示したものである。このように、2層目の下側半分程度が充填部と判定されており、締固めが行われたことを良く表している。型わく脱型後の外観を示した写真-5とを比較すると、2層目右側上方の一部が未充填部と誤判定されているものの、締固めによってコンクリート面が沈下した状況が良く表示されており、全体的には良い対応を示していると判断される。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、充填不良部として判定されている。

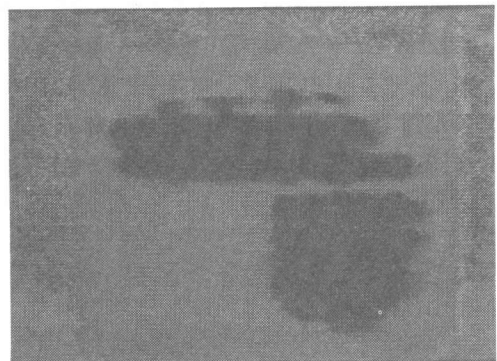
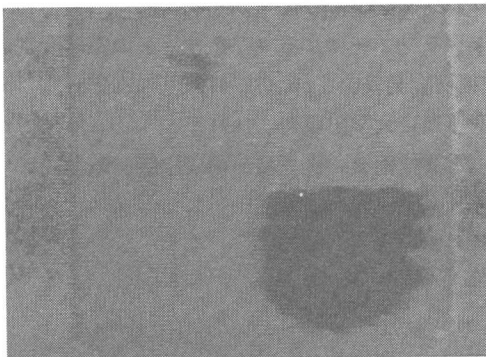


写真-6 2層目締固め前の3値画像処理結果

写真-7 2層目締固め後の3値画像処理結果

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処理を行って温度変化量のみを抽出し、その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、充填不良部を定量的かつ客観的に抽出できることが明らかとなった。そして、ここで検討したしきい値の設定法が妥当であることが確認できた。

4. おわりに

本研究の結果、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)本手法での判別可能なコンクリートの充填率についての検討を行った。その結果、今回の実験の条件下においては、信頼確率95%にて充填部と充填不良部とを識別する場合には、充填率94%が境界となり、その値以下の充填率であれば判別可能であることが明らかとなった。

(3)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によって得られた画像に対し、温度変化量にしきい値を選択して3値画像処理を行なうことにより、充填不良部分の判別が客観的に行えることが明らかとなった

(4)コンクリートが充填された部分の画素温度はほぼ正規分布にしたがっており、このバラツキを考慮することにより、上記(3)のしきい値が適切に設定できることが分かった。

今回の研究における画像解析は、汎用のパーソナルコンピュータにより行ったが、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と考えられる。

〈参考文献〉

[1]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

[2]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

[3]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、pp. 482-489、平成4年9月

[4]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、pp. 472-473、平成5年3月

[5]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

[6]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、昭和63年