

論文

[1022] コンクリート養生時における型わく面の熱赤外線画像による品質検査法に関する研究

正会員 〇渡部 正 (前田建設工業技術研究所)

正会員 魚本健人 (東京大学生産技術研究所)

1. はじめに

コンクリート構造物の早期劣化は、施工時に生ずる欠陥の存在により進行が加速されるため、施工不良に伴う欠陥を未然に防止することが劣化対策の原点であると提言されている[1]。そのための一環としては、コンクリートの打込み不良による欠陥をリアルタイムで監視して未然に防止するシステムと、施工が適切に行われたか否かを検査するシステムとが必要であると考えられる。

前者のシステムに係わる一手法としては、コンクリート打込み時の型わく外面の熱赤外線画像を利用した方法を著者らが既に提案した[2][3]。本論文では、後者のシステムを対象とし、コンクリートの養生時、すなわち、セメントの水和発熱過程における型わく外面の熱赤外線画像からコンクリート内部の品質を検査する手法について述べるものである。なお、ここでは、部材内におけるセメント量の異なる部分、および、材料分離による内部豆板の検出を対象とした。

2. 実験概要

実験に使用した型わくの形状寸法は、図-1に示したとおりであり、高さ87cm、長さ90cm、幅10cmである。型わく材には厚さ12mmの合板を使用し、実構造物での部材の状況を模擬するため、熱赤外線画像を計測する型わく面以外の他の部分を厚さ100mmの発泡スチロールで断熱した。実験は室内で行い、コンクリートは表-1に示す2配合とし、図-1に示すように3層に分けて以下の要領で連続的に打込んだ。

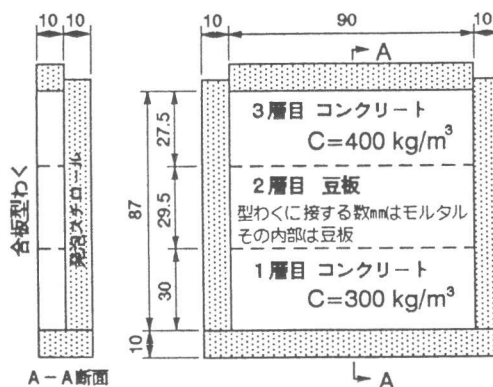


図-1 模型の形状寸法 (単位:cm)

1層目：セメント量が300kg/m³のコンクリートを投入し、バイブレーターで締固めを行った。

2層目：セメント量が400kg/m³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。ただし、コンクリート内部の豆板を模擬し、脱型後の外観から判別できないよう型わくに接する面には厚さ3~5mm程度のモルタルを付着させた。

3層目：セメント量が400kg/m³のコンクリートを投入し、バイブレーターで締固めを行った。

型わく外面の熱赤外線画像は、コンクリート打込み終了後材令1日までは30分間隔で、その後材令2日までは60分間隔で計測した。使用した赤外線カメラの性能、および、

表-1 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	水セメン ト比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
20	12±2	61	42.5	183	300	783	1100
20	12±2	48	44.0	193	400	762	1021

今回の実験における計測条件を表-2に示した。

また、熱赤外線画像の計測と同時に、型わく外表面、コンクリート内部、および、室温を熱電対により測定した。型わく表面への熱電対の取り付けは、できるだけ正確に温度を計測できるよう、その先端を銅板にはんだ付けして圧着する方法を採用した[4]。

### 3. 実験結果

#### 3.1 型わく表面の温度履歴

熱赤外線画像にて物体表面の真の温度を求める場合には、対象とする物体の種類に応じた放射率補正を行う必要がある。今回の実験では、3層目の型わく表面に取付けた熱電対での温度 $T_1$ と、放射率を1.0として計測した熱赤外線画像より求めた温度 $t$  (25画素の平均値)とを用いて、合板型わくの放射率 $E(=t/T_1)$ を求めた。

その結果は、図-2に示すとおりであり、バラツキが多少あるものの、温度が高いほど放射率が小さくなる傾向が認められた。このような現象は、絶縁物特有の性質であろうと考えられ[5]、熱赤外線画像より型わく表面の真の温度、および、温度分布(相対温度)を求める場合には温度依存性を考慮した放射率の補正を行う必要があることを示している。そこで、図中に示した回帰式により型わくの放射率補正を行って各層中心の表面温度 $T(=t/E)$ を求めると図-3のようになり、各層とも熱電対の測定値と良く一致する。ただし、赤外線カメラでの測定値には変動が見られる。この変動原因を定量的に評価するには至っていないが、赤外線カメラの性能に起因する検出精度や図-2で見られる合板型わくの放射率の変動等が影響しているためと考えられる。

型わく表面温度は、材令が約12時間で最大となり、 $C=400\text{kg/m}^3$ の3層目は $C=300\text{kg/m}^3$ の1層目、豆板の2層目より約 $3^\circ\text{C}$ 高い。1層目と2層目の温度の最大値はほぼ同一となっているが、温度の上昇過程での値は、若干ではあるが1層目の方が高い。

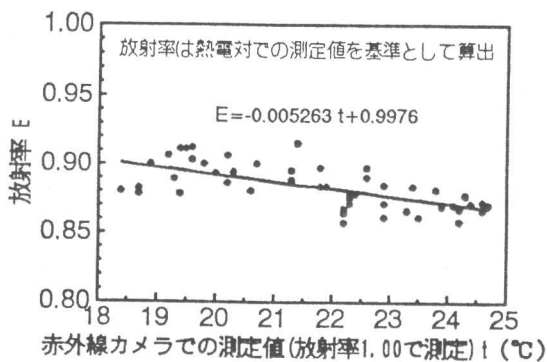


図-2 合板型わくの放射率

表-2 赤外線カメラの性能と計測条件

性能	測定温度範囲	0~1500 °C
	赤外線検知器	電子冷却HgCdTe16素子
	検知波長帯	3~5 μm
	最小検知温度差	0.5 °C
	フレームタイム	0.05 秒
計測条件	瞬時視野	2 mrad
	計測距離	6 m
測定条件	表示色数	32 色
	温度ステップ	0.2 °C
	画像加算回数	16 回
放射率	1.0	

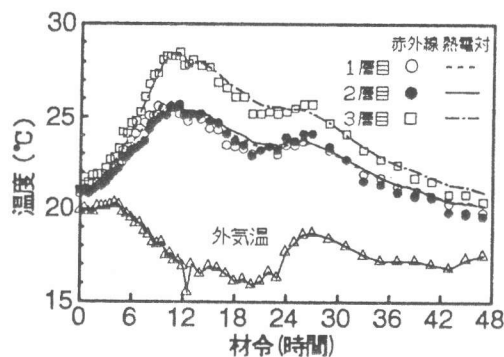


図-3 熱赤外線画像による温度と熱電対による温度

#### 3.2 熱赤外線画像の経時変化

材令6時間、12時間、48時間における型わく外表面の熱赤外線画像(放射率1.0として測定)を写真-1(a), (b), (c)に示した。(a)に示した材令6時間では、2層目の豆板部分が1層目、3層目より約 $0.5^\circ\text{C}$ ではあるが温度が低く表れているもののその相違は明確ではない。(b)に示した材令12時間では、セメント量が $400\text{kg/m}^3$ の3層目が1層目、2層目より温度が約 $3^\circ\text{C}$ 高い。しかし、セ

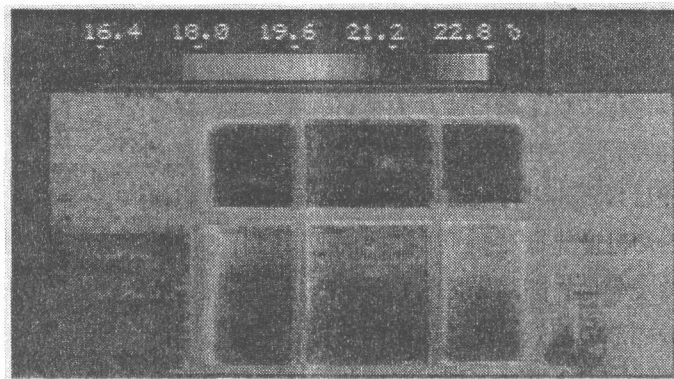
メント量が $300\text{kg/m}^3$ の1層目と豆板部の2層目はほぼ同じ温度を示しており、それら品質の相違は判別できない。(c)に示した材令48時間では、各層とも同一温度を示している。

以上のように、型わく表面温度が最高となる付近の材令12時間の熱赤外線画像では、1層目と2層目が3層目に比べて発熱量が小さく低温となっており、何らかの原因により品質が異なることを直接判定することができる。しかしながら、その温度差が、セメント量の違いによるものなのか、豆板の存在によるものなのかを判別することができない。そして、実際には1層目と2層目の品質が異なるにも係わらず、そのことを画像から直接判別することもできない。

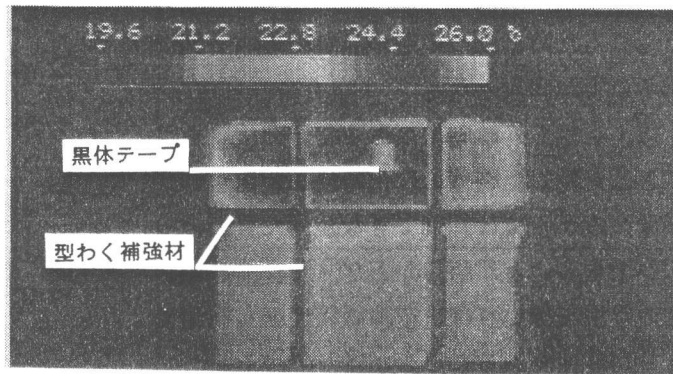
#### 4. 豆板の検出法に関する検討

熱赤外線画像から温度を求めると、前述したように各時間ごとに値が変動する傾向が見られた。そこで、この変動成分を消去するため、任意の材令の測定値とその前後の測定値の3点を用いて、算術移動平均を2重に繰り返した加重算術移動平均[6]を求めて整理した。その結果は図-4に示したとおりであり、測定値の変動をなめらかにすることができた。図より、温度上昇過程での豆板層の温度は、 $C=300\text{kg/m}^3$ の層に比べて小さく、そして、温度が最高となる材令が遅れるという現象が認められる。これは、豆板層での温度上昇がセメント水和熱によるものの他に、上下のコンクリートから空隙を通しての熱供給が行われることと、その空隙の熱伝導率がコンクリートより非常に小さいために生ずるものと推測される。

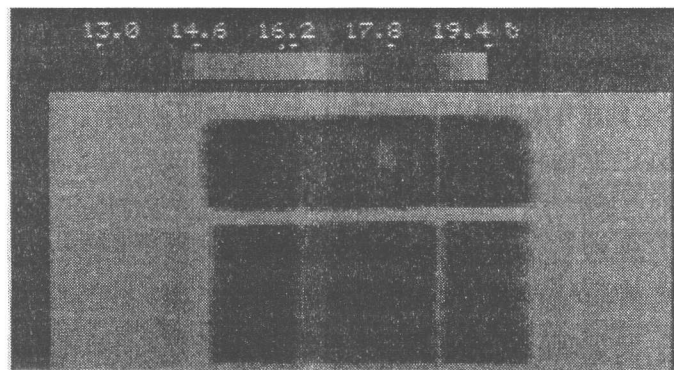
図-4の結果を用いて、3層目の温度を基準として、1層目、2層目の相対温度差を求



(a) 材令6時間



(b) 材令12時間



(c) 材令48時間

写真-1 型わく面の熱赤外線画像

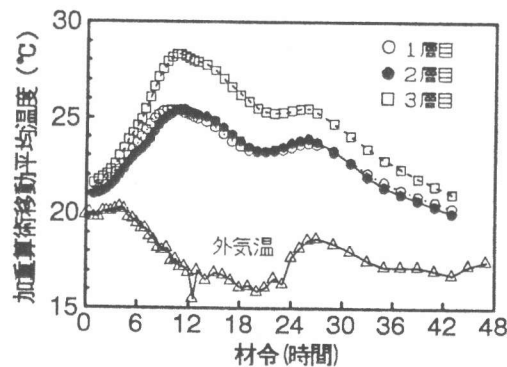


図-4 熱赤外線画像での加重算術移動平均温度

めると、図-5に示すとおりとなる。このように、2層目の豆板部との温度差は、温度上昇過程では1層目より大きい、そして、材令10時間から18時間の間では、1層目との温度差はほとんど変化しないが、2層目の豆板部との温度差は減少する傾向が認められる。この現象は、図-6に示したように、それら層の内部の相対温度差の傾向と良く一致している。このように、相対温度差の経時変化曲線を利用すれば、両者の傾向に明確な違いが認められるため、二つの層の品質の違いを判別することが容易となる。

以上、熱赤外線画像のある特定の位置を基準とした相対温度差の変化特性を利用すれば、画像のみからでは判別できなかった豆板の検出ができることが明らかとなった。そして、この手法を用いれば、空隙の程度をも推測できる可能性があることを示唆している。

### 5. まとめ

本研究では、コンクリート養生時のセメント水和発熱過程における型わく外表面の温度変化特性を熱赤外線画像として計測し、その情報を利用してコンクリート内部の品質を検査する手法について基礎的な検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 合板型わくの場合、その放射率には温度依存性が認められるため、熱赤外線画像から真の温度、および、温度分布を求める場合にはそのことを考慮した補正が必要がある。
- (2) 熱赤外線画像での温度の測定値には、種々の計測誤差が含まれており、温度の経時的な変化を求めて何らかの処理をする場合にはそのことを考慮する必要がある。
- (3) セメント量の違いによる品質の相違は、温度が最高となる材令前後の時点での型わく表面の熱赤外線画像により、発熱温度の差で直接判別することができる。
- (4) 豆板部では、熱赤外線画像のある特定の範囲を基準とした相対温度差の変化特性が空隙の存在によりコンクリート部と異なるため、この現象を利用すれば検出できる可能性がある。

### [参考文献]

- [1] 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの現状と将来、コンクリートライブラリー第68号、1991年
- [2] 渡部、魚本：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、1991年9月
- [3] 渡部、魚本：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、サーモグラフィー法に関するコンファレンス、日本コンクリート工学協会、1992. 4
- [4] 工業計測技術体系編集委員会編：温度、日刊工業新聞社、昭和44年
- [5] フジ・テクノシステム編：センサ実用便覧、フジ・テクノシステム、1985
- [6] 大地：電子計算機の手法とその応用、森北出版、1970年

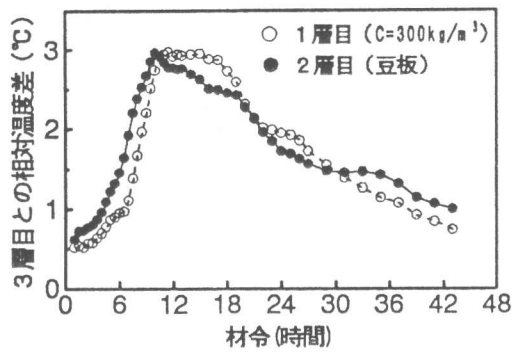


図-5 3層目を基準とした型わく表面の相対温度差 (赤外線カメラでの測定値)

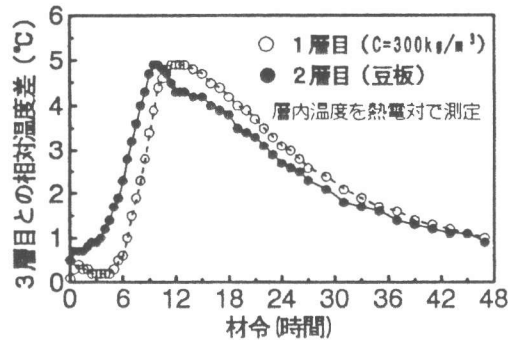


図-6 3層目を基準とした層内の相対温度差 (熱電対での測定値)