

# コンクリートの熱特性を活用した既設建造物の 品質評価に関する研究 (2)

——赤外線法による硬化コンクリートの水セメント比の判定法の提案——  
Evaluating the Quality of Existing Concrete Structure Based on the Heat Transfer Property of Concrete (2)  
—— Proposal for Prediction of Water-Cement Ratio of Hardened Concrete Using by Infrared Thermograph ——

加藤 佳孝\*・小根澤 淳志\*\*

Yoshitaka KATO and Atsushi ONEZAWA

## 1. はじめに

膨大な社会資本ストックを抱える我が国においては、効率的に建造物の維持管理を行うことが必要不可欠である。このためには、既存建造物の現状の把握を定量的に行い、劣化状況に応じた対応策を講じることが重要である。維持管理の出発点ともいえる現状の品質評価に関しては、非破壊検査技術を利用した研究が活発に行われており、多くの技術が実用化されている。しかし、そのほとんどは欠陥検知やコンクリート中に存在する鉄筋、鉄骨などを検知するものであり、健全なコンクリートの品質がどの程度のものであるかを定量的に把握する手法は開発されていない。

前述のように、コンクリート建造物への赤外線法の適用事例としては、欠陥評価に関するものがほとんどであり<sup>1)</sup>、比較的大きな（数 cm オーダー）空洞を対象としている。一方、コンクリート中のセメントペースト部分には、配合条件によって異なるが数 10% の空隙が存在しており、この空隙の大きさのオーダーは nm ~ μm と、前述の内部空洞と比較して極めて微小なものである。しかし、例えば塩化物イオンの見かけの拡散係数などのコンクリート全体の品質を示す特性値は、このような微小な空隙構造の差を反映し、水セメント比などの配合条件の違いに応じて諸特性が異なることが一般に知られている。

本研究では、赤外線法によりコンクリートの耐久性能の支配要因の一つである塩化物イオンの拡散係数を予測する手法の提案に向けた基礎的研究として、赤外線法によりコンクリートの水セメント比の違いを検出する方法に関する検討を行った。

## 2. 赤外線法の概要

一般に、コンクリートは日射や外気温変動により外部と

\*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

\*\*芝浦工業大学大学院

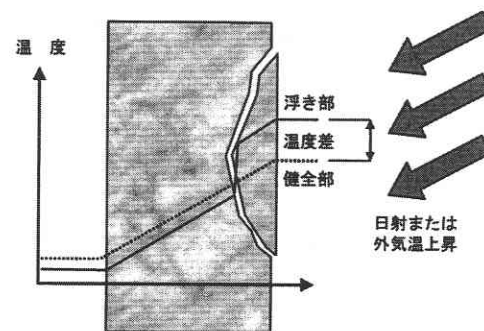


図1 赤外線法による欠陥検知の概念図

の間で熱の授受が行われる。コンクリート内部に空洞が存在している場合や、表層部に浮きが生じていると、内部の密閉された空気層はコンクリートに比べて熱抵抗が大きいため、欠陥部ではコンクリート内部への熱伝導が少なくなり、欠陥部表面の温度の変動が大きくなる。このため、浮きが生じている部分は内部に断熱層が挿入された状態となっており、日射が当たっている面や外気温上昇時には、浮きが生じている部分は周辺の健全部に比べて高温になる（図1参照）。但し、温度差が現れる時間は、気象条件や欠陥部の深さ、背面の条件によって異なる。また、内部空洞や浮き以外でも、漏水を伴うひび割れ等では、水分の気化熱により、周囲より低温になると検出することができる。この場合には筋状の低温域として現れる。赤外線法は、このようなコンクリートの内部状況や状態の違いによって生ずるコンクリート表面の温度差を赤外線放射温度計により可視化し、温度分布から異常部を判断する手法である。本研究では、微細な空隙構造の差を赤外線法により検知することを目的としているため、日射程度の加熱ではコンクリートの品質の違いを明確に把握することが困難であると考え、熱源によりコンクリートを加熱する手法を採用した。

3. 解析概要および結果

3.1 解析概要

本研究で対象としている水セメント比の異なるコンクリートの熱特性の差は、従来の内部空洞などの検知と比して小さいものになると想定され、実験結果からの検討では測定誤差の影響が大きく、品質の差を把握することが困難であると考えられる。そこで、既報<sup>2)</sup>により実験及び解析的に算出したコンクリート硬化体の熱特性値を用いて、熱伝導解析を行い、赤外線法により水セメント比の差が明確となる測定条件、評価指標の検討を行った。なお、本研究では粗骨材の比熱の影響を排除するために、粗骨材量を一定としたコンクリートを対象としている。配合表を表1に、用いた熱特性値を表2に示す。

実験は、写真1に示すようなホットプレートを用いて、1面加熱、5面断熱の状態で行い、所定の加熱時間後の放熱過程の表面温度変化を赤外線サーモグラフィにより撮影した。熱伝導解析は実験条件と同じ条件で行った。

3.2 解析結果

図2に熱伝導解析結果を示す。図は、上から加熱用ホットプレートを80°Cに設定したときの加熱時間を1, 1.5, 3

時間と変化させた場合の、コンクリート表面の温度履歴を示している。初期のコンクリート温度は20°C一定に設定している。なお加熱過程の解析は、事前にホットプレートにより加熱した時の温度履歴をコンクリート中に埋め込んだ熱電対により計測し、ホットプレートとコンクリート間の熱伝達率を逆解析により求め、この値を用いている。

加熱過程の温度履歴を見ると、いずれの場合も水セメント比40, 35, 50%の順に上昇温度が高くなっていることがわかる。本来であれば、上昇温度は熱拡散率の高い順になるため、水セメント比35, 40, 50%となるはずである。順番が異なる結果となった原因は、逆解析で求めたホットプレートとコンクリート表面間の熱伝達率に原因がある。ホットプレートとコンクリート間の熱伝達率は、コンクリートの表面状態の影響を多大に受け、例えばコンクリート表面の仕上げが良く両者が密着している場合と、仕上げが悪く両者の間に空間が存在する場合は、その値が異なる。このため、実験結果より逆解析的に求めた熱伝達率の値が水セメント比の違いによる熱特性の変化を適切に表現していなかったといえる。このような状況は、既設構造物へ適用した場合、より顕著に生じると想定される。そこで、強

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
35	42	172	477	715	955
40	43	172	430	739	955
50	45	179	359	789	955

表2 コンクリートの熱特性値

W/C (%)	熱伝導率 (W/m·K)	熱拡散率 (m <sup>2</sup> /h)	比熱 (J/kg°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> ·K)
35	1.60	0.0041	590.3	2380	13.9
40	1.40	0.0038	562.0	2360	15.4
50	1.34	0.0037	557.2	2340	16.7

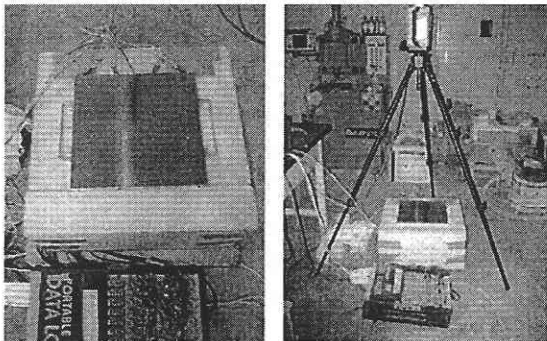


写真1 加熱状況と赤外線サーモグラフィによる撮影状況

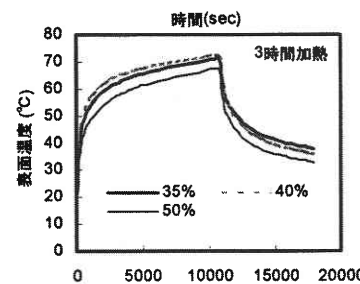
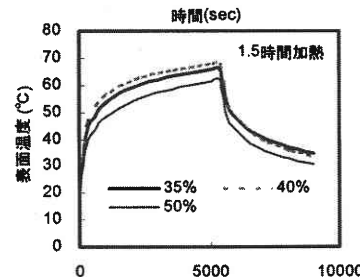
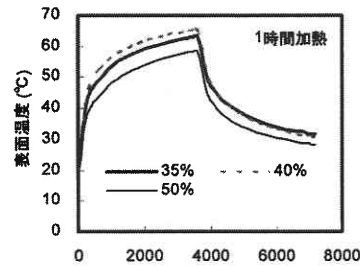


図2 熱伝導解析結果

制的に加熱している過程に着目して、水セメント比の違いを評価することは現実的ではないと考え、本研究では放熱過程に着目することとした。ただし、品質の違いにより熱拡散率が大きく異なり、加熱器機とコンクリート間の熱伝達率の影響を無視できるような状況においては、加熱過程に着目しても品質の違いを捉えることができる可能性がある。また、放熱過程の場合においても、風などの環境作用の影響が大きい場合は、放熱過程で評価する場合に注意が必要となると考えられる。

#### 4. 品質評価方法の提案

##### 4.1 放熱時間比と放熱温度比の関係

解析結果に見られるように、コンクリートの放熱過程の温度履歴は当然のことながら加熱の条件により異なる。そこで、加熱時間や加熱温度に依存しない指標により水セメント比の違いを判定できることが望ましい。ここで、赤外線サーモグラフィを用いて収集できる情報を整理すると、①初期表面温度 ( $T_0$ )、②加熱後表面温度 ( $T_H$ )、③放熱過程の表面温度履歴 ( $T_i$ ) である。また、その他の情報としては、④加熱時間 ( $t_H$ )、⑤放熱時間 ( $t_i$ ) がある。これらの情報を利用して、コンクリートに与えられた熱量の流入量および流出量を評価することができる簡便な指標を構築した。図3は、放熱時間と加熱時間の比（放熱時間比）と放熱温度 ( $T_H - T_i$ ) と上昇温度 ( $T_H - T_0$ ) の比（放熱温度比）の関係を表したものである。図から明らかなように、いずれの水セメント比においても、加熱時間にかかわらず放熱時間比と放熱温度比の関係は一定となることがわかる。図4は、放熱時間比と放熱温度比の関係を水セメント比ごとに、加熱時間に関して平均化したものである。図から明らかなように、水セメント比ごとに放熱時間比と放熱温度比の関係は異なる関係を示していることがわかる。つまり、両者の関係を用いることにより、赤外線サーモグラフィにより取得した情報のみで水セメント比を予測することが可能であると考えられる。

図5は、放熱温度比を放熱時間比に関して微分した結果を示しており、図6は上から放熱時間比の初期と後期における放熱温度比の変化率を示している。図5より、いずれの水セメント比においても、放熱温度比の変化率は全体的にみるとほぼ同一であることがわかる。図6に示すように、変化率を細かく見ると、初期においては水セメント比が大きいほど変化率が大きく、逆に後期においては水セメント比が小さいほど変化率が大きくなっていることがわかる。表2に示した熱特性値と比較して考えると、放熱初期は熱伝達係数がり、放熱後期は熱拡散率がコンクリートの熱移動特性に関して支配的であると推測できる。

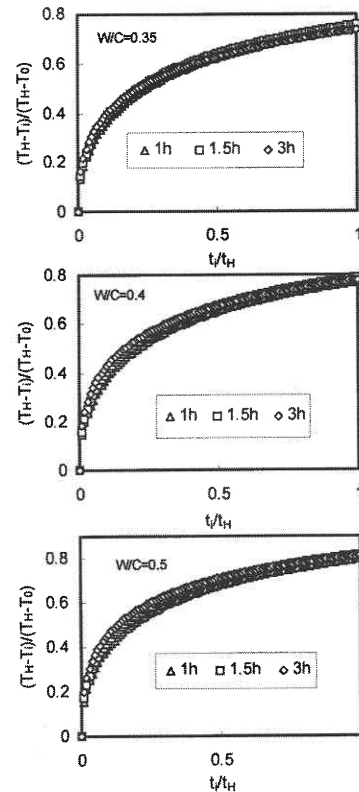


図3 放熱時間比と放熱温度比の関係

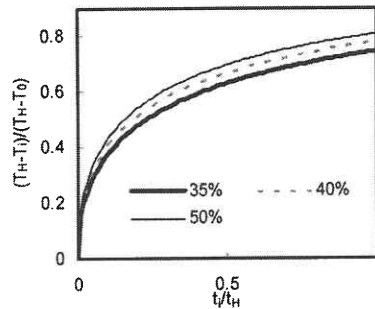


図4 放熱時間比と放熱温度比の関係 (W/Cの違い)

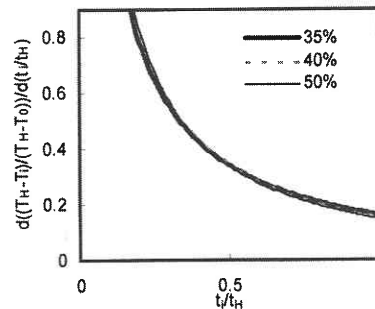


図5 放熱温度比の放熱時間微分

##### 4.2 水セメント比の予測

前節において求めた放熱温度比と放熱時間比の関係を用

研 究 速 報

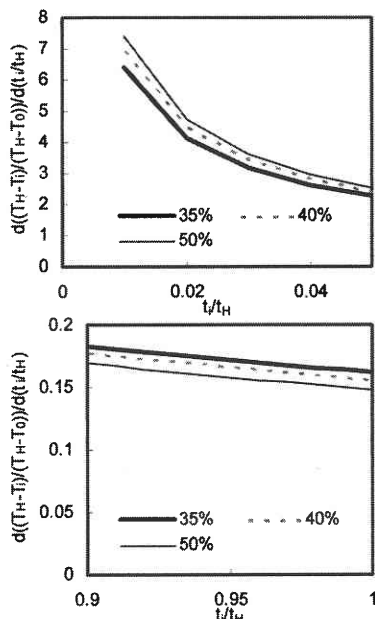


図6 放熱温度比の放熱時間微分 (初期と後期)

いて水セメント比を予測する。図5に示したように、放熱温度比の変化率は微小であるため、図4に示した関係を用いて予測を試みる。図4は加熱時間で正規化しているため、任意の加熱時間に対応することが可能であるが、本研究では、80℃で3時間加熱した後、放熱過程を赤外線サーモグラフィにより撮影した。ここで、放熱時間が1.5時間の時 (放熱時間比 = 0.5) の撮影結果を用いて水セメント比の予測を行う場合、あらかじめ解析により算出された図4を活用して、図7に示すような放熱温度比と水セメント比の関係を求めておく。図中のプロットは、解析結果である図4から得られる両者の関係であり、図中の曲線はこの結果に関して式 (1) で近似した結果である。

$$y = \frac{0.4}{1 + e^{-24.8(x-0.68)}} + 0.25 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、y : 水セメント比, x : 放熱温度比

実験結果より得られる放熱温度比は、水セメント比の小さい順に、0.618, 0.647, 0.674であった。これを式 (1) に代入して水セメント比を予測した結果を図8に示す。図より水セメント比 35, 40% の場合は比較的精度良く予測が可能であるが、50% ではその精度が低下することがわかる。また、全体として予測の水セメント比が実際より低い傾向にあるのは、解析では境界条件が厳密であるのに対して、実験では解析ほど厳密に管理できていないことによる。精度を向上させるためには、実際の境界条件を考慮して解析を行う必要がある。

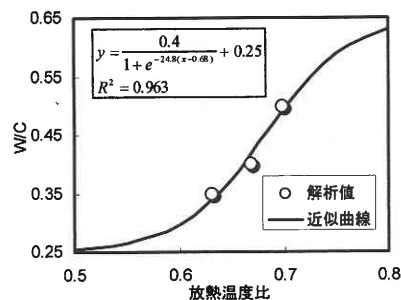


図7 放熱温度比と水セメント比の関係

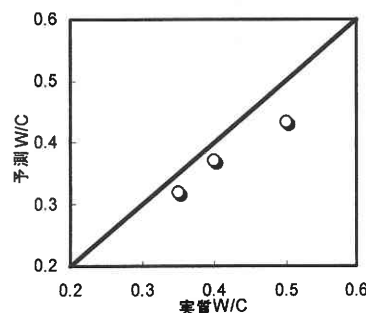


図8 水セメント比の予測結果

5. お わ り に

本研究は、赤外線法によるコンクリートの品質評価手法の提案を目的として行っている研究の基礎段階として、水セメント比の予測を行ったものである。本研究の成果により、放熱温度比と放熱時間比の関係より、赤外センサーモグラフィにより水セメント比が予測可能であることが示された。本手法は、事前に解析的に両者の関係を求めておく必要があり、解析に使用するコンクリートの熱特性値、境界条件が必要不可欠であり、今後はコンクリートの配合と熱特性値の関係、実際に構造物がおかれている環境条件と境界条件の設定法に関して検討していく必要がある。

謝 辞

本研究は、平成14年度産業技術研究助成事業 (研究代表者: 加藤佳孝) の一部として行ったものであり、ここに記して感謝の意を表す。

(2003年4月4日受理)

参 考 文 献

- 1) 例えば、高羅ら、サーモグラフィ法による空隙部の簡易検査手法の提案、V-210, 年次学術講演概要集, 2002
- 2) 加藤佳孝, 小根澤淳志: コンクリートの熱特性を活用した既設構造物の品質評価に関する研究 (1), 生産研究, Vol.55, No. 2, pp.80-83, 2003.