# 論文 赤外線法を用いたコンクリート部材内の材料分布評価に関する基礎的 研究

小根澤 淳志\*1・加藤 佳孝\*2・矢島 哲司\*3・魚本 健人\*4

要旨:部材内の材料分布の不均一性が,耐久性に影響を与えることが報告されているが, 実際に建設された構造物内部でどの程度の不均一性が生じているかに関しては定量的に 評価できないのが現状である。本研究では,コンクリート中の熱移動に着目し,赤外線画 像により施工後の品質を把握する手法を開発することを目的とした。放熱時間比と放熱温 度比の関係から,W/Cの違いを赤外線法により検出可能であることを示した。さらに,骨 材量の違いは加熱時間の温度変化を活用することで検出可能である。

キーワード:赤外線法,非破壊検査,コンクリートの品質

1. はじめに

高度経済成長以降に急速に建設されたコンク リート構造物に対して,劣化に応じた合理的な 補修・補強を実施すること,また新設構造物が 所要の品質を有しているかどうかを検査し,適 切な維持管理を実施することが,今後の社会基 盤整備にとって重要になると考えられる。

コンクリート構造物の維持管理が困難である 原因として,部材内で生じる材料分布の不均一 性や,選定された配合通りに施工されているか 否かの判断を定量的に行うことができないこと があげられる。部材内の材料分布の不均一性が, 耐久性に影響を与えることはこれまでも報告さ れており,コンクリート標準示方書施工編<sup>1</sup>(以 下示方書)では材料係数を用いることで対処し ている。しかし,実際に建設された構造物内部 でどの程度の不均一性が生じているかに関して は定量的に評価できないのが現状である。

そこで本研究では,コンクリート中の熱移動 に着目し,赤外線画像により,施工後のコンク リートの品質の良否を把握する手法を開発する ことを目的とした。

#### 2. 配合および供試体概要

本研究では材料分布の不均一性の要因として, 水セメント比(以下 W/C)および粗骨材量の変化 に着目した。W/C の変化に関しては示方書の 「塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する 照査」における式(1),(2) より,かぶりが 50mm の場合の鋼材腐食発生限界濃度 (C<sub>lim</sub>=1.2kg/m<sup>3</sup>)に至る時間とW/C の関係を求 め(図 1),これより,傾向が異なる2直線上 にあるW/C=35,40および50,55%の4点を選 定した。また,既往の文献<sup>2)</sup>を参考とし, W/C=50%において粗骨材量を標準量に対し質 量比で-10%,0%,+10%,+20%(以下,G-10%, G+0%,G+10%,G+20%)とした場合につい ても検討した。配合を表 1に示す。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{\rm lim}} \le 1.0 \tag{1}$$

$$C_{d} = \gamma_{cl} \cdot C_{0} \left(1 - erf\left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_{d} \cdot t}}\right)\right) \quad (2)$$

ここに, i:構造物係数(1.0), Clim:鋼材腐

\*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
\*2 東京大学生産技術研究所講師 博士(工学) (正会員)
\*3 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)
\*4 東京大学生産技術研究所教授 工博 (正会員)

食発生限界濃度(1.2kg/m<sup>3</sup>), C<sub>d</sub>:鋼材位置お ける塩化物イオン濃度の設計値(式(2)により 算出)

供試体は 30×30×15cm の直方体とし, 30 測点 の熱電対を配置した(図 2)。

3. 熱特性値の検討<sup>3)</sup>

コンクリートの品質の違いが熱移動特性に与 える影響を,解析および実験的に検討するため に必要な熱特性値として熱伝導率,熱拡散率, 熱伝達率の測定を行った。試験実施前の供試体 は 20 ,50%RHの恒温恒湿槽で管理し含水率 を一定に保った。

3.1 熱伝導率

写真 1 に示す熱伝導率測定装置を用いて熱 伝導率の測定を行った。測定回数は3回であり 平均値を用いて算出した。

3.2 熱拡散率

熱拡散率は Glover 法により測定することが 一般的である。Glover 法とは,高さと直径の比 が2:1 であるような円柱供試体の中央に熱電 対を配置し,供試体を60 の温水で一様に加熱 したものを20 の水中に浸けて,温度の経時変 化を測定することで熱拡散率を求めるもので ある。しかし,温水中で供試体を加熱する Glover 法では,供試体の含水率は100%となり, 含水率の違いによる影響を避けるために恒温 恒湿槽にて乾燥させた本実験の供試体とは異 なる条件下での測定となる。そこで,60 のホ ットプレート(写真 2)で30分間1面加熱した ときの(残りの5面は断熱)供試体の温度変化を 熱電対によって測定し,この結果から以下に示 す方法によって熱拡散率を導出した。

測定結果に対して、式(3)を用いた最小二乗法 による回帰分析を行い,表面温度*C*<sub>0</sub>と熱拡散率 Dを求める。得られた*C*<sub>0</sub>と時間tの関係から表 面温度係数Sを求め,この値を式(4)に当ては め,再度測定値に対して回帰分析を行い,熱拡 散率Dを算出した。



図-1 CI-の侵入に伴う鋼材腐食発生開始時間の関係



図-2 供試体ならびに熱電対配置図

表-1 配合

(0	%)		単位量	(kg/m³)	
W/C	s/a	W	С	S	G
35	42	172	477	715	955
40	43	172	430	739	955
50	45	179	359	789	955
55	46	171	312	842	955



写真-1 熱伝導率測定器

写真-2 ホットプレート

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - erf \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)$$
 (3)

$$C(x,t) = S\sqrt{t} (\exp(-\frac{x^2}{4D \cdot t}))$$
  
$$-\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D \cdot t}} erf \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}$$
(4)

ここに, C<sub>0</sub>:表面温度(), x:コンクリート表 面からの距離(cm), t:時間(sec), D:熱拡散率 (m<sup>2</sup>/h), erf:誤差関数 求めた熱拡散率を用いて熱伝導解析を行った結果,解析結果は実測値とほぼ一致しており, 算出した値が妥当であることがわかる(図 4)。



3.3 比熱

熱伝導率,熱拡散率,比熱には式(5)の関係 があり,本研究では熱伝導率,熱拡散率から比 熱を算出した。

$$\alpha_c = \frac{\kappa}{C\rho} \tag{5}$$

ここに

 $\alpha_c$ :熱拡散率[m<sup>2</sup>/h], k:熱伝導率[W/m・K] C:比熱[J/kg],  $\rho$ :密度[kg/m<sup>3</sup>]

3.4 熱伝達率

熱伝達率は,恒温槽で60 に加熱した供試体 を1面放熱し(残りの5面は断熱),供試体内部 の温度変化を熱電対により,表面の温度変化を 赤外線カメラにより測定した。この結果に対し て3.2で得られた熱拡散率を用いた熱伝導解析 により逆解析によって,熱伝達率を求めた。

3.5 測定結果と考察

表 3 に測定した熱特性値の一覧を示す。表 3の結果と W/C の関係を図 5,図 6に粗骨 材量との関係を図 7,図 8示す。

表 3 熱特性値

W/C	熱伝導率	熱拡散率	比熱	密度	熱伝達率
(%)	(W/m·K)	(m <sup>2</sup> /h)	(J/kg )	$(kg/m^3)$	$(W/(m^2 \cdot K))$
35	1.60	0.0041	590.28	2380	13.93
40	1.40	0.0038	562.00	2360	15.35
50	1.34	0.0037	557.17	2340	16.69
55	1.16	0.0042	428.57	2320	11.52
50(+20%)	1.45	0.0044	496.75	2380	13.62
50(+10%)	1.77	0.0042	634.79	2390	16.34
50(-10%)	1.33	0.0036	585.90	2270	16.81



W/C の増加とともに,熱伝導率,熱拡散率 (W/C=50%まで),密度は減少傾向を示すこと がわかる。また,粗骨材量の増加とともに,熱 伝導率(G+10%まで),熱拡散率,密度は増加 傾向を示すことがわかる。一般に熱伝導率と熱 拡散率は比例関係にあるとされており<sup>4)</sup>,この ことより考えると W/C=55%および W/C=50% (G+20%)の測定値は適切な値ではないと考え られる。熱伝達率は3.4 で述べたように熱拡散 率と表面温度の測定値より逆解析で算出してお り,熱拡散率の測定が誤っていれば,熱伝達率 の値も誤っていることになる。これらに関して は,今後再検討する必要があるが,今回は W/C=55%および W/C=50%(G+20%)に関しては 議論の対象から外すことにした。

4. 赤外線法による品質評価

4.1 解析による測定条件の検討

赤外線法を用いてコンクリートの品質の違い を検出するための条件を,3.で求めた熱特性値 を用いて熱伝導解析を行うことにより検討した。 解析の条件は,加熱時間をパラメータとし,そ れぞれの放熱過程をシミュレートした。加熱時 間は30分,1時間,1.5時間,2時間,2.5時間, 3時間とし,加熱温度は80 で一定としている。 解析結果の一例を図 9,図 10 に示す。検討 の結果,80 で3時間加熱し,その後放熱する 場合にW/Cの変化および,粗骨材量の変化につ いて明確な温度差を検出することができた。

4.2 測定方法

写真 3のように 5 面を断熱し,温度管理で きるホットプレートで一定時間加熱し,その後 1面から放熱させ,赤外線カメラを用いて表面 温度変化を写真 4 のように撮影した。試験実 施前の供試体は 20 ,50%RHの恒温恒湿で管 理し含水率を一定に保った。

## 4.3 結果と考察

最も温度差の現れた放熱開始から 10 分まで の表面温度変化の熱伝導解析結果を図 11 に, 実験結果の一例を図 12 に示す。W/C=35%と W/C=50%とでは放熱開始後2分で4.9 の温度



差が検出された。これは解析結果における温度 差4.5 とほぼ一致する。W/C=50%(G+0%)と W/C=50%(G-10%)とでは放熱開始時に5.4 の 温度差が検出できた。解析値の6.7 とは差があ るが,これは断熱が完全ではなかったことに起 因すると考えられる。また,全体的に最高温度 が実験値と解析値とで異なるのも同様の理由で あると考えられる。以上より,コンクリートの 品質の違いを表面温度差として検出可能である ことがいえる。

4.4 品質評価方法の提案

実験では80 のホットプレート(写真 2)で 3 時間加熱し,その後放熱する場合について検 討した。しかし,加熱時間が現実的ではなく, 供試体の初期温度等が変化した場合に適用が難 しくなると考えられる。

赤外線手法を用いるときに取得しうる情報と しては,初期表面温度T<sub>0</sub>,加熱後表面温度T<sub>H</sub>, 放熱時表面温度 Ti,加熱時間 ty,放熱時間 ti が考 えられる。これらを利用して熱エネルギーの流 入量と流出量の関係を簡略的に表現する方法を 検討した。熱伝導解析により,80 で1時間, 1.5 時間, 3 時間加熱し, その後放熱させた場 合の表面温度の経時変化を求めた。それぞれの 結果を用いて放熱時間t<sub>i</sub>と加熱時間t<sub>H</sub>の比(t<sub>i</sub>/t<sub>H</sub>) (放熱時間比)と放熱温度(T<sub>H</sub> - T<sub>i</sub>)と上昇温度 (T<sub>H</sub> - T<sub>0</sub>)の比(放熱温度比)の関係の一例を表 したものが図 13 である。これにより,加熱時 間によらず,両者の関係はほぼ一定になること がわかる。そこで,W/Cごとに各加熱時間で得 られた結果を平均化したものを図 14 に示す。 図から明らかなように,W/C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 とで赤外線法により取得した情報のみで W/C の違いを予測することが可能であると考えられ る。

図 14 の解析結果を用いて,図 15 は t<sub>i</sub>/t<sub>H</sub>=0.5 における放熱温度比と W/C の関係を示 したものである。図 15 には,実験より得られ



図-13 放熱時間比と放熱温度比の関係



図 14 放熱温度比と放熱時間比の関係



た放熱温度比をあわせてプロットしてある。 W/C=50%では実験結果との差がみられるが, W/C=35%とW/C=40%においては実験結果とほ ぼ一致している。実験結果と解析結果に差異が 表れたのは,実験においては断熱が完全ではな かったことに起因すると考えられる。そのため, 熱伝達率の最も高いW/C=50%において解析よ りも温度下降が早くなったと考えられる。しか しながら,図 15よりW/Cをある程度推定で きることがわかる。

同様な方法を用いて骨材量の検討も行ったが, W/Cに比べて明確な違いが得られなかった。そ こで,加熱過程における温度変化に着目した。 図 16に示すように,粗骨材量の変化によって 明確な差が見られた。加熱過程の差を定量的に 評価するために解析結果を最も再現できる式 (6)を用いて近似し,係数bと粗骨材量の関係 を求めた。

$$T = T_{\max}(1 - \exp(-bt^{0.39})) + T_0$$
 (6)

ここに,T<sub>max</sub>:加熱終了後の上昇温度()

図 17 に示すように,両者の関係には式(7) に示すような関係が存在することがわかる。こ れにより,加熱後表面温度(T<sub>H</sub> = T<sub>max</sub>+T<sub>0</sub>)と時間 を実測値から得て,式(6)よりbを算出し,式 (7)から最終的に粗骨材量を算出することがで きる。図 17 には,このようにして算出した結 果を合わせてプロットしてある。予測式とは異 なるが,実験値も同様な傾向を示しており,係 数 bを用いた関係式により骨材容積比が予測可 能であると考えられる。予測と異なった理由と しては,実験の断熱状態が完全ではなかったこ とが考えられる。

$$y = 0.24b^{-0.14} \tag{7}$$

#### 5. まとめ

本研究の成果を以下に取りまとめる。

- (1)コンクリートの品質の違いは表面温度の 違いとして検出することができる。
- (2)加熱温度および加熱時間を様々に変化させた場合においても,赤外線法を用いて入手可能な表面温度情報を用いて,W/Cおよび粗骨材量それぞれの特性式より品質の違いを検出できる可能性があることがわかった。

今後は,本手法を実構造物に適用させるため の測定条件などの検討を実施していく必要があ ると考えている。

### 謝辞

本研究を実施するに当たり,東京大学生産技術



研究所魚本研究室の皆様には多大なご協力を 頂きました。ここに記して感謝の意を表しま す。なお,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る。

参考文献

- 2001 年制定,コンクリート標準示方書 施工編,土木学会
- 神田衛,吉田八郎:コンクリート打ち込みの部材断面における水セメント比の分布性状,セメント・コンクリート, pp.38-43, No.357, 1976.11
- 川口徹,桝田佳寛:コンクリートの熱伝 導率,熱拡散率,比熱の測定方法とその 応用,マスコンクリートの温度応力発生 メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会,pp.11-14, 1982.9
- 庄司正弘: 伝熱工学,東京大学出版会, 1995