

論文 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいたコンクリート内部の鉄筋腐食率同定手法に関する研究

中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○長坂 慎吾

中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 正会員 大下 英吉

1. はじめに

著者らは、新たな非破壊検査診断手法として、鉄筋自体の通電性、熱伝導性を利用することにより鉄筋コンクリートの劣化性状を評価可能とするシステムの構築に着手してきた。その具体的手法は、鉄筋を強制加熱し、熱伝導により変動するコンクリート表面温度を赤外線センサで経時的に測定することにより、コンクリート内部の欠陥を評価するシステム（以下、本システムと称す）である。

本システムにより現在までに得られている成果は、剥離・空洞・ひび割れといった劣化要因がコンクリート表面の熱画像により検知可能となった¹⁾。さらに、コンクリート表面温度の経時変化から、鉄筋腐食の有無が診断可能になるとともに、順解析によりその厚さも評価可能となった²⁾。このように本システムは、剥離・空洞・ひび割れや鉄筋腐食厚といった劣化性状を総合的に評価可能であり、他に例を見ないものである。しかしながら、鉄筋腐食厚の定量的評価に際しては順解析で行なったため、誤差の問題や計算時間の問題が挙げられる。特に誤差の問題は、鉄筋腐食厚に大きく影響するため、その評価手法の改善が望まれる。

本研究では、コンクリート表面温度と鉄筋の温度上昇量を用いた精度良い腐食厚の推定法を確立することを目的とした。また、その推定法の適用性を実験結果との対比により評価した。

2. 解析概要

2.1 腐食領域の推定方法

鉄筋腐食の推定は、まず腐食厚を仮定（以下、仮定腐食厚と称す）する。次に、仮定腐食厚の熱伝導率を同定することにより、仮定腐食厚と仮定腐食厚の熱伝導率との近似式を求め、最終的に、近似式と真の腐食鉄筋の熱伝導率との関係から腐食厚を推定するというものである。

2.2 熱伝導率の同定

本研究では、共役勾配法の一様である Fletcher Reeves 法を用いて、以下に示す評価関数を最小化することに

より熱伝導率の同定を行なった。

鉄筋周りの熱伝導率を求めるための評価関数を以下のように定義する。

$$J(k) = \frac{1}{2} \int \{\tilde{T} - T(k, t)\}^T \{\tilde{T} - T(k, t)\} dt \quad (1)$$

ここで、

k : 熱伝導率

t : 時間

$\tilde{T}$: 実験で得られたコンクリート表面温度

T : 解析で得られたコンクリート表面温度

を表す。

以下に計算のアルゴリズムを示す。

[Step 1] 熱伝導率の初期値 k , 許容誤差 ε , $i = 0$ の設定

[Step 2] $T_\mu^0(k^0, t)$, $J(k^0)$, $\partial T / \partial k$ の計算

[Step 3] $\partial J(k^0, t) / \partial k$ の計算と $d^0 = -\partial J(k^0, t) / \partial k$ の設定

[Step 4] $J(k^i + \alpha^i d^i)$ が最小となるステップ幅 α^i の計算

[Step 5] $k^{i+1} = k^i + \alpha^i d^i$ の計算

[Step 6] $T^{i+1}(k^{i+1}, t)$ と $J(k^{i+1})$ の計算

[Step 7] If $|J(k^{i+1}) - J(k^i)| < \varepsilon$ ならば終了, でなければ次のステップへ

[Step 8] $\partial J(k^{i+1}) / \partial k$ の計算

[Step 9] β^{i+1} の計算

[Step 10] $d^{i+1} = -\partial J(k^{i+1}) / \partial k + \beta^{i+1} d^i$

[Step 11] $i = i + 1$ を設定し, ステップ 4 へ

ステップ幅 α は、評価関数をステップ幅 α で微分し、ゼロと置くことにより

$$\alpha^i = \int \left\{ \frac{\partial T}{\partial k} d \right\}^T \{\tilde{T} - T(k, t)\} dt / \int \left\{ \frac{\partial T}{\partial k} d \right\}^T \left\{ \frac{\partial T}{\partial k} d \right\} dt \quad (2)$$

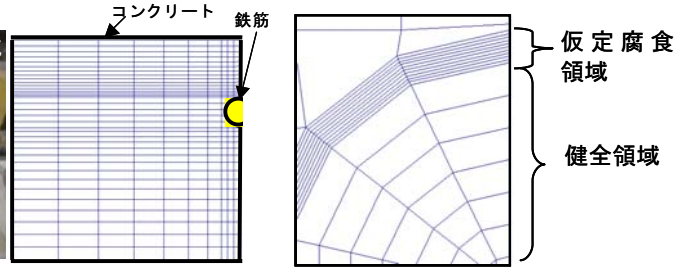
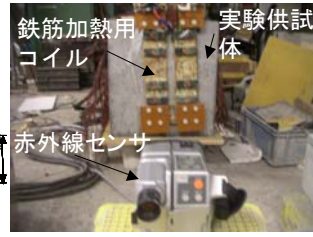
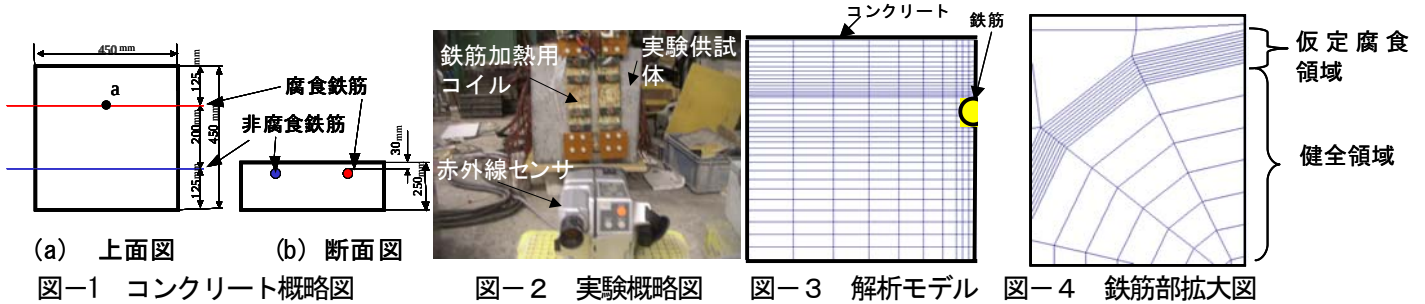
となる。また、共役方向に関する勾配 β^i は、繰り返し計算 ($i+1$) における評価関数の勾配の積を繰り返し計算 (i) での評価関数の勾配の積で除すことにより

$$\beta^i = \frac{\partial J(k^{i+1}) / \partial k \cdot \partial J(k^{i+1}) / \partial k}{\partial J(k^i) / \partial k \cdot \partial J(k^i) / \partial k} \quad (3)$$

として、求めることができる。

キーワード：非破壊検査 赤外線センサ 電磁誘導加熱 最適制御理論 腐食率 同定

住所：東京都文京区春日 1-13-27, 電話：03-3817-1892, FAX：03-3817-1803



(a) 上面図 (b) 断面図

図-1 コンクリート概略図

図-2 実験概略図

図-3 解析モデル

図-4 鉄筋部拡大図

表-1 解析に用いた熱的特性

	コンクリート	鉄筋(健全領域)	鉄筋(腐食領域)
密度 (kg/m ³)	2.40×10^3	7.85×10^3	5.30×10^3
比熱 (kJ/kg ³ ·°C)	1.15	4.70×10^{-1}	1.20
熱伝導率 (W/m ² ·°C)	2.70	5.13×10^1	6.97×10^{-2}

3. 本手法の適用性評価

3.1 実験に用いた鉄筋コンクリート供試体

実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-1 に示すように 450×450×250mm のスラブであり、かぶり厚さ 30mm の位置に D16 異型鉄筋を配筋したものである。鉄筋は全面非腐食状態、事前に腐食させた全面腐食状態を有する 2 種類を用いた。

3.2 実験方法および条件

実験方法は、図-2 に示すように、観測面に鉄筋加熱用コイルを設置し、2KW で 270 秒間コイルに通電し、通電終了後にコイルを取り除いた後、直ちに赤外線センサによりコンクリート表面温度を計測する。コンクリート表面温度の計測は、5 秒間隔で約 60 分間実施した。なお、室温は 24.8°C の一定条件で実施した。

3.3 解析モデルおよび解析条件

解析に用いた材料の熱的特性は、表-1 に示す通りである。解析モデルは図-3 に示すような 2 次元モデルであり、鉄筋部分の拡大図を図-4 に示す。假定腐食領域では、0.1mm 刻みにメッシュを作製した。また、同定に用いた観測値は図-1 に示す鉄筋直上に位置するコンクリート表面の中心位置 a 点であり、温度履歴は図-5 に示す通りである。鉄筋は強制加熱中においては固定温度境界とし、強制加熱終了後は固定温度境界を解除した。また、假定腐食厚は 0.1mm から 0.8mm まで 0.1mm 刻みに変化させた。

3.4 解析結果

解析で得られた假定腐食厚と熱伝導率の関係を図-6 に示す。図-6 の縦軸は熱伝導率であり、横軸は假定腐食厚である。この図から、假定腐食厚と熱伝導率の関係はほぼ線形である。解析結果から近似直線を作成し、鉄筋腐食領域の真の熱伝導率を代入することにより、腐食領域は 0.13mm という推定結果を得た。実際に使用した腐食鉄筋の腐食厚は、0.1mm~0.2mm であり、解析結果は実験結果と良好な一致を示している。

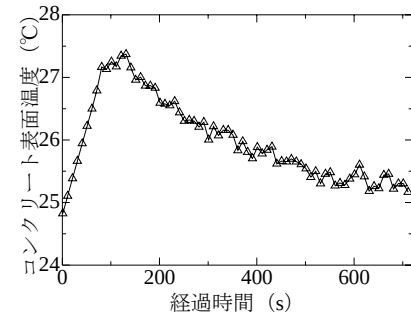


図-5 a点での経時温度変化

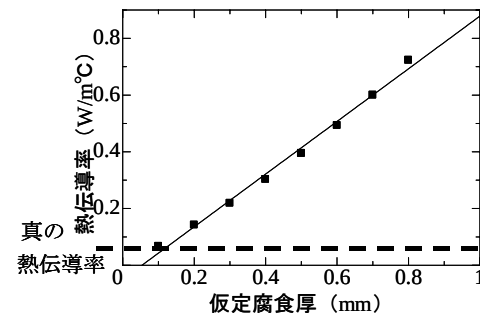


図-6 假定腐食厚・熱伝導率の関係

4. 今後の課題

現在のところ、推定された腐食厚が設定した要素の最小メッシュ幅以下の場合には、腐食厚の評価が困難である。また、現在のかぶり厚さが既知の場合に対する解析を行なっているが、実構造物ではかぶり厚さが未知であることが多い。このような場合には、鉄筋位置を移動させることにより、かぶり厚さの同定も同時に行なう必要があり、現在着手中である。

参考文献

- 1) 白木悠祐, 茂木淳, 谷口修, 大下英吉: 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいたコンクリート内部の空洞・ひび割れ非破壊検査手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第26巻, 第1号, pp.1845-1850, 2004.
- 2) 茂木淳, 長坂慎吾, 谷口修, 大下英吉: 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいたコンクリート内部の鉄筋腐食性状非破壊検査手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第26巻, 第1号, pp.1989-1994, 2004.