

題目 最適制御理論による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 ○谷ヶ崎 世司
 三菱 UFJ トラストシステム株式会社 修士 正会員 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、順解析的手法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・ひび割れや鉄筋の腐食厚といった劣化性状を同時に評価可能であり、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、順解析のトライアンドエラーにより実施していたため、不完全なものであった。

本研究では、コンクリート表面温度の観測値と計算値により定義される評価関数を基礎方程式、初期条件および境界条件のもとで最小とする最適解を求める手法である最適制御理論を用い、コンクリート表面温度により腐食厚の最適形状を同定する手法の開発を行った。

2. 最適制御理論を用いた鉄筋腐食の定量的評価

2.1 評価関数

鉄筋の健全及び腐食領域を求めるために評価関数を以下のように定義する。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \int_V (T - T_{obs})^T R (T - T_{obs}) dV dt \quad (1)$$

ここに、

T_{obs} : 観測点における温度 (°C)

T : 数値計算により求まる温度 (°C)

R : 重み定数

この問題は評価関数の最小化問題に帰着でき、評価関数が最小になるということは、数値計算により求まる温度 T が観測点における温度 T_{obs} に近づいているということを意味する。

2.2 随伴方程式の導出

式(1)示す評価関数は、基礎方程式を解いた値により表されることから、基礎方程式、初期条件および境界条件を拘束条件とした拘束条件付き最小化問題となるため、随伴変数法を導入する。評価関数は随伴変数及び基礎方程式を付加することにより、以下に示す拡張評価関数が得られる。

$$J^* = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \int_V (T - T_{obs})^T R (T - T_{obs}) dV dt + \int_0^{t_f} \int_V \lambda^T (\rho c \dot{T} - \kappa T_{,ii}) dV dt \quad (2)$$

ここに、 ρ および c はそれぞれ密度および比熱、 κ は熱伝導率、 λ は随伴変数を表す。

拡張評価関数 J^* の停留条件を導くために、 J^* の第一変分が 0 になる必要がある。そこで、拡張評価関数 J^* の第一変分を計算すると以下ようになる。

$$\delta J^* = \int_0^{t_f} \int_V \left\{ -\rho c \dot{\lambda}^T - \kappa \lambda_{,ii}^T + (T - T_{obs})^T R \right\} \delta T dV dt + \int_V \left[\lambda^T \delta T \right]_{t_0}^{t_f} dV + \int_0^{t_f} \int_S \lambda^T \delta (\kappa T_{,i} n_i) dS dt - \int_0^{t_f} \int_S (\kappa \lambda_{,i} n_i)^T \delta T dS dt + \int_0^{t_f} \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \lambda^T (\rho c \dot{T} - \kappa T_{,ii}) \right\} \right] \delta x_j dV dt \quad (3)$$

拡張評価関数の第一変分が 0 になる条件から、下に示す随伴変数の終端条件が得られる。

$$\lambda(t_f) = 0 \quad \text{in } V \quad (4)$$

また、以下に示す随伴方程式も得られる。

$$-\dot{\lambda}^T - \kappa \lambda_{,ii}^T + (T - T_{obs})^T R = 0 \quad \text{in } V \quad (5)$$

このとき、 λ については初期条件ではなく終端条件が与えられているため、式(5)は逆時間で解かなければならないことに注意する必要がある。

2.3 最小化手法

解析に用いた物性値は表-1に示す通りである。また、最小化手法は Sakawa-Shindo 法を適用した。

Sakawa-Shindo 法の計算アルゴリズムを以下に示す。

[Step1] 初期座標 $x_i^{(l)}$ を決定する。

[Step2] 状態方程式および評価関数 $J^{(l)}$ を計算する。

[Step3] 随伴方程式より、 $\lambda_i^{(l)}$ を計算する。

[Step4] 座標更新値 $x_i^{(l+1)}$ を算定する。

[Step5] 収束判定を行い、 $\|x_i^{(l+1)} - x_i^{(l)}\| < \varepsilon$ なら計算を

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



図-1 実験概略図

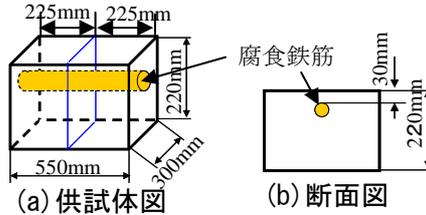


図-2 実験供試体

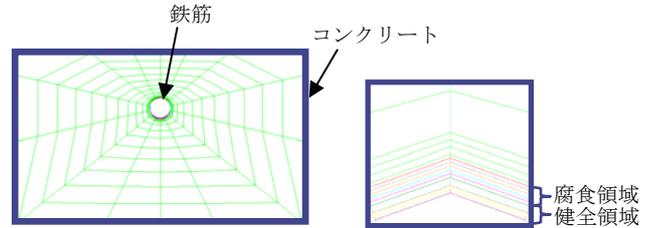


図-3 解析モデル

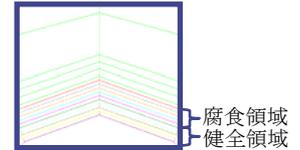


図-4 鉄筋部拡大図

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°C)	1.15	4.70 × 10 ⁻¹	1.20
熱伝導率(W/m°C)	2.70	5.13 × 10 ¹	6.97 × 10 ⁻²

終了し、そうでない場合は step6 へ進む。

[Step6]状態方程式および評価関数 $J^{(l+1)}$ を計算する。

[Step7]重みパラメータ $C^{(l)}$ の更新を行う

もし $J^{(l+1)} \leq J^{(l)}$ なら、

$$C^{(l+1)} = 0.9C^{(l)} \quad (6)$$

とし、STEP3 へ戻る。そうでない場合は、

$$C^{(l+1)} = 2.0C^{(l)} \quad (7)$$

とし、STEP4 へ戻る。

繰返し計算過程における各カウントの新たな節点座標値 $x_i^{(l+1)}$ は、以下の式で計算される。

$$x_i^{(l+1)} = x_i^{(l)} + \frac{1}{C^{(l)}} \int_0^{t_f} \left(\frac{\partial J^*}{\partial x_i} \right)^{(l)} dt \quad (8)$$

なお、重みパラメータの初期設定値 $C^{(l)}$ は、メッシュの形状を破壊しないように、初期イタレーション時に計算によって得られた拡張評価関数の座標値に対する勾配 $\int_0^{t_f} \left(\frac{\partial J^*}{\partial x_i} \right)^{(l)} dt$ の値を考慮して、適切に設定する必要がある。本検討では下式により設定することとした。

$$C^{(l)} = \left\| \int_0^{t_f} \left(\frac{\partial J^*}{\partial x_i} \right)^{(l)} dt \right\| / \Delta x_i^{(1)MAX} \quad (9)$$

ここに $\Delta x_i^{(1)MAX}$ は初期イタレーション時における、腐食領域の表面座標値に関する最大移動量を示す。

3. 本手法の適用性評価

3.1 実験方法および条件

実験方法は、図-1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秒間コイルに通電加熱をし、加熱終了後にコイルを取り除いた後、直ぐ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。また、実験供試体は図-2に示すように550×300×220mmで、かぶり厚さ30mmの位置にD16腐食鉄筋を配筋したものである。

3.2 解析条件および解析モデル

解析に用いた物性値は表-1に示す通りである。また、観測値は図-7の値を使用し、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。解析モデルは図-3に示すような2次元モデルであり、図-2(a)で示した供試体の青線の部分の断面図に相当する。

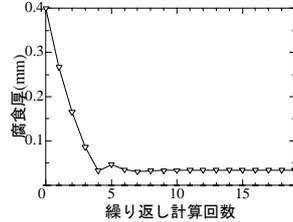


図-5 鉄筋腐食厚の収束状況

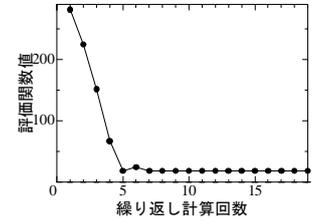


図-6 評価関数の推移

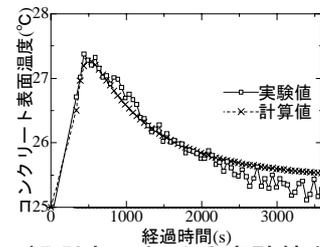


図-7 観測点における実験値および解析値

鉄筋部分の拡大図を図-4に示す。

3.3 解析結果

図-5に繰返し計算毎における腐食厚の推移を表す。この図からわかるように、繰返し約5回で、0.04mmに収束していることがわかる。実際に使用した鉄筋の腐食厚は0.05mm程度であり、推定結果は実測値を精度良く評価している。また、図-6に示すような評価関数値が得られ、0に近い値に収束しているのが確認できる。収束した腐食厚さをを用いた場合の実測値と計算値を比較したものを図-7に示す。実測値と計算値を比較すると最大で約0.2°C程度の差異が認められるものの、全体的によく一致しているものと考えられる。

4. まとめ

最適制御理論により、精度良く腐食厚の評価が可能であることが確認された。また、現在の使用しているメッシュは二次元であり、より精度を向上させるためにメッシュを三次元に拡張するのが今後の課題である。

参考文献

- 1) 臼木悠祐, 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.