

コンクリートの表面温度性状に基づく鉄筋腐食の簡易診断手法に関する研究

中央大学 学生会員 ○矢寄早織
中央大学 正会員 大下英吉

1. はじめに

著者らは、鉄筋コンクリート構造物内部の鉄筋を電磁誘導法により強制加熱し、赤外線サーモグラフィで測定したコンクリート表面温度や分布性状からコンクリート内部における鉄筋腐食状況を定性的かつ定量的に評価可能とする非破壊検査システムの構築に着手している^{1),2),3)}。その手法は、磁性体で高い熱伝動性である鉄筋の性質と大きな比熱で小さな熱伝導率である腐食生成物の熱的性質に着目したものである。具体的には、電磁誘導法により鉄筋に蓄えられた熱がコンクリート表面へと拡散する際、鉄筋表面に腐食が存在するとその直上に位置するコンクリート表面温度性状に変化が現れる。その変化の程度は、腐食の進行度合い（腐食厚や腐食率）に依存することに着目し形状最適化理論で熱伝導問題に適用し、コンクリート表面温度から、それらを定量的に推定する手法も構築している。しかしながら、定量的推定に至るまでには、有限要素法による複雑なメッシュ作りや膨大な計算時間が必要となるため、より簡易な推定手法の構築が望まれていた。さらに、実構造物におけるコンクリート表面温度の情報が得られると同時に、その情報を基に鉄筋腐食の有無の判断ならびにある程度の精度の範囲内で腐食率を評価可能とする手法が必要であった。

このことはすなわち、種々の鉄筋径やかぶり厚、コンクリートの初期温度や外気温の変動に伴う電磁誘導によるコンクリート表面の温度上昇量が非腐食鉄筋に対して把握できていれば、それとの照合で実構造物の測定箇所における鉄筋の腐食の有無ならびに腐食量が推定可能となる。

本研究では、鉄筋腐食の有無や腐食率を簡易に予測可能とする手法の構築を目的とする。具体的には、非腐食鉄筋のコンクリート表面の温度上昇量を各種条件下の鉄筋や環境条件のもとで熱伝導解析によってデータベース化を行うとともに熱伝導解析結果を実測値と比較することにより、コンクリート内部の鉄筋腐食診

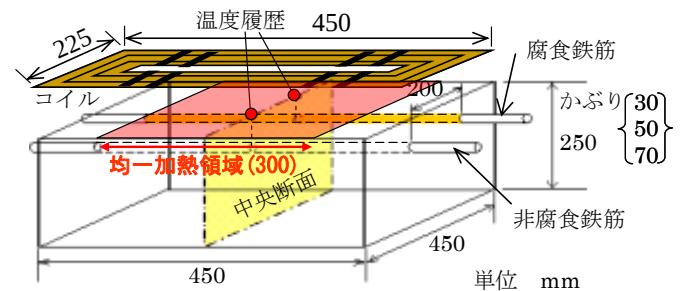


図-1 試験体概要

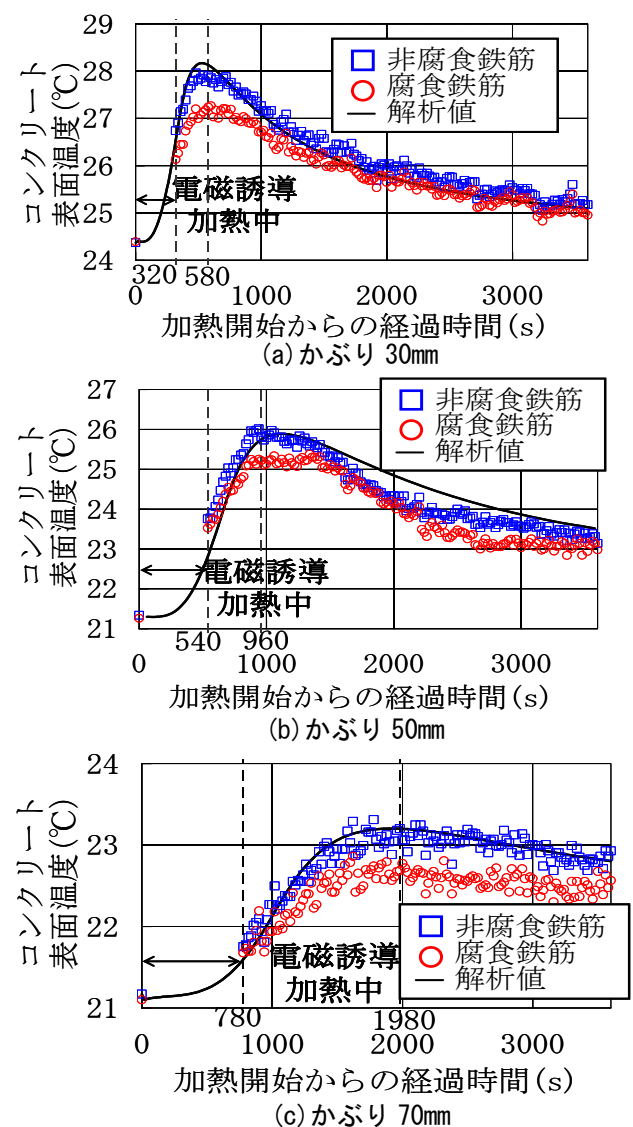


図-2 コンクリート表面温度履歴

断を実施する。さらに、その関係から腐食量を予測可能な評価式を提案することとする。

キーワード：非破壊検査、電磁誘導、コンクリート表面温度、熱伝導解析

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

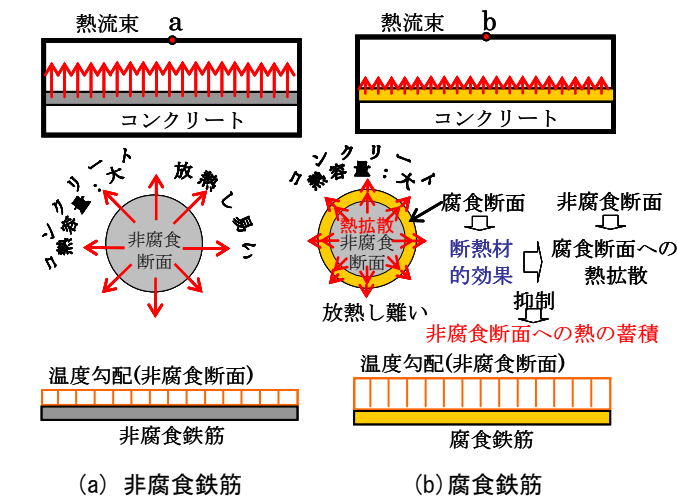


図-3 腐食の有無によるコンクリート表面温度性状

2. 鉄筋腐食評価手法の概要

2.1 電磁誘導加熱

本システムでは、コンクリート内部の鉄筋を強制加熱する際に電磁誘導加熱を用いている。電磁誘導加熱は、電磁誘導コイルに高周波電流を負荷することによってコイル周辺に交番磁界が発生することによって鉄筋が加熱されるものである。既往の研究では、かぶりを 30, 50, 70mm とした試験体を対象として電磁誘導加熱を利用した本システムの適用によるコンクリート表面温度性状を確認した。図-1 に示すように、コンクリート試験体寸法は 450×450×250mm であり、かぶり 30, 50, 70mm の位置に 200mm の間隔で 2 本の鉄筋を配筋している。鉄筋径は D16 であり、軸方向全長に渡って比較的均一な腐食を生じた腐食鉄筋および非腐食鉄筋の 2 種類である。電磁誘導加熱による鉄筋温度の制御は、かぶりに応じて設定した電力を所定の時間までコイルに負荷することにより実施し、その後コイルを取り外した。

コンクリート表面の温度測定は、赤外線サーモグラフィにより実施し、電磁誘導コイルを設置する前に初期温度を測定し、電磁誘導加熱終了後 5 秒間隔で 90 分測定した。

なお、既往の研究で使用した電磁誘導コイルの均一加熱領域は鉄筋軸方向に 300mm である。

2.2 温度履歴

図-2 は、図-1 に示した試験体の鉄筋軸方向に直交する中央断面に位置する鉄筋中心直上のコンクリート表面における温度履歴を示している。いずれの試験体においても、非腐食鉄筋と腐食鉄筋上のコンクリート

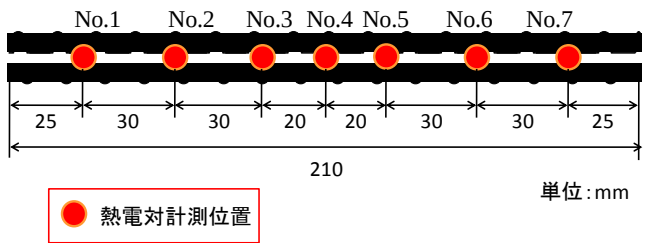


図-4 熱電対設置位置

表-1 実験条件

鉄筋径 (mm)	かぶり (mm)	負荷電力 (kw)	加熱時間 (s)
16	30	0.2	90
19			
22			
16	50	1.0	120
19			
22			

表面温度では差異が生じており、鉄筋腐食上のコンクリート表面温度が非腐食鉄筋上に比べて最大で 0.5 ～0.9℃低くなっている。これは、図-3 に示すように腐食生成物のもつ断熱的性質によるものである。すなわち、腐食量が多いほど断熱材的效果が大きく、コンクリート表面の温度差が腐食量に対応することを示している。

3. 非腐食鉄筋を仮定したコンクリート温度性状のデータベース化

前章では、非腐食鉄筋と腐食鉄筋のコンクリート表面温度に差異が生じ、その温度差が腐食量と関係しているということを述べた。すなわち、実構造物のコンクリート内部の鉄筋を電磁誘導加熱し、測定した際に非腐食鉄筋時の温度上昇量が既知であれば、簡易的に内部鉄筋の腐食状況の診断が可能と言える。

本章では、各種の鉄筋径、かぶり、環境条件等のパラメータを設定した熱伝導解析を実施し、非腐食鉄筋時のコンクリート表面の温度上昇量に関する、データベース化を実施する。

3.1 解析パラメータ

図-2 に示したようにかぶりが大きくなると最高温度に到達するまでの時間が長くなることに加え、温度上昇量も小さくなることが既往の研究^{1),2),3)}より確認されている。また、コンクリートの初期温度や外気温により温度上昇量も変化する。さらに、電磁誘導の特性により鉄筋径によっても温度上昇量は異なることから、と外気温の影響を受けることを想定し、解析パラメータをかぶり、鉄筋径、初期温度、外気温の計 4 つに設定した。

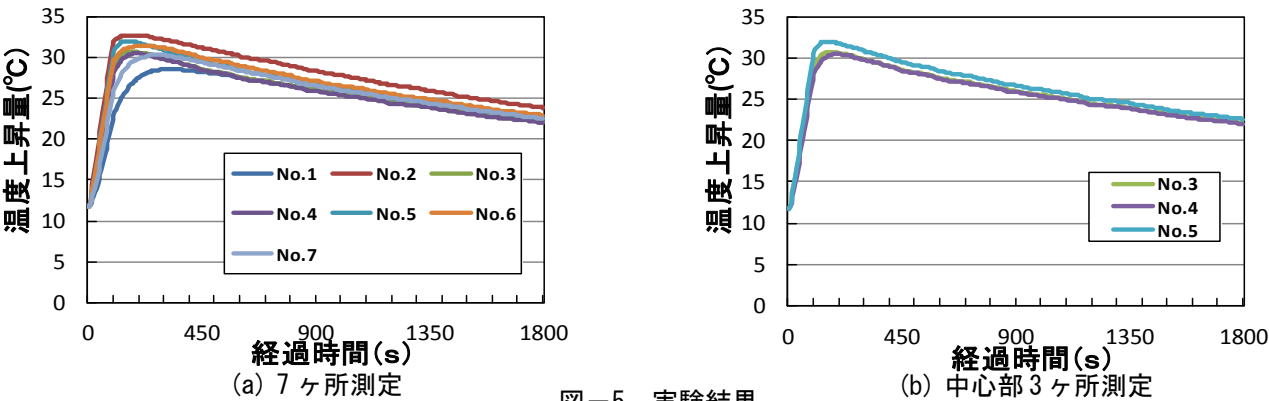


図-5 実験結果

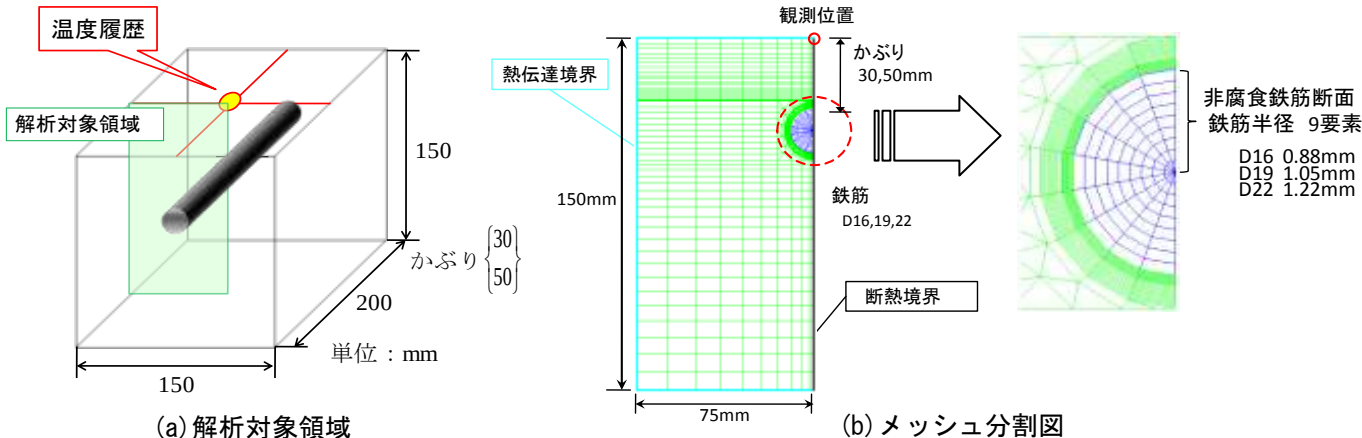


図-6 解析モデル

表-2 測定値

かぶり(mm)	鉄筋径(mm)	温度上昇量(°C)
30	16	15.91
	19	15.55
	22	14.42
50	16	33.72
	19	31.86
	22	29.24

表-3 解析に用いた熱的物性値

コンクリート	熱伝達率	2.70 W/m°C
	密度	2400 kg/m ³
	比熱	1.15 kJ/kg°C
非腐食鉄筋	熱伝達率	51.30 W/m°C
	密度	7850 kg/m ³
	比熱	0.47 kJ/kg°C

3.2 強制加熱

熱伝導解析を実施するに際し、強制加熱による鉄筋の温度上昇量は既知量でなくてはならない。そのため、鉄筋径やかぶりの違いによる鉄筋温度上昇量を実際に測定する必要がある。本研究では、熱電対を用いて鉄筋温度を測定し、温度上昇量を求めることとした。

(1) 実験概要

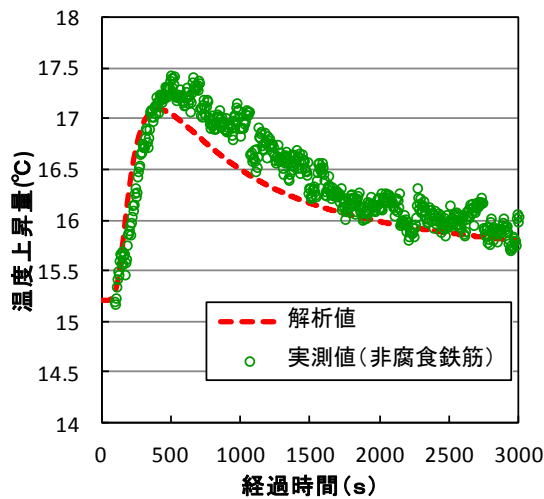
鉄筋の温度上昇量測定実験は、図-4 に示すように 210mm の長さを有する D16, D19, D22 鉄筋単体に発砲ポリエチレンフィルムを巻くことにより断熱状態とし、鉄筋軸中心と中心からそれぞれ 20mm 離れた箇所に設置した熱電対により実施した。鉄筋と電磁誘導コイルの距離は、かぶり厚である 30mm および 50mm であり、所定の時間まで電磁誘導加熱を実施した。

加熱条件は、表-1 に示すように、かぶり 30mm では

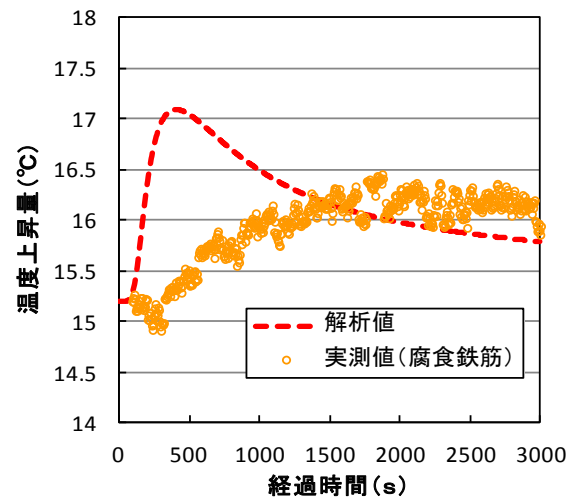
0.2kW を 90 秒加熱、かぶり 50mm では 1.0kW、120 秒加熱を行った。温度測定は加熱終了後に電磁誘導コイルを取り外し、加熱開始から 30 分間とした。本研究に用いたコイルは、加熱面 150×200mm の寸法であり、かぶり面の鉄筋軸方向にコイルの中心が沿うように配置した。なお、均一加熱領域は鉄筋軸方向 100mm としている。

(2) 鉄筋の温度履歴

実験結果を図-5 に示す。図中に示す No.1～NO.7 は図-4 に対応する位置であり、No.4 が鉄筋中心部に位置する。図-5 から、鉄筋全長では均一加熱領域の関係から多少加熱むらが生じるが、中心部の 3 ヶ所の温度履歴にほとんど差異が無いことからこの 3 ヶ所の表面温度の平均を計測した鉄筋温度上昇量に設定することとした。強制加熱終了時までの初期温度からの温度上



(a) 非腐食鉄筋



(b) 腐食鉄筋

図-7 コンクリート表面温度履歴における実測値と解析値の比較

昇量を表-2に示す。かぶり 30mm および 50mm とともに鉄筋径が小さいほど電磁誘導加熱による温度上昇量が大きくなるとともに、鉄筋径による差異はほとんどないことが分かる。この値を用い、熱伝導解析を行う。

3.3 データベース化

前節の数値を用い、熱伝導解析を実施する。解析対象領域は、図-6に示すように鉄筋を含む鉄筋軸に直交する中央断面とした。

境界条件は、鉄筋を含む断面を断熱境界とし、それ以外を熱伝達境界とした。なお、解析で使用した熱的物性値は表-3に示す通りである。鉄筋の強制加熱によるコンクリート表面温度の解析結果は図-7のようになった。

この結果から、鉄筋径によるコンクリート表面温度上昇量への影響が小さいため、初期温度と外気温の2つのパラメータの関係から次式を得た。

$$\text{かぶり 30mm} : 0.922a + 0.078b + 1.89$$

$$\text{かぶり 50mm} : 0.89a + 0.11b + 1.11$$

(a : 初期温度, b : 外気温)

実際にかぶり 30mm の D16 鉄筋、初期温度 15.0°C、外気温 10.0°C の場合に適用すると、コンクリート表面の最高温度が 16.5°C の値を得ることができ、図-7 からこの式は整合性があるものと言える。

3.3 本熱伝導解析精度の検討

本節では、既往の研究データとの照合から、前節までに述べてきた熱伝導解析の鉄筋腐食診断の適用性について検討を行う。既往の研究における試験体は、図-8に示す試験体と同様、150×150×200mm の形状寸法であり、かぶり 30mm の位置に D16 鉄筋を配置した。鉄筋は D16 の非腐食鉄筋および腐食鉄筋を使用し、か

ぶり面の鉄筋軸方向にコイルの中心が沿うようにコイルを配置し、コイル負荷電力 1.0kW、加熱時間 90 秒の実験条件で本システムを適用した。図-7(a) (b) に鉄筋中心直上のコンクリート表面位置の温度履歴の実測値と熱伝導解析結果を示す。この結果から、本熱伝導解析による鉄筋腐食診断は有用性があるといえる。

4. まとめ

本研究は、非腐食鉄筋と腐食鉄筋の電磁誘導加熱によるコンクリート表面の温度上昇量の違いから、熱伝導解析を用いた簡易鉄筋腐食診断の適用性について論じた。以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) 非腐食鉄筋を仮定した熱伝導解析によるコンクリート表面温度上昇量は、実測値との整合性が得られた。
- (2) 腐食鉄筋のコンクリート表面温度履歴との比較から、鉄筋腐食診断は十分有効である。

参考文献

- 1) 堀江宏明, 宮口住久, 谷口修, 大下英吉: 電磁誘導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評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 685-690, 2007
- 2) 大下英吉, 堀江宏明, 長坂慎吾, 谷口修, 吉川信二郎: 電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいた RC 構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法, 土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 1, pp. 76-92, 2009
- 3) 大下英吉, 長坂慎吾, 倉橋貴彦, 谷口修: コンクリート表面温度に基づく鉄筋腐食厚および腐食率の推定手法に冠する研究, 土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 4, pp. 442-458, 2009