

# 論文 剥離・空洞を誘発した鉄筋腐食の定量的評価の精度向上に関する研究

金本 恒之介\*1・大下 英吉\*2・林 詳悟\*3・福岡 養祐\*4

**要旨:** 著者らは電磁誘導法を用いて鉄筋を強制加熱し、コンクリート表面へと伝わった熱を赤外線サーモグラフィで測定することにより鉄筋腐食率を評価可能とする非破壊検査手法を開発した。既往の研究では、断熱材の効果有し温度上昇量の低下の要因となる剥離空洞および鉄筋腐食の両方が存在する状態においても電磁誘導法のみで鉄筋の腐食率を予測可能とする手法を提案したが、腐食率算定にあたり精度に問題があった。そこで本研究では腐食率を予測するために構築した式の改良、また、新たな画像処理技術を導入することによって、剥離性状ならびに鉄筋腐食性状の推定精度の高度化も行った。

**キーワード:** 非破壊検査, 赤外線サーモグラフィ, 電磁誘導, 鉄筋腐食, 剥離空洞

## 1. はじめに

我が国における土木構造物は高度経済成長期に建設されたものが多く、建設から 50 年以上経過する構造物の急激な増加が予測される。なかでも RC 構造物は社会基盤をなす主たる構造物であるため、RC 構造物に発生する劣化性状を正確に把握することは極めて重要である。

各種劣化性状のなかでも鉄筋腐食は、RC 構造物の構造性能および耐久性を大幅に低下させる重大な要因である。鉄筋の腐食は、腐食生成物の体積膨張によってコンクリートにひび割れを誘発し浮きや剥離を発生させるばかりでなく、鉄筋の断面減少によって耐荷力の低下を引き起こす要因となるため、鉄筋の腐食性状を精度よく評価する手法の確立が必要である。

現在、鉄筋腐食性状評価に広く用いられている手法には、自然電位法と分極抵抗法がある。しかしながら、前者は鉄筋腐食性状の定量的な評価が困難であり、後者については定量評価を目的とした研究段階にあるが、現段階では鉄筋の質量減少率である腐食率の十分な評価精度を有していない。また、いずれの手法においても測定にあたってかぶりコンクリートを局部的に破壊する必要があるため、新たな鉄筋腐食診断手法の開発が急務である。

このような背景から、著者ら<sup>1)~3)</sup>は RC 構造物の鉄筋が腐食した状態に対して、それらを定性的かつ定量的に評価可能とする非破壊検査手法を開発した。著者らの手法では、磁性体で高い熱伝導性を有する鉄筋の性質と比熱が大きく熱伝導率が小さいという断熱材の性質を有する腐食生成物の性質を利用したものである。すなわち、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、RC 構造物内部の鉄筋周囲に腐食生成物が存在すると、電磁誘導により鉄筋に蓄積された熱

がコンクリート表面に向かう熱拡散を抑制し、コンクリート表面温度は健全な状態に比べて低下すること。そして、その温度低下量が腐食率に関係していることから、鉄筋からの熱流出とコンクリート表面温度を用いて鉄筋の腐食量を定量的に評価可能とした<sup>1)</sup>。一方、鉄筋腐食が生じると、その腐食率にもよるがコンクリートには腐食ひび割れが誘発され、剥離空洞を生じる<sup>4)</sup>。このような状態に対して著者らの手法をそのままの形で適用すると、剥離空洞が腐食生成物と同様に比熱が大きく熱伝導率が小さいという断熱材の性質を有しているため、その上部におけるコンクリート表面温度は剥離空洞が存在しない領域に比べると低くなる。したがって、このコンクリート表面温度を用いて鉄筋の腐食率を推定すると、実際の値に比べて過度に評価することとなり、精度の面で大きな問題が生じる。このような問題に対して既往の研究では、鉄筋腐食と剥離空洞が同時に生じているような複合欠陥を対象として、それらを簡便かつ同時に評価可能とする手法を構築した<sup>5)</sup>。その結果、本システムは空洞存在下においても、定量的な鉄筋腐食性状評価を可能とし、鉄筋腐食を起因とする剥離空洞を生じた複合劣化を伴う構造物に対しても適用可能とした。しかし、鉄筋腐食と剥離空洞が同時に存在する場合の鉄筋腐食率算定モデルにおいて、推定精度に問題があった。さらに、鉄筋腐食率の精度良い推定には、剥離に伴う空洞厚さの高精度な予測が前提条件であるが、空洞厚さの推定精度に問題あったため精度向上に向けた改良が必要であった。

そこで本研究では、鉄筋腐食と剥離空洞が同時に存在する状態における鉄筋腐食性状の推定精度の向上を目的とする。腐食率算定式においては、かぶり領域を拡散する熱量の表し方を見直し腐食率の推定式を再構築した。

\*1 中央大学 理工学研究科都市環境学専攻 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学部都市環境科教授 工博 (正会員)

\*3 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 技術部 (正会員)

\*4 第一高周波工業(株) 技術部

また、剥離空洞が存在する場合、その空洞を定性的かつ定量的に把握するための空洞厚算定式を再構築し、算出された空洞厚さから、剥離空洞が存在する状態において鉄筋腐食性状の推定精度の向上を目指した。

## 2. 鉄筋腐食診断システム概要

本章ではまず、本鉄筋腐食診断システムの概要を示すとともに、試験体をかぶり、鉄筋腐食率および空洞厚の3パラメータとして鉄筋腐食および剥離空洞が同時に存在する状態の試験体に対して、本システムを適用した結果を示す。併せて、それらの実験結果から複合欠陥がコンクリート表面温度性状に及ぼす影響について論じる。

### 2.1 鉄筋腐食推定手法の概要

本システムの概要図を図-1に示す。対象とした試験体の熱物性値<sup>6)</sup>は表-1に示す通りである。まず鉄筋の加熱に際しては、電磁誘導コイルを高周波インバータに接続し、高周波電流をコイルに負荷させることにより交番磁界を発生させる。交番磁界の影響範囲がRC構造物中の鉄筋に達すると、鉄筋に渦電流が発生し鉄筋自体の抵抗により発熱する。この熱は鉄筋からコンクリート表面へと鉄筋断面に対して放射状に伝搬するため、鉄筋直上の表面温度を赤外線サーモグラフィによって測定することで、鉄筋からコンクリート表面へ供給される熱量を把握することが可能となる。

腐食生成物の熱的物性値に着目すると、表-1に示すように腐食生成物は非腐食鉄筋に比べ、比熱が大きく熱伝導率が小さいため断熱材の効果を有している。したがって、鉄筋が腐食している場合は図-2に示すように、腐食生成物のコンクリート表面への熱拡散が腐食生成物により抑制され、非腐食状態に比べて鉄筋上の表面温度が低下することとなる。

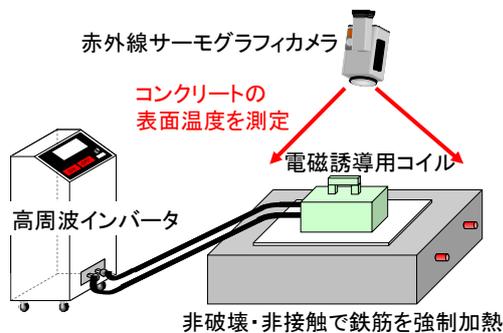


図-1 鉄筋腐食診断システムの概要

表-1 各物質の熱的物性

対象	物性	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [kJ/kg°C]	熱伝導率 [W/m°C]
非腐食鉄筋		7850	0.47	51.3
腐食生成物		5300	1.2	0.07
空洞(空気)		1.2	1.01	0.03
コンクリート		2300	1.2	1.6
発泡ポリエチレン		52	1.01	0.044

### 2.2 実験概要

試験体概要を図-3に示す。タイプAは空洞なし、タイプBは空洞ありの試験体、形状寸法は600×200×150mmであり、かぶり30mm、50mmの位置にD16異形鉄筋(SD295A)を配筋した。なお、コンクリートの配合は表-2に示すとおりである。試験体は、健全鉄筋を用いた非腐食試験体および鉄筋全長を目標腐食率1.00%、5.00%で腐食させた腐食鉄筋を用いた腐食試験体とした。なお、鉄筋の腐食方法には比較的目標腐食率になるように制御し易い電食試験法を採用し、あらかじめ腐食させてから試験体に埋設した。

また、空洞領域は表-1に示すように空気と同じく、比熱が大きく熱伝導率が小さい断熱材の効果を有する発泡ポリエチレンを用いることで剥離空洞を模擬した。空洞領域の大きさに関しては、薄い空洞として厚さ1mmと厚い空洞として厚さ5mmに定め、同表に示すように空洞なし、1mm、5mmの3水準をパラメータとした。空洞の設置位置は、実現象における剥離空洞は腐食ひび割れの発生に伴い鉄筋に接する直上部分で発生するため、鉄筋のかぶり側に接する位置とした。

実験パラメータおよび実験条件を表-3に示す。電磁誘導加熱による鉄筋温度の制御は、設定した電力を所定の時間までコイルに負荷させることにより実施した。図-4は電磁誘導加熱による鉄筋単体の温度上昇量を示している。コンクリート中に鉄筋が存在する状態では、鉄筋からコンクリートへ熱が拡散するため、この状態の温度は図-4に対する温度とは異なる(約1/3)。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秒間隔で測定した。なお、試験体名称はかぶり-腐食率-空洞厚順に記載されている。

### 2.3 コンクリート表面の温度性状

かぶり30、50mmの空洞なし試験体(タイプA)における温度履歴を図-5、かぶり30mmの空洞厚1mm、5mm、かぶり30mmの空洞厚1mmの試験体(タイプB)における温度履歴を図-6に示す。図-5に示す通り鉄筋腐食は最高温度のみの影響を及ぼし、最高温度に到達する

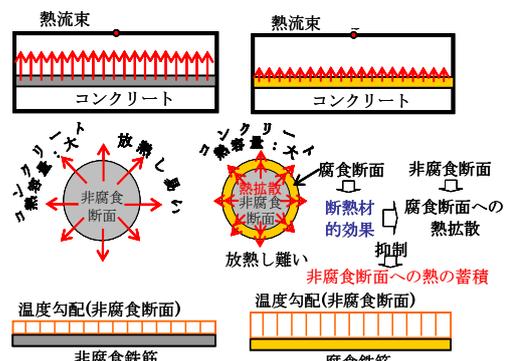


図-2 鉄筋腐食によるコンクリート表面温度の変状

表-3 試験体パラメータ, 実験条件

タイプ	試験体名称	鉄筋径	かぶり (mm)	空洞		実測腐食率 (%)	コイル負荷電力 (kw)	加熱時間 (sec)	
				縦×横(mm)	厚さ(mm)				
タイプA	K30-C0-T0	D16	30	150×600	0	0.0	1.8	90	
	K30-C1.0-T0					1.0			
	K30-C5.0-T0					5.0			
	K50-C0-T0		0.0			420			
	K50-C1.0-T0		1.0						
	K50-C5.0-T0		5.0						
タイプB	K30-C0-TA1.0		30	50	1.0	1.0		0.0	90
	K30-C0-TA5.0					5.0		2.6	
	K30-C2.6-TA1.0					1.0		1.3	
	K30-C1.3-TA5.0					5.0		4.7	
	K30-C5.0-TA1.0		1.0			0.0		420	
	K30-C4.7-TA5.0		5.0			1.0			
	K50-C0-TA1.0	1.0	5.4						
	K50-C1.0-TA1.0	1.0							
K50-C5.4-TA1.0	5.4								

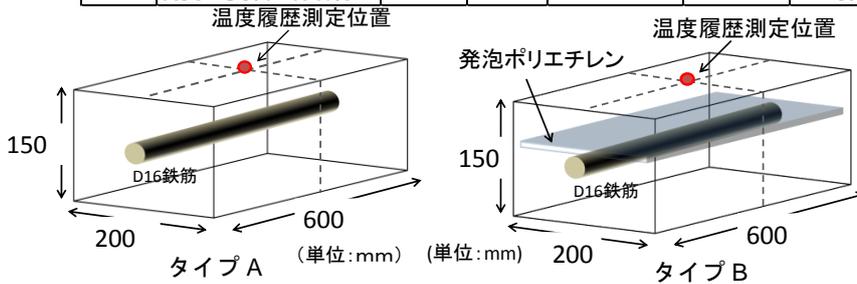


図-3 試験体の形状寸法

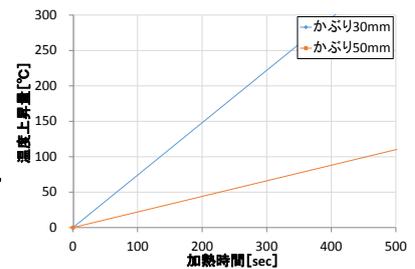


図-4 鉄筋単体の温度上昇量

表-2 コンクリートの配合

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
W	C	S	G	A
171	290	798	1003	1.2

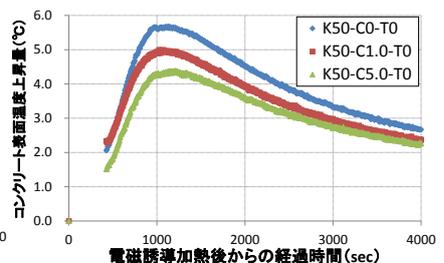
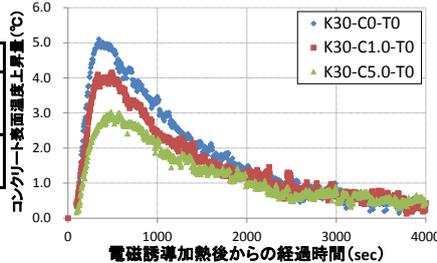


図-5 コンクリート表面の温度履歴

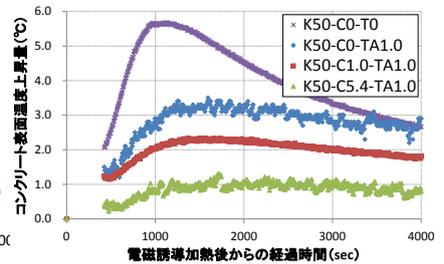
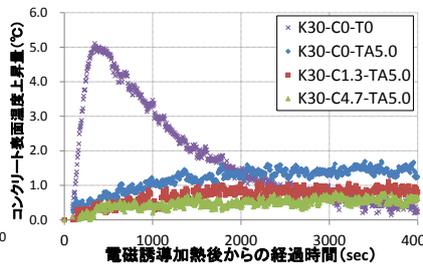
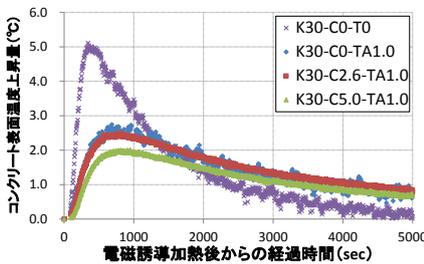


図-6 コンクリート表面の温度履歴

までの単位時間当たりの温度上昇量(以下, 温度上昇率と称す)は鉄筋腐食の有無によらずほぼ同じ値であることがわかる。また, 図-6 に示す通り最高温度到達時間の差異は空洞厚の影響が支配的であり, 腐食率による影響はほとんどないことを示し, これらは既往の研究<sup>5)</sup>と同様の傾向を示した。次章以降では, 実験傾向から腐食率算定モデルと空洞厚算定モデルの構築を行う。

### 3. 剥離空洞がない場合の鉄筋腐食評価

本章では, 健全時および鉄筋腐食時におけるコンクリート表面の温度上昇量の差異と鉄筋腐食率を関連付けた精度の良い推定式の再構築を行う。

#### 3.1 既往の腐食率算定モデルと改良点

既往の研究における腐食率算定モデルは, エネルギー保存則に基づいて, 鉄筋が健全時のコンクリートと鉄筋

が腐食したコンクリートにそれぞれ残存する熱量を表す次式をそれぞれ導出し、これらを連立させることでモデルを構築した<sup>5)</sup>。

$$\rho C \phi \Delta \theta A = \Delta Q A d \Delta t - h(\theta_n - \theta_0) A \Delta t \quad (1)$$

$$\rho' C' \phi \Delta \theta' A = \Delta Q (1 - n) A d \Delta t' - h(\theta'_n - \theta'_0) A \Delta t' \quad (2)$$

ここで、 $\Delta Q$  はコンクリートに蓄えられる単位時間・単位体積当たりの熱量、 $d$  および  $\phi$  はそれぞれ鉄筋径およびかぶり厚、 $C$  はコンクリートの比熱、 $d$  および  $\phi$  はそれぞれ鉄筋径およびかぶり厚、 $\Delta \theta$  は健全時のコンクリート表面温度上昇量、 $A$  はコンクリート断面積、 $\Delta t$  は健全時の最高温度到達時間、 $h$  は熱伝達係数、 $\theta_0$  はコンクリート表面初期温度、 $\theta_n$  は健全時のコンクリート表面最高温度、 $\theta_{stl}$  は鉄筋の温度上昇量、 $\kappa_{stl}$  は鉄筋の熱伝導率、 $\Delta \theta'$  は鉄筋が腐食したコンクリート表面の温度上昇量、 $\Delta t'$  は鉄筋が腐食したコンクリート表面の最高温度到達時間、 $\theta'_n$  は鉄筋が腐食したコンクリート表面の最高温度、 $n$  は腐食率を示している。

コンクリート表面に向かう熱拡散性状は、構成材料の熱伝導率と厚さ、密度や比熱ならびに温度勾配に依存し、コンクリート表面まで拡散した熱量に応じて温度上昇が生じることになる。この現象を簡易に表現することのできる物性に、熱貫流率（K 値）がある。熱貫流率は、熱の伝えやすさを表す指標であり、熱伝導率と同じような性質を表している。ここで、熱伝導率は材料自体の特性を表す指標であることに対して、熱貫流率はそれに材料の厚さも加味することで単位面積当たりに貫流する熱量を表す指標である。しかしながら、既往の腐食率算定式は、熱拡散を考える上で重要な構成材料の厚さ（熱貫流率）の項が含まれておらず、腐食率の推定精度に大きな問題があった。そこで、鉄筋腐食率の推定精度の向上を目的として、構成材料の厚さを含む熱貫流率に各構成材料の熱容量を加味することで、鉄筋が健全のコンクリートと鉄筋が腐食したコンクリートに拡散する熱量を表した。また、鉄筋が健全な状態および腐食した状態における構成材料の密度と比熱を平均化し、新たな物性値として扱うことでより高精度な腐食率の推定を可能とした。

### 3.2 腐食率算定式の構築

鉄筋が健全であるコンクリートと鉄筋が腐食したコンクリートの熱貫流率はそれぞれ次式となる。

$$\bar{K}_{sc} = \frac{1}{\frac{d}{\lambda_{stl}} + \frac{\phi}{\lambda_{con}}} \quad (3)$$

$$\bar{K}_{src} = \frac{1}{\frac{d}{\lambda_{stl}} + \frac{d_o}{\lambda_{cor}} + \frac{\phi}{\lambda_{con}}} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{K}$  は熱貫流率、 $\lambda_{con}$ 、 $\lambda_{stl}$  および  $\lambda_{cor}$  はコンクリート、鉄筋および腐食生成物の熱伝導率である。また、

$m$  および  $o$  はそれぞれ鉄筋の腐食により残存した鉄筋径に対する健全時鉄筋径の割合（残存率）および腐食厚さに対する健全時鉄筋径の割合（非腐食厚さ率）である。

式(3)および式(4)は単位面積当たりを通過する熱量であり各構成材料の熱容量を加味することで、かぶり領域を拡散する熱量  $\bar{Q}_{sc}$  および  $\bar{Q}_{src}$  となりそれぞれ、次式で表すことができる。

$$\bar{Q}_{sc} = \frac{\bar{K}_{sc}}{\bar{\rho}_{sc} \bar{c}_{sc}} \quad (5)$$

$$\bar{Q}_{src} = \frac{\bar{K}_{src}}{\bar{\rho}_{src} \bar{c}_{src}} \quad (6)$$

ここで、 $\bar{\rho}_{sc}$ 、 $\bar{c}_{sc}$  および  $\bar{\rho}_{src}$ 、 $\bar{c}_{src}$  はそれぞれ、鉄筋が健全な状態および腐食した状態における構成材料の平均的な密度、比熱であり、次式のように表すことができる。

$$\bar{\rho}_{sc} = \frac{\frac{d}{2} \rho_{stl} + \phi \rho_{con}}{\phi + \frac{d}{2}} \quad (7)$$

$$\bar{\rho}_{src} = \frac{\frac{d}{2} \rho_{stl} + \frac{d}{2} m \rho_{cor} + \phi \rho_{con}}{\phi + \frac{d}{2}(m+o)} \quad (8)$$

$$\bar{c}_{sc} = \frac{\frac{d}{2} \rho_{stl} c_{stl} + \phi \rho_{con} c_{con}}{\frac{d}{2} \rho_{stl} + \phi \rho_{con}} \quad (9)$$

$$\bar{c}_{src} = \frac{\frac{d}{2} \rho_{stl} c_{stl} + \frac{d}{2} m \rho_{cor} c_{cor} + \phi \rho_{con} c_{con}}{\frac{d}{2} \rho_{stl} + \frac{d}{2} m \rho_{cor} + \phi \rho_{con}} \quad (10)$$

ここで、 $\rho_{stl}$ 、 $\rho_{cor}$  および  $\rho_{con}$  はそれぞれ鉄筋、腐食生成物およびコンクリートの密度、 $c_{stl}$ 、 $c_{cor}$  および  $c_{con}$  はそれぞれ鉄筋、腐食生成物およびコンクリートの比熱である。

そして、電磁誘導加熱によって鉄筋に蓄積される熱量は検討した腐食量の範囲では鉄筋腐食の有無によらずほぼ同じであったことから、鉄筋の腐食率がコンクリート表面の温度性状に及ぼす影響を次式で表すことができる。

$$\Delta Q = \bar{Q}_{src} / \bar{Q}_{sc} \quad (11)$$

また、健全時のコンクリート表面の温度上昇量 ( $\Delta T_{sc}$ ) に対する鉄筋が腐食したコンクリート表面の温度上昇量 ( $\Delta T_{src}$ ) の割合を次式で表せる。

$$\Delta Q = \Delta T_{src} / \Delta T_{sc} \quad (12)$$

なお、 $\Delta Q$  は鉄筋の腐食率がコンクリート表面の温度性状に及ぼす影響度合いを表しており、健全時と腐食のコンクリート表面温度の差異に関係していること、また、鉄筋の腐食率が比較的小さい場合には、構成材料の平均的な熱容量  $\bar{\rho}_{src} \bar{c}_{src}$  は鉄筋が非腐食の状態にある平均的な熱容量  $\bar{\rho}_{sc} \bar{c}_{sc}$  とほぼ同一となる。したがって、式(7)は次式で近似できることになる。

$$\Delta T_{src} / \Delta T_{sc} = \bar{K}_{src} / \bar{K}_{sc} \quad (13)$$

そして、健全時鉄筋径に対する腐食厚さの割合（腐食比） $m$  は、式(3)、(4)および式(13)から次式のように求めることができる。

$$m = \frac{k_1\beta\Delta T + k_2\gamma - \gamma\sqrt{(1+k_3v\beta)\delta^2\alpha^2 - k_4v\beta^2}}{k_5\delta} \quad (14)$$

ここで、 $k_1 \sim k_5$ は、それぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned} k_1 &= \delta - v(\delta\beta + \gamma), k_2 = v\beta + \Delta T - 1 \\ k_3 &= \beta(1 - \Delta T^2(1 - v)) - 2 \\ k_4 &= (\Delta T - 1)(1 - v)((\Delta T - 1) + 2\delta\Delta T\alpha) \\ k_5 &= 1 - 2v\beta + v\beta^2 \end{aligned}$$

また、式中的変数 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $v$ および $\Delta T$ それぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\lambda_{con}}{\lambda_{stl}}, \beta = \frac{\lambda_{cor}}{\lambda_{stl}}, \gamma = \frac{\lambda_{cor}}{\lambda_{con}}, \delta = \frac{d}{2\phi} \\ v &= \frac{\rho_{cor}}{\rho_{stl}}, \Delta T = \frac{\Delta T_{sc}}{\Delta T_{src}} \end{aligned}$$

なお、計算を簡略化するために、上式中の $\beta$ はその他の変数に比べてかなり小さな値であり、 $\beta \approx 0$ とすると式(14)は次式で表すことができる。

$$m = \frac{\gamma}{\delta}(\Delta T - 1) - \alpha\gamma \quad (15)$$

また、質量減少率で定義する際の鉄筋の腐食率 $n$ は、以下のように表すことができ、式(15)を代入することで腐食率が求まる。

$$n = 1 - \left( \sqrt{1 - m^2v(1 - v)} - mv \right)^2 \quad (16)$$

### 3.3 腐食率算定

式(16)を用いて腐食率を算定した結果を図-7、図-8に示す。タイプAでは、図-7に示すように、かぶり30, 50mmの試験体に対する腐食率の推定値は実測値に比較的近い値を示しており、その適用性が確認できる。

タイプBでは、図-8に示すように、推定値は実測値に比べて非常に大きな値を示している。これは、既往の研究<sup>5)</sup>で示したように鉄筋腐食に伴う剥離は鉄筋からコンクリート表面に向かう熱拡散を抑制するためコンクリート表面温度は剥離空洞が存在しない状態に比べて低くなるからである。推定値には空洞の影響も加味されており、腐食率の推定に際しては、かぶりコンクリートに存在する剥離空洞の影響を除去したコンクリート表面温度を用いなければならないこととなる。

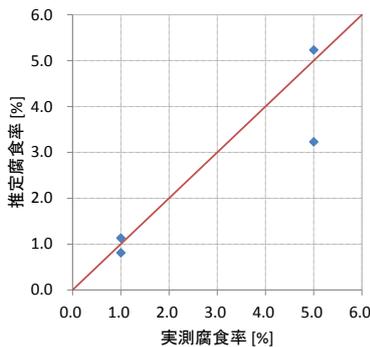


図-7 腐食率推定(タイプA)

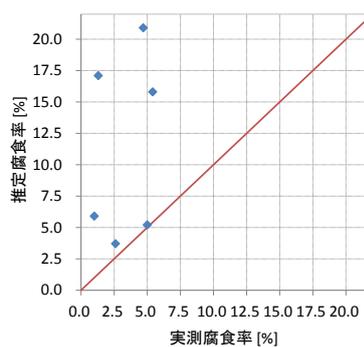


図-8 腐食率推定(タイプB)

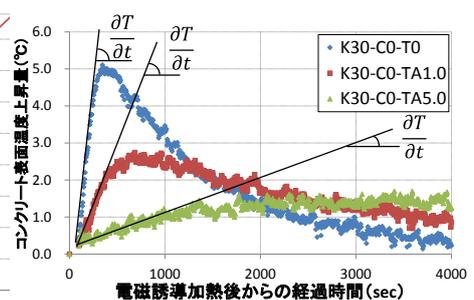


図-9 空洞の違いによる温度履歴

## 4. 剥離空洞存在下における鉄筋腐食評価

前章で述べたように、空洞存在下の腐食率算定において、空洞がコンクリート表面に及ぼす影響を除去する必要がある、空洞厚を精度良く評価しなければならない。そこで、本章では、空洞存在下の腐食率算定において必要な空洞厚さを健全時および空洞存在下におけるコンクリート表面の温度上昇率の差異と空洞厚さを関連付けた精度の良い推定式の再構築を行う。

### 4.1 既往の空洞厚算定モデルと改良点

既往の研究<sup>5)</sup>における空洞厚算定モデルでは、空洞が存在しない場合と空洞が存在する場合の温度上昇率の違いに着目し、熱貫流率に関連付けて導出を行っていた。その際の熱貫流率においてかぶり領域内の構成材料のうち、空洞を考慮していなかった。そのため空洞厚さの測定精度向上を目的として熱貫流率においてかぶり領域内の空洞を考慮した空洞厚算定モデルを新たに構築した。

### 4.2 空洞厚算定式の構築

空洞がコンクリート表面に及ぼす影響は、図-9に示すように最高温度に到達する時間を増加させること、また、温度上昇量を低下させることである。したがって、空洞厚の推定は温度上昇率に着目し導出することとした。

空洞が存在しないコンクリートと空洞が存在するコンクリートの熱貫流率は次式となる。

$$\bar{K}_c = \frac{1}{\lambda_{con}} \quad (17)$$

$$\bar{K}_{vc} = \frac{1}{\frac{pd}{\lambda_{cav}} + \lambda_{con}} \quad (18)$$

ここで、 $\lambda_{cav}$ は空洞の熱伝導率、 $p$ は空洞比を示している。

また、図-9のように空洞が存在する場合の温度上昇率に比べて空洞が存在しない場合の温度上昇率は大きくなる。この温度上昇率の関係は次式で表せる。

$$\bar{K}_{vc} = \frac{\partial T_{vc}/\partial t}{\partial T_{con}/\partial t} \bar{K}_c \quad (19)$$

ここで、 $T_{con}$ および $T_{vc}$ は、それぞれ空洞が存在しない状態および存在する状態におけるコンクリート表面温度で

ある。

式(17)および(18)を式(19)に代入すると、空洞比 $p$ は次式で表すことができる。

$$p = \lambda_{cav} \left( \frac{1}{K_{vc}} - \frac{d}{\lambda_{con}} \right) \frac{1}{d} \quad (20)$$

#### 4.3 温度上昇量の補正

ここで、算出した空洞厚と同体積の空洞がかぶりコンクリート領域内に均一に分散された状態に置き換え、かぶり領域全体の見かけ上の熱的物性値を求め、空洞が無いと仮定した際の温度上昇量を算出する。

空洞がないと仮定した際の温度上昇量は既往の研究<sup>6)</sup>で構築した以下の式を用いる。

$$\Delta T_{con} = \frac{\bar{\rho}_{cv} \bar{c}_{cv}}{\rho_{con} c_{con}} \Delta T_{meas} \quad (21)$$

ここで、熱容量 $\bar{\rho}_{cv} \bar{c}_{cv}$ は次式で表す。

$$\bar{\rho}_{cv} \bar{c}_{cv} = \frac{\rho_{con} c_{con} + p \rho_{cav} c_{cav}}{1+p} \quad (22)$$

ここで、 $\Delta T_{meas}$ は実測されたコンクリート表面の温度上昇量、 $\Delta T_{con}$ は空洞がないと仮定した際の温度上昇量である。

#### 4.4 空洞厚および腐食率評価

前掲の式(16)に式(21)の空洞が無いと仮定した温度上昇量と健全時の温度上昇量を用いてタイプB試験体の空洞厚さを算定した結果を図-10、タイプB試験体の腐食率を算定した結果を図-11に示す。

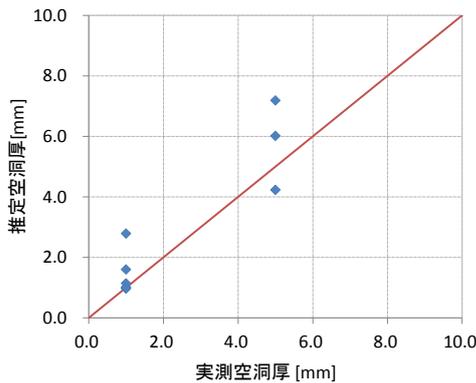


図-10 空洞厚さの推定(タイプB)

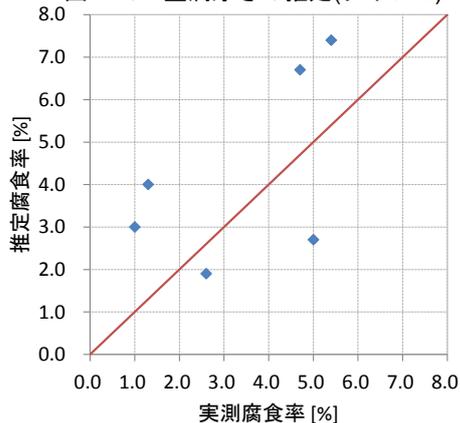


図-11 腐食率推定(タイプB)

空洞厚の推定値は、実際の空洞厚の1.0~1.5倍程度であり、比較的精度の良い評価となっている。

また、鉄筋腐食率の推定値は、いずれの試験体においても比較的精度の良い評価となっている。

#### 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋腐食の評価において、腐食の有無では最高温度到達時間に差がないことから最高温度に着目し、構成材料の熱貫流率を用いることで精度の良い腐食率評価を可能とした。
- (2) 剥離空洞の厚さの推定は、コンクリート表面の温度上昇率に着目し、熱貫流率においてかぶり領域内の空洞を考慮することで精度の良い空洞厚さ評価を可能とした。
- (3) 空洞存在下での鉄筋腐食率推定においては、推定された空洞と同体積の空洞がかぶりコンクリート領域内に均一に分散された状態に置き換え、その熱物性値を用いることで、空洞がないと仮定した温度上昇量に補正する。その補正した温度上昇量を用いることで精度良い鉄筋腐食率の評価を可能とした。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 矢寄早織, 今井嵩弓, 大下英吉: 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, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.411-416, 2012
- 3) 谷口修, 重松文治, 堀江宏明, 大下英吉: 電磁誘導加熱を利用したコンクリート表面の温度性状に基づく RC 構造物の空洞検出システムの開発に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.173-185,
- 4) 堤知明, 松島学, 村上祐政, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, N0.532/V-30, pp.159-166, 1996
- 5) 金本恒之介, 大下英吉, 林詳悟, 福岡養祐: 剥離・空洞を誘発した鉄筋腐食の定量的評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第 37 巻, No.1, pp.1729-1734, 2015
- 6) 根本早季, 今井嵩弓, 大下英吉, 林詳悟, 福岡養祐: 鉄筋腐食推定手法の剥離空洞存在領域への拡張, コンクリート工学年次論文報告集, 第 35 巻, No.1, pp.1825-1830, 2013