

## 論文 鉄筋腐食推定手法の剥離空洞存在領域への拡張

根本 早季\*1・今井 嵩弓\*2・大下 英吉\*3・林 詳悟\*4

**要旨:** コンクリート表面温度性状から RC 構造物における鉄筋腐食率の予測を行う非破壊検査手法は、腐食生成物の存在が温度性状に変状を誘発することによっている。既往の研究では、コンクリート表面温度の相対的な比較によりコンクリート内部の鉄筋腐食率の推定が可能であった。しかしながら、実構造物では鉄筋腐食に起因する剥離等の現象が生じる場合もあり、そのような状態に対しては本手法の適用が困難であった。本研究では、剥離等に起因する空洞が存在する状態においても、コンクリートの表面温度性状から鉄筋の腐食率を予測可能な手法を提案する。

**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. 緒言

ストックメンテナンス時代にある我が国において、土木構造物の新設数は減少傾向にあり、既存する構造物に対して適切な維持管理を施すことにより、構造物の長期延命化を図るという方式に移行している。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、その維持管理は重要視されており、それらに発生する各種劣化性状を正確に把握することが必要不可欠である。

各種劣化要因のなかでも鉄筋腐食は構造物の構造性能や耐久性能に大きな影響を及ぼす非常に重要なものである。鉄筋の腐食は、その腐食生成物の体積膨張によりかぶりコンクリートにひび割れや浮き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に直結する要因となるため非常に大きな問題となっており、鉄筋腐食の度合いを精度良く評価可能とする手法の確立が望まれている。

現在、鉄筋腐食性状評価に際して用いられている主な手法に、自然電位法と分極抵抗法がある。自然電位法は鉄筋が腐食することによって変化する鉄筋表面の電位から鉄筋腐食を診断し、分極抵抗法はコンクリート表面に設置した電極から電流を負荷した際に生じる電位変化量から鉄筋腐食を診断する手法である。いずれの手法においても、鉄筋腐食量の定量的な評価は困難であり、測定にあたって、かぶりコンクリートを局所的に破壊する必要があるため、鉄筋の腐食性状を非破壊かつ定量的に評価可能とする新たな鉄筋腐食診断手法の開発は急務である。

このような問題を解消するべく、著者らは既往の研究<sup>1)2)</sup>において RC 構造物の鉄筋腐食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（以下、本システムと称す）。本システムの概要は、電磁誘導法を用

いて RC 構造物内部の鉄筋を通電することによって強制加熱し、鉄筋からコンクリート表面に伝搬した熱を赤外線サーモグラフィで検知するものである。コンクリートのかぶり領域に剥離空洞が存在していたり、鉄筋に腐食が生じている場合、コンクリート表面温度には変状が生じる。すなわち、剥離空洞や腐食生成物の熱的特性である断熱効果により、それらが存在しない領域に比べて温度変化が少なくなり、熱画像上の温度履歴や温度分布を分析することで劣化の程度を正確に評価することが可能となる。

一般に、RC 構造物において鉄筋が過度に腐食すると、その体積膨張によりかぶりコンクリート領域の鉄筋直上に浮きが生じ、鉄筋とかぶりコンクリートとの間に空洞領域が存在することとなる。空洞（空気）は比熱が大きく密度が小さいため、腐食生成物と同様に、それ自身が断熱特性を有している。したがって、本システムを鉄筋腐食に起因した剥離空洞が存在する構造物に適用した際、電磁誘導によって加熱された鉄筋からかぶりコンクリートへの熱の伝導は、空洞により抑制されるため、空洞領域直上のコンクリート表面温度は空洞の無い領域に比べて低くなることが確認されている。このことはすなわち、剥離空洞が存在する領域に本システムを適用すると、鉄筋の腐食の度合いを過大に評価することとなり、このこと自体は安全側の評価につながるが、適切な評価手法であるとは言い難い。

本研究では、ハロゲンヒーターによるコンクリート表面の強制加熱により生じた温度性状の違いから、剥離空洞の厚さを定量的に評価する手法を構築する。さらに、その結果から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する

\*1 中央大学 理工学部都市環境科 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*3 中央大学 理工学部都市環境科 教授 工博 (正会員)

\*4 西日本高速道路エンジニアリング(株) 技術部 (正会員)

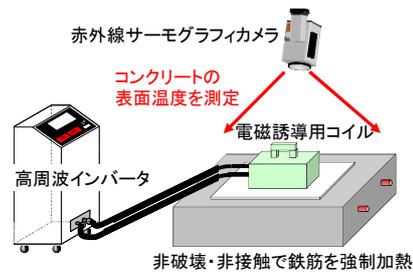


図-1 鉄筋腐食診断システムの概要

表-1 各物質の熱的物性値

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	0.22

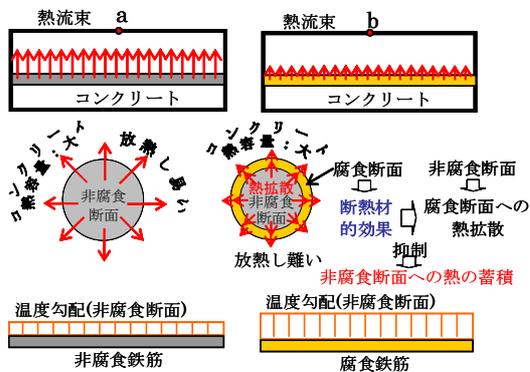


図-2 鉄筋腐食によるコンクリート表面温度の変状

手法への拡張を行う。

## 2. 空洞存在領域での鉄筋腐食推定手法の問題点

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、本システムを空洞が存在する領域に適用する際の問題点について論じる。

### 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条件は表-1 に示す通りである。まず鉄筋の加熱方法に際しては、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す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

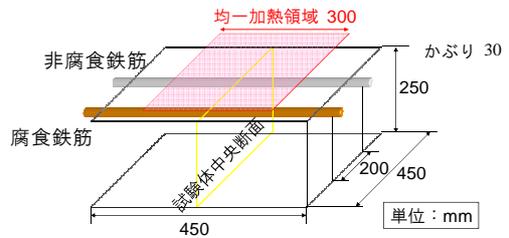


図-3 試験体の形状寸法

表-2 実験条件

試験体名称	K30-C0.66
時間(秒)	320
コイル負荷電力(kW)	2.0
鉄筋温度上昇量(°C)	14.7
平均腐食率(%)	0.66
外気温(°C)	23.7

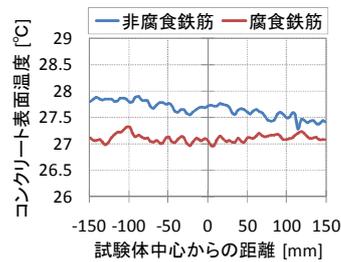


図-4 コンクリート表面温度分布

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-3 は、鉄筋軸方向に一樣に腐食した鉄筋と腐食していない鉄筋が配筋された試験体の概要である。鉄筋は D16 異形鉄筋を用い、大気中に暴露することによってあらかじめ腐食させた腐食率 0.66% の腐食鉄筋および非腐食鉄筋をかぶり 30mm の位置に設置した。

同図の試験体に対して表-2 に示す電磁誘導条件のもとで本システムを適用した際の結果を図-4 に示す。同図は、電磁誘導加熱停止から 180 秒が経過した時点における各鉄筋軸直上のコンクリート表面温度分布である。同図より非腐食鉄筋および腐食鉄筋上のコンクリート表面温度を相対的に比較すると、腐食鉄筋上の温度は非腐食鉄筋上の温度よりも低くなっていることがわかり、その差異は約 0.6~0.9°C である。これは、前述したように腐食生成物が鉄筋からコンクリート表面に向かって拡散する熱を抑制するためであり、腐食していない鉄筋と腐食した鉄筋上のコンクリートの温度上昇量の差異が、鉄筋の腐食の度合い(腐食率)に依存することとなる。したがって、温度上昇量の差異を分析することによって、鉄筋の腐食率が同定されることとなる。

### 2.2 鉄筋腐食率同定手法

腐食率を求める際、基準となる非腐食鉄筋のコンクリート表面の最高温度  $T_{max}$  は、既往の研究における熱伝導解析によって以下の通りデータベース化されている。

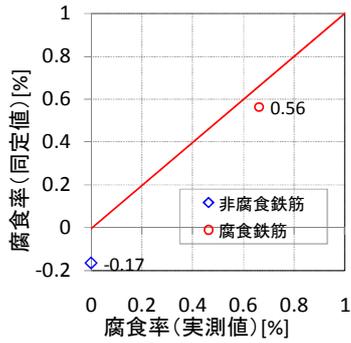


図-5 腐食率算定結果

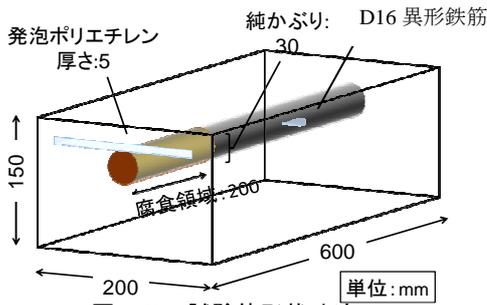


図-6 試験体形状寸法

$$T_{\max} = a_0 + c \{-0.0023(a_0 - b) - 0.0395\} + 3.075 \quad (1)$$

ここで、 $a_0$ 、 $b$  および  $c$  はそれぞれコンクリート表面の初期温度、外気温およびかぶり厚を示している。

本手法では、鉄筋腐食生成物が鉄筋内部に抑制する熱量率とコンクリート表面温度上昇量の割合が等しくなることを用いて、鉄筋腐食量の算定を行う。コンクリート表面温度が最高となる時点において、かぶり領域の温度分布が線形的に変化すると仮定すると、腐食した鉄筋とコンクリート表面の熱収支は次式となる。

$$\frac{W_{st} - W_{co}}{W_{st}} = \alpha \cdot \frac{\Delta T_{st} - \Delta T}{\Delta T_{st}} \cdot \frac{C_{st} \cdot \rho_{st} \cdot S_{st}}{C_{con} \cdot \rho_{con} \cdot S_{con}} \quad (2)$$

ここで、 $W$ 、 $C$ 、 $\rho$  はそれぞれ熱量、比熱、密度を示している。 $S$  は単位奥行きあたりの熱拡散影響面積であり、かぶりコンクリート内部の熱拡散は鉄筋を中心に45度の角度で広がると仮定した。添え字  $st$ 、 $co$ 、 $con$  はそれぞれ、非腐食鉄筋、腐食生成物およびコンクリートを示す。また、 $\alpha$  は本仮定に対する補正係数であり、次式のように表される。

$$\alpha = 0.0164c - 0.1 \quad (3)$$

また、腐食生成物の熱量  $W_{co}$  は次式で表される。

$$W_{co} = (1 - n)W_{st} + nW_{st} \cdot \frac{C_{st}}{C_{co}} \quad (4)$$

(2)~(4)式を用いて、最終的に腐食率  $n$  は次式となる。

$$n = \alpha \cdot \frac{\Delta T_{st} - \Delta T}{\Delta T_{st}} \cdot \frac{C_{st} \cdot \rho_{st} \cdot S_{st}}{C_{con} \cdot \rho_{con} \cdot S_{con}} \cdot \frac{C_{co}}{C_{co} - C_{st}} \quad (5)$$

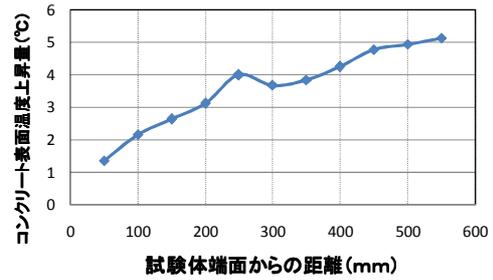


図-7 コンクリート表面温度上昇量分布

図-3 で示した試験体を電磁誘導加熱し、得られた温度分布 (図-4) から(5)式を用いて腐食率を算定した結果を図-5 に示す。実測値に対し、同定値が近い値をとっていることから、(5)式を用いた腐食率推定モデルの適用性が示される。

### 2.3 鉄筋腐食推定精度に及ぼす空洞の影響

本手法は鉄筋腐食に起因する剥離空洞等の劣化現象を伴わないコンクリートであることを前提としたものである。本節では、鉄筋腐食に伴う剥離空洞が存在した場合に生じる問題点について論じる。

腐食生成物が持つ熱的物性により、断熱効果を有することは前節で述べたが、同様に剥離空洞に起因する空気層もその熱特性から断熱効果を示すことが表-1 より明らかである。その結果、剥離空洞の存在によってコンクリート表面温度性状に変状が生じ、腐食率を過剰に評価してしまう問題があった。ここで、実際に剥離空洞の存在が腐食率の算定精度に及ぼす影響について評価する。

試験体概要は図-6 に示す通りである。なお、鉄筋は完全にコンクリート中に埋め込まれており、試験体の端部において鉄筋は露出していない。鉄筋の腐食領域は試験体端面0~200mmである。鉄筋を大気中に暴露させることによって腐食させた腐食鉄筋と非腐食鉄筋を用意し、それぞれかぶり30mmの位置に配筋した。また、空洞には表-1 に示すような熱的物性を持つ発泡ポリエチレンを用いるが、これは空洞(空気)に似た熱的物性を有し、断熱効果を示すためである。発泡ポリエチレンは、試験体端面0~300mmの鉄筋の腐食領域直上に配置している。

図-7 に、90秒間電磁誘導加熱した際のコンクリート表面温度上昇量を示す。同じ出力にて電磁誘導コイル加熱を実施した場合、鉄筋の温度上昇量は等しくなる。しかし、均一加熱領域において空洞のない領域では4~5°Cの温度上昇が見られるのに対し、空洞のある領域では2~3°Cの温度上昇が確認された。この結果は、鉄筋腐食のみの状態である図-4の温度差(約1.0°C)に比べて大幅な温度低下を生じており、空洞の存在は鉄筋の腐食による温度低下を遙かに上回る影響を与えることが分かる。

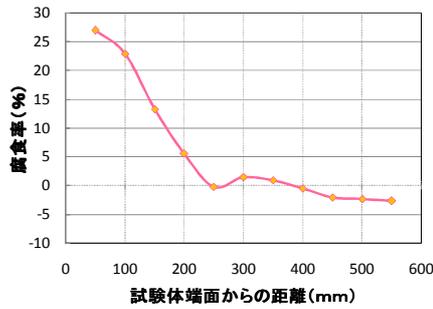


図-8 腐食率算定結果

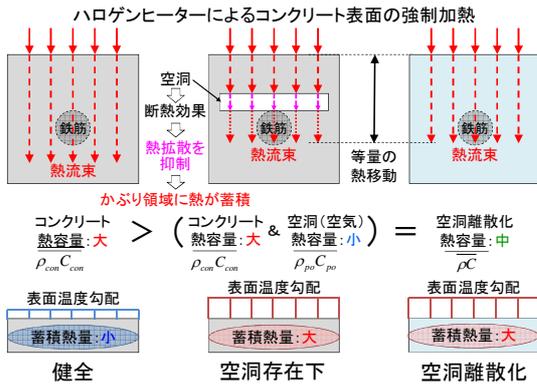


図-9 等価熱物性モデル

本手法をそのままの形で本実験によるコンクリート表面温度性状に適用することにより同定された腐食率を図-8に示す。空洞の存在により腐食率が過剰に評価されていることが分かる。したがって、本システムにおける鉄筋腐食評価モデルの適用に際して、剥離空洞がコンクリート表面性状に及ぼす影響を除去することが求められる。

### 3. 空洞離散化によるかぶりコンクリートの等価熱物性評価モデル

本章においては、前章で示したように、剥離空洞の存在は腐食性状評価に影響を及ぼすため、(5)式を空洞存在領域においても適用可能な式へと拡張する。

#### 3.1 等価熱物性評価モデル

本手法では、図-9に示すようにコンクリートとは異なる空洞の熱物性をコンクリート中に分散化することによって、通常のコンクリートとは異なる等価熱物性として置き換える。それにより剥離空洞が存在する実現象が模擬されることとなり、空洞がコンクリート表面温度に及ぼす影響を定量的に評価する。

空洞の分散化にあたり、まずは空洞の存在位置を把握し、定量的に空洞を評価する実験値が必要となる。そこで、本手法ではアクティブ法を用いることとする。

本手法では、図-10に示す通りハロゲンヒーターを試験体に対して平行に、300mmの間隔を置いて設置し、コンクリート表面を5分間強制加熱する。アクティブ法の

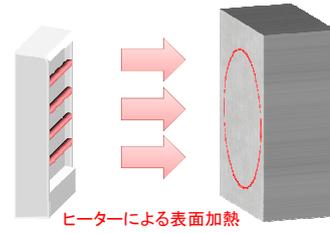


図-10 アクティブ法実施方法

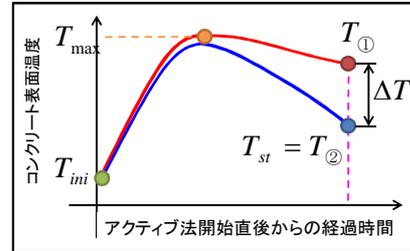


図-11 アクティブ法によるコンクリート表面温度履歴概略図

適用後に一定時間が経過すると、図-11に示す温度差 $\Delta T$ が生じる。これは、加熱後初期の段階では空洞の存在により、かぶりコンクリートに熱が蓄積され、時間の経過とともに空洞に蓄積されていた熱が徐々に放熱されていくことに起因する。本節における等価熱物性評価モデルでは、このアクティブ法によって生じた空洞領域と空洞を有しない領域の温度上昇量の差を用いて評価を行う。

#### (1) かぶりコンクリート中の蓄積熱容量

空洞を有するコンクリートに蓄積される熱量  $W_{po}$  は、図-9に示すような空洞部とコンクリート部にそれぞれ蓄えられる熱量を足し合わせることで求められ、同様にして求めた空洞の無いコンクリートに蓄積される熱量  $W_{st}$  とともに、次式で表すことができる。

$$W_{po} = \phi(T_{max} - T_{ini})\rho_{po}c_{po} + (1-\phi)(T_{st} - T_{ini})\rho_{con}c_{con} \quad (6)$$

$$W_{st} = (T_{st} - T_{ini})\rho_{con}c_{con} \quad (7)$$

空洞を有するコンクリートに残存する熱量は、(6)式によって求めた蓄積熱量とコンクリート表面からの放出熱量とを差し引くことで求められる。同様にして空洞の無いコンクリートに残存する熱量を求め、空洞の有無によって生じるコンクリート中の残存熱量の差は、等価熱容量  $\overline{\rho c}$  を用いて次式のように表される。

$$\phi \left\{ (T_{max} - T_{ini})\rho_{po}c_{po} - (T_{st} - T_{ini})\rho_{con}c_{con} \right\} \approx \Delta T \overline{\rho c} \quad (8)$$

$$\phi = \frac{\overline{\rho c} - \rho_{con}c_{con}}{\rho_{po}c_{po} - \rho_{con}c_{con}} \quad (9)$$

ここで、添え字  $po$  は空洞を示し、 $T_{max}$  はコンクリート表面最高温度、 $T_{ini}$  はコンクリート表面初期温度、 $T_{st}$  は空洞のない健全なコンクリート表面温度、 $\Delta T$  は実測のコンクリート表面温度上昇量を示す。また、 $\phi$  はかぶり

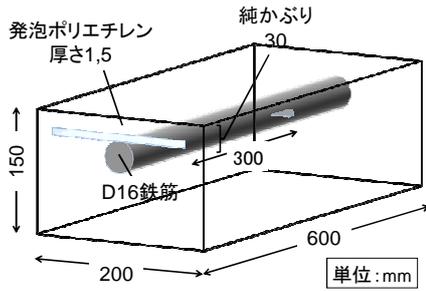


図-1 2 試験体形状寸法

表-3 試験体概要

試験体名称	K30-N-T0.0	K30-N-T1.0	K30-N-T5.0
かぶり厚(mm)	30	30	30
空洞厚さ(mm)	空洞無	1.0	5.0

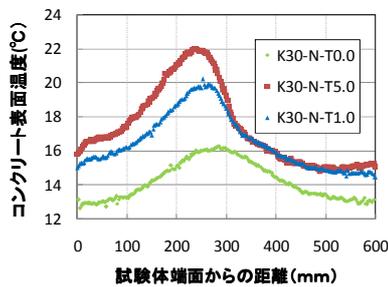


図-1 3 コンクリート表面温度分布

りコンクリートに対する空洞の体積割合を示す。

$\bar{\rho c}$  について整理すると、最終的に、

$$\bar{\rho c} = \frac{\rho_{con} c_{con} \cdot \{(T_{max} - T_{ini}) \rho_{po} c_{po} - (T_{st} - T_{ini})\}}{(T_{max} - T_{ini}) \rho_{po} c_{po} - (T_{st} - T_{ini}) - \Delta T (\rho_{po} c_{po} - \rho_{con} c_{con})} \quad (10)$$

と表される。空洞が離散化された見かけ上空洞のないコンクリートにおける表面温度上昇量  $\Delta \bar{T}$  は、等価熱容量  $\bar{\rho c}$  とコンクリートの物性の比から、以下のように示される。

$$\Delta \bar{T} = \frac{\bar{\rho c}}{\rho_{con} c_{con}} \times \Delta T_{実測} \quad (11)$$

(11)式で算出したコンクリート表面温度上昇量を、腐食率算定式(5)式に代入し、見掛け上空洞がない状態の温度上昇量として換算することで剥離空洞による影響の除去が可能となり、剥離空洞存在下でも腐食率を予測することが可能となる。

## (2) 熱伝導率

物質の断熱性状を表す指標は、熱伝導率に代表される。したがって、コンクリート表面温度の上昇量によって劣化性状を評価する本手法において、熱伝導率の考慮は必要不可欠である。

本研究では、既存の分散系熱伝導率の推定式(12)を用いて熱伝導率の離散化について検討する。

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{con} \cdot \lambda_{po}}{\phi \lambda_{con} + (1 - \phi) \lambda_{po}} \quad (12)$$

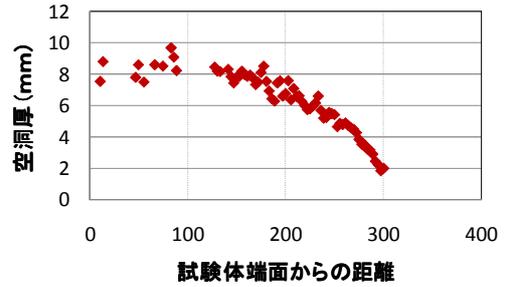


図-1 4 空洞厚 5 mm 試験体適用結果

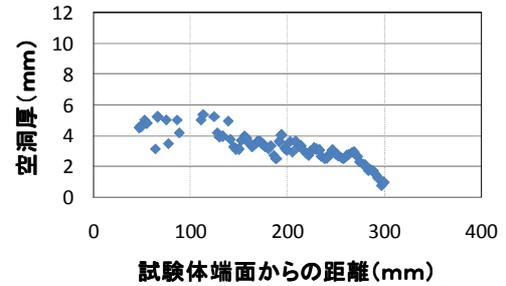


図-1 5 空洞厚 1 mm 試験体適用結果

ここで、 $\lambda$  は各物質における熱伝導率を示し、 $\bar{\lambda}$  は空洞が離散化されたコンクリートの熱伝導率を示す。

## 3.2 空洞厚算定モデル

剥離空洞の存在の有無により、コンクリート表面温度変状が生じることは2.2節で論じた通りである。

そこで、空洞が存在する領域と存在しない領域でのコンクリート表面温度上昇量の比を用いて離散化された熱伝導率は、以下のように示される。

$$\bar{\lambda} = \lambda_{con} \frac{\Delta T_{st}}{\Delta T} \quad (13)$$

空洞の体積割合  $\phi$  について整理すると、以下のような式が得られる。

$$\phi = \frac{\lambda_{po} (\Delta T - \Delta T_{st})}{\Delta T_{st} (\lambda_{con} - \lambda_{po})} \quad (14)$$

最終的に剥離空洞厚  $x$  は(14)式にかぶり厚  $c$  を乗じることにより求まる。

## 4. 等価熱物性評価モデルに基づく鉄筋腐食推定

本章では、剥離空洞を模擬した試験体に対し、前章で示した腐食率推定モデルおよび空洞厚算定モデルを適用し、その有用性について検討を行う。

### 4.1 実験概要

空洞を有した鉄筋コンクリートの試験体概要を図-12に示す。表-3に示すように、空洞を模擬した発泡ポリエチレンは厚さが 1mm、5mm の 2 種類の試験体である。鉄筋は D16(SD295) の非腐食鉄筋を用い、純かぶり 30mm の位置に配筋した。アクティブ法実施後、コンクリート表面を赤外線サーモグラフィにより 1 時間測定し、得ら

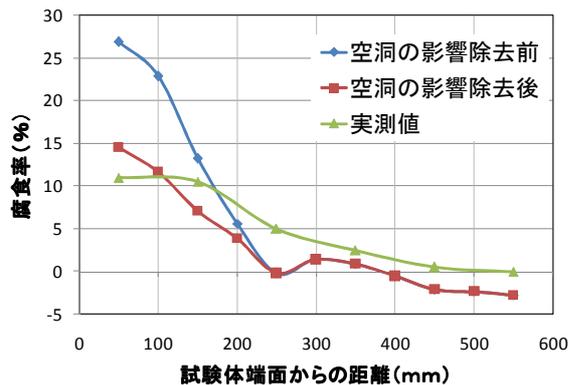


図-16 腐食率分布の比較

れたコンクリート表面温度性状を用いて空洞位置や空洞厚さを検討した。

アクティブ法による強制加熱の停止から 600 秒経過した時点でのコンクリート表面温度の分布を図-13 に示す。まず、空洞のない試験体は本来、コンクリート表面温度が一定の値となるはずであるが、実際は大きく異なる結果となっている。これは、ハロゲンヒーターの加熱むらの影響によるものであり、場所によってコンクリート表面に与えられた熱エネルギーが異なるためである。この結果を空洞のある試験体から差し引くことで加熱むらの影響を除去し、見掛け上均一な加熱を仮定した温度上昇量を算出することを試みた。

空洞のある 0~300mm の領域に着目すると、空洞の無い試験体に比べて表面温度は高くなっており、空洞厚 5mm の試験体においては約 6℃、空洞厚 1mm では約 4℃ の温度差がある。これは、前述したように空洞の有する断熱効果により深さ方向への熱拡散が抑制され、熱がかぶりコンクリート中に留まったことに起因している。

また、空洞のない 300~600mm の領域においては 3 つの試験体ともにかぶりコンクリートの状態は同じであるため、同じ表面温度をとるはずであるが、空洞のある試験体と空洞の無い試験体を比較すると、1℃程度の温度差が生じている。これは、空洞の断熱効果により、空洞領域から空洞の無い領域への熱の回り込みが生じているからであると考えられる。

#### 4.2 等価熱物性モデルの適用性評価

前節の実験結果に対して、実際に(15)式の適用により空洞厚を算出した結果を図-14 および図-15 に示す。発泡ポリエチレンの位置は図-12 に対応しており、0~300mm の位置に配置されている。

空洞厚 5mm 試験体、1mm 試験体ともに、多少の誤差はみられるが、定量的な評価が可能となったことがわかる。また、各結果ともに真値から約 2mm 大きく見積もった結果が得られた。原因として、ハロゲンヒーターの加熱に大きなむらがあり、その影響を除去しきれなかつ

ことが予測される。したがって、試験体全域に均一な加熱をすることが可能となれば、より精度の良い空洞厚の評価ができることが考えられる。

#### 4.3 空洞領域における鉄筋腐食推定

本節では、まずアクティブ法を実施することにより、空洞領域（大きさ、厚さ）を同定し、それを加味したかぶりコンクリートの等価熱物性モデルを用いることにより、鉄筋腐食率を算定することとする。なお、電磁誘導加熱は、アクティブ法実施 1 時間後、コンクリート表面温度と外気温がほぼ一定となった時点で実施した。

図-16 は、空洞の影響除去前と除去後、および実測腐食率（質量減少率）を比較したグラフである。この結果からも、空洞の影響を除去したことで、過剰に評価されていた腐食率がより良好に評価されていることが分かる。試験体端面においては、前節に示したハロゲンヒーターの加熱むらの影響により、依然として腐食率が過剰に評価されているが、こちらにも加熱むらの除去が可能となれば、より精度の高い腐食率の評価が可能となることが考えられる。

#### 5. 結言

電磁誘導加熱とハロゲンヒーターによるアクティブ法を用いて、剥離空洞を生じた腐食鉄筋コンクリートにおける鉄筋腐食診断、および剥離空洞評価について、本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) ハロゲンヒーターを用いたアクティブ法により、コンクリート表面温度性状から空洞の位置を予測することが可能となった。
- (2) アクティブ法によるコンクリート表面温度性状から熱伝導率離散化し、空洞の影響を定量的に評価することで、空洞の厚さを評価することが可能となった。
- (3) 本システムの拡張により得られた等価熱物性評価モデルを用いることで、剥離空洞を有する腐食鉄筋コンクリートにおいても、空洞の影響を評価し、腐食率も定量的に評価することが可能となった。

#### 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) 矢野早織, 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