

論文 赤外線サーモグラフィを用いた鉄筋コンクリート内部の鉄筋腐食状況の推定手法に関する研究

渡部 瑠依子*1・溝渕 利明*2

要旨：本研究では、液体窒素を用いてコンクリート表面を急冷し、その後の温度変化を赤外線サーモグラフィで撮影することにより、得られた熱画像上から内部鉄筋の腐食程度を評価する手法に関する検討を行った。検討の結果、得られた熱画像から、腐食厚の違いによる温度変化の違いを確認することができた。また、実験結果をもとに温度解析を実施し、熱物性評価を行うことで、任意の腐食厚の鉄筋腐食状況を解析上からも評価できる可能性を見出した。

キーワード：赤外線サーモグラフィ, 鉄筋腐食, 液体窒素, 熱画像, 腐食鉄筋, 温度解析, 熱物性

1. はじめに

我が国では、鉄筋コンクリート構造物の劣化が深刻な課題となっており、定期的な点検を行い、適切な時期に、適切な対策や措置をとることが求められている。しかしながら、限られた時間・コスト・人員の中で大量の構造物の点検を行うことは困難であり、それらを解決する新たな検査手法が検討されている。

現状の鉄筋コンクリート内部の鉄筋の腐食探知は、「はつり出し」や、「自然電位法」および「分極抵抗法」等の非破壊検査を用いて推定する方法が一般的である。はつり出しは、鉄筋腐食の状況を定量的に評価できる一方、構造物に局所的な損傷を与える点や、構造物全体の鉄筋腐食度評価を行うことができない点の課題を有している。また、自然電位法及び分極抵抗法等の非破壊検査は、比較的、広範囲に対して安定した測定を行うことができる一方で、定性的な評価(腐食度合に応じてグレード分けし評価を行う)となることや、調査に多大な時間を要することの課題を有している。

そこで、既往の研究¹⁾²⁾³⁾において、新たな非破壊検査手法の一つに「赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート内部の鉄筋腐食状況の把握に関する検討」が行われている。この手法は、鉄筋コンクリート内部の鉄筋をある一定温度まで加熱し、その後の温度変化を赤外線サーモグラフィを用いて撮影し、得られた熱画像より、鉄筋腐食の状況を評価する手法である。鉄筋の腐食の有無の違いによって、コンクリート表面の熱画像に違いが生じることが確認できており、部分腐食の有無判定の可能性も見出している。一方で、鉄筋を直接加熱させるため、膨大なエネルギーを要することや、大掛かりな機器を要すること、また鉄筋の加熱膨張により、鉄筋周囲に微細なひび割れを生じる可能性がある等の課題を有している。

そこで、本研究では既往の研究⁴⁾において、鉄筋コンクリート内部の鉄筋を、温度変化の勾配を比較的容易に変化させることが可能な液体窒素を用いて冷却し、その後の温度変化を赤外線サーモグラフィにて撮影し、得られた熱画像を用いて、鉄筋腐食状況の評価を行う手法に関する検討を行っている。検討の結果、加熱試験と比較し短時間での評価が可能であることを確認している。また、鉄筋の腐食の有無の違いによって、コンクリート表面の熱画像に違いが生じることを確認しており、これは腐食生成物の熱物性の違いによって温度変化が生じると考えられている。また、温度解析を用いて、鉄筋の腐食有無の違いによるコンクリート表面の温度変化を再現することの可能性も見出している。一方で、既往の研究では腐食していない鉄筋(以下、健全鉄筋と称す)と腐食している鉄筋(以下、腐食鉄筋と称す)の計2本での検討を行っており、鉄筋相互の熱移動の影響をうけていること、および適切な時間の選定が行われていない等の課題を有している。

そこで、本研究では腐食厚さの異なる鉄筋を埋設したコンクリート供試体を作製し、液体窒素を用いた冷却試験を行った。また、既往の研究ではコンクリートの一部分をはつり出し、直接鉄筋を冷却していたが、鉄筋に直接ではなく、鉄筋コンクリート表層部を、液体窒素を用いて冷却し、その後の温度変化を、赤外線サーモグラフィを用いて撮影することで、得られた熱画像より鉄筋腐食度を評価することが可能であるか、検討を行った。

さらに、温度解析を行い、腐食鉄筋の熱物性を変化させることにより、鉄筋腐食状況の違いによるコンクリート表面の温度変化を再現することが可能か検討を行うこととした。

*1 法政大学大学院 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻 修士 (現：日本工営(株)) (正会員)

*2 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリート配合

かぶり厚 (mm)	組骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 剤	AE 減水剤
30	20	11.5	50	3.8	43.0	160	320	772	1051	C×0.003%	C×1%
40	20	11.0	55	4.6	45.5	165	300	819	1007	C×0.003%	C×1%
50	20	11.5	50	4.5	43.0	160	320	772	1051	C×0.003%	C×1%

2. 鉄筋コンクリート供試体を用いた冷却試験

2.1 実験概要

本検討では、腐食厚さの異なる腐食鉄筋を埋設した、かぶり厚 30, 40, 50mm のコンクリート供試体を作製した。また既往の研究では、作製された供試体が、腐食鉄筋および健全鉄筋の計 2 本を埋設していた。本検討では、均一に鉄筋直上のコンクリート表面を冷却するため、鉄筋を 1 本ずつ埋設した供試体を作製することとした。各供試体の配合を表-1、一覧を表-2、作製した供試体の概要を図-1 に示す。本研究の使用セメントは、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³, 比表面積 3130 cm²/g), 使用細骨材は、大井川水系の陸砂(表乾密度 2.58g/cm³), 使用粗骨材は、東京都青梅産の硬質砂岩砕石であり、20~15mm, 15~10mm, 10~5mm にふるいでふるわれたものを標準粒度となるよう 4:3:3 に混合したものである。

値を算出することで、対象鉄筋の腐食厚さを求めることとした。電子顕微鏡による測定方法は、腐食部を目視で選定する点や部分的な測定となる点に課題を有していた。

そこで、2015, 2016 年度に作製した供試体(かぶり 30, 40mm)に埋設した腐食鉄筋の腐食厚さは、電子顕微鏡による測定に加え、3D スキャナによる測定を行うこととした。3D スキャナによる鉄筋の腐食状況を図-3 に示す。3D スキャナを用いて腐食した鉄筋と腐食部除去後の鉄筋を測定することにより、腐食部の体積、面積、腐食形状を把握することが可能となった。3D スキャナによる測定を行うことにより、電子顕微鏡を用いた測定に比べ、より定量的な測定を行うことが可能となった。

表-2 作製供試体一覧

No.	作製年度	曝露場所	曝露期間	かぶり (mm)	腐食厚 (mm)	測定方法
1	2014	D16異形鉄筋(健全鉄筋)		50	0.00	-
2		※既往の研究にて使用した腐食鉄筋		50	0.20	電子顕微鏡
3		東京	1年	50	0.70	電子顕微鏡
4		沖縄	1年	50	1.00	電子顕微鏡
5	2015	D16異形鉄筋(健全鉄筋)		30	0.00	-
6		東京	2年	30	0.08	電子顕微鏡, 3Dスキャナ
7		神奈川	1年	30	0.35	電子顕微鏡, 3Dスキャナ
8		神奈川	2年	30	0.56	電子顕微鏡, 3Dスキャナ
9	2016	D16異形鉄筋(健全鉄筋)		40	0.00	-
10		東京	3年	40	0.46	電子顕微鏡, 3Dスキャナ
11		沖縄	3年	40	4.58	電子顕微鏡, 3Dスキャナ

なお、本研究で使用した腐食鉄筋および健全鉄筋は、No.2 の腐食鉄筋のみ、塩水浸透を繰り返し行った人工曝露鉄筋を使用しており、その他は、東京・神奈川・沖縄の各自然条件下にて曝露させた自然曝露鉄筋である。

2014 年度に作製した供試体(かぶり 50mm)に埋設した腐食鉄筋の腐食厚さは、電子顕微鏡を用いて測定を行っている。電子顕微鏡による鉄筋の腐食状況を図-2 に示す。任意の部位における腐食厚さを目視で測定し、平均

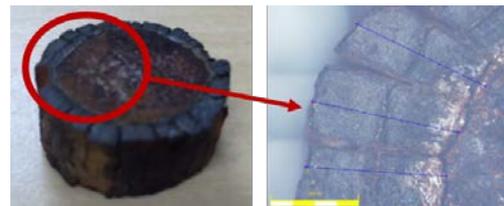


図-2 電子顕微鏡による鉄筋の腐食状況

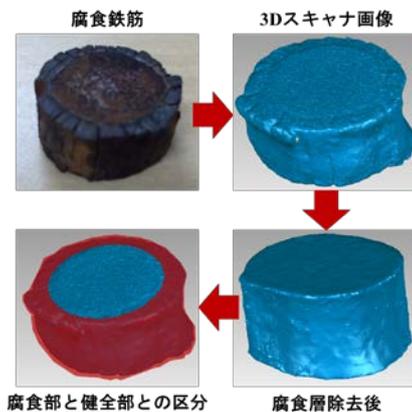


図-3 3Dスキャナによる鉄筋の腐食状況把握

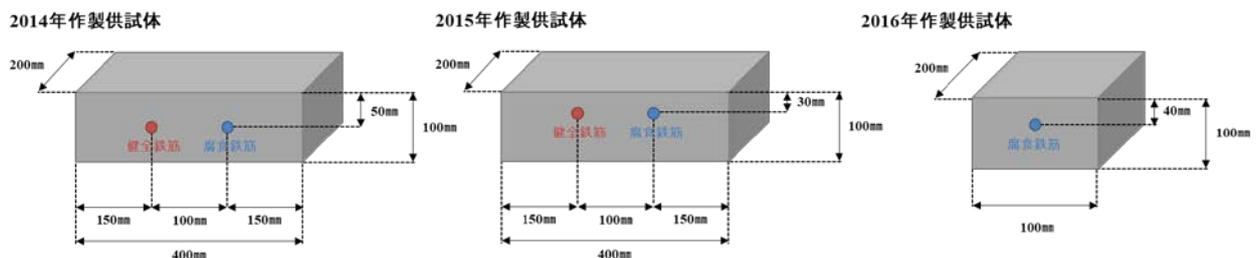


図-1 供試体概要

3D スキャナより得られた腐食厚さと腐食層の見かけの密度との関係を図-4 に示す。腐食層の密度は、腐食層除去前後の鉄筋重量差(g)を、3D スキャナより得られた腐食層除去前後の体積差(cm³)で除することにより求めることとした。図-4 より、全ての腐食鉄筋において、腐食部の密度は健全部と比較し50%程度低下する結果となった。これは図-2 に示すように、腐食層には空隙層が生じるためであると考えられる。よって、本試験法でコンクリート表面を冷却した場合、腐食層の体積によって熱伝導が変化し、その後のコンクリート表面の温度変化に違いが生じると推察される。

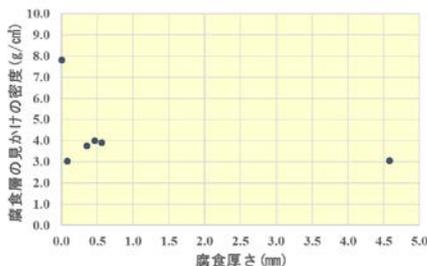


図-4 腐食層と見かけの腐食密度との関係

鉄筋コンクリート供試体を用いた冷却試験の試験手順を以下に示す。

- 手順1 各供試体の冷却面(鉄筋直上)以外は、熱の放出を避けるため、断熱材で覆う。なお、本試験は20℃一定の室内にて試験を行うこととした。
- 手順2 冷却装置に液体窒素を注ぎ、鉄筋直上のコンクリート表面を450秒間冷却する。本研究にて使用した冷却装置を写真-1に示す。装置は、縦×横×高さ=150mm×60mm×200mmの箱型銅板としており、冷却面の寸法は、150mm×60mmである。また、既往の研究⁴⁾において、コンクリート表面が均一に冷却できない課題点が挙げられていることをうけて、箱型銅版の冷却面に導伝性ゴムシートを貼付し、コンクリート表面と冷却面をより密着させ、従来と比較し、より均一な冷却を行うこととした。
- 手順3 冷却終了後、熱画像上より得られる、鉄筋直上のコンクリート表面の最低温度が-10℃となったことを確認し、赤外線サーモグラフィによる撮影を開始する。撮影距離は、各供試体とも、30cmとし、インターバル5秒にて撮影を行った。
- 手順4 熱画像の温度変化量が0.01℃/secとなった時点で撮影を終了する。赤外線サーモグラフィより得られた熱画像から得られる温度変化より、鉄筋の腐食度評価を行う。

なお、本試験で設定した冷却時間は、既往の研究において各供試体に埋設した鉄筋中心部の熱電対より得られる温度の測定結果から、450秒程度冷却した時点の鉄筋中心部の温度に、腐食層の違いによる変化が現れることを確認しており、その結果をもとに設定した。ただし、かぶり厚や鉄筋径等による最適な冷却時間があると思われることから、それについては今後の課題としたい。

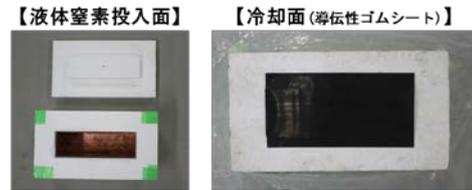


写真-1 冷却装置

2.2 実験結果

熱画像より得られる鉄筋直上のコンクリート表面の最低温度が-10℃時点の熱画像を図-5に示す。熱画像上に記した赤枠は、熱画像上より鉄筋と思われる形状を記したものである。撮影時に鉄筋直上部に焦点を合わせ、かつレンジ幅を小さく設定し撮影を行うことにより、得られた熱画像上から、鉄筋と思われる形状を確認できるまでの撮影精度を得ることができた。

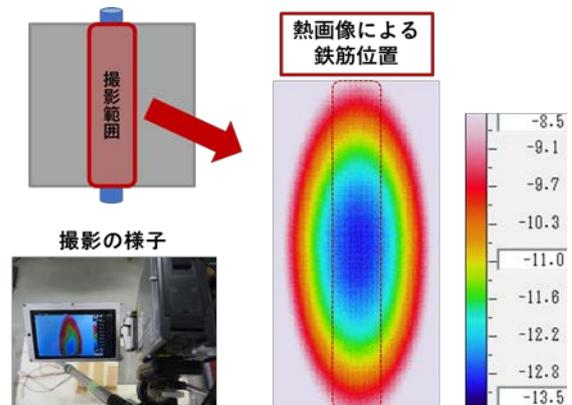


図-5 供試体試験より得られる鉄筋直上の熱画像

次に、鉄筋直上に示された見かけ上の最低温度点を5秒間隔ごとにプロットした、腐食厚の違いによるコンクリート表面のかぶり厚ごとの温度変化を、図-6～図-8に示す。各供試体とも、腐食厚が大きくなる程、温度上昇量が大きくなる傾向を示した。これは、冷却した際、腐食層が厚いほど、鉄筋中心部までの熱伝導を妨げるため、鉄筋中心部の温度が腐食厚の違いにより変化し、冷却終了後のコンクリート表面の温度変化に変化をもたらしているのではないかと推察される。

かぶり厚ごとに試験結果から、かぶり30mm、40mmの試験結果において、腐食厚の違いによる温度変化が生じており、かぶり50mmの試験結果からは、腐食厚の違いによる差異は見られず、腐食の有無の違い程度しか判断は

できなかった。よって、かぶり厚 50 mm の試験の際には、より長い時間冷却する必要があると考えられる。

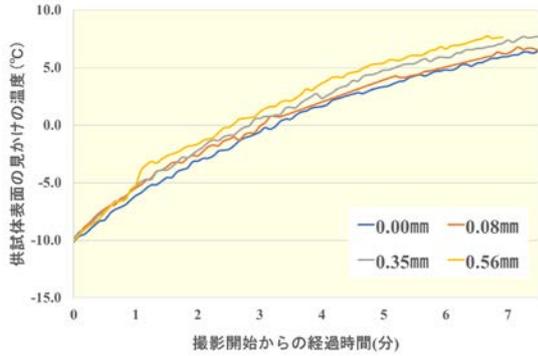


図-6 コンクリート表面温度変化【かぶり 30 mm】

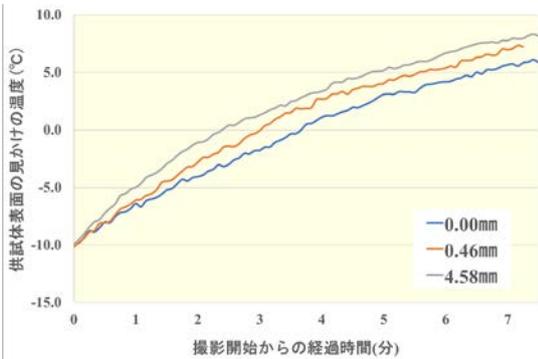


図-7 コンクリート表面温度変化【かぶり 40 mm】

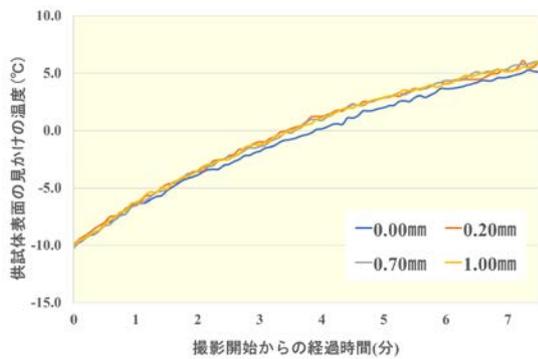


図-8 コンクリート表面温度変化【かぶり 50 mm】

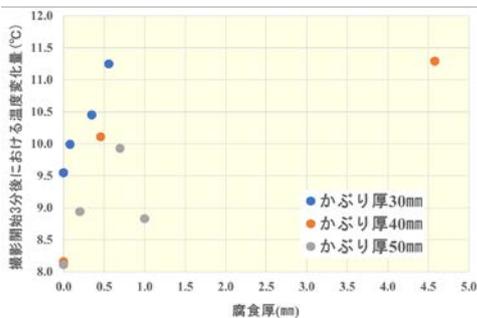


図-9 腐食厚と温度変化量との関係

撮影開始後からの経過時間に着目していくと、撮影開始 3 分程度で、温度変化の明らかな違いを確認することができた。

撮影開始 3 分後における温度変化量と腐食厚との関係を図-9 に示す。かぶり厚 50 mm においては、ばらつ

きがみられるものの、かぶり厚 40 mm 及び 30 mm においては、腐食厚が大きくなる程、温度変化量も大きくなる傾向が見られた。また、かぶり厚が大きい程、温度変化量が小さい傾向を示しており、かぶり厚ごとに冷却条件を設定していく必要があると考えられる。

次に、かぶり厚 40mm の供試体試験より得られた鉄筋直上の熱画像による温度変化一覧を表-3 に示す。撮影開始直後、1 分後、3 分後を例として載せる。

表-3 コンクリート表面の温度変化【かぶり 40 mm】

	腐食厚 0.00 mm	腐食厚 0.46 mm	腐食厚 4.58 mm	レンジ
撮影開始直後				-5.0 -5.6 -6.2 -6.8 -7.5 -8.1 -8.7 -9.3 -10.0
撮影開始 1 分				-2.5 -3.1 -3.7 -4.3 -5.0 -5.6 -6.2 -6.8 -7.5
撮影開始 3 分				2.5 1.8 1.2 0.6 0.0 -0.6 -1.2 -1.8 -2.5

撮影開始直後は、かぶり厚の違いによる温度差はさほど見られないが、1 分後、3 分後と時間が経過するにつれて、かぶり厚の違いによる温度変化が熱画像上から、明

確に表れる結果となった。また、図-6～図-8の試験結果と同様に、腐食厚が大きいほど時間経過に伴う温度変化が大きい結果となった。

以上の試験結果より、本試験法による、腐食の有無および腐食厚の違いを評価できる可能性を示唆していると考えられる。今後は、かぶり厚ごとの具体的な冷却条件設定の検討を行っていく必要がある。また、今回の試験では、全面腐食した鉄筋を用いて試験を行ったが、今後フィールドで適用していくためには、部分的に腐食した鉄筋による試験も行っていく必要がある。

3.2 次元解析による腐食鉄筋の熱物性評価

3.1 解析概要

本検討において、本試験法によって腐食厚の違いによるコンクリート表面の温度の変化に差異がみられたことから、有意な温度変化が得られた、かぶり厚 30 mm, 40 mm の供試体について温度解析を実施した。解析は、供試体試験より得られた結果をもとに、2次元解析による同定解析を行い、鉄筋の腐食厚ごとの熱物性を求めることとした。既往の研究⁴⁾では、鉄筋の腐食部及び健全部それぞれをモデル化し、腐食部の熱物性を変化させることで、腐食鉄筋の再現を行っている。そのため、異なる腐食厚の解析を行う場合、解析モデルを作り直す必要があった。そこで、本研究では鉄筋の腐食部及び健全部を一体と考えモデル化し、鉄筋自体の熱物性を変化させることにより、腐食鉄筋の再現を行うこととした。解析に用いた熱物性を表-4、2次元解析に用いた解析モデルを図-10に示す。実験と同様の条件とするため、冷却面以外は断熱境界とした。また、冷却面に熱伝達境界を設け、450秒間、表面熱伝達率 60W/m²°C、温度 -196°C一定とし、その後、表面熱伝達率 14W/m²°C、温度 20°C一定とすることにより、流体の液体窒素を用いて冷却する過程を再現することとした。なお、本解析において定めた表面熱伝達率 60W/m²°Cは、健全供試体のフィッティング解析において得られた値である。

3.2 解析結果

はじめに、健全鉄筋が埋設された供試体を用いて、供試体表面の温度変化をフィッティングさせ、各作製年度におけるコンクリートの熱物性を設定した。ここで、鉄筋の比熱は 0.47kJ/kg°Cとする。解析の結果、水セメント比 50%のコンクリートの比熱は 1.20kJ/kg°C、水セメント比 50%のコンクリートの比熱は 1.05kJ/kg°Cとなった。かぶり厚 30 mmの健全供試体におけるフィッティング結果を図-11に示す。本解析では、コンクリートの熱物性値に大きく影響を受けるため、フィールド調査に用いる際には、事前に対象構造物のコンクリート物性値を確認した上で、解析する必要があることを確認した。

表-4 解析に用いた熱物性

コンクリート	熱伝達率	2.60 W/m ² °C
	密度	2400 kg/m ³
	比熱	(※1) kJ/kg°C
鉄筋	熱伝達率	51.30 W/m ² °C
	密度	7850.00 kg/m ³
	比熱	(※2) kJ/kg°C

(※1)水セメント比50%:1.20kJ/kg°C、55%:1.05kJ/kg°C
(※2)腐食厚ごとに変更する

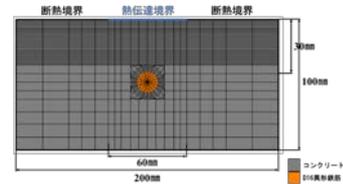


図-10 2次元解析モデル

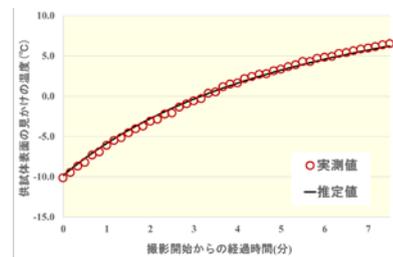


図-11 解析値と実測値【健全、かぶり 30 mm】

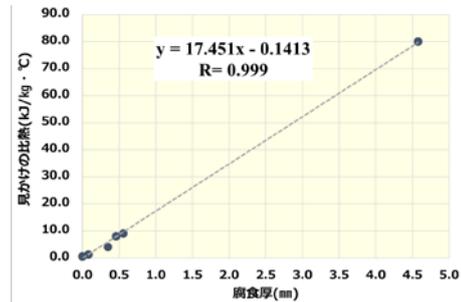


図-12 腐食厚と見かけの比熱との関係

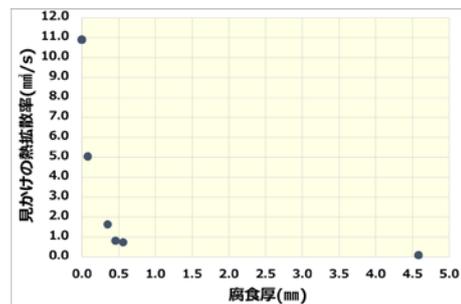


図-13 腐食厚と見かけの熱拡散率との関係

次に、腐食鉄筋の比熱を変化させ、腐食厚ごとの同定解析を行った。腐食厚と見かけの比熱との関係を図-12、腐食厚と見かけの熱拡散率との関係を図-13に示す。熱拡散率は式(1)より求めた。

$$\text{熱拡散率}(\text{mm}^2/\text{s}) = \frac{\text{熱伝導率}(\text{W}/\text{m} \cdot \text{°C})}{\text{比熱}(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{°C}) \times \text{密度}(\text{kg}/\text{m}^3)} \quad (1)$$

図-12より、腐食厚と見かけの比熱に線形関係が見られており、腐食厚が大きくなる程、見かけの比熱が大きくなる傾向を示している。また、図-13より、腐食厚が大きくなる程、見かけの熱拡散率が小さくなる傾向を示している。よって、腐食鉄筋の熱物性を変化させることで、供試体に埋設された鉄筋腐食状況を解析においても評価できる可能性を見出したと考えられる。今後、腐食厚の違いによるデータ水準を蓄積していくことで、精度の高い解析を構築していくものとする。

4. 3次元解析による温度解析

4.1 解析概要

2次元解析より得られた腐食鉄筋の熱物性値を用いて、実験より得られるコンクリート表面の熱画像と実験より得られる熱画像との比較を行った。3次元解析に用いた解析モデルを図-14に示す。解析モデルは、縦×横×高さが200mm×200mm×100mmのコンクリート供試体とし、実験と同様の冷却面に、熱伝達境界を設け、冷却面を除く全面に断熱境界を設けた。

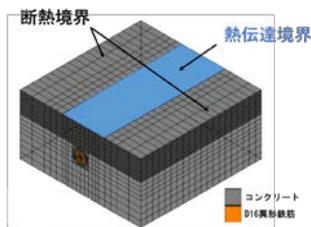


図-14 3次元解析モデル

4.2 解析結果

3次元解析より得られた、かぶり40mmの供試体における熱画像結果の一例として、撮影開始3分後の画像を図-15に示す。実験と同様に、熱画像上から鉄筋の形状を確認することができた。また、腐食厚が大きくなる程、温度変化量が大きいことも示された。よって、3次元解析を行うことによって、任意の腐食厚による温度変化を推定するだけでなく、熱画像においても評価できる可能性を見出したと考えられる。一方で、実験より得られた熱画像のような明らかな温度差は確認できていないことから、解析に使用する物性値等、再度検討を行っていく必要がある。

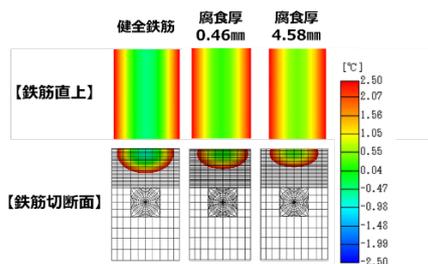


図-15 解析より得られる熱画像【かぶり40mm】

5. まとめ

本研究は、コンクリート表面を急冷後の温度変化を赤外線サーモグラフィで撮影することにより、得られた熱画像上から内部鉄筋の腐食程度を評価する手法に関する検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 3D スキャナより得られた腐食厚と腐食層の見かけの密度を比較することにより、腐食部の密度は健全部と比較し50%程度低下する結果となった。
- (2) 実験より得られた熱画像より、かぶり30mm、40mmの試験結果において、腐食厚が大きくなる程、温度変化量が大きくなる傾向を示した。一方、かぶり50mmの試験結果からは、腐食の有無の違い程度しか判断はできなかった。
- (3) 2次元温度解析より、腐食厚の違いによる熱物性の違いを確認した。よって、腐食鉄筋の熱物性を変化させることにより、供試体に埋設された鉄筋腐食状況の評価を解析上で再現できる可能性を見出した。
- (4) 3次元温度解析より、任意の腐食厚による温度変化を推定するだけでなく、熱画像においても評価できる可能性を見出した。

参考文献

- 1) 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関する研究, 土木学会論文集, Vol.65, No.4, pp442~pp458, 2009.10
- 2) 今井 富弓, 矢寄 早織, 大下 英吉, 林 詳悟: 赤外線サーモグラフィによるRC構造物の鉄筋腐食性状評価における熱画像処理方法の検討に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp1714~pp1719, 2012.7
- 3) 高德 類, 新井 淳一, 野嶋 潤一郎, 溝渕 利明: 赤外線を用いたコンクリート中の鉄筋腐食状況の把握に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp2032~pp2037, 2014.7
- 4) 渡部 瑠依子, 溝渕 利明: 赤外線によるコンクリート中の鉄筋腐食状況の把握に関する研究, 土木学会第71回年次学術講演会, pp839~pp840, 2016.9