

論文 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

高德 類^{*1}・新井 淳一^{*2}・野嶋 潤一郎^{*3}・溝渕 利明^{*4}

要旨: 本研究では、腐食鉄筋がその腐食層において、健全鉄筋に比べ熱伝導率が小さく、比熱が大きくなるという性質を利用して、温度勾配を比較的容易に大きくすることが可能となる液体窒素を用いて、健全及び腐食鉄筋の温度変化を測定し、コンクリート中の鉄筋の腐食の程度を評価する可能性について検討を行った。その結果、健全及び腐食鉄筋の中心部における温度変化と、コンクリート表面における温度変化に違いが見られることを確認した。また熱画像から、健全側と腐食側でコンクリート表面の温度変化に違いが見られたことから、赤外線を用いて、コンクリート中の鉄筋の腐食の程度を評価する可能性を見出した。

キーワード: 赤外線, 鉄筋腐食, 腐食生成物, 液体窒素, 非破壊検査

1. はじめに

鉄筋の腐食は、水と酸素がある限り進行し続け、コンクリートの耐久性に大きく影響するため、より精度の高い鉄筋腐食の診断技術が必要である。

コンクリートの劣化要因は種々あるが、塩害や中性化による鉄筋腐食は、生成される腐食生成物によって鉄筋周囲を膨張させ、コンクリートにひび割れや剥離等を引き起こし、構造物の耐久性を大きく損なう劣化現象である。コンクリート中の鉄筋の腐食状況の確認は、コンクリート表面にひび割れや錆汁が生じるなどの劣化現象が明らかになるまで困難であるが、こういった劣化現象が生じた段階ではコンクリート構造物には大きな損傷が発生している場合がある。そのため、早期に鉄筋の腐食状況を把握することが重要である。従来の鉄筋の腐食状況の確認は、はつり出しを行う場合が多いが、多くの時間と費用がかかるだけでなく、局部的に構造物に損傷を与えてしまうことになる。そこで、非破壊で鉄筋の腐食状況を評価することが可能となれば、コンクリートに損傷を与えることなく、コンクリートの劣化現象を把握することができ、損傷が軽微なうちに対策を講じることができるようになる。そのため、鉄筋腐食を定量的に評価することのできる非破壊検査法の確立が望まれている。

現在、非破壊による鉄筋腐食評価に自然電位法を用いられる場合がある。しかしこの手法は、鉄筋の形状、かぶりコンクリートの品質、湿潤状態、ひび割れの有無などによって測定値に差異が生じ、測定精度に課題を有しているのが現状である。

本研究は、新たな非破壊検査による鉄筋腐食評価手法として、赤外線法に着目した。赤外線法では、劣化状態を一度の計測で広範囲に評価することができるという利

点がある。既往の研究では、コンクリート中の鉄筋を低周波型交流電流により通電加熱し、コンクリート表面の温度変化を赤外線法によって測定することで、鉄筋の腐食状況評価を行っている¹⁾。ただし、鉄筋を加熱させるには膨大なエネルギーが必要であり、また鉄筋の加熱膨張に伴い、鉄筋周囲に微細ひび割れを生じさせる可能性がある。

そこで本研究では、温度変化の勾配を比較的容易に大きくすることが可能である液体窒素を用いて、腐食していない鉄筋(以後、健全鉄筋と称す)と腐食している鉄筋(以後、腐食鉄筋と称す)を埋設したコンクリート表面の熱画像によってコンクリート中の鉄筋の腐食状況の評価の可能性について検討を行った。

2. 赤外線による腐食状況把握の概要

2.1 赤外線とは

赤外線は、可視光線や電波と同じく電磁波である。全ての物体において、その温度が絶対零度以上であれば、物体表面の原子や分子の運動によって常に放出されるエネルギーである。赤外線の波長領域は可視光線よりも長く、電波より短い 0.78~1000 μm で、さらに近赤外線、中赤外線、遠赤外線と区分されている。電磁波の波長領域を図-1に示す。

2.2 赤外線サーモグラフィによる検証

赤外線の放射エネルギーは温度に比例する。赤外線サーモグラフィは赤外線エネルギーを検出し、見かけの温度に変換し、熱画像を表示する装置である。この装置による赤外線の検知波長は中赤外線前後の波長である。屋外で使用すると、コンクリートの健全部は日射による熱エネルギーを内部へ吸収するが、劣化部は内部に空隙が

*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 修士課程 (学生会員)

*2 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 博士課程 (学生会員)

*3 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 博士課程 (正会員)

*4 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)

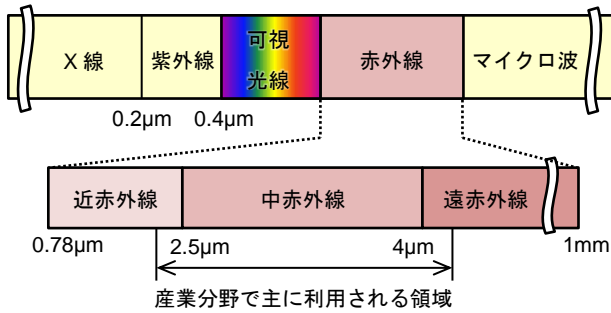


図-1 電磁波の波長領域

できていることから、表面からの厚みが少なくなり、熱エネルギーの密度が高くなることで熱画像から読み取ることができる。室内では、同様の現象を熱画像で示すために、何らかの温度変化を与える必要がある。

3. 実験の概要

鉄筋が腐食すると写真-1のような腐食生成物が生成される。その組織は非常に粗となり、健全鉄筋に比べて熱伝導率は小さく、比熱は大きくなる。この特性を利用し、比較的容易に冷却が可能である液体窒素を用い、健全鉄筋及び腐食鉄筋を冷却させ、両者の経時的な温度変化について実験を行った。

3.1 使用鉄筋

実験に使用した鉄筋は、長さ 500mm の D16 異形鉄筋である。写真-2 に示すように、健全鉄筋と塩水を繰り返し塗布した腐食鉄筋を使用した。腐食鉄筋は、「2007 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]」に示される、鋼材の腐食グレードⅢであり、腐食厚さは 0.2mm である。また、以下に示す鉄筋単体試験、供試体を用いた試験にそれぞれ健全鉄筋、腐食鉄筋を 1 本ずつ使用した。

3.2 実験方法

(1) 鉄筋単体の温度変化測定

本実験では、健全鉄筋と腐食鉄筋の端部を写真-3 に示すように液体窒素によって同条件下で冷却した。冷却開始から液体窒素が気化した後、鉄筋の温度がほぼ外気温と同等になるまで計測を行った。両鉄筋には、冷却側端部からそれぞれ 100mm と 200mm の部分にφ4mm、深さ 8mm の穴を空け、それぞれの穴に温度センサを埋め込み、鉄筋中心部の温度を測定した。なお、温度測定間隔は 15 秒とした。

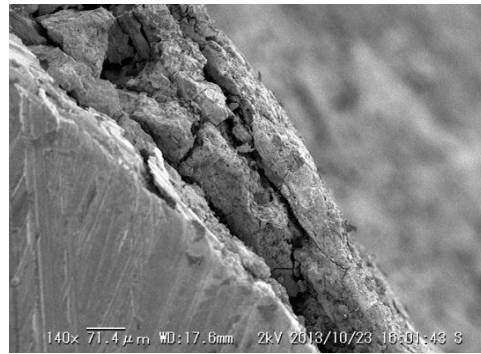


写真-1 腐食鉄筋の腐食生成物



写真-2 実験使用鉄筋(上：腐食鉄筋 下：健全鉄筋)



写真-3 鉄筋単体の冷却方法

(2) 鉄筋を埋設した供試体の温度変化測定

本実験では、図-2 に示す高さ 100mm×幅 200mm×長さ 400mm の供試体に、健全鉄筋と腐食鉄筋をかぶり 30mm 及び 50mm の位置に 1 本ずつ埋設した。コンクリート表面の温度測定は、図-3 示すように、冷却側の裏面より赤

表-1 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単体量(kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	55	12	4.5	45	165	300	804	1016

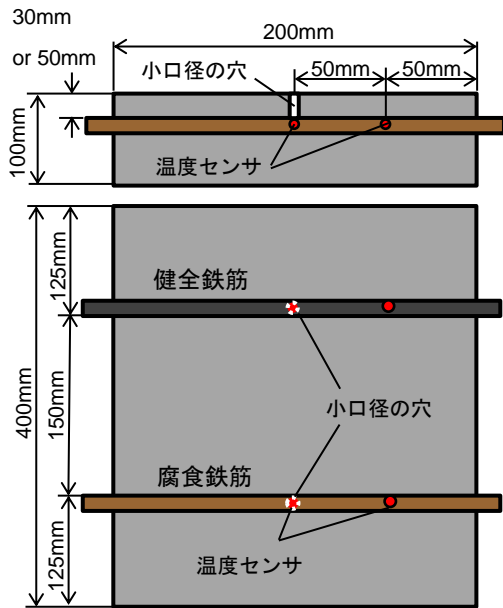


図-2 供試体の概略図

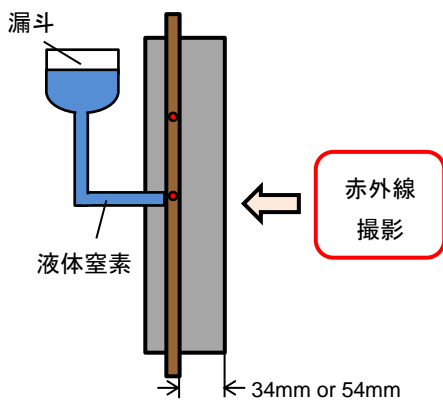


図-3 コンクリート中の鉄筋の冷却方法

外線サーモグラフィ装置を用いて行った。そのため、かぶりはそれぞれ 54mm 及び 34mm となる。供試体のコンクリート配合を表-1 に示す。埋設した鉄筋には、鉄筋中央部と中央部から 50mm の位置に $\phi 4$ mm、深さ 8mm の穴を計 2 箇所空けてあり、それぞれの穴に温度センサを埋め込み、鉄筋中央部の温度を測定した。鉄筋の冷却は鉄筋の中央部付近に鉄筋表面に達する深さまで $\phi 14$ mm の穴をあけ、パイプを通してそれぞれ 500ml の液体窒素を同時に注入した。

4. 実験結果

4.1 鉄筋単体の温度変化測定結果

本実験では、鉄筋単体の冷却実験を合計 7 回実施した。冷却側鉄筋端部から 100mm の位置での健全鉄筋と腐食鉄筋の温度の経時変化の結果の一例を図-4 に示す。図-4 の凡例は一例として示す 3 回の実験の各鉄筋を示している。冷却時間が短い場合、両者の温度変化に差が見られ

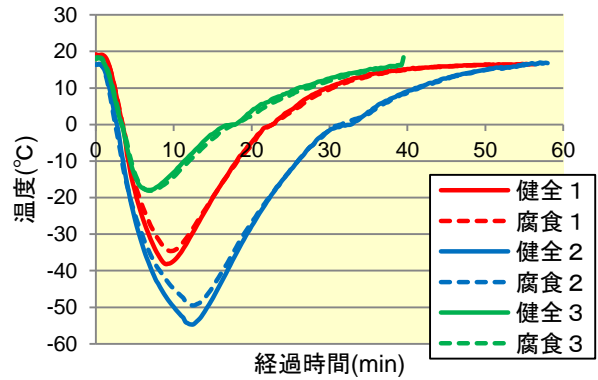


図-4 鉄筋単体の温度変化

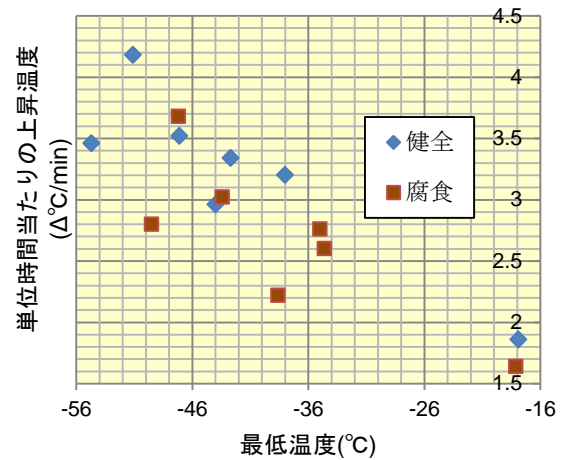


図-5 各鉄筋の最低温度と上昇温度の関係

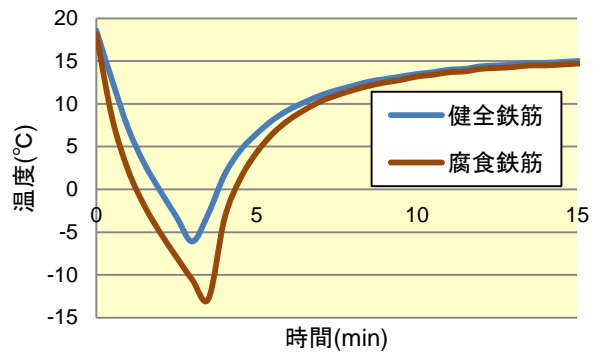


図-6 供試体冷却部の温度変化

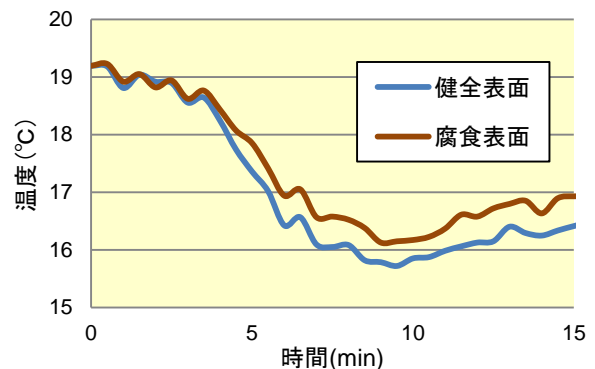


図-7 供試体表面の温度変化

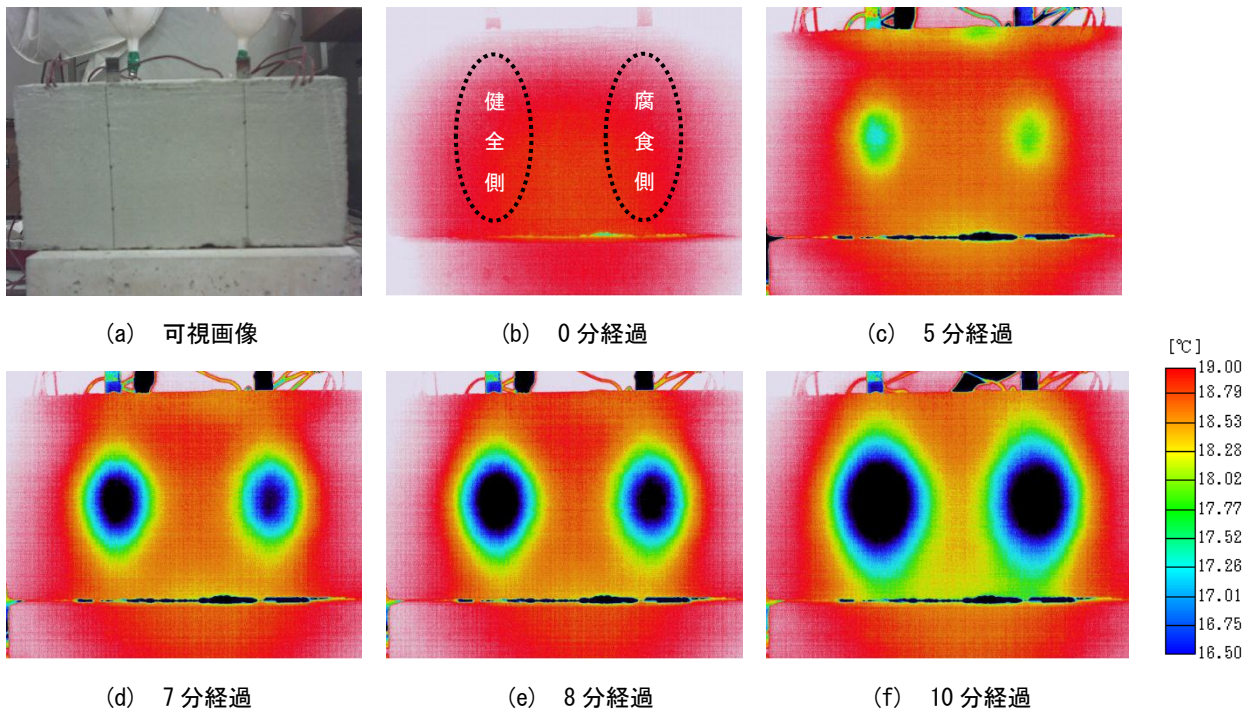


図-8 かぶり54mmの供試体の熱画像（左：健全側 右：腐食側）

なかった。一方、冷却時間が長くなると、両者の温度変化に差異が見られ、健全鉄筋が腐食鉄筋よりも最下点温度が低くなる結果となった。本実験結果をもとに、両鉄筋の最低温度計測時から5分間の上昇温度量を求め、その温度上昇の単位時間当たりの変化量を算出した。図-5に、7回実施した試験の各鉄筋における最低温度と単位時間当たりの上昇温度の関係を示す。両者とも最下点温度が低くなるほど、温度上昇の変化量が大きくなる傾向を示した。また、腐食鉄筋の方が健全鉄筋よりも単位時間当たりの上昇温度が小さくなる傾向を示した。これは、写真-1に示した腐食鉄筋の腐食層およびその空隙の熱伝導率が低く、比熱が大きいためと思われる。

4.2 鉄筋を埋設した供試体の温度変化測定結果

冷却位置の健全部および腐食部の鉄筋の温度変化を図-6に、各冷却部上のコンクリート表面における温度変化を図-7に示す。図-6および図-7より、冷却部では腐食側の方が低くなっているにも関わらず、表面温度は健全部の方が低い結果となった。これは、腐食鉄筋の腐食層によってコンクリートへの熱移動が妨げられたためではないかと推測される。

また、赤外線サーモグラフィより得られたかぶり54mmの供試体における熱画像を図-8に示す。図-8より、健全側と腐食側でコンクリート表面への熱の伝搬速度が異なっており、腐食側の方が健全側に比べて、コンクリート表面の冷却域(この場合 18℃以下)が表面に現れてくるのが遅い結果となった。複数回実験を行っても同様の傾向が見られた。

5. 実験結果をもとにした温度解析による鉄筋腐食評価

鉄筋単体の温度測定結果をもとに、同定解析を行い、腐食生成物の熱伝導率および比熱、境界条件を定めることで、鉄筋を埋設された供試体表面の温度変化を温度解析からシミュレートできる可能性について検討を行った。

5.1 解析条件

5.1.1 鉄筋単体での解析

本検討では、まず鉄筋単体での同定解析を行った。鉄筋単体の温度変化測定試験の結果から、健全および腐食鉄筋の最低温度が解析結果と実験値が同値となる様に設定し、その結果から表-2に示す腐食生成物の熱的特性を逆算した。腐食鉄筋の腐食生成物の厚さは、写真-1に示した走査電子顕微鏡によって撮影した写真から0.2mmとした。

5.1.2 コンクリート供試体での解析

コンクリート供試体の解析モデルを図-9に示す。寸法は図-2に示した供試体概略図と同様である。上記の鉄筋単体での解析結果から得られ、本検討で用いた熱的特性を表-2に示す。なお、コンクリートに埋設されている鉄筋の解析モデルは鉄筋単体での解析用いたモデルである。

表-2 解析に用いた熱的特性

材料	熱伝導率(W/m ² ・℃)	比熱(kJ/kg・℃)
コンクリート	2.7	1.15
健全領域	51.3	0.47
腐食領域	0.138	1.4

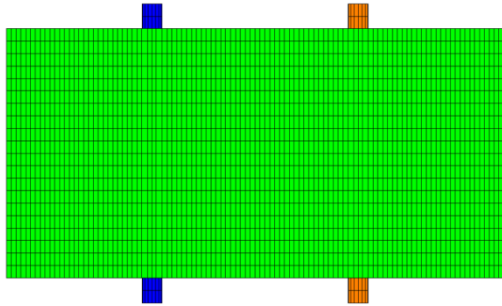


図-9 解析モデル(表面温度測定面)

5.2 解析結果

鉄筋単体における冷却部端部から 100mm の位置の温度解析結果を図-10 に示す。図-10 から、両鉄筋の測定値と解析値の最低温度がほぼ一致する結果となった。最低温度に達するまでの時間は、解析値の方が速い結果となった。これは、現段階での解析では液体窒素の気化に伴う熱量変化を考慮することができないためではないかと推察される。今回はこの解析結果から、表-2 に示す腐食領域の熱的特性を用いることとした。次に、かぶり 34mm のコンクリート供試体のコンクリート表面の温度解析結果を図-11 に示す。コンクリート供試体の解析値も同様に、温度低下時間が速い結果となった。ただし、解析において、健全側と腐食側に差異が生じる結果となった。

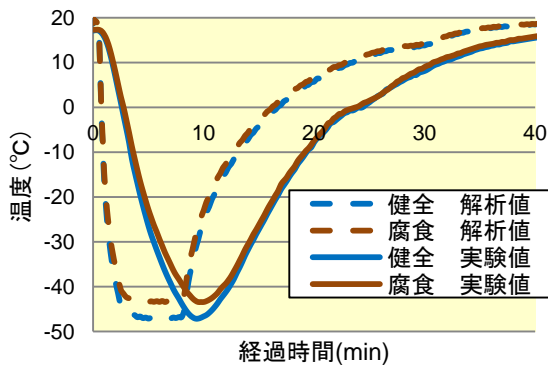


図-10 鉄筋単体の端部から 100mm に位置における温度変化

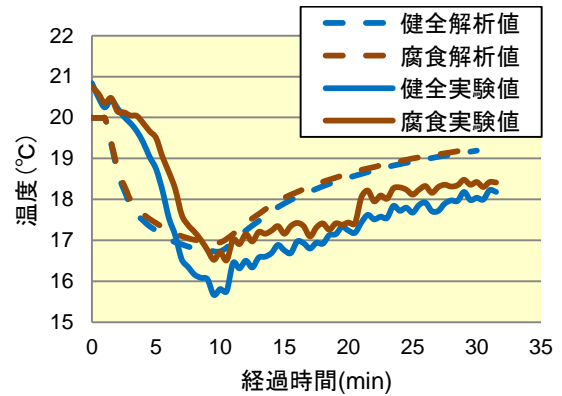
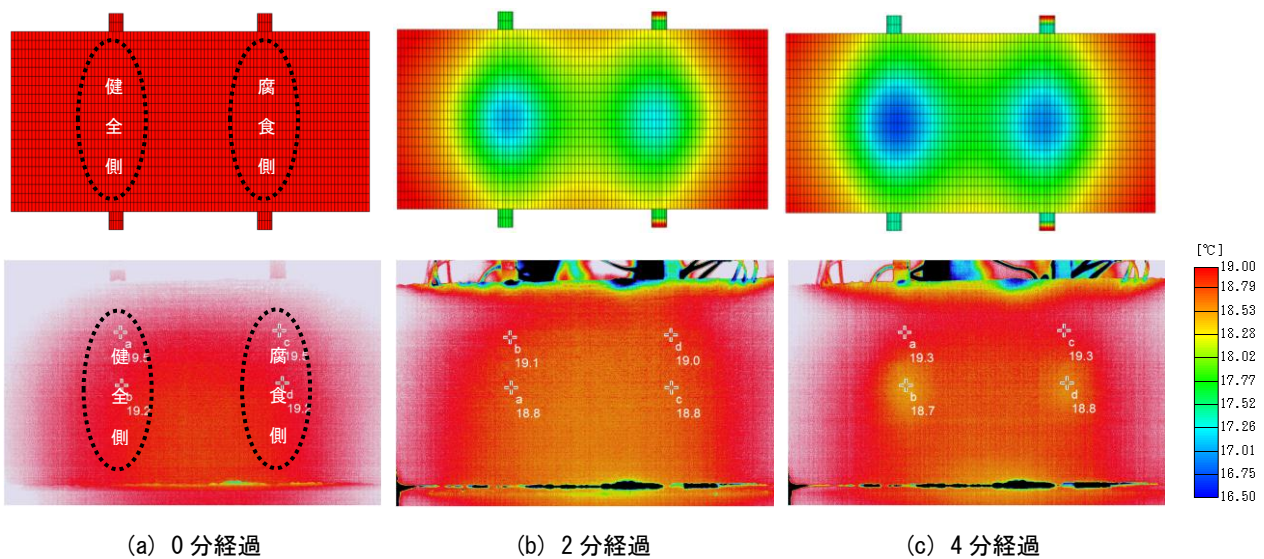


図-11 かぶり 34mm の供試体における解析値比較



(a) 0分経過

(b) 2分経過

(c) 4分経過

図-12 かぶり 34mm の供試体表面の温度解析モデル及び熱画像
(左：健全側 右：腐食側 上図：解析モデル 下図：熱画像)

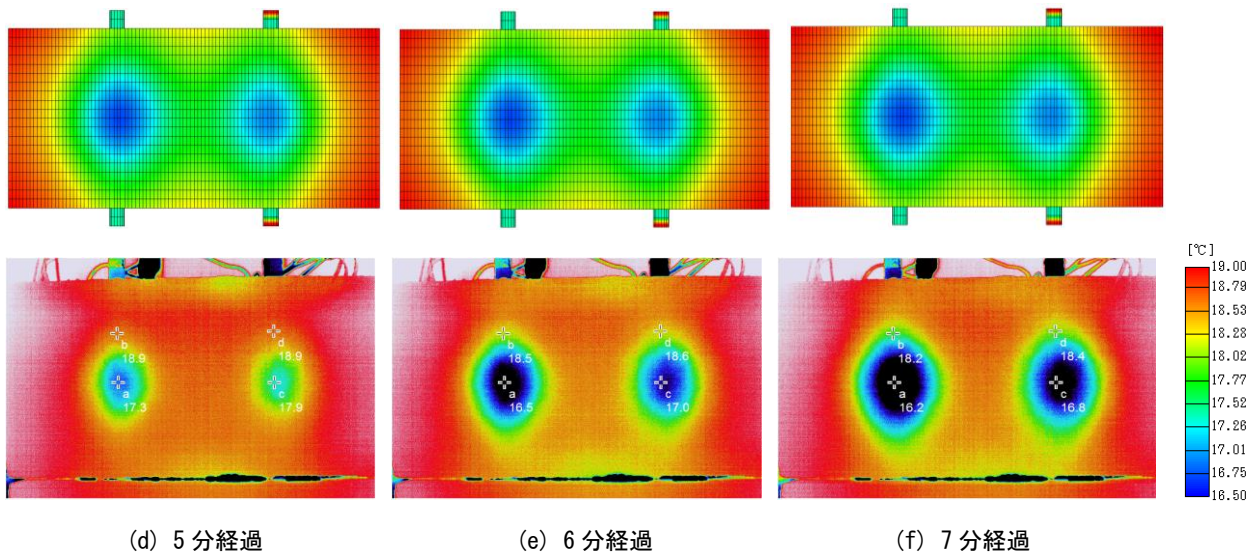


図-12 かぶり 34mm の供試体表面の温度解析モデル及び熱画像（続き）
 （左：健全側 右：腐食側 上図：解析モデル 下図：熱画像）

供試体表面の解析モデルと熱画像の経時変化を図-12 に示す。図には、上段に解析モデルを、下段に熱画像を示す。図-12 から、熱画像による実測データと解析データの温度変化は一致していないものの、両者とも健全側と腐食側の熱伝搬に違いが生じていることから、さらに検討を行っていけば、温度解析によって鉄筋腐食進行を予測する可能性があるのではないかとと思われる。

6. 結論

本研究では、赤外線を用いてコンクリート中の鉄筋腐食状況把握のため、健全鉄筋および腐食鉄筋を液体窒素を用いて冷却する手法を提案し、時間経過による温度変化の違いから鉄筋の腐食状況の評価手法の可能性について検討を行った。今回の検討で得られた結果を以下に示す。

- (1) 鉄筋単体の温度変化測定において、腐食鉄筋は健全鉄筋に比べ最低温度が高く、温度上昇速度は腐食鉄筋の方が小さい傾向を示した。
- (2) コンクリート供試体の温度変化測定において、コンクリート内部の鉄筋の温度が腐食鉄筋の方が低いにも関

わらず、供試体表面の温度は健全側の方が低くなる結果となった。これは、腐食生成物の比熱が大きく、熱伝導率が低いことから、腐食側のコンクリートへの熱伝搬が阻害されたのではないかと推察される。

- (3) 温度解析による供試体の温度変化において、コンクリート表面において、健全側と腐食側で熱伝搬が異なることから、解析による鉄筋腐食状況の評価をシミュレートする可能性を見出されたのではないかとと思われる。

今後、腐食厚さの違いによる熱伝達への影響を、実験を行い把握し、本手法による鉄筋腐食度の定量的な評価の可能性について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 白木悠祐, 堀江宏明, 谷口修, 大下英吉: 熱画像処理を用いた非破壊検査手法による部分的な鉄筋腐食評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp1741-1746, 2005
- 2) 2007 年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編 p.109