

報告 赤外線を用いた非破壊試験による鉄筋腐食状態把握のための検討

中村 美咲*1・新保 弘*2・野嶋 潤一郎*3・溝渕 利明*4

要旨: 本研究は、鉄筋の腐食部の有無によって熱特性に違いがあることに着目し、冷却後のコンクリート表面温度変化からコンクリート内部の鉄筋腐食状況を把握するための検討を行った。また、解析により現象を再現することで、腐食厚の変化に対する冷却速度の関係を検討した。検討の結果、腐食状態の違いが冷却後の表面温度変化に差異を及ぼすことが確認された。そこで、表面温度変化の推定式を作成することにより、鉄筋腐食状態の推定の可能性を見出した。さらに、本研究では冷却にドライアイスを用い、表面温度測定に赤外線カメラを用いることで、比較的簡便な非破壊試験方法を提案した。

キーワード: 非破壊試験, 鉄筋腐食, 赤外線, ドライアイス

1. はじめに

鉄筋腐食は、構造物の耐力低下や腐食膨張圧によるひび割れを生じさせる。そのため、構造物の管理者は定期的に検査を行い、鉄筋の劣化状態を把握しておく必要がある。しかしながら、現在広く用いられている非破壊による腐食検査手法は、鉄筋の腐食の有無、腐食速度を推定するものであり、鉄筋の腐食状態を定量的に評価することは難しい。一方、鉄筋の腐食状態を定量的に把握するための検査としては、コンクリートのかぶり部分をはつり出す破壊試験法が多く用いられており、構造物に損傷を与えることとなる。以上の点より、鉄筋の腐食状態を定量的に評価できる非破壊検査手法が求められている。

そこで本研究では、ドライアイスを用いてコンクリート表面を冷却し、冷却後の表面温度変化から内部鉄筋の腐食状態を定量的に評価する非破壊検査手法の検討を行った。

2. 研究概要

本研究では、鉄筋の腐食の有無によって、比熱や熱伝導率といった熱特性が異なるという既往の研究¹⁾に着目し、コンクリート内部の鉄筋腐食状態推定を行った。ここで、鉄筋が腐食している部分を腐食部とし、腐食していない部分を健全部と称することとする。健全部及び腐食部の熱特性を表-1に示す。表-1より、健全部は比熱が小さく熱伝導率が大きく、腐食部は比熱が大きく熱伝導率が小さいことがわかる。つまり、腐食部は健全部に比べ、冷えにくく冷気を伝えにくいといえる。このことが、内部鉄筋の腐食状態の違いが冷却後のコンクリート表面温度変化に差異を及ぼす理由として考えられる。

既往の研究²⁾より、液体窒素を用いて冷却後のコンクリート表面温度は内部鉄筋の腐食状態の違いによって差異が生じることが示されている。本研究では、液体窒素の代わりに比較的入手しやすいドライアイスを用いてコンクリート表面を冷却し、冷却後の表面温度変化を基に、推定式を求めることにより、コンクリート表面温度変化から鉄筋の腐食状態を推定する手法を検討した。また、再現性の確認にて推定精度の検討を行うとともに、実験条件を要因とした再現解析を行い、腐食量がコンクリート表面温度に与える影響についても検討を行った。

表-1 鉄筋健全部及び腐食部の熱特性

	比熱 (kJ/kg°C)	熱伝導率 (W/m°C)
健全部	0.60	83.5
腐食部	1.2	0.07

3. 実験概要

3.1 鉄筋埋設供試体を用いた室内試験

本検討では、健全鉄筋及び腐食鉄筋が埋設された供試体について、ペレット状のドライアイスが入った銅板容器を用いて10分間冷却し、冷却後のコンクリート表面温度の測定を行った。冷却効率を高めるために、供試体鉄筋直上位置と銅板容器の間には伝熱ゴムシートを設置した。ここで、鉄筋部分のみでの冷却が行えるように伝熱ゴムシートの幅は鉄筋幅に近いものとした。また、供試体・伝熱ゴムシート・冷却器間の密着性を高めるため、冷却器の上には重石を設置し、冷却器およびドライアイスと合わせ合計約20kg程度の力で圧着を行った。ドラ

*1 法政大学 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 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 (株)開発設計コンサルタント 茅ヶ崎技術事業本部 設備保全技術部 博士(工学) (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)

ドライアイス昇華量は約 12~14g/min と、総重量に比べても少ないため、ここではドライアイスの昇華による重石重量の変化は無視することとした。さらに、冷媒の損失を抑えるため、供試体や銅板容器の周囲には断熱材を設置した。冷却後のコンクリート表面温度の測定には焦

点距離を 25cm とした赤外線カメラを用い、表面温度が冷却前と同等の値となるまで 5 秒間隔で観測を行った。実験室の室温は 20°C、湿度は 60RH 一定とした。使用機器を図-1、試験状況を図-2 に示す。

供試体の寸法は 200×400×100mm であり、埋設した健全鉄筋及び腐食鉄筋には D16 異形鉄筋を用いた。腐食鉄筋は屋外暴露により錆を発生させ、腐食厚の測定には電子顕微鏡および 3D スキャナーを用いた。なお、鉄筋および供試体表面には温度測定のための熱電対が埋め込まれている。供試体概要を図-3 および表-2 に示すとともに、コンクリート配合を表-3 に示す。なお、細骨材は大井川水系陸砂、粗骨材には青梅産硬質砂岩、AE 減水剤にはマスターポゾリス 78S、AE 材にはマスターエア 202 を使用した。

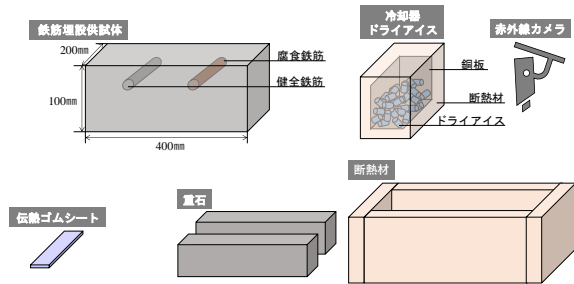


図-1 使用機器

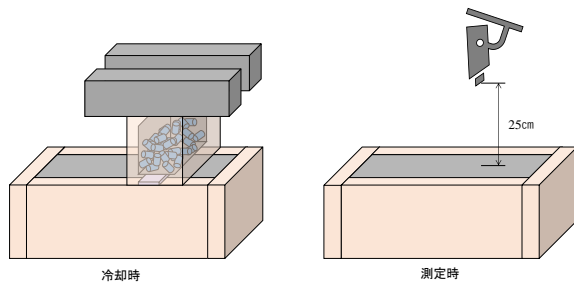


図-2 試験の様子

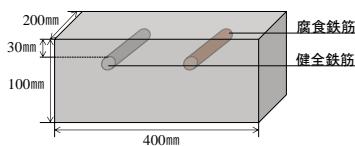


図-3 供試体概略図

表-2 供試体概要

試験鉄筋名	かぶり (mm)	腐食厚 (mm)
鉄筋 A	30	0.00
鉄筋 B		1.00
鉄筋 C		0.56
鉄筋 D	30(ひび割れ有り)	2.64

3.2 実験条件を要因とした再現解析

冷却期間中の冷却速度と腐食厚の関係についての解析を Step1、放熱期間中の放熱速度と腐食厚の関係についての解析を Step2 とした。どちらの Step においても、試験時の使用材料をモデル化した。Step1 の解析モデルを図-4、Step2 のモデルを図-5 に示す。また、解析条件に用いる熱特性は、室内試験結果から算定することとした。

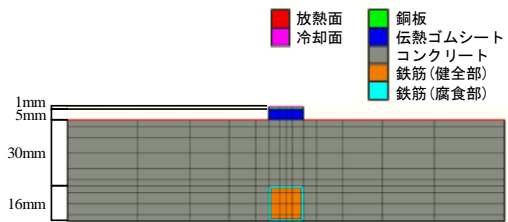


図-4 解析モデル (Step1)

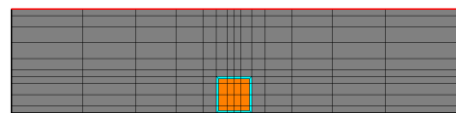


図-5 解析モデル (Step2)

表-3 コンクリート配合

打設 年度	鉄筋名	最大骨 材寸法 (mm)	スランブ (mm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m³)			
							水	セメント	細骨材	粗骨材
							W	C	S	G
2014	鉄筋 B	20	11.5	50	4.5	43	160	320	772	1051
2015	鉄筋 A		13.5							
	鉄筋 C		11.5							
	鉄筋 D									

4. 検討結果および考察

4.1 腐食状況の違いが鉄筋およびコンクリート表面の温度履歴に与える影響

鉄筋 A に対して行った 1 回目の試験を試験 1, 2 回目の試験を試験 2, 鉄筋 B に対して行った試験を試験 3, 鉄筋 C に対して行った試験を試験 4, 鉄筋 D に対して行った試験を試験 5 とし, 試験結果の比較・検討を行った。冷却開始時から冷却終了時までの鉄筋温度履歴を図-6 に示す。鉄筋は腐食が少ないほど冷えやすく, 腐食層が厚いほど冷えにくい傾向にあった。これは, 研究概要で述べた通り, 鉄筋健全部は比熱が小さく冷えやすい一方, 腐食した鉄筋は比熱が大きく冷えにくいと考えられる。次に, 鉄筋温度履歴とコンクリート表面温度履歴の関係について検討を行った。試験 1 と試験 4 の鉄筋およびコンクリート表面の温度履歴を図-7 に示す。なお, ここで示しているコンクリート表面温度履歴は, 供試体表面に埋め込まれている熱電対により測定したものであり, 赤外線カメラにより測定した結果とは異なる。図-7 から, 鉄筋温度とコンクリート表面の温度履歴は, 腐食厚が厚いほど冷えにくいという傾向を示している。これより, コンクリート表面温度から鉄筋の腐食状況を推定できる可能性が見いだせた。

4.2 室内試験における試験精度及び再現性の確認

試験の精度及び再現性を確認するため, かぶり 30mm, 腐食厚 0.00mm の鉄筋 A に対して行った 2 回の測定結果

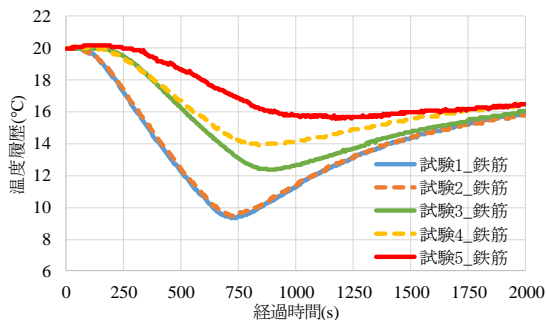


図-6 鉄筋中央部の温度履歴

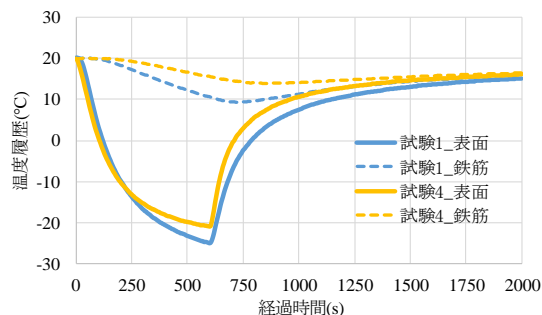


図-7 鉄筋およびコンクリート表面の温度履歴

を比較した。なお, これ以降に示すコンクリート表面の温度履歴は実験概要で述べた通り, 赤外線カメラを使用して測定した結果である。一般的に行われている赤外線を用いたコンクリートの劣化検査法では, 比較的広域の温度変化や熱の移動速度に対して評価を行うのに対し, 本研究ではごく狭い範囲の測定結果に対して評価を行った。そのため, 評価対象となる測定結果が, 測定ごとに変化しないことが重要となる。また, 健全鉄筋埋設供試

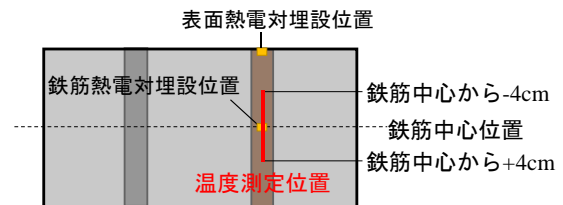


図-8 温度測定位置

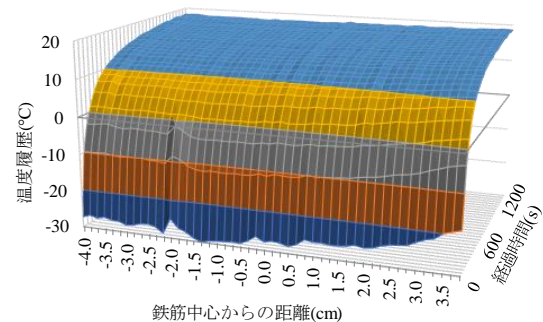


図-9 試験 1 の鉄筋直上部での温度分布

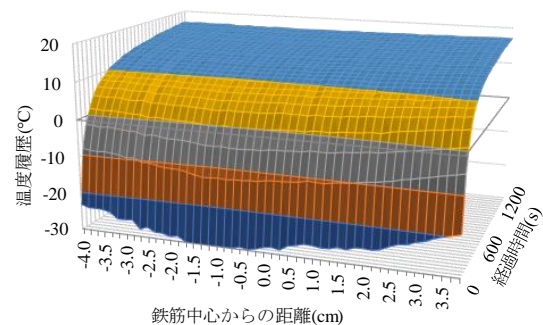


図-10 試験 2 の鉄筋直上部での温度分布

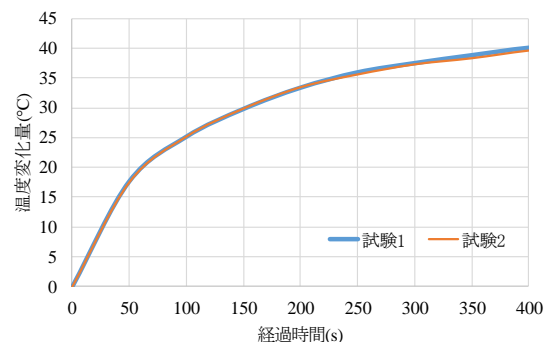


図-11 試験 1 と試験 2 の表面温度測定結果

体の試験結果は、腐食鉄筋埋設供試体の試験結果と比較する基準とした。

試験1と試験2において、供試体冷却後、赤外線カメラを用いて測定した鉄筋直上部の表面温度測定位置を図-8、測定結果を、それぞれ図-9、図-10に示す。図-9および図-10から、供試体の冷却が比較的偏りなく均一に行われていること、放熱時の温度も偏りなく均一に変化していることがわかる。

試験1と試験2の測定結果を図-11に示す。なお、比較のため原点が0°Cとなるよう、各点の測定値から冷却終了直後の温度を差し引いている。図-11より、試験1と試験2は同様の結果を示した。これにより、試験の再現性があるといえる。

4.3 試験結果

次に、鉄筋Aに対して行った試験1の結果と、鉄筋Bに対して行った試験を試験3および鉄筋Cに対して行った試験4の放熱時での温度変化の結果について比較した。表面温度測定結果を図-12に示す。図-12から、健全鉄筋の埋設してある試験1(鉄筋A)に対し、腐食鉄筋が埋設してある試験3(鉄筋B)および試験4(鉄筋C)のほうが、表面温度の変化量が小さくなる結果となった。これは前述したように、健全部の温まりやすく熱を伝えやすい性質によるものと推察される。つまり、健全鉄筋はドライアイスによって冷却され、放熱時には腐食した鉄筋に比べて放熱量が大きいために、表面温度の変化量が大きくなったと考えられる。一方、腐食部は温まりにくく熱を伝える性質を持つため、ドライアイスによって冷却されにくく、腐食層下の鉄筋健全部への熱の移動が少なく、結果的に表面温度の変化量が小さくなったと考えられる。

この腐食部の有無による表面温度測定結果の差異から、コンクリート表面の温度変化量から腐食厚を推定するための手法について検討を行った。

4.4 鉄筋直上にひび割れを有する供試体の試験結果

鉄筋直上にひび割れを有する鉄筋Dの供試体写真を図-13、図-14に示す。ひび割れ幅は最大1.00mmであっ

た。この供試体では、埋設した腐食鉄筋に塩分が残存しており、供試体作製後も鉄筋が腐食膨張を続け鉄筋直上位置にひび割れが生じたものと思われる。鉄筋Dに対して行った試験5の結果を図-15に示す。図-15より、表面にひび割れを有した鉄筋では温度変化の履歴は他の試験に比べ、放熱速度が速かった。試験5(鉄筋D)では腐食厚が2.64mmと厚く鉄筋自身あまり冷気を蓄えない一方、ひび割れ部の空気層とそれに接する部位で対流熱伝達が起こり、図-15のような結果になったのではないかと推察される。

4.5 推定式の作成

試験により得られた温度変化量に対して、以下の推定

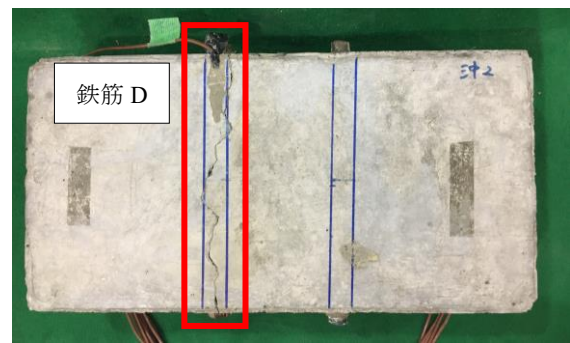


図-13 鉄筋D供試体写真



図-14 鉄筋D供試体写真

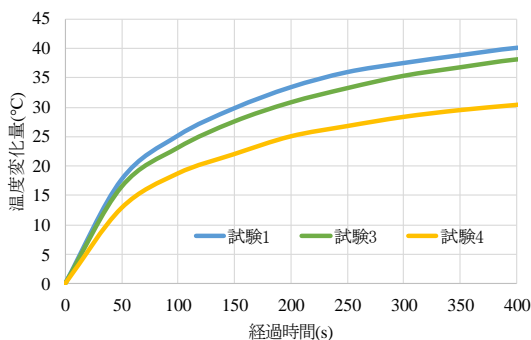


図-12 試験結果

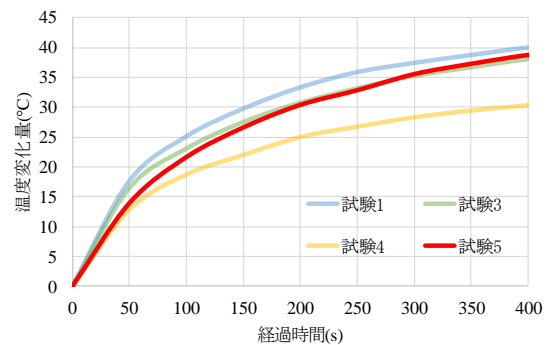


図-15 試験結果

式を用いて同定を行った。使用した推定式を式(1)に示す。

$$T = T_{\infty}(1 - e^{-\alpha t^{\beta}}) \quad (1)$$

ここで、 T_{∞} は測定開始から30分(1800秒)後の温度、 t は経過時間(s)とした。 α と β を変化速度に関する係数とした。測定値と同定した推定値の比較結果を図-16、図

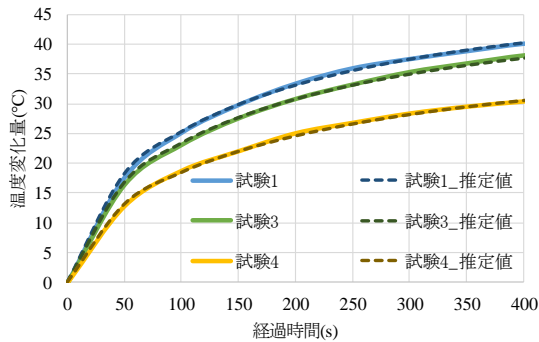


図-16 推定値との同定結果

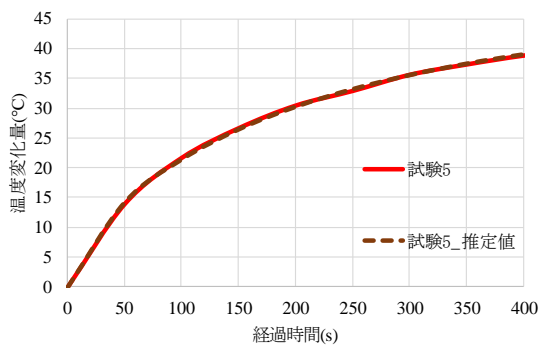


図-17 ひび割れを有する場合の推定値の同定結果

表-4 変数 $\alpha \cdot \beta$ と腐食厚 (mm)

試験名	腐食厚 (mm)	α	β
試験 1	0.00	0.0380	0.65
試験 3	0.56	0.0365	
試験 4	1.00	0.0335	
試験 5(ひび割れ有り)	2.64	0.0186	0.75

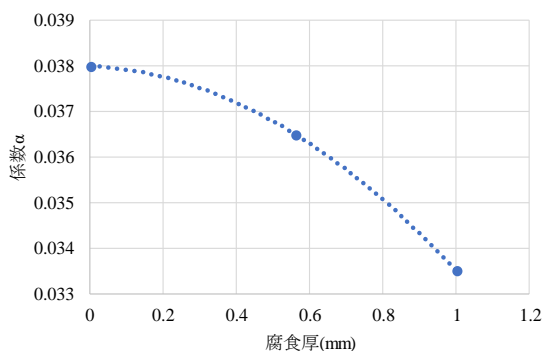


図-18 変数 α と腐食厚 (mm) の関係

-17 に示すとともに、係数 $\alpha \cdot \beta$ と腐食厚の関係を表-4 に示す。なお、この α と β は同定により得られたものである。表-4 より、供試体にひび割れがない場合、変数 β は 0.65 で一定となり、腐食厚の違いにより変化するのは、変数 α のみであった。そこで、ひび割れがない場合の係数 α と腐食厚の関係を図-18 に示す。図-18 より、腐食厚が増加すると係数 α の値は減少する傾向にあった。腐食厚と係数 α の関係を以下に示す。

$$x = -503701\alpha^2 + 3379.3\alpha - 55.677 \quad (2)$$

ここで、 x は腐食厚(mm)とする。試験により得た係数 α をこの近似曲線の式に代入することで、腐食厚の推定が行えると思われる。

4.6 再現性の確認結果

腐食厚の推定式を用いて、再現性の確認を行った。ここで、鉄筋 A に対して行った試験を試験 6、鉄筋 B に対して行った試験を試験 7、鉄筋 C に対して行った試験を

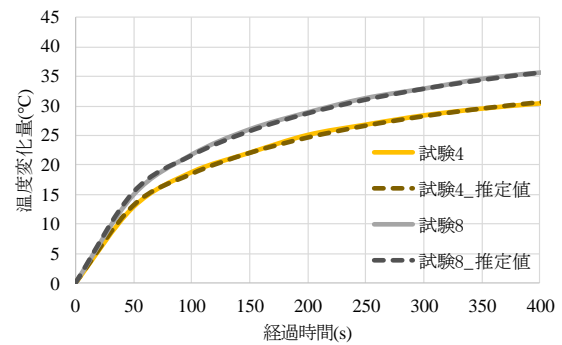


図-19 推定値との同定結果

表-5 変数 α と推定腐食厚(mm)

試験名	腐食厚 (mm)	α	推定腐食厚 (mm)	差分 (mm)
試験 6	0.00	0.0385	0.00	0.00
試験 7	0.56	0.0340	0.99	0.43
試験 8	1.00	0.0340	0.99	0.01

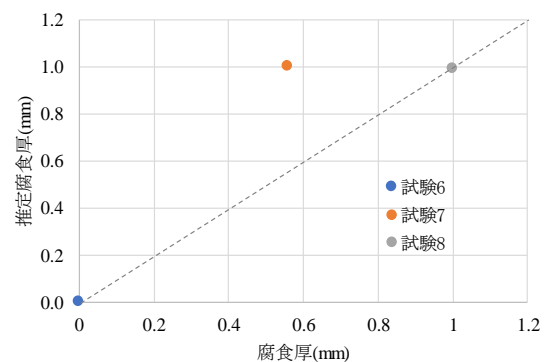


図-20 腐食厚 (mm) の推定結果

表-7 解析条件

	銅板	伝熱ゴムシート	コンクリート	鉄筋(健全部)	鉄筋(腐食部)
熱伝導率(W/m°C)	391	5.2	2.8	85.0	0.055
密度(kg/m³)	8800	3.2	2400	7850	5300
比熱(kJ/kg°C)	0.386	0.32	1.05	0.43	1.2

表-6 解析条件

	解放部	冷却部
外気温(°C)	20	-78.5
熱伝達率(W/m²°C)	14	310

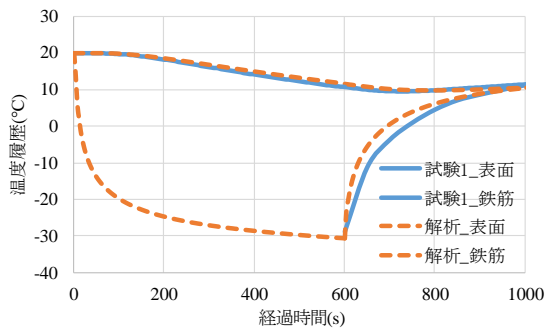


図-21 試験1の結果と解析結果

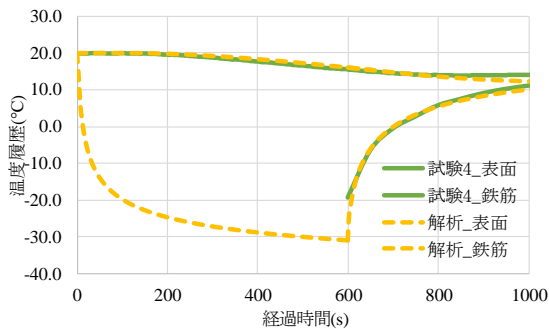


図-22 試験4の結果と解析結果

試験 8 とする。また、腐食厚の推定において α の値が 0.038 以上のとき、推定腐食厚が負の値になる。そのため、 α の値が 0.038 以上のときは、推定腐食厚を 0mm とする。試験 8 の試験結果を図-19、試験 6 および試験 7、試験 8 の推定腐食厚を表-5、推定腐食厚と実際の腐食厚の関係を図-20 に示す。図-19 および表-5 から、温度変化量の結果が異なる場合においても、係数 α は近い値になった。表-5 および図-20 より、試験 6 および試験 8 では腐食厚を精度よく推定することができた。しかし試験 7 では腐食厚を安全側に判定している。この要因につい

ては、今後の検討課題とする。

4.7 再現解析結果

試験より得られた結果から算定した解析条件を表-6 および表-7 に示す。腐食厚が 0.00mm の解析結果と試験 1 の結果を図-21 に、腐食厚が 1.00mm の解析結果と試験 4 の結果を図-22 示す。なお、解析には ASTEA MAXS を用いた。試験結果に対して解析による再現が概ね可能であることを確認した。今後は、さらなる精度向上のため、三次元での検討を行っていく予定である。

5. 結論

ドライアイスを用いてコンクリート表面を冷却し、冷却後の表面温度変化量から、コンクリート内部の鉄筋腐食厚の推定を検討した。その結果、腐食厚を推定できる可能性を見出した。以下に本検討で得られた結果を示す。

- (1) 健全鉄筋が埋設してある供試体の表面温度変化に対し、腐食鉄筋の埋設してある供試体の表面温度変化のほうが、変化量が小さくなった。鉄筋に関しても同様の結果となった。
- (2) ひび割れを有する供試体では、ひび割れがない供試体に比べ、表面温度変化が大きくなった。
- (3) 鉄筋埋設供試体を用いた冷却試験により、内部鉄筋の腐食厚を非破壊で推定する推定式を作成した。
- (4) 推定式を用いて腐食厚を推定した再現性の確認の結果、実測値に近い結果が得られた。
- (5) 再現解析により、鉄筋温度変化および表面温度変化が概ね可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 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の精度向上に関する研究, コンクリート工学年次大会論文集, Vol.38, No.1, pp.2175-2180, 2016
- 2) 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大会論文集, Vol.36, No.1, pp.2032-2037, 2014