

論文 熱画像処理に基づく鉄筋コンクリート部材の劣化性状評価システムに関する基礎的研究

茂木 淳^{*1}・一ノ瀬 晴幸^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨: コンクリート構造物の欠陥に対する維持管理は、耐久性を考慮するにおいて無視できない問題であり、中でもコンクリート構造物の鉄筋の腐食は寿命を左右する重大な劣化現象である。本研究は、鉄筋腐食に関する非破壊検査の技術向上を目的として、熱画像処理と熱伝導解析に基づく新たな劣化診断システムの開発に関する基礎的研究を行った。

キーワード: 非破壊検査, サーモグラフィー, 熱伝導解析, 鉄筋腐食

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の維持管理の重要性が高まり、より実用的かつ高精度な劣化診断技術が求められている。特に、鉄筋の腐食は水と酸素があるかぎり進行し、コンクリート全体の耐久性に大きな悪影響を及ぼすことになるのであるが、現在の鉄筋腐食に関する非破壊検査法は、腐食箇所による自然電位の変化を測定する手法である自然電位法が主流である。しかしながら、この手法は、コンクリート表面で測定される自然電位はかぶり部分の品質・性状に起因して生じる電位分も加算されるため、判定と実際の腐食状況とが一致しないことがあり、測定精度に大きな問題がある。したがって、より高精度で新たな診断手法技術の開発が急務となる。

従来、コンクリートの浮きなどの劣化現象¹⁾に対する非破壊検査手法としてサーモグラフィーを用いた熱画像処理手法がある。本手法はコンクリートとその内部に存在する浮きである空気或いは水の熱伝導率や比熱の違いによって生じる表面温度の違いを感知してコンクリートの浮き性状を推定するものである。例えば、鉄筋コンクリート構造物を構成する材料であるコンクリートと鉄筋に関して言えば熱伝導率は、それぞれ 2.50²⁾、12.5²⁾であり、比熱は 1.05²⁾、0.60²⁾

であるように、密度が大きい物質では、大きな熱伝導と小さな比熱を有しており、逆に密度が小さい物質では、小さな熱伝導率と大きな比熱を有しているわけである。

一般に、鉄筋が腐食するとその組織は非常に粗となり、その間には空気や水分が存在する状態となる。このことはすなわち、鉄筋の腐食領域においては、健全な鉄筋に比べて熱伝導率は小さく、比熱は大きくなる。したがって、コンクリート構造物中に存在する鉄筋に直接外部から熱を加えることによって、鉄筋自体の熱伝導、鉄筋からコンクリートへの熱伝導、コンクリート内の熱伝導により生じるコンクリート表面の温度は、コンクリート中のひび割れの存在や腐食した鉄筋の存在或いは鉄筋位置によって非常に不均一となるものと考えられる。

本研究ではサーモグラフィーによる熱画像処理と熱伝導解析を併用した鉄筋コンクリート構造物に対する新たな劣化診断システムの開発に関する基礎的研究であり、種々の腐食性状を有する鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材を作製し鉄筋自体を強制加熱することによるコンクリート表面温度の違いをサーモグラフィーによる熱画像処理により測定し、鉄筋腐食の有無を定性的かつ定量的に評価するとともに熱伝導解析を併用することにより鉄筋腐食性状を評価した。

*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*2 中央大学技術員 理工学部土木工学科 (正会員)

*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

水セメント比 (%)	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
55.5	20	12	45.5	159	257	840	1030

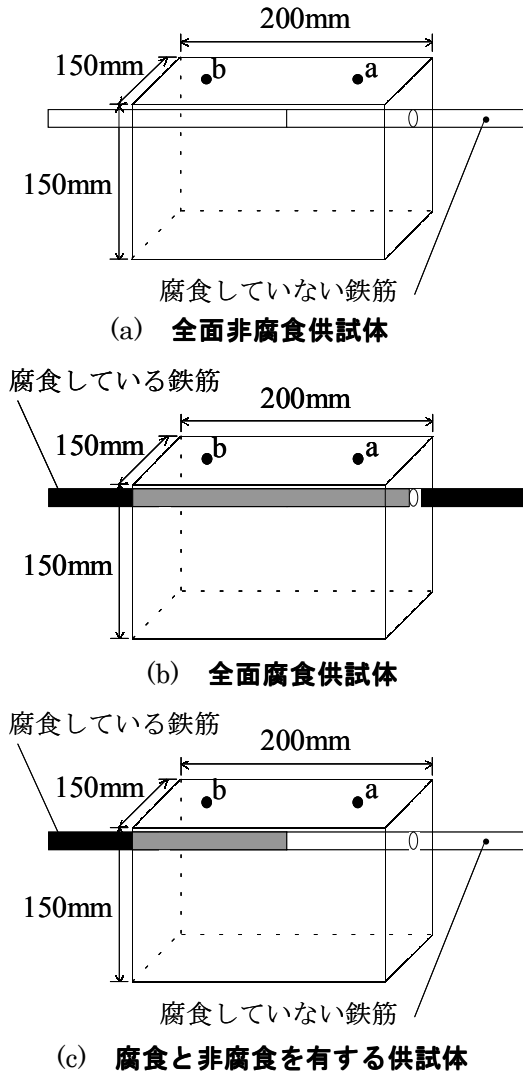


図-1 実験供試体

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験に用いた供試体は、図-1に示すように寸法 15×15×20cm の角柱供試体を用いており、供試体中にかぶり厚さ 3cm の位置に長さ 50cm にした D10 の異形鉄筋を配置した。コンクリートは配合強度 29.4N/mm²とし、鉄筋に関しては同図に示すように長さ方向に全面非腐食状態、全面腐食状態および鉄筋軸中心を対称として全面腐食および全面非腐食状態を有する3種類とした。なおコンクリートの配合に関し

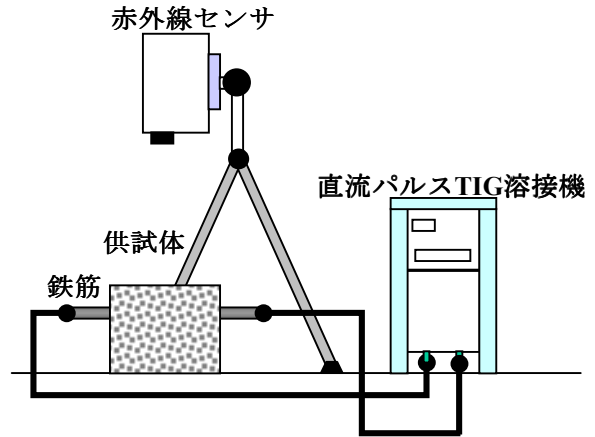


図-2 計測システム

表-2 赤外線センサの仕様

検出器	2次元非冷却センサ
測定精度	フルスケールの±2.0%
最小検出温度差	0.08℃
観測測定範囲	-20℃~100℃
フレームタイム	60フレーム/秒

ては、表-1に示すこととする。

2.2 実験方法

図-1に示した供試体の鉄筋部分の両端から、直流パルス TIG 溶接機を用いて、200A の出力電流を流し、鉄筋部分のみを 45℃まで一様に加熱した。鉄筋表面温度はコンクリート近傍部の鉄筋を測定し、温度管理を行った。鉄筋への加熱は、外気温の影響の防止および鉄筋に供給される熱のみをコンクリートに直接伝えるために断熱材として発泡スチロールを用い、鉄筋とコンクリートの底面部、側面部および上面部を全て覆った状態で行った。コンクリート表面温度の測定は、図-2に示すシステムによって出力電流を流し鉄筋を 45℃まで温めてから5分間放置した状態で上面部の発泡スチロールを取り除いた時点から開始し、測定時間は20分とし、測定インターバルは1分とした。コンクリート表面の温度測定には赤外線センサを使用し、その性能に関しては表-2に示す。また、測定箇所に関しては図-1に示すように、コンクリー

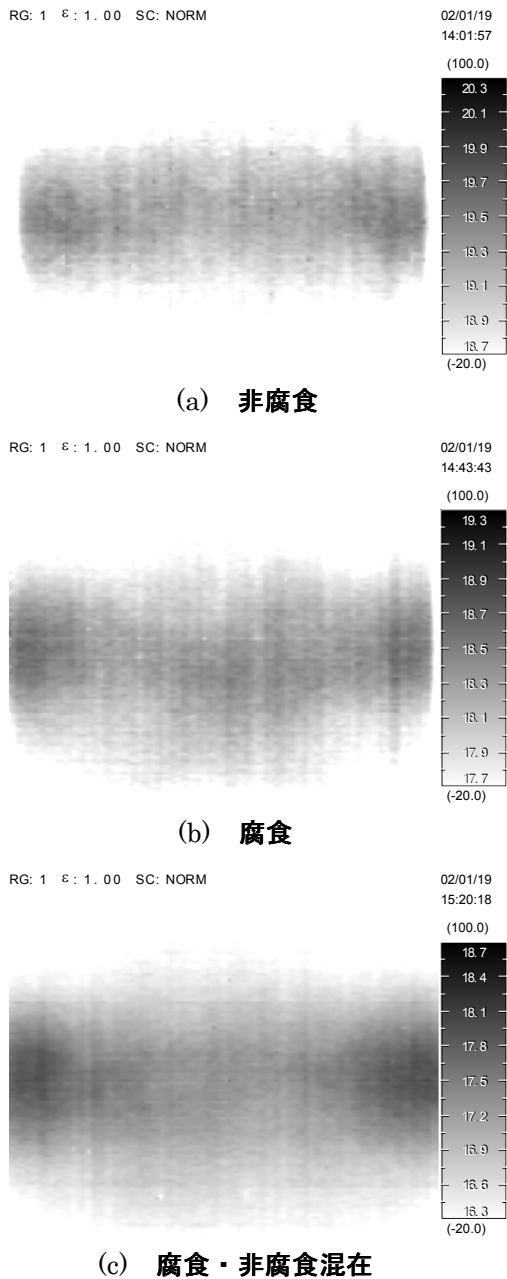


図-3 200秒時点での供試体表面の熱画像

ト上面部の中心と鉄筋の鉛直方向との交点を取り、その交点から左右に同距離の箇所(1点ずつ(a, b点)置いた。供試体から赤外線センサまでの測定距離を100cmとし、室温は16°Cの一定条件で実施した。なお、本計測においては、コンクリートの表面温度を評価する際、コンクリート表面色に依存する放射率の変化を無視し、放射率を一定($\epsilon=1.00$)とした。本実験では鉄筋への強制加熱手法として、電流装置を使用した。加熱手法は今後の課題としたい。

2.3 腐食状態によるコンクリート表面温度

図-3 (a), (b) および (c) は強制加熱終了から200秒経過した時点での供試体表面の熱画像をそれぞれ腐食無し、腐食有りおよび腐食有りと腐食無しが混在する鉄筋におけるものを示したものである。この熱画像から鉄筋腐食が明確に表れていないこと、また、鉄筋腐食の有無を判断する上で時間歴が必要であるため図-4 (a), (b) および (c) に腐食無し、腐食有りおよび腐食有りと腐食無しが混在する鉄筋における強制加熱後の自然冷却過程におけるコンクリート表面温度の経時変化をそれぞれ示した。図-4 (a) および (b) の比較から、腐食の有無によって、コンクリート表面の初期温度が約1°C異なり、自然冷却過程における温度低下の割合は同図 (d) から、腐食有りの方が若干ながら緩やかな傾向を示している。すなわち、熱伝導率が高いと熱を供給され易く放出し易いこと、逆に熱伝導率が低ければ熱が供給され難く放出し難いという観点に立脚するならば、鉄筋腐食の有無によってコンクリート表面温度および温度低下割合が異なり、腐食を有する場合には断熱材的な性状を示すことになる。

上述の性状を加味することにより、腐食および腐食無しが混在する状態の図-4 (c) におけるa点およびb点での比較を行う。図中に示すa点は鉄筋腐食無し領域およびb点は腐食有り領域における冷却過程のコンクリート表面温度を示している。なお、同図には示していないが、鉄筋が全面腐食している場合或いは全面腐食していない場合においては、通電によって鉄筋の温度が一様に上昇することに対して、本供試体においては、腐食有りは45°C、腐食無しは34.4°Cという鉄筋表面温度が測定された。熱源とする鉄筋の温度が約10°C違うにも関わらず、コンクリートの初期表面温度はほぼ同様の値が測定された。さらに測定箇所b点のコンクリート表面温度がa点と比較すると約300秒まではb点の方が高い温度を示しているものの、それ以降に関してはほぼ変わらない温度を示している。上述の結果を生じたことは腐食性状の熱伝

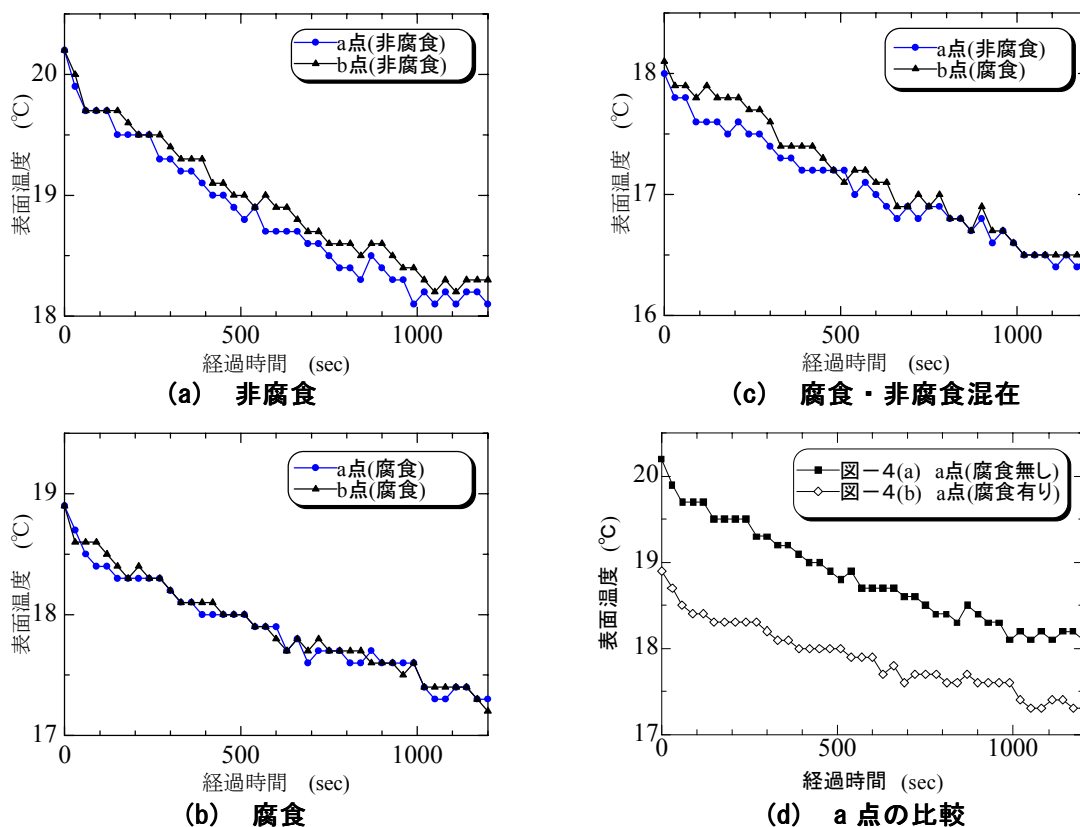


図-4 供試体表面の経時温度変化

導率と比熱の差異によるものである。熱伝導率と比熱という観点に立脚するならば、腐食した鉄筋では熱伝導率が低く比熱が高いため、供給した熱が逃げ難く保温効果があると考えられるためである。以上のことから、鉄筋の腐食の有無によって熱伝導率と比熱に差異が生じ、鉄筋への強制加熱を行うことにより、コンクリート表面の温度性状が異なるわけである。すなわち、腐食した鉄筋の場合には、腐食していない鉄筋に比べて、コンクリート表面の温度が低くなるとともに、時間の経過によるコンクリート表面温度の低下割合が小さくなるわけである。そこで、次章ではこのような鉄筋腐食の有無によるコンクリート表面の温度性状を熱伝導解析により評価することにする。

3. 熱伝導解析に基づく表面温度性状

コンクリート内部の鉄筋の加熱に伴う温度上昇後に生じるコンクリート冷却経過時間に対する熱伝導率に基づく表面温度変化の評価を図-1(a)~(c)に示すような鉄筋の各状態におい

て実施した。

解析モデルは、かぶり 3cm の位置に図-1に示すような全面非腐食、全面腐食および腐食・非腐食を有する鉄筋の状態を想定する。15×15×20cm の形状寸法に対する 1/2 モデルとし、3次元解析を実施した。なお、本解析に用いた解析モデルを図-5および図-6に示す。

本解析に用いた熱力学的特性を表-3に示す。熱伝導率に関しては、非腐食状態の鉄筋は一般的な値である $12.5(\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C})^2$ とし、全面腐食した鉄筋に関しては、本実験からは定量的判断が困難であることより、非腐食の鉄筋の $1/10$ の値である $1.25(\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ を適用することとした。それぞれ、比熱に関しても、鉄筋非腐食状態では $0.60(\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^2$ に対して腐食状態では 10 倍の値である $6.0(\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ を解析パラメータとして適用させることとした。

3.1 解析のフローチャート

本実験に基づく熱伝導を考慮した解析の流れを、以下のようなフローチャートに示すこととする。

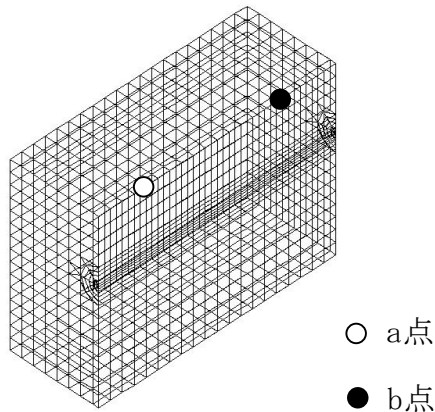


図-5 解析モデル

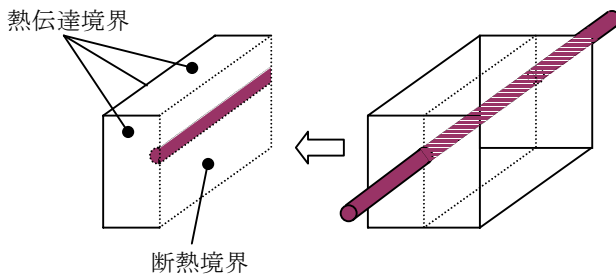


図-6 境界条件

表-3 解析に用いた熱力学的諸特性

材料	熱伝導率 (W/m・℃)	比熱 (kJ/kg・℃)
コンクリート	2.50	1.05
鉄筋 (腐食なし)	12.5	0.60
鉄筋 (腐食あり)	1.25	6.0

1)鉄筋に直接加熱を与え、図-1(a)~(c)に示す全てのケースにおいて45℃で均一な状態を仮定する。

なお、実験においては図-1(c)に示す腐食および非腐食が混在するコンクリートの強制加熱に伴う熱源としての表面温度は、2.3において述べたように腐食状態と非腐食状態とで温度のばらつきを生じたが、本解析においては熱源として与えた温度は45℃の一定値とした。

2)強制加熱後から5分経過後に供試体上面に配置された断熱材である発泡スチロールを取り除く過程は、熱伝達率を1.74²⁾から11.63²⁾(W/m・℃)に変化させることにより表現する。すなわち発泡スチロールの熱伝達率である

1.74から外気温の熱伝達率11.63に転換を行う。
3)断熱材を取り除くことにより変化した熱伝達率を用いることにより、5~25分間の冷却過程の温度変化に関するコンクリートの温度解析を実施する。

3.2 解析結果

本実験フローチャートに従い、鉄筋の各状態における温度解析に対する検討を行う。なお、鉄筋の腐食領域は、鉄筋表面から1mmまでを仮定したものである。

図-7~10は、それぞれ全面非腐食、全面腐食および腐食・非腐食を有する鉄筋を熱源とした場合におけるコンクリート表面温度の冷却過程温度変化の解析結果である。図-7~9は前述の腐食領域を鉄筋表面から1mmの深さと仮定したものであり、図-10は3mmまでの領域とすることで腐食領域に伴うコンクリート表面の冷却過程温度変化を比較できるようにしたものである。

まず、図-7,8に示すように鉄筋状態が全領域において熱伝導率が均一であるためにa点およびb点において温度履歴に差異を生じていない。しかしながら、鉄筋の腐食の有無に依存して、初期温度および温度冷却勾配に差を生じており、本実験結果の傾向を精度良く評価している。

次に、図-9においてはその鉄筋状態に依存して、初期温度は同一値を示しているものの徐々に温度履歴に差が生じ、最終的に約0.2℃の温度差を示している。また、aおよびb点の勾配を比較すると、b点勾配が緩やかであることが分かる。これは熱伝導および比熱が異なることによりコンクリート上面に与える熱量が異なるため、勾配に差が生じたものと考えられる。

さらに、図-10は、図-9の腐食・非腐食が混在する鉄筋腐食状態に対して、腐食部では鉄筋表面から3mmの深さまで腐食が進行したと仮定し腐食程度をパラメータとして変化させた解析結果を示している。腐食が進行することによって熱伝導率の低下すなわち図-9と比

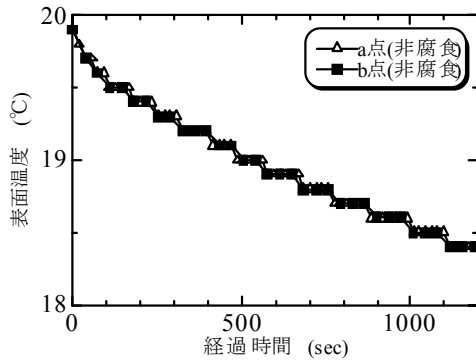


図-7 非腐食鉄筋を熱源とする
コンクリート表面温度～経過時間関係

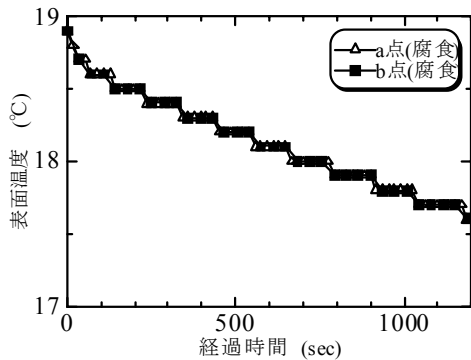


図-8 腐食鉄筋を熱源とする
コンクリート表面温度～経過時間関係

較して冷却過程の温度勾配が緩やかになっている。また、非腐食部での初期温度が若干低いことが分かる。これも熱伝導および比熱に立脚するならば、コンクリートに与える熱量が異なることにより初期温度および冷却過程の温度勾配に差異を生じるためである。

本解析による比較を実施した結果、熱源としての鉄筋からの強制加熱によるコンクリート表面温度、温度冷却勾配はその腐食状態に依存していることが確認された。

4. まとめ

本研究では、非破壊検査としての技術向上を目的として、鉄筋状態に起因する部材としてのコンクリートの温度変化による評価手法として鉄筋に対して直接強制加熱を作用させることにより、その温度冷却過程において生じる熱伝導率相違評価を行ない、それに基づく基礎的な理論構築および解析的評価を実施した。

本研究から得られた結果を以下にまとめる。

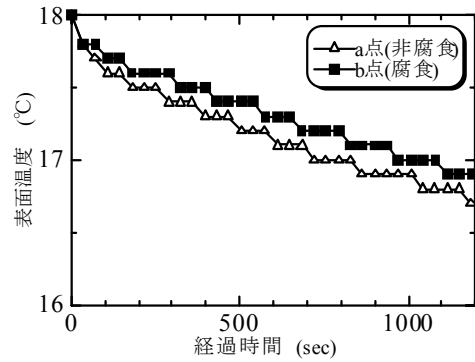


図-9 腐食(1mm)・非腐食を熱源とする
コンクリート表面温度～経過時間関係

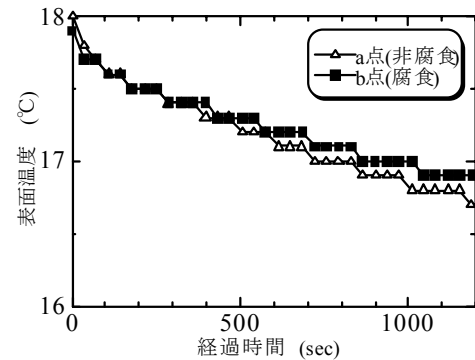


図-10 腐食(3mm)・非腐食を熱源とする
コンクリート表面温度～経過時間関係

- (1)本実験結果により、コンクリート内部に存在する鉄筋の温度変化が生じるに伴い、コンクリートの温度変化に対しても影響を及ぼしていることが確認された。
- (2)コンクリート部材としての熱伝導率は、鉄筋に対する強制加熱後の冷却過程において、鉄筋状態すなわち鉄筋の腐食の有無により違いを生じていることが確認された。
- (3)鉄筋の腐食性状の違いにおいて解析的評価を実施した結果、鉄筋の熱伝導率および比熱の違いを詳細に評価しうる結果を示した。

参考文献

- 1) 高羅信彦，魚本健人：温度解析に基づいたサーモグラフィー法によるコンクリート中の空隙および斜めひび割れの検査方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.613-618，2001
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告集，1985