

## 電磁誘導加熱を利用した欠陥等の検出に関する研究

谷口 修\*<sup>1</sup>, 重松 文治\*<sup>2</sup>, 堀江 宏明\*<sup>3</sup>, 大下 英吉\*<sup>4</sup>

### A Study for Defect Detection in Concrete due to Electromagnetic Heating Induction

Osamu TANIGUCHI\*<sup>1</sup>, Bunji SHIGEMATSU\*<sup>2</sup>, Hiroaki HORIE\*<sup>3</sup> and Hideki OSHITA\*<sup>4</sup>

**要旨:** 本研究は, コンクリート中の鉄筋を強制加熱し, コンクリート表面温度変化を測定することによってかぶり部分に存在する空洞や鉄筋腐食を診断する非破壊検査手法(以下:本手法と称す)について検討を行った. 非破壊・非接触で鉄筋を加熱することが可能な電磁誘導加熱を用い, 鉄筋位置, 空洞および鉄筋腐食診断についてそれぞれ実験を行い, 本手法の適用性評価を行った.

**キーワード:** 非破壊検査, 赤外線サーモグラフィ, 電磁誘導加熱, 鉄筋位置, 空洞, 鉄筋腐食

#### 1. はじめに

本研究は, コンクリート内部に配置された鉄筋に対して強制加熱を行い, 鉄筋からの熱伝導により変化するコンクリート表面温度を赤外線サーモグラフィで測定することによって, かぶり領域に存在する浮き, 空洞および鉄筋の腐食の有無といった複数の劣化要因を高精度に測定可能とする手法の構築を目的としたものである.

従来の著者らの研究<sup>1),2)</sup>では, 鉄筋の加熱方法としてコンクリートをはつることによって鉄筋を露出させ, その鉄筋に電流を通電することにより, 鉄筋を発熱させていた. したがって, 本手法を既設のコンクリート構造物に適用する際にも鉄筋に通電用の電極を設置するためにコンクリートの一部をはつらなければならず, コンクリート構造物に少なからず損傷を与えるという点で問題がある. さらに, 鉄筋の継手箇所や鉄筋交差部では抵抗を有するため過度に発熱が生じるため, 鉄筋網に対して一様に加熱することが困難であり, 単一鉄筋

部材での診断が限界であった. このようなことから, 上述した問題点を解決すべく新たな加熱手法の確立が急務であった.

そこで本研究では, コンクリート内部の鉄筋を非破壊・非接触で加熱可能な方法として電磁誘導加熱を利用することとしたものである. まず電磁誘導加熱の原理および加熱特性を示し, 次に電磁誘導加熱を利用した鉄筋位置および空洞診断について実験を行った. さらに部分的に腐食した鉄筋を有する試験体を用いて鉄筋腐食診断実験を行った. 以上の結果から本手法の適用性について検討を行った.

#### 2. 電磁誘導加熱

##### 2.1 電磁誘導加熱の原理

電磁誘導加熱は, コイルに高周波電流を負荷することによってコイル周辺に交番磁界が発生し, 交番磁界中の磁性体(鉄筋)にうず電流が発生し, 発熱するものである.

\*1 五洋建設(株)技術研究所 構造耐震チーム 主任

\*2 五洋建設(株)本社機械部 部長

\*3 中央大学大学院 理工学研究科 修士課程

\*4 中央大学 理工学部 教授

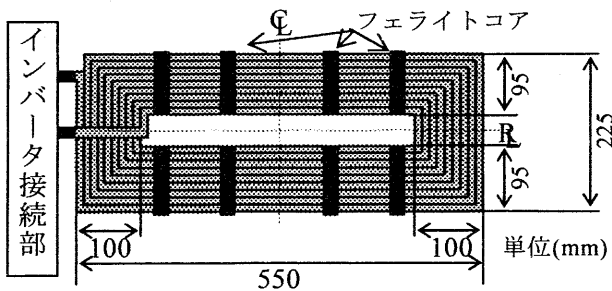


図-1 電磁誘導コイル

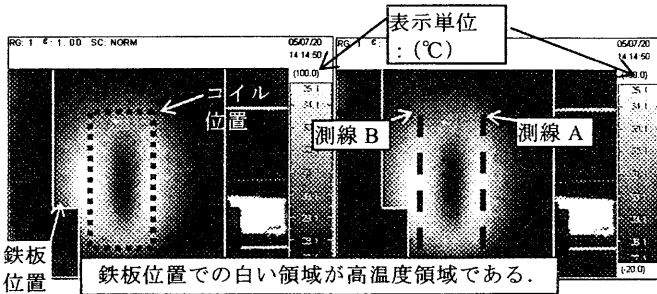


図-2 鋼板加熱の熱画像

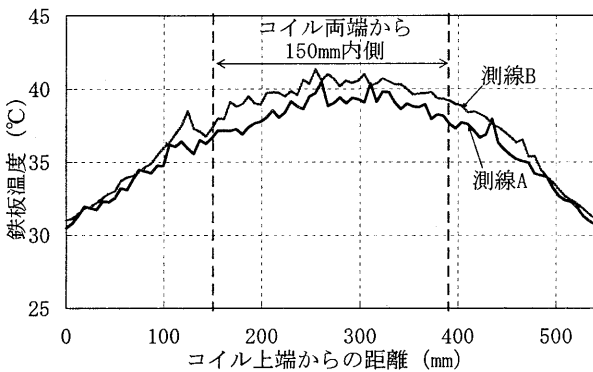


図-3 鋼板加熱の温度分布 (加熱開始 30 秒後)

電磁誘導加熱は、通称 IH 調理器具と呼ばれる金属鍋の加熱や金属の熔融炉などに用いられており、加熱効率が優れており、急速な加熱が可能であるとともに、加熱の制御が容易であるという特徴がある。本研究では、コンクリート表面に設置したコイルによって非破壊・非接触でコンクリート中の鉄筋のみの加熱を試みるものである。

## 2.2 コイル形状、加熱装置

本研究に用いたコイルは、図-1 に示すように矩形形状のコイルである。コイルは直径 10mm の銅管で構成されており、高周波電流の通電によってコイル自体が加熱することから冷却水を通水する方式となっている。コイルに負荷する高周波電流は、表-1 に示す高周波インバータによって商用電源を変換したものである。

表-1 電磁誘導加熱装置

|        |                       |
|--------|-----------------------|
| 入力     | 3φ AC200/220V 50/60Hz |
| 入力電源容量 | 26KVA                 |
| 出力電圧   | 1000 Vmax             |
| 出力電流   | 230 Amax              |
| 電力     | 20kW                  |
| 周波数    | 10~40kHz の一波          |
| 冷却方式   | 強制冷却                  |

表-2 赤外線サーモグラフィの仕様

|         |               |
|---------|---------------|
| 走査角     | 水平 29° 垂直 22° |
| 瞬時視野角   | 1.58mrad      |
| 検出器     | 2次元非冷却センサ     |
| 測定波長    | 8~14μm        |
| 測定温度範囲  | -40°C~120°C   |
| 最小検知温度差 | 0.06°C        |
| 有効画素数   | 280×240 画素    |

## 2.3 加熱特性

### (1) 鋼板の加熱

図-1 に示したコイルの加熱特性を把握するためにコイルから 150mm の位置に厚さ 2mm の鋼板を配置し、加熱電力は 1kW として鋼板の加熱温度性状を測定した。使用した赤外線サーモグラフィの仕様は表-2 に示す。

加熱開始 30 秒後の鋼板の熱画像を図-2 に示す。熱画像から加熱した温度分布が比較的均一であると考えられる測線 AB 上における温度分布を図-3 に示す。コイル上下端から 150mm 以上離れた部位では鋼板の温度分布の差が 3°C 以内となりほぼ均一に加熱されていることがわかる。なお、測線 A,B はコイル端部に対応する箇所である。

### (2) 鉄筋加熱

コイルの加熱温度分布特性を鉄筋で確認するために図-4 に示すようにコイル長辺の両端置に鉄筋を配置して加熱を行った。コイルと鉄筋間の距離は 50mm、室温は 29°C 一定、コイルの負荷電力は 2kW とした。使用した鉄筋は D16(SD295A) である。

加熱開始 60 秒後の鉄筋 A および B の鉄筋表面の温度分布を図-5 に示す。コイル両端からそれぞれ 125mm 内側の範囲内では鉄筋の温度差は 3°C 以内となっており、ほぼ均一に加熱されている。そ

表-3 コンクリートの配合

| Gmax<br>(mm) | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     |     | 空気量<br>% | スランプ<br>(cm) |
|--------------|------------|------------|-----------------------------|------|-----|-----|-----|----------|--------------|
|              |            |            | 水                           | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 |          |              |
| 20           | 60         | 43         | 162                         | 270  | 851 | 995 | 2.7 | 5.0      | 12           |

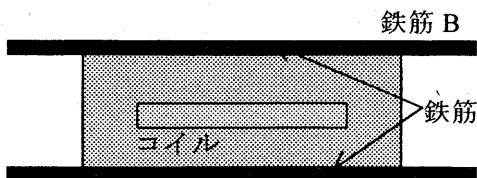


図-4 鉄筋の加熱位置

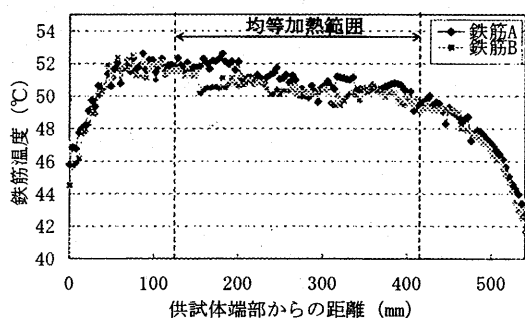


図-5 鉄筋加熱時の温度分布

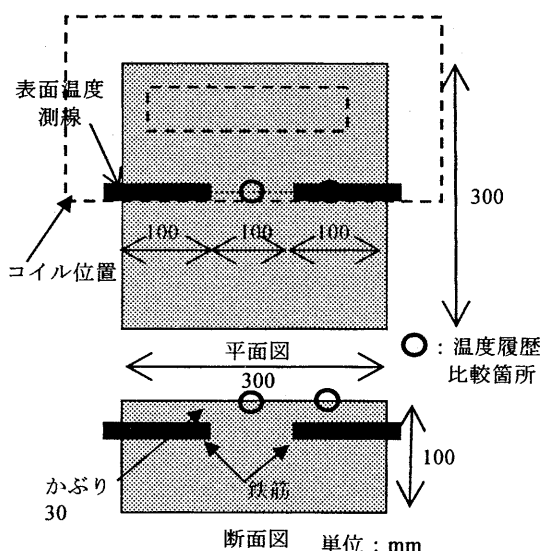


図-6 鉄筋位置診断用試験体

ここで本研究では、図-5 に示した均一加熱範囲内での結果について検討を行うこととする。

### 3. 鉄筋位置の診断

#### 3.1 実験概要

本手法による鉄筋位置の診断を目的として実験を行った。実験に使用した試験体は、図-6 に示すように大きさは 300mm×300mm×100mm であり、かぶり 30mm の位置に鉄筋 D16(SD295A)を配置した。鉄筋が存在しない領域は、試験体中心部の

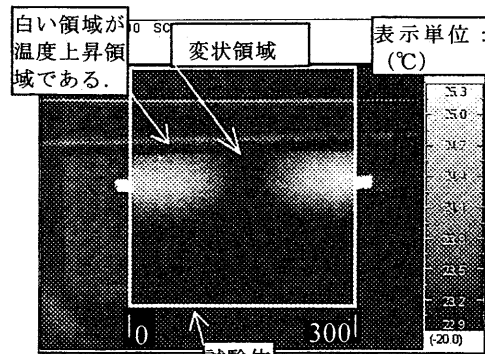


図-7 加熱終了 300 秒後の熱画像

100mm である。

鉄筋の加熱は、コイルに 36 秒間高周波電流を負荷し、負荷電力は 5kW とし、室温 23°C の一定温度下で行った。加熱終了時点での露出部での鉄筋加熱温度上昇量は 25°C である。コンクリート表面温度の測定は、赤外線サーモグラフィにより行った。加熱装置、電磁誘導コイル、赤外線サーモグラフィは、前章の実験と同じものを使用している。なお、本試験体に用いたコンクリートの配合を表-3 に示す。

#### 3.2 コンクリート表面温度

加熱終了 300 秒後の熱画像を図-7 に示す。鉄筋が存在する箇所（試験体端部から 280mm 付近）と鉄筋が存在しない箇所（試験体中心部）のコンクリート表面温度に違いが生じている。図-8 は、試験体端部から 280mm の位置における鉄筋直上のコンクリート表面温度履歴と試験体中心位置における鉄筋が存在しない箇所のコンクリート表面温度履歴である。加熱終了 300 秒後に鉄筋が存在する箇所の表面温度が最大となっている。この時刻における鉄筋軸上のコンクリート表面温度分布を示したものが図-9 である。鉄筋が存在しない試験体中心付近では、温度上昇がまったく見られないが試験体端部から 200mm 付近の鉄筋位置では、2°C 程度の温度上昇が見られる。また、試験体端部から 100mm、200mm 付近では、鉄筋が存在するものの表面温度が低下している傾向にある。これ

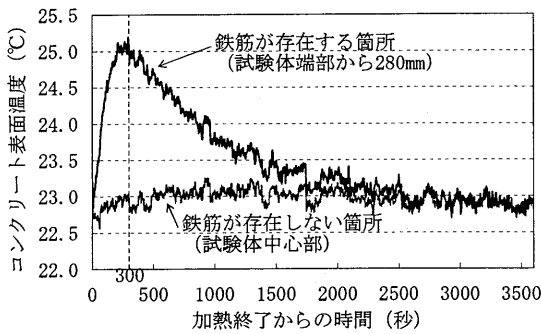


図-8 コンクリート表面温度履歴

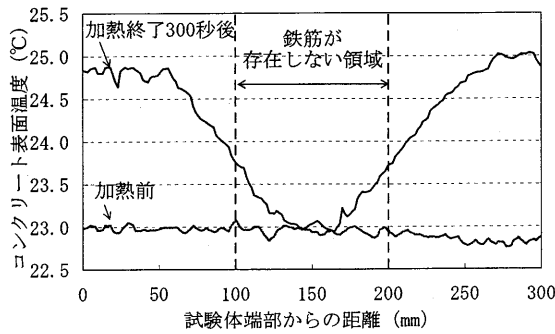


図-9 コンクリート表面温度分布

は、鉄筋が存在しない低温度領域に鉄筋からの熱が伝わるため、鉄筋端部付近のコンクリート表面温度が低下するものと考えられる。

以上の結果から本手法を用いることによって熱画像上から鉄筋位置を診断することが可能である。

#### 4. 空洞位置の診断

##### 4.1 実験方法

コンクリート内部に空洞を有する試験体を対象として電磁誘導加熱による本手法の適用性検討を行う。本実験に用いたコンクリート試験体は、図-10に示すように570×300×180mmの形状をした試験体であり、かぶり厚さ30mmの位置に鉄筋D16 (SD295A)を水平方向に配筋し、空洞を実験的に模擬するために50×50×10mmおよび30×30×10mmの形状寸法をした発泡スチロールを鉄筋上に配置した。なお、本試験体では模擬空洞として発泡スチロールを使用しているが、これは発泡スチロールの熱的特性が空気と同様であるためである。

鉄筋の加熱は、電磁誘導コイルへの負荷電力を2kWとし、試験体外部に露出した鉄筋の温度上昇量が約20°Cになるまで加熱した。加熱時間は300

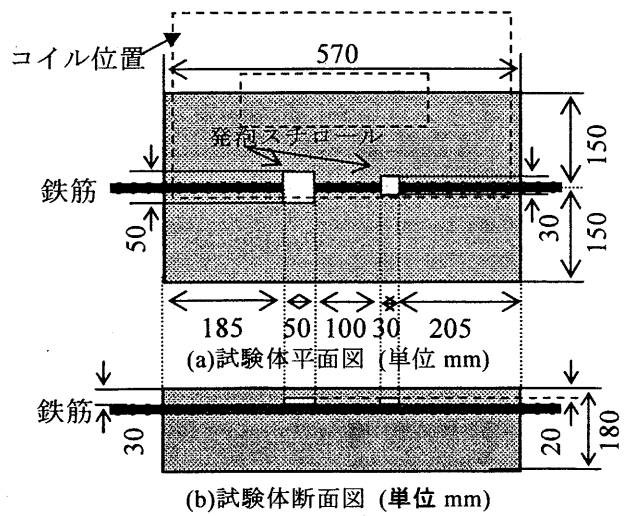


図-10 模擬空洞試験体

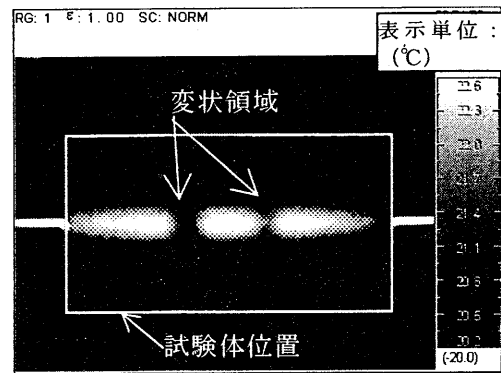


図-11 加熱停止直後の熱画像

秒である。コイルは図-10に示すようにコイル端部が鉄筋上となるように試験体上に設置して鉄筋加熱を行った。

コンクリート表面温度の測定は、赤外線サーモグラフィにより加熱終了後から5秒間隔で90分間行った。試験体から赤外線センサまでの距離は2500mmとし、室温は20.5°Cの一定条件で実施した。加熱装置、電磁誘導コイル、赤外線サーモグラフィは、前章の実験と同じものを使用している。なお、本試験体に用いたコンクリートの配合を表-3に示す。

##### 4.2 コンクリート表面の温度性状

図-11は、加熱終了直後における試験体表面の熱画像である。加熱終了時において、既に鉄筋からの熱がコンクリート表面に伝わっており、コンクリート表面温度に差異が生じている。空洞箇所表面温度は、30mm×30mmに比べ50mm×50mmのほうが低いことがわかる。

図-12は、試験体中央部の健全箇所、30mm×

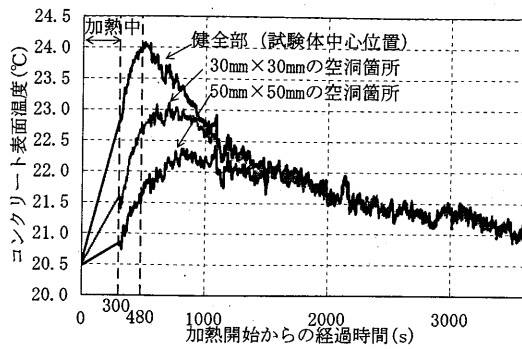


図-12 コンクリート表面の温度履歴

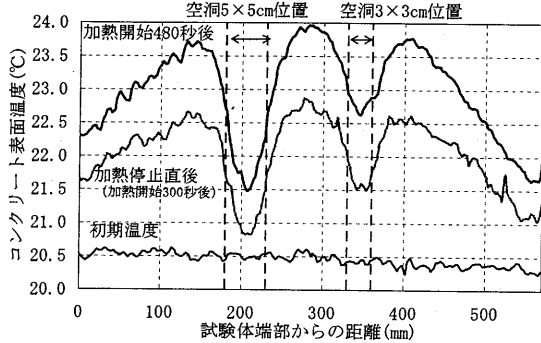


図-13 コンクリート表面の温度分布

30mm および 50mm×50mm の空洞位置のコンクリート表面温度履歴であり、空洞の大きさによってコンクリート表面温度の最大値に差異が生じていることがわかる。また、最高温度に達する時間は、空洞が大きくなるほど遅くなる傾向が見られる。これは、空洞直上において鉄筋からの熱が空洞によって妨げられるため、空洞が大きいほど空洞周辺部から空洞直上に伝わる熱の流入に時間を要するためである。なお、図-12 において加熱中はコンクリート表面にコイルを設置していることから、加熱開始から加熱終了までの間は、コンクリート表面温度を補間している。

図-13 は、加熱前、加熱停止直後、加熱開始 480 秒後の鉄筋軸方向に沿ったコンクリート表面温度分布を示したものである。空洞箇所の温度低下は、空洞の大きさよりも若干ではあるが広がっている。これは、熱伝導が小さい空洞が鉄筋直上に位置しており、鉄筋に与えられた熱が同心円状に広がることから、空洞にて遮断される熱伝導の影響が空洞部周辺にも及ぶためである。このような性状は、図-13 に示した空洞の大きさによる比較からも明らかである。空洞の大きさが小さいほど周囲のコンクリートからの熱の流入により、空洞が存在し

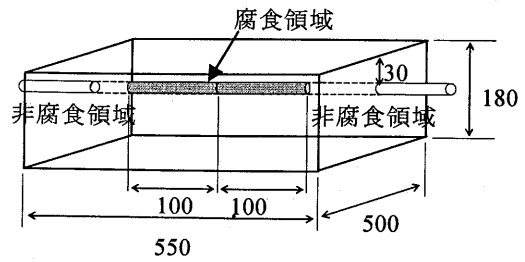


図-14 試験体の形状寸法

ないコンクリート表面温度との差が小さくなっていることがわかる。

以上の結果から本手法で空洞位置の評価が可能であり、空洞の大きさによって空洞が存在しない領域と空洞が存在する領域の温度差が異なること明らかとなった。

## 5. 鉄筋腐食の診断

### 5.1 腐食鉄筋の熱伝導メカニズム

コンクリート中の鉄筋を加熱した際、非腐食鉄筋では加熱された熱が直接コンクリートに伝わることとなる。腐食鉄筋では腐食領域が空気と同様な熱的特性（大きな比熱，小さな熱伝導）であるため、鉄筋からの熱が腐食領域で遮断されコンクリートに熱が伝わりにくくなる<sup>2)</sup>。したがって腐食鉄筋のコンクリート表面温度は、健全鉄筋に比べ低くなる性質がある。

### 5.2 実験概要

本研究では、鉄筋の一部に電食処理を施し、強制腐食させた鉄筋を用いて試験体を作製した。部分的に腐食した鉄筋を用いることによって1本の鉄筋中でのコンクリート表面温度比較から鉄筋腐食の有無を診断するものである。実験に使用した試験体の形状は、図-14 に示すように 550×500×180mm であり、鉄筋の一部を試験体の外に露出させたものである。

かぶりは 30mm，腐食領域は 200mm，鉄筋腐食重量減少率は 3.45% である。鉄筋には熱電対を取り付け鉄筋の温度を直接測定できるようにし、腐食領域には、コンクリート表面温度に影響を及ぼさないように鉄筋側面の腐食領域に直接貼付した。

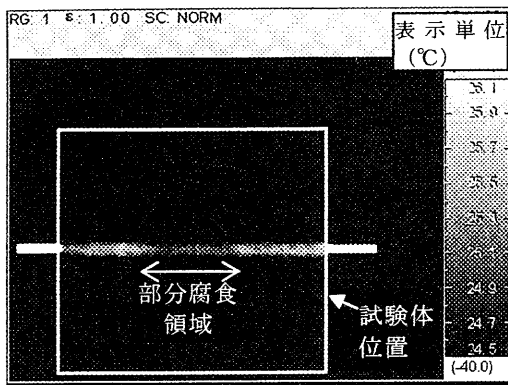


図-15 コンクリート表面の熱画像  
(加熱終了60秒後)

鉄筋の加熱は前章と実験と同様にコンクリート表面に電磁誘導コイルを配置し、電磁誘導加熱によって鉄筋の加熱を行った。鉄筋の加熱温度上昇量が  $20^{\circ}\text{C}$  となるように制御してコイル負荷電力は、 $4\text{kW}$ 、加熱時間は  $240$  秒とした。

加熱装置、電磁誘導コイル、赤外線サーモグラフィは、前章の実験と同じものを使用している。なお、本試験体のコンクリートの配合は表-3 に示すとおりである。

### 5.3 コンクリート表面温度

図-15 は加熱終了  $60$  秒後における熱画像を示したものである。熱画像上から部分腐食領域を確認することができる。

加熱前、加熱終了直後の試験体内部の鉄筋の温度分布を図-16 に示す。加熱終了直後において、腐食領域の鉄筋温度分布は、非腐食領域（供試体端部から  $150\text{mm}$  付近）の温度と比べて約  $2^{\circ}\text{C}$  の温度低下がみられる。

図-17 に加熱終了  $60$  秒後のコンクリート表面温度分布を示す。腐食箇所領域のコンクリート表面温度は健全部に比べ  $0.3^{\circ}\text{C}$  程度低下している傾向がみられる。これは、前述したように腐食部分の熱的特性により鉄筋からの熱が伝わりにくくなったものと考えられる。

以上の結果からコンクリート表面温度性状から鉄筋中に存在する腐食領域存在を確認することができる。

## 6 まとめ

本研究は、鉄筋を熱源としてコンクリート表面

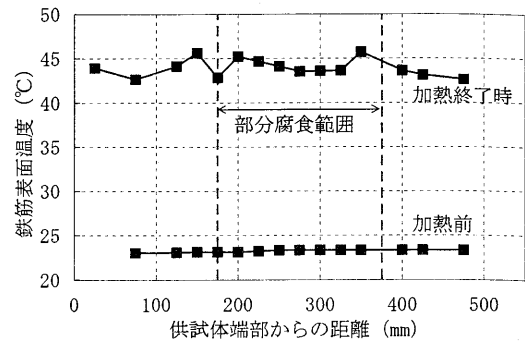


図-16 鉄筋表面の温度分布

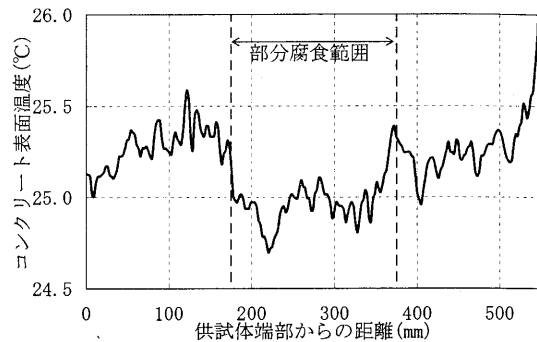


図-17 コンクリート表面温度分布

温度変化からコンクリート内部に存在する空洞、鉄筋腐食を診断する方法について検討を行った。

電磁誘導加熱を利用することによってコンクリート内部の鉄筋を非破壊・非接触で加熱可能なことを示した。また、鉄筋位置、空洞、鉄筋腐食に関する診断実験結果を示し、本手法を用いることによってこれらの評価可能であることがわかった。

なお、本研究では鉄筋 1 本に対する基礎的実験を行ったものであり、実構造物への適用に関しては、広範囲加熱、コンクリート表面の温度むら、気温、風のなどの影響について評価する必要がある。また、本研究は限られた範囲の実験結果を示したものであり、本手法を用いた際の鉄筋加熱温度および加熱時間等に対する測定精度については今後検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 臼木悠祐, 茂木淳, 谷口修, 大下英吉: 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいたコンクリート内部の空洞・ひび割れ非破壊検査手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 26 巻, 第 1 号, pp.1845-1850, 2004.
- 2) 茂木淳, 長坂慎吾, 谷口修, 大下英吉: 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいたコンクリート内部の鉄筋腐食性状非破壊検査手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 26 巻, 第 1 号, pp.1989-1994, 2004.