

電磁誘導加熱を利用したコンクリート表面の 温度性状に基づくRC構造物の空洞検出 システムの開発に関する研究

谷口修¹・重松文治²・堀江宏明³・大下英吉⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 本社 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:Osamu.Taniguchi@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 本社 機械部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:Bunji.Shigematsu@mail.penta-ocean.co.jp

³学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail:horiehiroaki@civil.chuo-u.ac.jp

⁴正会員 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail:oshita@civil.chuo-u.ac.jp

本論文は、電磁誘導加熱を利用して非接触、非破壊にてコンクリート内部の鉄筋を加熱し、コンクリート表面に表れる温度変化を赤外線サーモグラフィで計測することによってかぶり部分に存在する空洞箇所を非破壊で診断する手法の開発を行ったものである。電磁誘導加熱に関する特性について基礎的検討を行い、その結果をもとに鉄筋コンクリート部材のかぶり部分に空洞が存在する際のコンクリート表面の温度の一般的性状を示した。次に、この一般的性状をもとに空洞を有する試験体の空洞検知実験を実施し、本システムの適用性および適用限界を明らかにした。

Key Words : *thermography, heat charge due to electromagnetic induction, reinforcing steel-bar, internal defects, diagnosis*

1. はじめに

非破壊検査手法のひとつである赤外線サーモグラフィ法は、診断対象物から放射される赤外線を検出することによって対象物の温度測定を行い、温度変状箇所から欠陥部を検出する方法である。非接触で広範囲に検査可能な利点を生かして、プラントにおける配管などの異常発熱部分の検知や人体における体温の検知などに用いられている¹⁾。

コンクリート構造物への赤外線サーモグラフィの適用事例は、主に浮き・空洞の存在の有無の検知である。診断に際しては、対象構造物へ何らかの加熱あるいは吸熱が必要となり、一般的には日射熱や気温変動などの自然発生的に生じる温度変化を利用するパッシブ法が用いられている。この方法による検知の精度は、コンクリート構造物が置かれる環境条件に依存するため、栈橋下面や橋台などの日射の影響がほとんどない箇所や1日の気温変動が小さい夏場などでは、測定が困難になることもある²⁾。日射

熱を利用した実用上の測定限界深度は50mm程度とされており、また気温変動を利用した測定限界深度は30mm程度であると報告されている³⁾。

一方、日射熱の供給がなく気温変動も少ない箇所では、ヒータ等によってコンクリート表面を人工的に加熱する手法であるアクティブ法が用いられている⁴⁾。それ以外の加熱方法としては、舗装熱を熱源として利用し内部欠陥を検知する方法⁵⁾や打ち込み時の温度を利用し型枠の未充填部を診断する方法⁶⁾なども提案されている。このように赤外線サーモグラフィ法は、コンクリート構造物の劣化診断において有用な非破壊検査手法であると考えられる。

本研究では日射熱や気温変動、ヒータ等によるコンクリート表面の人工的加熱といった従来の赤外線サーモグラフィによる非破壊診断手法とは異なった熱源を利用したものであり、図-1に示すようにコンクリート内部に配置された鉄筋を非破壊により強制的に加熱し、かぶり領域に存在する浮きや空洞などの劣化要因を測定可能とする手法の構築を目的と

空洞の存在で熱伝導は異なる。
→コンクリート表面の温度に違いが生じる

赤外線サーモグラフィを用いてコンクリート表面温度を測定する。

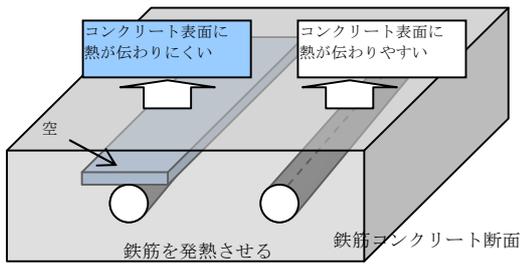


図-1 鉄筋加熱による非破壊診断手法

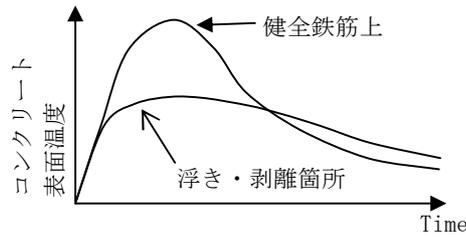


図-2 鉄筋加熱中および加熱後のコンクリート表面温度

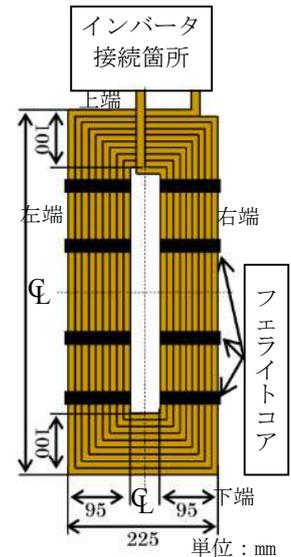


図-3 電磁誘導コイル

したものである。

コンクリート中の鉄筋を加熱することでかぶり部分に浮きや空洞が存在する場合にはコンクリート表面温度性状は、図-2 に示すように欠陥部での熱的特性（小さい熱伝導率，大きな比熱）により，健全部に比べ最高温度は低く，温度低下率も小さいため比較的長時間を要して外気温に近づいていく⁸⁾。温度履歴はこのような現象を示すことから空洞が存在することによってコンクリート表面の温度分布も低下した箇所として表れることになる。

一方，従来の鉄筋の加熱方法は，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っていた^{7),8),9),10),11)}。したがって，既設コンクリート構造物に適用する際には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損傷を与えるという点で問題があった。さらに，鉄筋の継手箇所や鉄筋交差部では，鉄筋量の変化や鉄筋同士の接触による抵抗の増大により過度に発熱が生じていた。したがって，鉄筋を一様に加熱することが困難であるとともに，鉄筋加熱による診断は，単一鉄筋部材に限定されていた。

このようなことから上述した問題点を解決すべく本研究での鉄筋加熱方法は，非破壊・非接触で加熱可能な電磁誘導加熱を用いることとした。本研究は，この電磁誘導加熱を利用したコンクリート表面温度分布性状に基づく診断システム（以下，本システム）について適用範囲の議論を行ったものである。

本論文ではまず，電磁誘導加熱特性を把握するために鋼板，鉄筋の電磁誘導加熱実験結果から鉄筋を均一に加熱可能な範囲の特定を行った。次にあらかじめコンクリート中に空洞を設置した試験体に対して実験を行い，鉄筋と空洞の相対位置が検出精度に与える影響について検討を行った。

2. 電磁誘導加熱の特性と均一加熱範囲の特定

(1) 加熱原理とコイル形状

電磁誘導加熱は磁性体以外であるコンクリートや木材などは加熱されず，コンクリート中の鉄筋のみを非接触で加熱させることが可能な方法である。発熱原理は，鉄筋に誘導した誘導電流によって発熱する方法であることから鉄筋に直接電気を通電する方法と同一のものである¹²⁾。

電磁誘導加熱は被加熱物を直接加熱するため加熱効率が高く，急速加熱ができる特徴がある。これらの特徴を生かして，一般的には通称 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いる^{13),14)}。

電磁誘導加熱に用いられるコイルは，円形や井筒形状など様々な形状のものが存在するが，コンクリート中の鉄筋を加熱するのに最適な形状は，事前実験の結果から矩形形状が有効であると考えられた。他のコイル形状では鉄筋に加熱温度むらが発生することや加熱効率が悪いことなどの問題点を有していた。そこで本研究では，図-3 に示す矩形コイルを用いて実験を行った。

なお，本研究で使用した電磁誘導加熱装置の仕様を表-1 に，赤外線サーモグラフィの仕様を表-2 に示す。

(2) 矩形コイルの加熱特性と均一加熱範囲の特定

a) 鋼板の加熱実験結果

まず，鋼板に対する加熱と鉄筋単体に対する加熱実験を実施し，本研究で使用する矩形コイルの加熱特性を検討した。

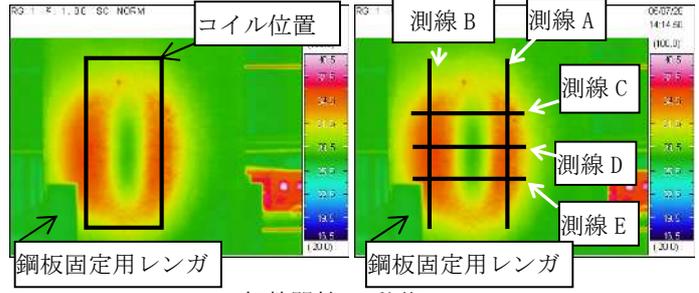
鋼板加熱実験はコイルから 150mm の位置に厚さ

表-1 電磁誘導加熱装置の仕様

入力	3φ AC200/220V,50/60Hz
入力電源容量	26kVA
出力電圧	1000 V (最大電圧)
出力電流	230 A (最大電流)
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℃~120℃
最小検知温度差	0.06℃
有効画素数	280×240画素



加熱開始 30 秒後

図-4 鋼板加熱の熱画像

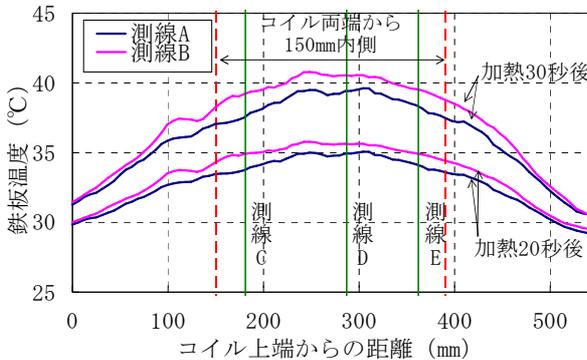


図-5 鋼板加熱の温度分布 (測線 A,B)

2mm の鋼板を配置し、加熱電力は 1kWとして鋼板の加熱状況を測定した。鋼板表面の温度測定は赤外線サーモグラフィを用いた。

加熱終了後 20 秒の時点の鋼板の熱画像を図-4 に示す。また、同図に示す測線 AB 上における温度分布を図-5 に示す。コイル上下端から 150mm 以上離れた箇所では、鋼板の温度差が 2℃以内となりほぼ均一に加熱されている。なお、測線 A,B はコイル端部に対応する箇所である。

図-4 の測線 C, D, E における温度分布を図-6 に示す。コイル中心領域では温度が低くなっているが、コイル左右端部領域では温度低下はほとんど生じていない。特に、コイル左右端部から約 ±30mm の範囲では同一測線における温度むらは 1℃以内であり、ほぼ均一な加熱状態となっている。

b) 鉄筋の加熱実験結果

次に、前述の鋼板加熱の結果を基に図-7 に示す

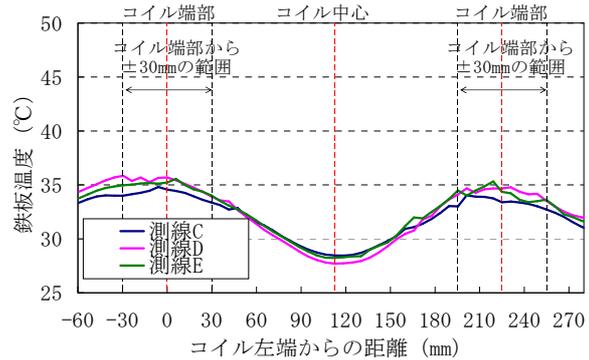


図-6 鋼板加熱の温度分布 (測線 C,D,E 加熱開始 20 秒後)



図-7 鉄筋加熱位置

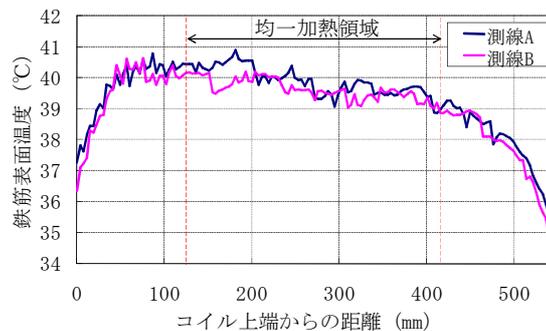


図-8 鉄筋加熱の温度分布

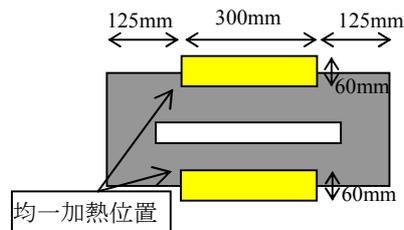


図-9 均一加熱領域

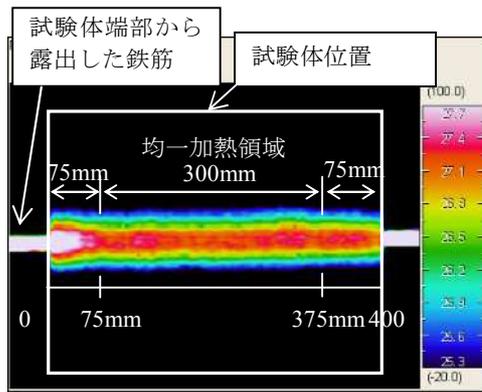


図-10 鉄筋加熱後のコンクリート表面温度分布 (かぶり 30mm)

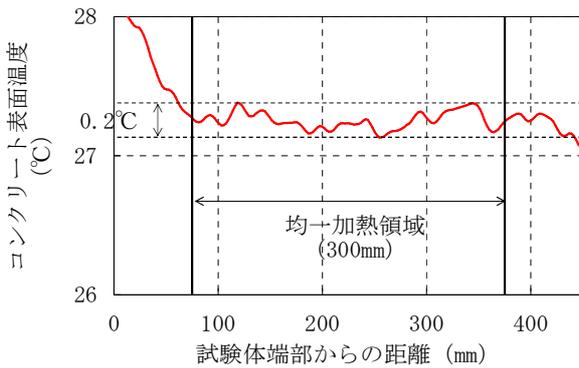


図-11 鉄筋直上のコンクリート表面温度分布

表-3 実験条件

試験体名称	K30-A
かぶり(mm)	30
空洞の大きさ(mm) ※1	50×50, 30×30
空洞深さ(mm) ※2	20
空洞位置(mm) ※3	0
コイル負荷電力(kW)	2
加熱時間(s)	300
鉄筋加熱時の温度上昇量(°C)	20
外気温(°C)	20.5

- ※1 空洞厚さはすべて 10mm
- ※2 コンクリート表面から空洞表面までの距離
- ※3 鉄筋中心軸からの空洞中心までの距離

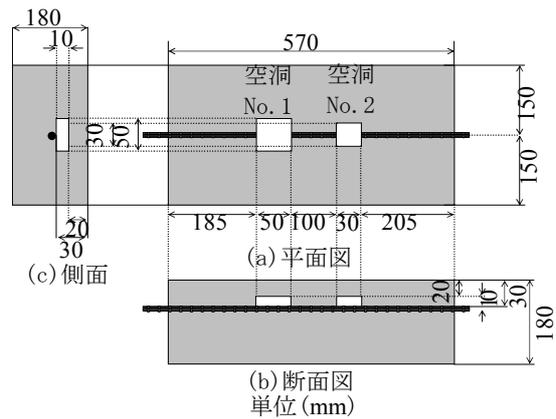


図-12 かぶり 30mm 試験体 K30-A

位置に鉄筋を配置し加熱実験を行った。使用した鉄筋は D16 鉄筋 (SD295A)，鉄筋とコイル間の距離は 50mm，室温は 29°C の一定である。

加熱開始 30 秒の時点の鉄筋表面の温度を示したものが図-8 である。コイルの上下端部から約 125mm 以上離れた箇所を除く領域において鉄筋表面の温度差は 2.0°C 以内であり，その温度差以内となるコイルの領域を示したものが図-9 である。なお，電磁誘導コイル加熱時間を上述した 30 秒以上の長時間に設定したとしても，均一加熱領域内における鉄筋表面の温度差は，2.0°C 以内であることも確認されている。

(3) 鉄筋の加熱温度差がコンクリート表面温度に及ぼす影響

コンクリート試験体中の鉄筋を加熱して空洞の診断を行うためには，鉄筋単体の加熱時における温度差 2.0°C が，コンクリート表面温度に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。

図-10 は，かぶり部分に空洞が存在しない RC 試験体の鉄筋加熱終了後のコンクリート表面の熱画像であり，コンクリート表面温度上昇量が最大となる時点での温度を示している。なお，試験体はかぶり

30mm であり，D16 鉄筋を使用している。

試験体端部左側は，露出鉄筋の影響によりコンクリート表面温度が高くなっており，試験体右側はコイルの加熱特性により温度が低下しているが，それ以外の箇所では均一な温度分布である。

図-10 および図-11 から，鉄筋の加熱温度差がコンクリート表面温度に及ぼす影響は，均一加熱領域である 300mm の範囲内では最大で 0.2°C である。すなわち，図-9 に示したコイルの範囲を用いて鉄筋加熱を行うことで，コンクリート表面温度に与える鉄筋の加熱温度差の影響は極めて小さいものである。また，コイルの設置位置による鉄筋の加熱温度差がどの箇所で生じるのかは加熱時のコイル位置によって明らかであることから鉄筋の加熱温度差の影響は小さいと考えられる。

以上の結果から矩形コイル形状においては，図-9 に示す位置を利用し鉄筋加熱を行うこととした。

3. 空洞の存在によるコンクリート表面温度の一般的性状

本システムによる空洞検知に際しては，まず空洞

表-4 コンクリートの配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
15	4.3	58	49	20	175	302	864	894	3.02

がコンクリート表面の温度性状に及ぼす影響を評価しておかなければならない。そして、空洞の存在によるコンクリート表面の温度性状を十分に把握した上で、まずコンクリート表面の熱画像のみから変状の評価を行い、その可能性がある場合には温度分布により 0.5℃以上の温度差が見られる個所を空洞として判断をする。これは従来の長田ら²⁾の研究においても、赤外線サーモグラフィを用いた空洞診断を行う際の限界閾値に関する研究を実施し、その値が 0.5℃であれば判別性に十分な信頼があるとしており、本研究においても 0.5℃を限界閾値に設定した。

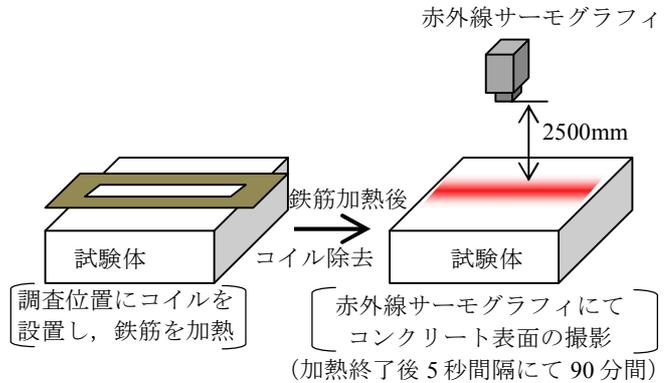


図-13 本システムによる測定方法

(1) 試験体の形状寸法および実験概要

本実験で使用した試験体は、表-3 および図-12 に示す形状寸法である。空洞を模擬した発泡スチロールは、鉄筋直上のコンクリート表面から 20mm の位置に設置している。なお、コンクリートの配合は表-4 に示す通りである。

鉄筋の加熱は、図-9 に示したコイル均一加熱領域が鉄筋直上となるようにコイルを設置し、表-3 に示す電磁誘導コイルへの負荷電力および鉄筋の加熱温度時間により実施した。その際の鉄筋の加熱温度上昇量および外気温も表-3 に併記しておく。

コンクリート表面温度の測定は図-13 に示すように行い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。試験体から赤外線サーモグラフィまでの距離は 2500mm とし、室温は一定条件で実施した。

本システムでは、図-9 に示したコイル均一加熱領域の鉄筋軸上において 0.5℃以上の温度低下が見られる個所を空洞として判断する。

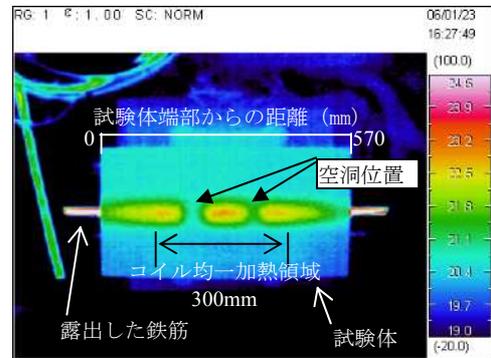


図-14 加熱終了直後の熱画像 (試験体 K30-A)

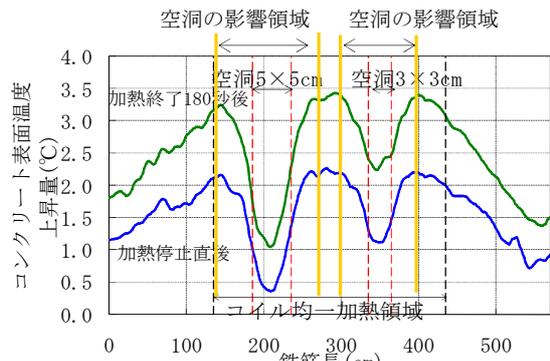


図-15 コンクリート表面温度上昇量の分布 (試験体 K30-A)

(2) コンクリート表面の温度性状

a) 熱画像性状

試験体 K30-A に対して本システムを適用した際の熱画像を図-14 に示す。同図は、加熱終了直後における試験体表面の熱画像である。本研究で用いたコイルの均一加熱領域は、図-9 に示したようにコイル中央部の 300mm の範囲であることから、その範囲も熱画像上に示してある。ほぼ均一に加熱されている領域のみに着目して議論することとする。空洞が存在するコンクリート表面領域では、コンクリ

ート表面の等温度線が不連続となり、空洞が存在しない領域に比較すると 1.0℃以上も低い温度となっており、その位置および大きさを明瞭に確認することができる。(以下では等温度線が不連続となる領域を変状と呼ぶ。) さらに、空洞の大きさに応じて変状領域の大きさが変化していることも確認できる。このように空洞が存在するコンクリート表面領域で

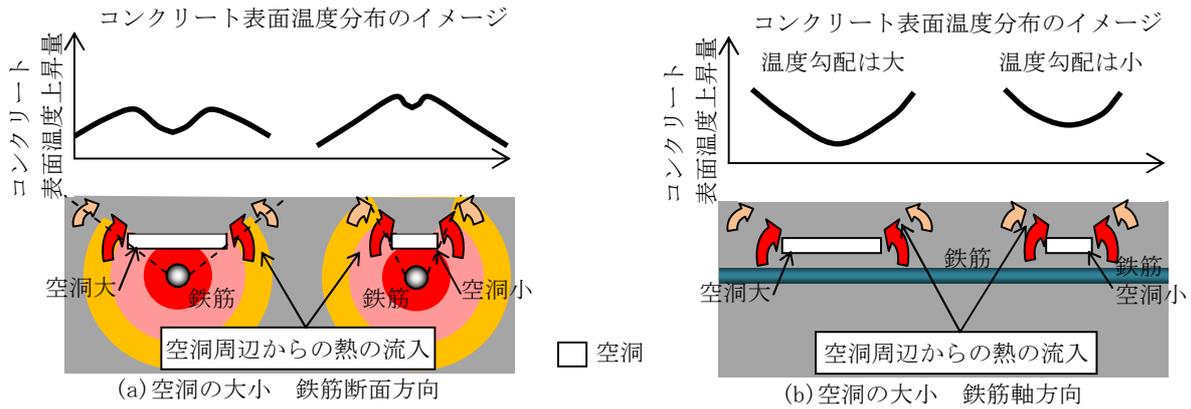


図-16 空洞大小の違いによる影響範囲と温度分布

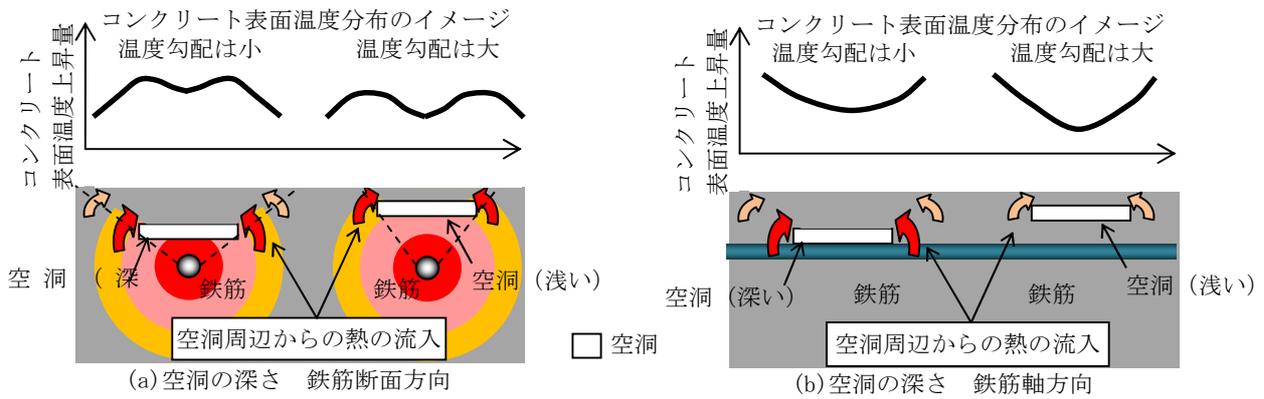


図-17 空洞の深さの違いによる影響範囲と温度分布

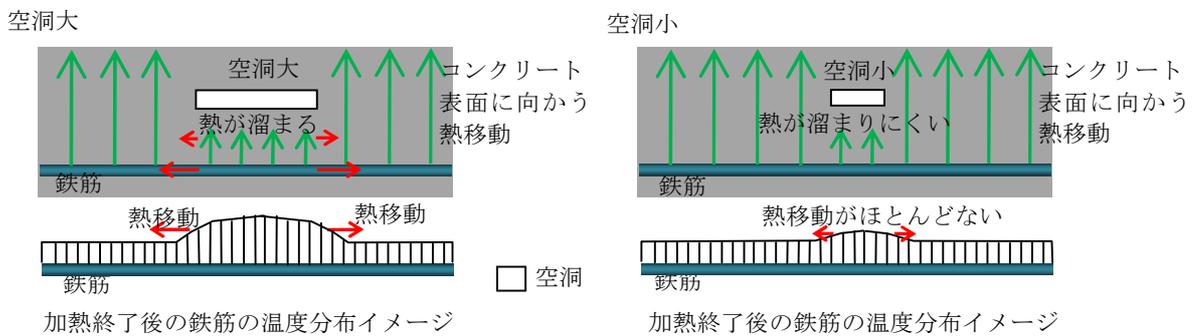


図-18 かぶりコンクリートの温度分布

温度が低くなる性状は、鉄筋に蓄積された熱が温度勾配によりコンクリート表面へ拡散する現象を空洞が遮断することによるものである。

b) コンクリート表面温度分布性状

図-15 は、鉄筋軸方向に沿ったコンクリート表面の初期温度からの温度上昇量分布を示したものであり、図中の青線、緑線はそれぞれ加熱停止直後および加熱終了後 180 秒の時点に対応している。

空洞が存在するコンクリート表面領域の温度は、他の領域に比べて空洞 No.1 および No.2 においてそれぞれ約 2.0℃および 1.0℃低くなっている。図-15 では、図-9 に示したコイル均一加熱位置において

0.5℃以上の温度差が発生しており、温度分布から空洞の有無を判断することができる。空洞の大きさによる温度低下量の差異は、図-16 に示すように空洞が大きいくほど鉄筋からの熱が遮られる面積が大きくなり、空洞上への熱の流入が小さくなるため空洞位置のコンクリート表面温度の上昇量は少なくなる。このような現象は、コンクリート表面の温度勾配にも影響を及ぼすことになる。

また、空洞の存在によるコンクリート表面温度の影響領域は、空洞の大きさよりも広くなる。これは、図-16 に示したように鉄筋に与えられた熱がコンクリート表面に向かって拡散することから、空洞で遮

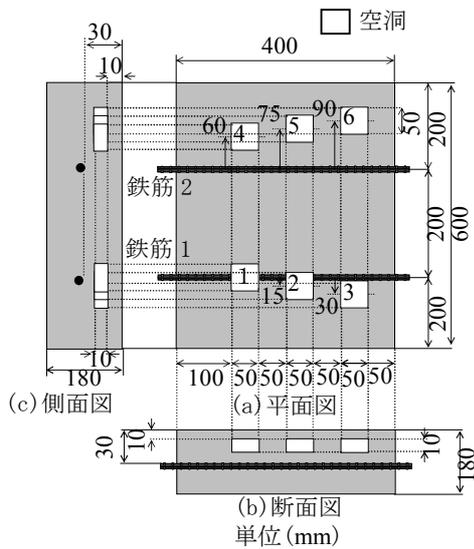


図-19 かぶり 30mm 試験体 K30-B

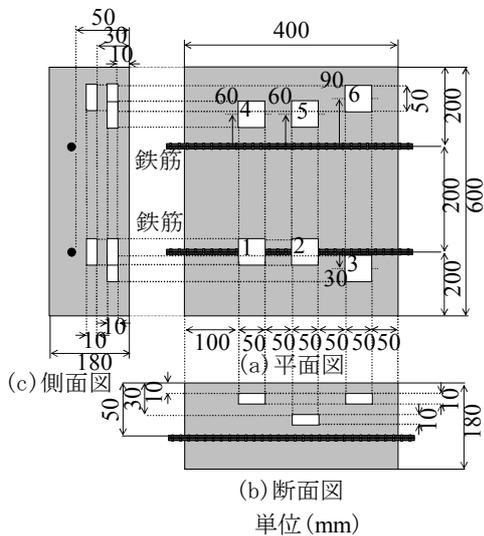


図-20 かぶり 50mm 試験体 K50

断される影響が空洞以外の領域にも及ぶためである。

一方、鉄筋からの熱伝導問題として考えると図-17に示すように、コンクリート表面からの空洞の深さが異なる場合には、空洞が深いほどコンクリート表面温度に影響を及ぼす範囲は大きくなり、表面の温度勾配は小さくなる。逆に、空洞が浅いほど、その影響範囲は小さくなり、温度勾配は大きくなる。これは、熱源（鉄筋）に近い位置に存在する空洞ほど鉄筋から広がる熱伝導を遮断するため、広範囲にコンクリート表面上昇量の影響を及ぼすこととなる。

一方、空洞の存在による鉄筋軸方向の温度性状は、図-18に示すような温度分布になると考えられる。

図-16に示した空洞が大きい場合や図-17に示した空洞位置が深い場合には、空洞下面のコンクリートの温度は他の領域に比べて高くなる。これは、鉄筋からコンクリートへの熱拡散が、空洞下面において滞

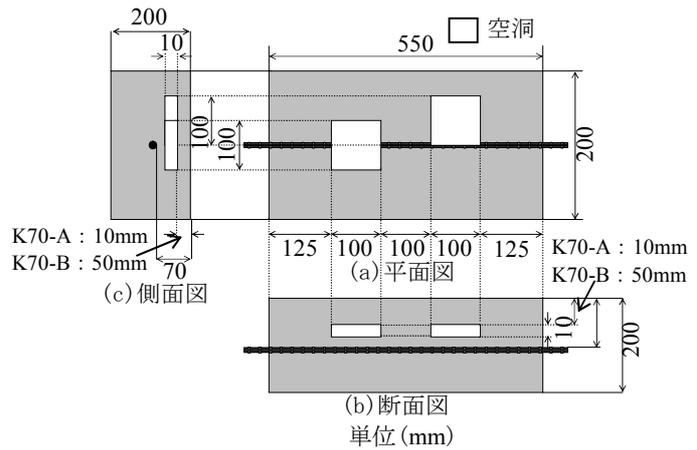


図-21 かぶり 70mm 試験体 K70-A,K70-B

表-5 実験条件

試験体名称	K30-B	K50	K70-A	K70-B
かぶり(mm)	30	50	70	70
空洞の大きさ(mm)※1	50×50		100×100	
空洞深さ(mm)※2	10	空洞番号 1,3,4,6	10	50
		10		
		空洞番号 2,5		
30				
空洞位置(mm)※3	0,15,30,60 75,90	0,30, 60,90	0,50	
コイル負荷電力(kW)	6	6	3.5	3.5
加熱時間(秒)	180	180	780	780
鉄筋加熱時の温度上昇量(℃)	30	30	16.8	16.2
外気温(℃)	22.3	23.9	24.2	24.3

※1 空洞厚さはすべて10mm

※2 コンクリート表面から空洞表面までの距離

※3 鉄筋中心軸からの空洞中心までの距離

留するためである。したがって、空洞下面に位置する鉄筋温度も空洞が存在しない位置の鉄筋温度よりも高くなり、コンクリート領域と鉄筋の温度勾配は他の領域よりも小さくなることが考えられる。しかしながら、このような鉄筋の温度分布はその熱伝導性を考えると、極短時間で鉄筋軸方向に熱伝導が生じることにより一様となり、再び上述したようなコンクリート内の熱拡散が生じる。このような現象は、測定データにはそれらは当然に含まれることとなるが、本システムでは測定したデータに基づいて鉄筋軸方向の温度分布の差が最も大きくなる時点で空洞の有無を判断するため、この現象が空洞の検出精度に影響を及ぼさないと考えられる。

以上のように、熱画像において変状領域を含むコンクリート表面の温度分布性状に対して急激な温度勾配を生じる領域の大きさ（面積或いは長さ）およ

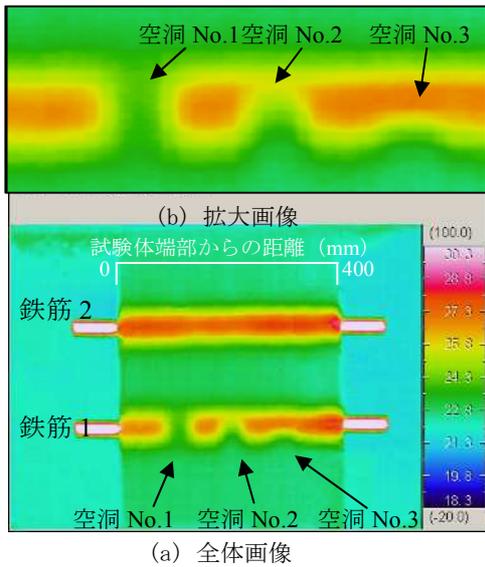


図-22 加熱終了240秒時点の熱画像
(試験体 K30-B)

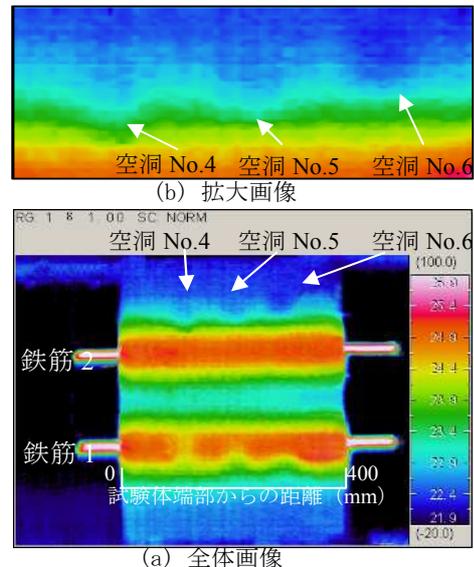


図-24 加熱終了1200秒時点の熱画像
(試験体 K30-B)

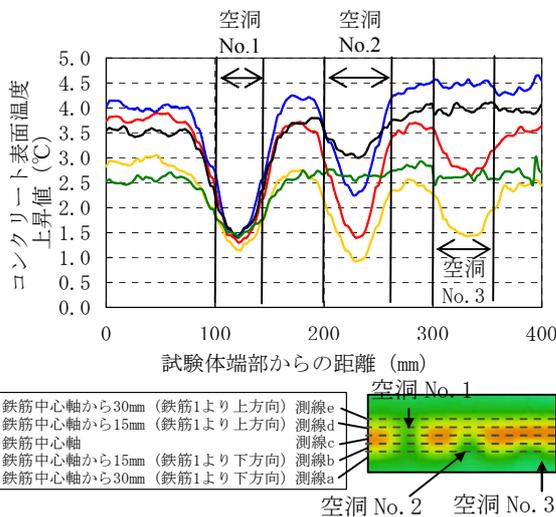


図-23 コンクリート表面温度上昇値の分布
(試験体 K30-B 鉄筋1 加熱終了240秒時点)

び高温領域と低温領域との温度差という観点から検討することにより、空洞の存在の判定は勿論のこと、その大きさが定性的に評価可能となる。

4. 鉄筋と空洞の相対位置が検出精度に与える影響

(1) 実験概要

前章で示した空洞が存在する試験体のコンクリート表面温度性状に基づいて鉄筋と空洞の相対位置が検出精度に及ぼす影響について検討を行う。

実験に使用した鉄筋コンクリート試験体は、かぶり30,50,70mmの3種類とし、空洞を模擬するためにあらかじめ発泡スチロールをかぶりコンクリート部分に配置したものである。各試験体の形状寸法、

空洞の位置および大きさは図-19、図-20、図-21に示す通りである。各試験体の空洞上の数値は、空洞 No を示している。

コイル負荷電力、加熱時間、鉄筋加熱時の温度上昇量を表-5に示す。表-5に示すコイル負荷電力、加熱時間、加熱時の鉄筋の温度上昇量は、かぶり30mmおよび50mmと70mmと異なっているが、この理由としてかぶりが大きくなるほどコイルから鉄筋位置までの距離が大きくなるため、電磁誘導加熱の特性により鉄筋を同一温度とするためには長時間の加熱時間を必要とするためである。さらに電磁誘導加熱は、機器の特性により加熱対象の金属がコイルに近いほど高出力を負荷することができるためかぶりが大きくなると必然的に負荷電力が低下することになる。

また、赤外線サーモグラフィで撮影した熱画像は、汎用の熱画像処理ソフト (TH71-703) を用いることで映像のように時系列でコンクリート表面温度分布を評価することが可能であり、その映像を観察して空洞が最も明瞭に現れる時刻にて評価した。なお、空洞が最も明瞭に現れる時刻は、かぶり厚や鉄筋径によって異なるため、撮影後に熱画像の映像で判断することが望ましいと考えられる。

(2) 試験体 K30-B における空洞評価

試験体 K30-B の加熱終了後 240 秒時点のコンクリート表面の熱画像を図-22に示す。

図-22(a)に示すコンクリート表面の熱画像では、空洞位置に対応して鉄筋1近傍において変状が3箇所存在する。この領域を拡大したものが同図(b)である。空洞 No.1および空洞 No.2は、変状が明確で

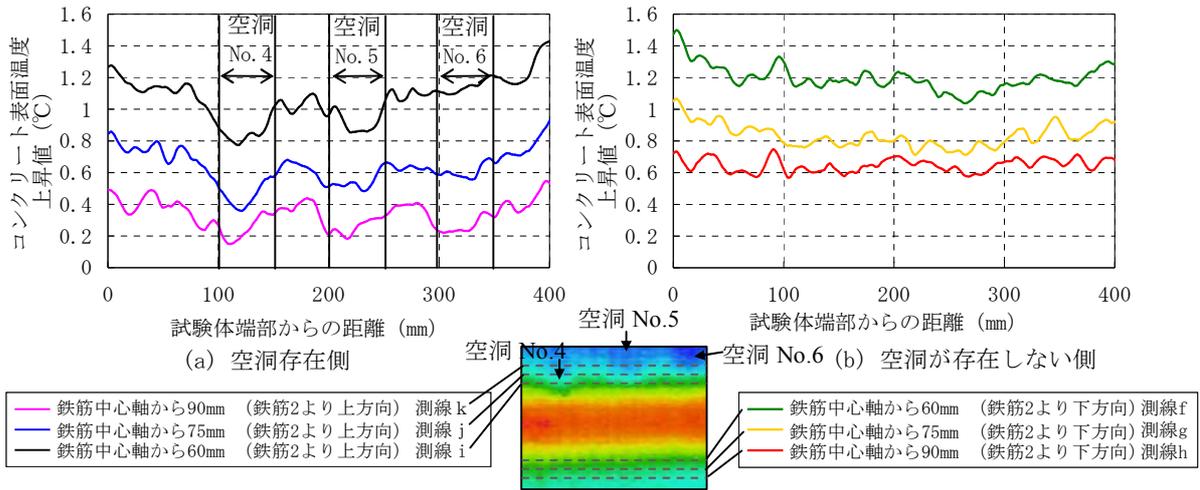


図-25 コンクリート表面温度上昇値の分布
(試験体 K30-B 鉄筋 2 加熱終了 1200 秒時点)

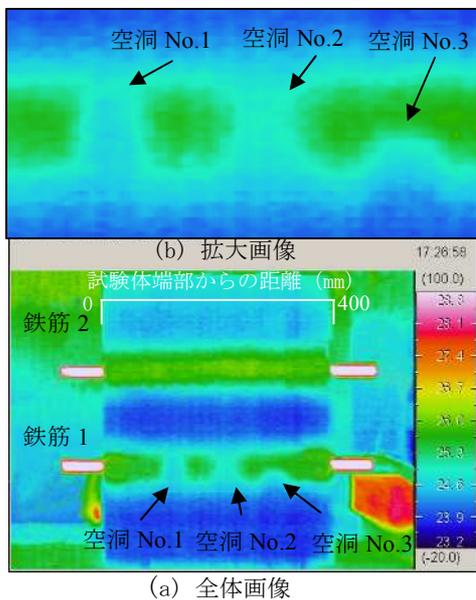


図-26 加熱終了 540 秒時点の熱画像
(試験体 K50)

あるが、空洞 No.3 は空洞 No.1,2 に比べそれ自体では明確さに欠ける。

図-23 は、熱画像において確認された空洞 No.1,2,3 の領域を含む鉄筋軸方向の温度分布である。

鉄筋中心軸上である測線 c に着目すると、空洞 No.1 および No.2 では、空洞が存在しない個所に比べ約 2.5℃および約 1.7℃の温度低下が見られ、温度分布から空洞の存在を判断することができる。一方、空洞 No.3 が存在する領域では、鉄筋軸での温度低下は見られず、測線 a に着目すると空洞 No.3 の存在する箇所に温度低下が見られる。

図-24 (a) は、空洞 No.4,5,6 が熱画像上で最も明瞭にあらわれた加熱終了後 1200 秒の時点の熱画像である。同図では、図-22 に同じく鉄筋 1 近傍におい

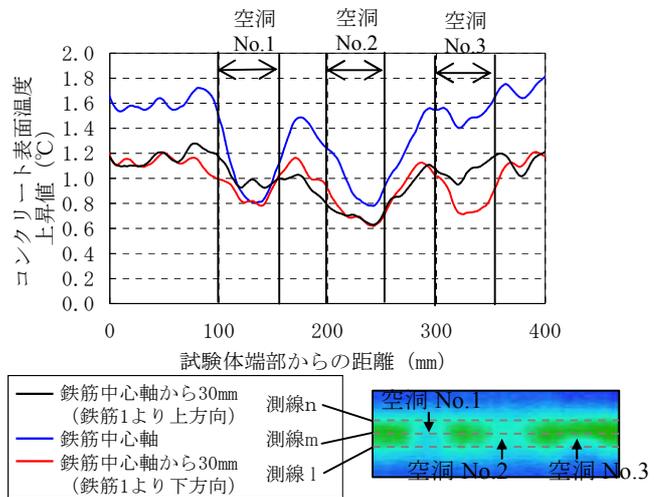


図-27 コンクリート表面温度上昇値の分布
(試験体 K50 鉄筋 1 加熱終了 540 秒時点)

て 3 箇所の変状が依然として確認できる。空洞位置の事前情報を有する場合には鉄筋 2 の上部において温度が低下している領域 (空洞 No.4,5,6) が存在することがわかるが、それらは空洞 No.1,2,3 に比べると不明瞭となっている。なお、熱画像のみから空洞位置を判断することが可能であるか確認するために試験体の空洞設置位置等の事前情報を有しない赤外線サーモグラフィに精通したコンクリート診断士を保有する技術者 3 名に図-24 (a) の熱画像のみを提示し、変状箇所について意見を聞いたところ、鉄筋 1 上の空洞は 3 名とも指摘することができたが、鉄筋 2 近傍に存在する空洞は 3 名ともに指摘しなかったことを参考として追記しておく。

図-25 は、空洞 No.4,5,6 の領域を含む鉄筋軸方向のコンクリート表面における初期温度からの温度上昇量分布である。

空洞 No.4,5,6 とともに空洞位置の温度低下量は

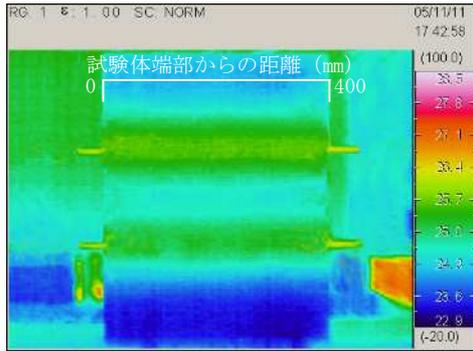


図-28 加熱終了 1500 秒時点の熱画像 (試験体 K50)

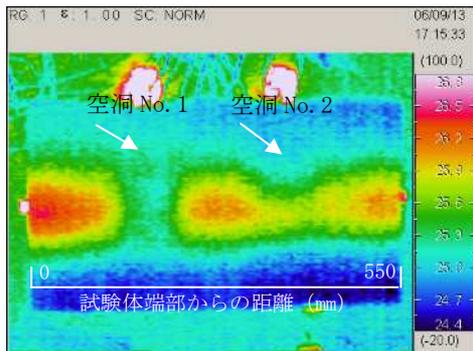


図-29 加熱終了 780 秒時点の熱画像 (試験体 K70-A)

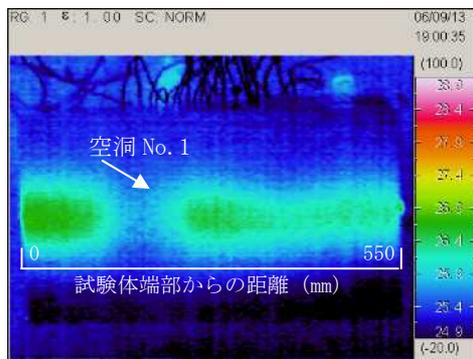


図-30 加熱終了 780 秒時点の熱画像 (試験体 K70-B)

0.4°C以下であり空洞として判断することはできない。

(3) 試験体 K50 における空洞評価

試験体 K50 の加熱終了後 540 秒におけるコンクリート表面の熱画像を図-26 に示す。

鉄筋 1 において空洞位置に対応して変状領域が 3 箇所存在し、この領域を拡大したものが同図 (b) である。空洞 No.1 および空洞 No.2 が存在する領域は、変状が比較的広範囲において明確であるが、空洞 No.3 は空洞 No.1 および 2 に比べて狭い範囲で変状が生じている。一方、鉄筋 2 近傍では変状を確認することができない。

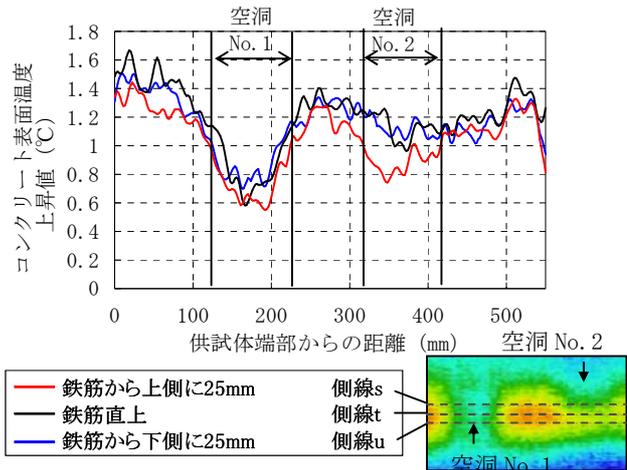


図-31 コンクリート表面温度上昇値の分布 (試験体 K70-A 加熱終了 780 秒時点)

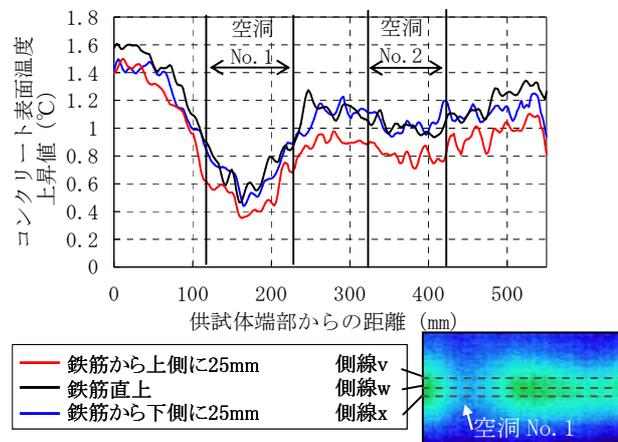


図-32 コンクリート表面温度上昇値の分布 (試験体 K70-B 加熱終了 780 秒時点)

図-27 は、空洞 No.1,2,3 の領域を含む鉄筋軸方向のコンクリート表面における初期温度からの温度上昇量分布である。

まず、鉄筋中心軸上である測線 m に着目すると、空洞 No.1 および No.2 が存在する領域では空洞が存在しない領域に比べ約 0.7 の温度低下を生じている。空洞 No.3 が存在する領域では、空洞が存在しない領域とほぼ同じ温度となっている。

前節で示したかぶり 30mm である試験体 K30-B の空洞領域と空洞が存在しない領域との温度差と比較してみると、本試験体では約 1.8°C低い値となっている。これはコンクリート表面からの空洞の深さに応じてコンクリート表面における熱の拡散領域が広がることに加えて、図-17 に示した空洞が存在しない領域からの熱の流入が多くなることによるものである。

また、図-17 に示したように空洞の深さによってコンクリート表面に現れる温度分布は異なることとなる。図-27 の測線 m において空洞 No.1 と No.2 を

表-6 本研究の実験範囲内で得られた結果

評価内容		得られた結果
かぶり (鉄筋深さ)		表面から 70mm の鉄筋 まで加熱可.
空洞 の 診断	鉄筋上に存在する 空洞 図-31 (a)	コンクリート表面から 50mm の深さのものま では診断可
	空洞端部が鉄筋軸 上に存在する場合 図-31 (b)	コンクリート表面から 10mm に位置するもの までは診断可能. コン クリート表面から 50mm に位置するもの は診断不可.
	鉄筋から離れて 存在する空洞 図-31 (c)	診断不可

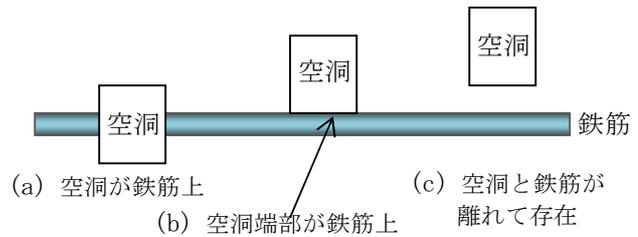


図-33 平面方向における鉄筋と空洞の位置関係 (表-6 に対応)

いていずれの測線も急激な温度低下を示しており、空洞の存在を示すものとなっている。一方、空洞 No.2 の存在は温度分布からも判断することができない。

比較すると、温度低下を生じる性状は同一であるが、温度低下を生じている領域幅（変状領域幅）は、空洞 No.2 の方が No.1 に比べて広がっている。この傾向は測線 1,n にも同様に見られる。これらは空洞深さによる影響と考えられる。

図-28 は、加熱終了後 1500 秒の時点のコンクリート表面の熱画像である。加熱終了後から長時間が経過しているため空洞周囲から空洞上部に熱が流入し、図-26 で確認できた空洞 No.1,2,3 は確認することができなくなっている。また、鉄筋から離れた位置に存在する空洞 No.4,5,6 も確認することはできない。

(4) 試験体 K70-A, K70-B における空洞評価

試験体 K70-A, K70-B の加熱終了後 780 秒の時点のコンクリート表面の熱画像をそれぞれ図-29 および図-30 に示す。

図-29 に示す試験体 K70-A のコンクリート表面の熱画像では空洞 No.1 および No.2 の 2 箇所、図-30 に示す試験体 K70-B のコンクリート表面の熱画像では空洞 No.1 の 1 箇所において変状が存在する。

図-31 および図-32 は、それぞれ試験体 K70-A および K70-B における鉄筋軸方向のコンクリート表面における初期温度からの温度上昇量の分布であり、対象とした時間は、図-29 および図-30 の熱画像と同じである。

試験体 K70-A の鉄筋中心軸上である測線 t に着目すると、空洞 No.1 に変状が存在する。一方、空洞 No.2 では、測線 s は測線 u に比べて急激な温度低下を示しており、これらの温度分布から空洞の存在位置は、鉄筋中心軸よりも上方向に位置していることを示している。

試験体 K70-B に関しては、空洞 No.1 の領域にお

(5) 実験範囲内における本システムの適用範囲

本章ではかぶりおよび鉄筋からの空洞の位置をパラメータとした試験体に対して、コンクリート表面の熱画像および変状領域を含む温度分布性状により空洞検知の検討評価を実施した。そこで、本システムの適用範囲を本実験結果の範囲内でまとめることとする。

本システムは、表-6 および図-33 に示すようにコンクリート表面からの鉄筋深さが 70mm までの試験体に対してその適用性を評価した。その際、評価が可能な空洞は、コンクリート表面から 50mm の位置に存在する鉄筋上の空洞とコンクリート表面から 10mm の位置に存在し空洞端部が鉄筋軸上に存在する場合であった。鉄筋軸から空洞端部までが離れて存在するものは、判断することができなかった。

本実験内で判断することができなかった空洞位置に対して明確な温度差を生じさせるためには鉄筋への蓄積熱量を多くすることが考えられ、そのためには鉄筋を長時間加熱することや短時間にて鉄筋の加熱温度上昇量を大きくする必要がある。しかし、短時間で鉄筋の加熱温度上昇量を大きくした場合には鉄筋の熱膨張を引き起こし、コンクリートに悪影響を与えるおそれがある。そこで鉄筋を長時間加熱することで鉄筋の蓄積熱量を大きくする方がよいと考えられる。ただし、本実験で示した鉄筋の加熱範囲内ではコンクリート表面や試験体側面部でのひび割れの発生はないことを目視にて確認していることから本実験範囲内での加熱の加熱温度上昇量では問題無いものと考えられる。

なお、本研究では限られた範囲内での実験結果であるため、本研究で検討した以外の空洞の大きさ、深さ、かぶり厚に対する適用性範囲は解析的手法との併用による検討が必要であると考えられる。

また、本システムはコンクリート表面の熱画像と温度分布から空洞診断を行うものであるため、コンクリート表面温度が外的要因により大きく影響を受ける際には本システムの適用が困難になる場合もある。そのような要因を挙げると、診断対象領域が部分的に濡れている状態（部分的に含水状態が異なる箇所）、日射が当たる箇所と日陰箇所が混在するような状態および日射熱の影響が大きい場合や急激な外気温上昇が生じる場合である。

さらに対象とするコンクリートの状態としてかぶりコンクリートにひび割れやジャンカが存在する場合には鉄筋からの熱伝導がそれらの存在で遮断されるため診断に影響を及ぼすことに留意する必要がある。

5. 結論

本研究は、コンクリート内部の鉄筋を非破壊・非接触により強制的に加熱し、コンクリート表面の温度分布性状から、かぶり領域に存在する鉄筋コンクリート構造物の空洞診断システムの開発を行ったものである。以下に本研究で得られた結論を示す。

- (1) 非破壊・非接触によりコンクリート内部の鉄筋を強制的に加熱する一手段は、電磁誘導加熱であり、鉄筋を均一に加熱可能とする電磁誘導コイル形状は矩形形状である。
- (2) 本システムによる空洞検知手法は、まずコンクリート表面の熱画像において変状の確認を行い、次に、その領域を含むコンクリート表面の温度分布性状により詳細な検討を行うものである。
- (3) 本システムにおいては、鉄筋に蓄積された熱が温度勾配によりコンクリート表面へ拡散する現象を空洞が遮断することにより、空洞が位置するコンクリート表面温度は健全な領域に比べて低くなる。その程度は、コンクリート表面からの空洞深さ位置および空洞の大きさに依存する。
- (4) 本研究の範囲内における本システムの適用範囲は、70mm以内の鉄筋を加熱可能であり、評価が可能な空洞は、コンクリート表面から50mmの位置に存在する鉄筋上の空洞とコンクリート表面から10mmの位置に存在し空洞端部が鉄筋軸上に存在す

る場合であった。

参考文献

- 1) (社)日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック，2004.
- 2) 長田文博，山田裕一，虫明成生，赤松幸生：熱画像による鉄道高架橋コンクリートの剥離診断手法の開発，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.121-133，2004.5.
- 3) 魚本健人，加藤佳孝，非破壊検査協会：コンクリート構造物の検査・診断—非破壊検査ガイドブック—，理工図書，2003.8.
- 4) 原文人，阪上隆英，込山貴仁，鈴木宏信：赤外線サーモグラフィ法によるトンネル覆工の空洞検出試験，第58回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，pp.817-818，2003.9.
- 5) 金光 寿一，柳内 睦人，三星 智典：舗装熱を利用したサーモグラフィ法によるRC床版内部の欠陥検出に関する研究，土木学会論文集，No.732/V-59，pp.95-108，2003.5.
- 6) 渡部正，魚本健人：型わく外面の熱赤外線画像によるコンクリートの打込み管理手法に関する基礎研究，土木学会論文集，No. 435/VI-15，pp.121-128，1991.9.
- 7) 茂木淳，山越孝太郎，大下英吉：熱画像処理に基づくコンクリート内部の鉄筋腐食評価システム構築に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，pp.1679-1684，No.1，2003.7.
- 8) 白木悠祐，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，Vol.26，Vol.1，pp.1845-1850，2004.7.
- 9) 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，Vol.26，Vol.1，pp.1989-1994，2004.7.
- 10) 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，pp.1741-1746，2005.6.
- 11) 高澤健二郎，白木悠祐，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補修効果の確認手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1849-1854，2005.6.
- 12) 堀克彦：工業用電気加熱，(財)省エネルギーセンター，pp.93，1986.1.
- 13) 中路幸謙：電熱工学 第二次改訂版，電気学会，pp.81，1984.2.
- 14) 電気・電子工学大百科事典，電気書院，Vol.19，pp.152，1983.

(2007. 3. 30 受付)

APPLICATION OF THERMOGRAPHY TO DETECTION OF INTERNAL
DEFECTS IN REINFORCED CONCRETE BY HEAT CHARGE DUE TO
ELECTROMAGNETIC INDUCTION

Osamu TANIGUCHI, Bunji SHIGEMATSU, Hiroaki HORIE and Hideki OSHITA

A new Nondestructive evaluation for internal defects in reinforced concrete is developed by employing thermography and heat charge due to electromagnetic inductance. A target of research is to identify defects existed in concrete cover Nondestructively. Because reinforcing steel-bar should be heated by electromagnetic induction, the effect of induction coil on uniform heating of rebar is first clarified. Based on findings, model specimens with artificial defects are tested. Thus, applicability and limitation of the proposed technique are demonstrated.