

論文 鉄筋格子に適用可能な電磁誘導コイルの改良と鉄筋腐食診断に関する研究

森宮 奈緒子*1・大下 英吉*2

要旨: 著者らはコンクリート構造物中の鉄筋を強制加熱し、コンクリート表面の温度変化を赤外線センサで測定することにより、コンクリート内部の様々な劣化性状を評価可能である新たな非破壊検査システムの構築に着手している^{1)~4)}。既往の研究において、コンクリート中の鉄筋格子に対して電磁誘導加熱すると、結束箇所における接触抵抗の影響で加熱むらが生じ、熱画像処理による鉄筋腐食などの各種劣化診断の精度が低下する。本研究では、電磁誘導加熱に用いるコイルの形状を変えることで、結束箇所の影響をなくすとともに鉄筋格子における本システムの適用性を議論する。

キーワード: 非破壊検査, 電磁誘導, 鉄筋腐食, 鉄筋格子

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が社会問題となり、各種劣化性状を簡便かつ高精度な診断を可能とする手法の新たな開発ならびに現存する手法の高機能化が求められている。各種劣化性状のなかでも、特に鉄筋の腐食は構造性能を低下させるばかりか、構造物の崩壊にもつながる非常に重要な問題である。

著者らはコンクリート内部に存在する剥離、空洞、鉄筋腐食といった劣化性状を非破壊、非接触によって評価を可能とする非破壊検査システムの構築に着手している。システムの概要は、鉄筋コンクリート構造物内部の鉄筋を強制的に加熱させコンクリート表面の温度変化を赤外線センサで測定し、その温度の値やその分布性状からコンクリート内部における上述した各種劣化現象を評価するというものである。したがって、鉄筋の温度制御が非常に重要であるとともに、その制御如何によっては診断精度の低下を生じさせることにもなる。

鉄筋の加熱手段には電磁誘導を用いており、コイル形状によっては加熱むらが生じるため既往の研究ではまず、加熱むら生じさせず加熱効率も最適となるコイル形状を決定した。そして、一方向に配筋された RC 構造物において、鉄筋の温度制御に対する有効性が確認された。しかしながら、電磁誘導加熱による加熱効率は、コイルから磁性体である鉄筋までの距離すなわちかぶりと鉄筋量に大きく依存するため、主筋と配力筋あるいはせん断補強筋の結束箇所では非常に高温となる問題があった。さらに、鉄筋同士で格子が形成されると、それを 1 周する電流も生じるため（以下、ループ電流と称す）鉄筋格子においては一様な温度制御が困難になるという問題が生じた。このようなことから、鉄筋同士の結束箇所で生じる磁力を低減させるためにコンクリート表面

に銅板を設置した状態での制御を実施したが、依然として上述した前者の問題は課題に残っていた^{1), 2)}。

本研究では、鉄筋同士の結束箇所で生じる上述の問題を回避すべく鉄筋格子に対しても一様な鉄筋加熱性状を呈することのできるコイルの改良を行なうとともに、その有用性を検討する。さらに、部分的に腐食が生じた鉄筋を格子状に配筋したコンクリートに対する電磁誘導加熱を行い、コンクリート表面の温度性状も確認した。

2. 電磁誘導コイルの改良と加熱特性

従来のコイルは、**図-1** に示すように長方形をした形状である。鉄筋に対してコイルは長辺方向と鉄筋軸方向とが一致するように設置していたためにコイルの作る 1 方向の磁界に対して 1 方向の電流が鉄筋に流れるものであった。したがって、格子状の鉄筋においてはループ電流が流れ、抵抗が大きな結束箇所において高温となったものである。さらに、四隅の隅角部では磁界を作る方向が急激に変化するという問題もあった。

そこで、本章では上述した問題を解決するためにコイルの改良を行ない、大気中の健全鉄筋を加熱した際の鉄筋表面の温度分布から、コイルの加熱特性を把握するとともに、その有用性について検討する。

2.1 コイルの形状寸法

改良コイルは、**図-2** に示すように 190×115×40mm の楕円形状であり、磁力を大きくするために 3 層からなっている。ここで、同図に示すコイルの水平方向中心を x 軸、鉛直方向中心を y 軸と定義しておく。

コイルは、**図-3** に示すように鉄筋軸に沿ってコイルの長手方向の中心軸である x 軸を一致させるように配置する。このような配置は、鉄筋を挟んだ左右のコイルにより、1 本の鉄筋軸方向に 2 方向の電流を生じさせ、加

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

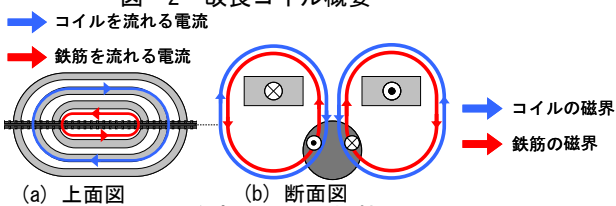
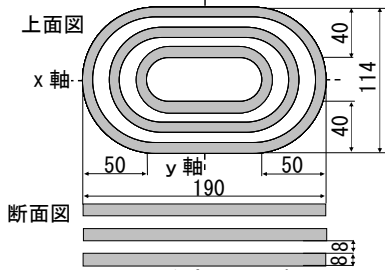
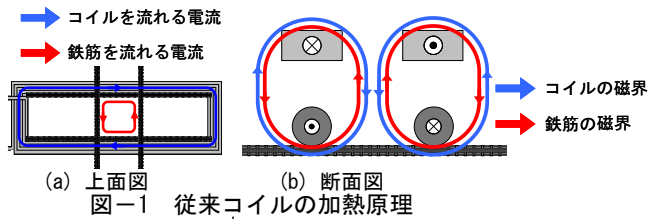


表-1 実験条件

コイル負荷電力 (kW)	加熱時間 (s)	コイルから鉄筋表面までの距離 (mm)
0.2	120	43

熱対象とする鉄筋軸方向のみに電流が発生することとなり、ループ電流を抑制することが可能となる。また、隅角部が存在しないことにより、磁界の急激な変化もなくなる。

2.2 コイルの加熱特性

(1) 実験方法

実験概要は図-4 に示す通りであり、用いた鉄筋はD16(SD295)、コイルの負荷電力、加熱時間およびコイルから鉄筋までの距離は表-1 に示す通りである。鉄筋表面温度の計測は、赤外線センサによって初期温度計測後、加熱が終了しコイル撤去直後から 5 秒間隔で 90 分撮影した。コイルの設置は、コイルの x 軸が鉄筋軸直上になるようにした。

(2) 鉄筋表面の温度性状

図-5 は、加熱停止直後および加熱停止後 60 秒の鉄筋表面温度の上昇量の分布である。均一に加熱されている領域は、加熱停止直後の時点では 300~400mm であることがわかる。加熱停止後 60 秒の時点における上述した 300~400mm の温度分布は完全には均一ではないものの、その差は約 1°C であり、この差異がコンクリートの温度に及ぼす影響はほとんどない³⁾。

以上のことから、本研究で試作した寸法の改良コイルでは 100mm 程度以内では均一に加熱可能であることが確認できた。このことから、改良コイルの形状を保持したまま長辺方向の寸法を大きくすれば均一な加熱領域

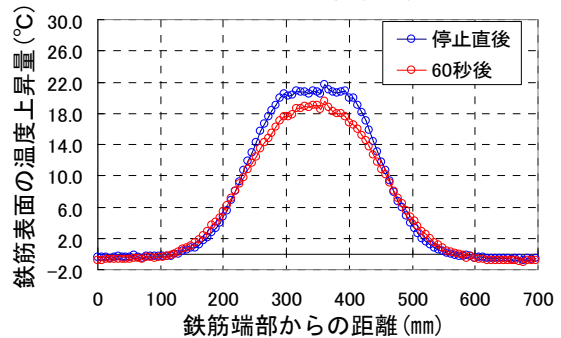
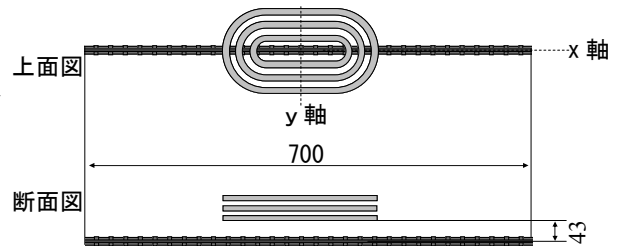
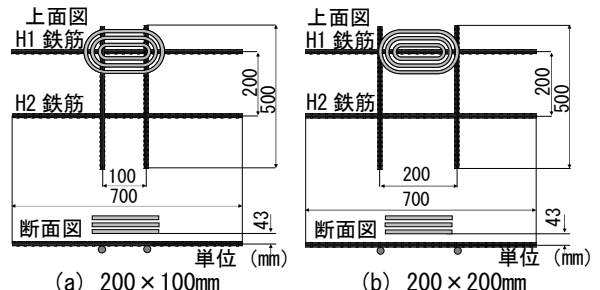


図-5 鉄筋表面の温度上昇量分布 (健全鉄筋単体)



は広がるものと考えられる。

3. 鉄筋格子における加熱特性

本章では、鉄筋格子単体に対して改良コイルによる電磁誘導加熱を行ない、鉄筋格子の加熱特性を評価することにより、改良コイルの適用性を議論する。

3.1 実験方法

実験概要を図-6 に示す。同図 (a), (b) はそれぞれ 200×100mm, 200×200mm の 1 つの鉄筋格子である。加熱対象を H1 鉄筋とし、コイルは x 軸が H1 鉄筋軸直上になるように設置した。また、結束箇所は結束線を用いて結束した。コイル負荷電力、加熱時間、コイルから鉄筋までの距離は、表-1 と同じである。

3.2 格子部の加熱特性

既往の研究では、鉄筋格子を加熱すると格子部が高温となり、時間が経過したとしても結束箇所は他の鉄筋箇所よりも高くなっていた。本節では改良コイルを用いた鉄筋格子への電磁誘導実験により、特に結束箇所における加熱特性に着目した検討を実施する。

図-7 に加熱停止直後および加熱停止後 60 秒の鉄筋表面温度の上昇量の分布を示す。同図 (a), (b) は、図-6 (a), (b) に対応した H1 鉄筋表面の温度上昇量分布であり、横

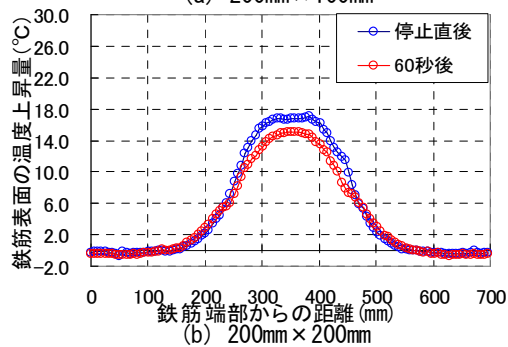
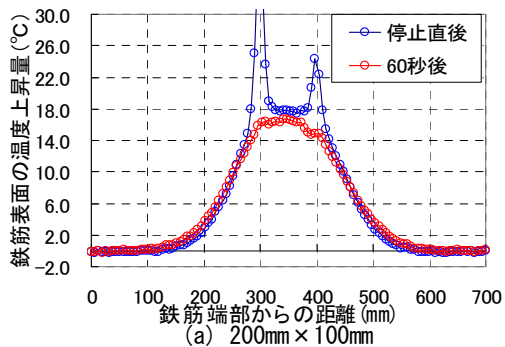


図-7 鉄筋表面の温度上昇量分布（健全鉄筋格子）

軸は鉄筋端部からの距離を示している。いずれの温度上昇量分布も格子内の鉄筋の温度上昇量は図-5と比較するとほぼ同じ温度上昇量であることから、ループ電流が生じていないことが確認できる。

まず、図-7(a)において、加熱停止直後の時点で結束箇所(鉄筋左端部から300mmおよび400mm)の位置が高温となり、60秒後には近傍の鉄筋とほぼ同じ温度上昇量となっている。これは結束線の断面が小さいために電気抵抗が大きくなり、一時的に結束線自体が発熱したものである。均一に加熱されている領域は、加熱停止直後の時点で320~380mm、加熱停止後60秒の時点では結束線の温度低下による影響を考慮すると、300~400mmである。

次に、同図(b)においても均一に加熱されている領域は停止直後の時点で300~400mmであり、加熱停止後60秒の時点においてもその領域にほとんど変化はない。また、結束位置である250mmおよび450mmの位置における温度は、同図(a)とは異なり、近傍の鉄筋とほぼ同じである。これに関しては後述する。

3.3 格子部からの熱移動性状

図-7(a)について、加熱停止直後の結束箇所では他の領域に比べて高温となっているが、時間の経過とともに結束箇所の温度上昇量は他の領域とほぼ等しくなり、温度勾配が緩やかになっている。一方、同図(b)に関しては、停止直後の結束箇所の発熱はみられない。これは、格子間隔が200mmであり、2.2節に示した適用可能な鉄筋間隔よりも大きいために結束箇所が加熱されなかったためである。

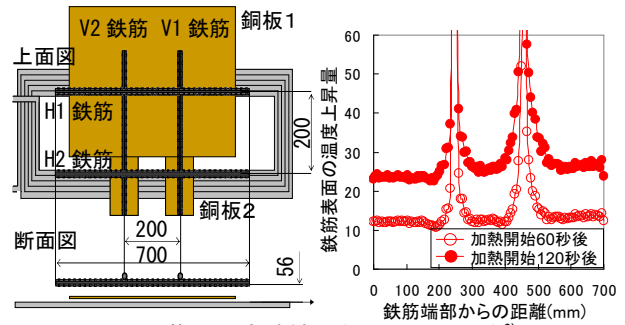


図-8 梅原の実験結果(200×200mm)²⁾

表-2 熱的特性値

銅	熱伝導率	51.30 W/m°C
	比熱	0.47 kJ/kg°C
腐食生成物	熱伝導率	0.07 W/m°C
	比熱	1.20 kJ/kg°C

図-8は既往のコイルによる結果を示したものであり、200×200mmの鉄筋格子の結束箇所に銅板を設置した状態で加熱を行なったものである²⁾。同図では、結束箇所の温度上昇は他の領域に比べて非常に高く、その差異は40°C以上にもなっている。

以上のことから、2章に示した改良コイルを用いた鉄筋格子の加熱は、ループ電流および鉄筋の点接触による電気抵抗の増加に伴う結束箇所の発熱を解消し、加熱対象鉄筋のみを加熱することが可能であると考えられる。

4. 腐食した鉄筋の加熱特性とコンクリート表面の温度性状

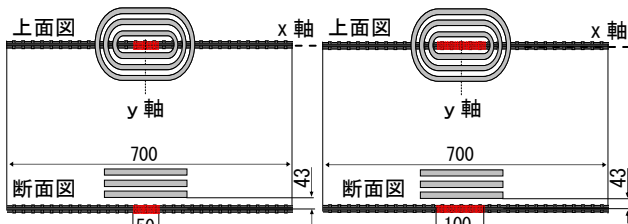
前章に示したように、改良コイルは鉄筋格子に対して均一に加熱することが可能であり、結束箇所での鉄筋量に応じた発熱特性が改善されるとともにループ電流も生じないことが確認された。しかしながら、コンクリート中の鉄筋を加熱した場合には鉄筋のみを加熱した場合に比べて多方向へ熱が拡散するため、コンクリート供試体に対して加熱実験を行うことにより、鉄筋格子を加熱した場合と同様の効果が得られるかを検討しなければならない。

4.1 鉄筋格子の加熱特性

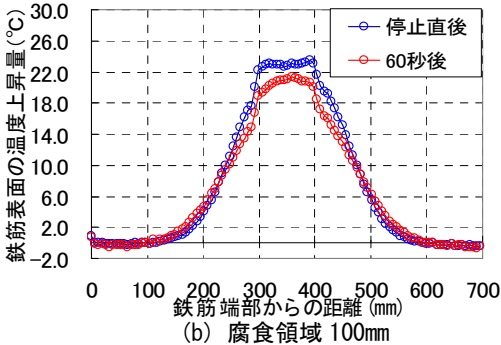
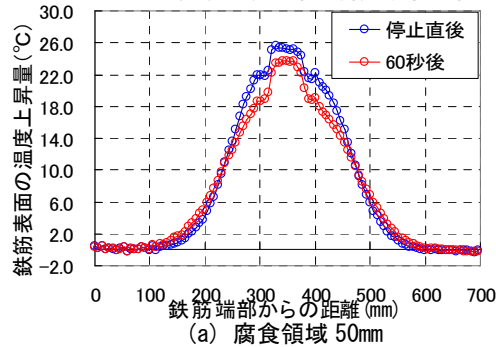
(1) 腐食鉄筋1本

まず、鉄筋腐食が鉄筋表面温度に及ぼす影響を把握するため、ある領域で腐食を生じている一本の鉄筋に対して、加熱実験を行うこととする。実験概要は、図-9に示すように、腐食領域は50mmと100mmであり、実験条件は表-1と同じである。

図-10は鉄筋表面の温度上昇量の分布であり、同図(a)、(b)はそれぞれ部分腐食領域が50mm、100mmの鉄筋である。まず、同図(a)において、加熱停止直後では320~380mmの領域で均一に温度が高くなっており、鉄筋左端部から350mmの位置の温度上昇量は26°Cである。そして、加熱停止後60秒の時点では、高温領域は325~360mmに減少し、鉄筋左端部から350mmの位



(a) 腐食領域 50mm (b) 腐食領域 100mm
図-9 実験概要(部分腐食鉄筋単体)



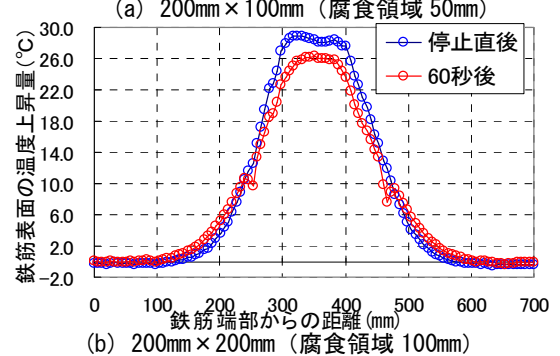
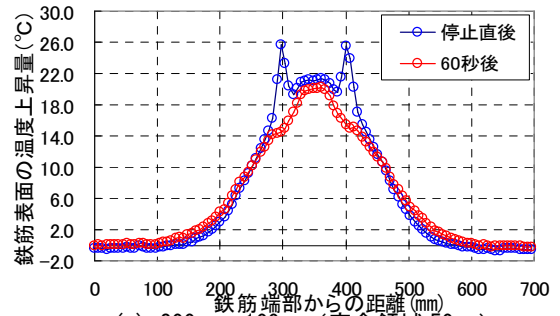
(a) 腐食領域 50mm (b) 腐食領域 100mm
図-10 鉄筋表面の温度上昇量分布(部分腐食鉄筋単体)

置の温度上昇量は 24°C である。腐食を生じていない一本の鉄筋における図-5 の温度分布と比較すると、腐食部と健全部において温度性状が異なることがわかる。これは、表-2 に示す比熱が大きく熱伝導率が小さいという腐食生成物の熱特性によるものであり、非腐食領域では外部への熱拡散が活発に行われることに対して、腐食領域では熱を蓄積するとともに外部への拡散を抑制するためである。

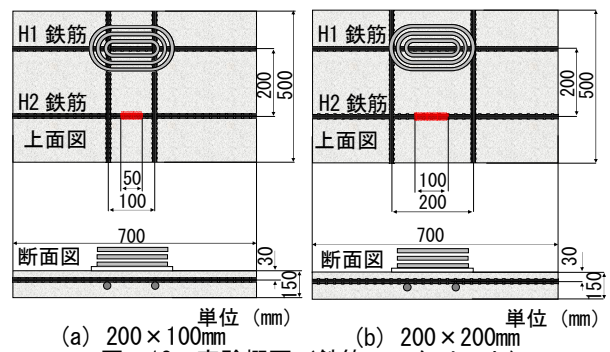
同図(b)においては、加熱停止直後では 300~400mm の領域で均一に加熱されており、鉄筋左端部から 350mm の位置の温度上昇量は約 23°C である。加熱停止後 60 秒の時点では高温領域は 330~390mm となり、鉄筋左端部から 350mm の位置の温度上昇量は 21°C である。また、腐食部と健全部の境界となる 300mm および 400mm の位置で温度勾配が緩やかになっている。

(2) 腐食した鉄筋格子

次に、部分的に腐食した鉄筋が格子状に配筋された状態に対して、加熱実験を行う。実験概要は図-6(a)、(b) の H1 鉄筋にそれぞれ 50mm、100mm の部分腐食を有する鉄筋を配筋したものである。腐食領域は 700 mm の鉄筋の中央に腐食領域が存在するようにあらかじめ電食試



(a) 200mm×100mm (腐食領域 50mm) (b) 200mm×200mm (腐食領域 100mm)
図-11 鉄筋表面の温度上昇量分布(部分腐食鉄筋格子)



単位 (mm) (a) 200×100mm (b) 200×200mm
図-12 実験概要(鉄筋コンクリート)

表-3 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	10	5	60	154	256	866	1013	2.56

験により作成し、腐食率はいずれも 1.6% 程度であった。なお、コイル負荷電力、加熱時間、コイルから鉄筋までの距離は、表-1 と同じである。

図-11 は鉄筋表面の温度上昇量分布であり、同図(a)、(b)はそれぞれ 50mm、100mm の部分腐食を有する鉄筋格子である。同図(a)について、結束箇所(鉄筋左端部から 300mm および 400mm)では、図-7(a)と同様に加熱停止直後の時点で他の領域に比べて高温となり、時間が経過すると他の領域よりも低くなっていることがわかる。この温度性状を図-7(a)に示した健全な鉄筋格子の温度性状に関連付けて検討してみると、図-7(a)における均一な温度領域は 300~400mm であるため図-11(a)の同区間に生じている急激な温度勾配は腐食領域の影響によるものと断定してもよいであろう。また、均一温度領域については、図-7(a)では結束箇所以外で温度が上昇する部分はないが、同図(a)では 325~375mm の範囲で様に温度が上昇しており、部分腐食の有無を確認す

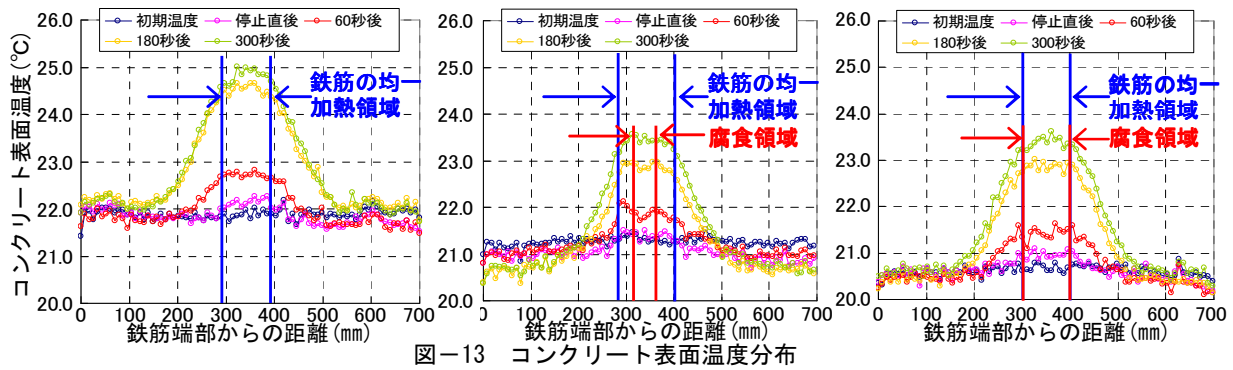


図-13 コンクリート表面温度分布

ることが可能である。

また、同図(b)については、結束箇所は同図(a)と同じ温度変化を示すとともに、300~400mmの区間では図-7(b)とほぼ同様の温度分布を示していることがわかる。しかしながら、距離300および400mmの位置で急激な温度勾配を示しており、その位置において図-7(b)とは異なる。これは、改良コイルの寸法から均一加熱区間が300~400mmであることに加えて、その位置が腐食と非腐食領域の境界であることによるものであり、腐食長が50mmの図-11(a)と同じような温度性状となっている。

以上のことから、結束箇所の発熱を解消できる改良コイルは、部分腐食を有する鉄筋格子に対して有効であるといえる。

4.2 コンクリート表面の温度性状と鉄筋腐食

(1) 実験方法

本実験で用いたコンクリート供試体の形状寸法および配合をそれぞれ図-12、表-3に示す。同図(a)、(b)のH1鉄筋に健全鉄筋を配筋し、H2鉄筋にそれぞれ50mmと100mmの部分腐食を有する鉄筋を配筋したものである。鉄筋表面からコンクリート表面までの距離は30mmとし、コイルはそのx軸と加熱対象とする鉄筋軸とが一致するように設置し、コイルからの熱がコンクリート表面に伝わらないように、断熱材として厚さ10mmの発泡スチレンボードをコンクリートとコイルの間に配置した。なお、コイルの負荷電力は1.0kW、加熱時間は90秒とした。

(2) 実験結果

図-13に加熱停止直後からの所定の時間におけるコンクリート表面の温度分布を示す。同図(a)、(b)、(c)は、図-12(b)のH1(健全鉄筋)、図-12(a)のH2(部分腐食領域50mm)、図-12(b)のH2(部分腐食領域100mm)に対応している。なお、本実験で用いた結束線の熱容量はコンクリートに比べ非常に小さいため、全ての温度分布で結束箇所が高温となる現象はみられなかった。

まず、同図(a)の健全な鉄筋上のコンクリート表面の温度分布については、コンクリート表面における加熱むらに着目した検討が重要となる。すなわち、図-14に

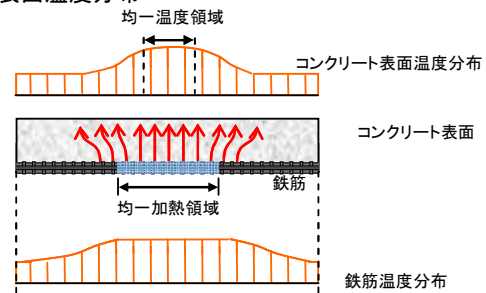
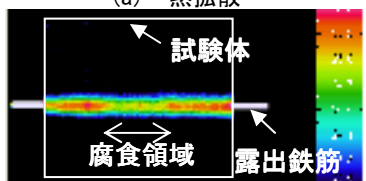
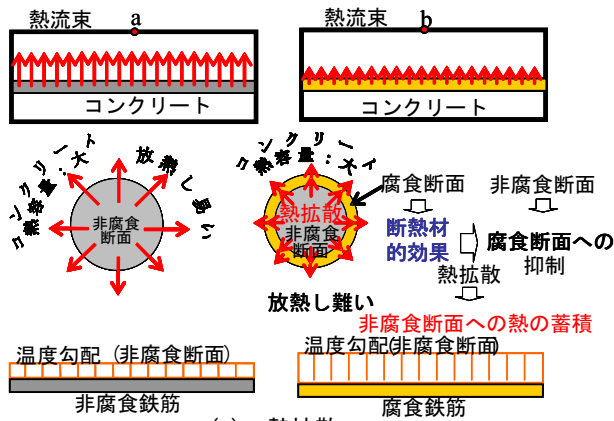


図-14 鉄筋表面とコンクリート表面の均一温度領域

示すように、鉄筋の均一加熱領域とコンクリート表面の均一温度となる領域とは異なり、鉄筋からコンクリート表面への熱拡散により、コンクリートの均一温度領域は小さくなり、その精度はかぶり厚や鉄筋の加熱による温度上昇量に依存することとなる。このようなコンクリート表面の均一温度領域内に腐食鉄筋箇所が存在することが、ここでの大前提となる。したがって、均一温度領域外に腐食が存在する場合には、対象領域(コイル設置位置)を変更するのみで対応可能となる。コンクリート表面の均一温度領域であるが、加熱停止後60秒の時点では、ほぼ鉄筋の均一加熱領域(300~400mm)に同じであるが、時間の経過とともに近傍へ熱拡散によりその領域は徐々に小さくなっている。すなわち、本研究で行った実験条件下では、コンクリート表面の均一温度領域が最も広い加熱停止後60秒の時点において、鉄筋腐食の有無に関する検討を行なうことが妥当であると考えられる。

次に、同図(b)および(c)の部分的に腐食した領域が存在する鉄筋上のコンクリート表面の温度分布については、上述したように加熱停止後60秒の時点における300~400mmの領域での温度分布性状に着目した検討が重要となる。既存の研究成果によると、図-15⁴⁾に示すように腐食生成物が鉄筋の非腐食断面からコンクリートへの熱拡散を抑制し内部に熱を蓄積することにより、腐食領域上のコンクリート温度は他の領域に比べて低くなるとしている。このような温度分布性状に関連付けて図-13(b)および(c)の検討を行なうと、腐食領域50mmでは300~400mmの領域(加熱停止後60秒)における温度の最大値と最小値の差異は約0.6°Cであり、閾値を



(b) コンクリート表面の熱画像 (加熱終了 60 秒後)
 図-15 既往の研究成果⁴⁾

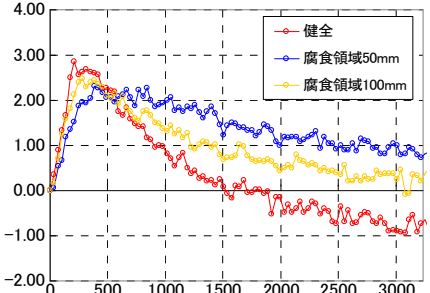


図-16 コンクリート表面温度履歴

0.5°C⁵⁾と仮定することにより腐食の有無が確認できる。一方、腐食領域 100mm では、同図 (a) に示したコンクリートの均一温度領域と鉄筋の腐食領域が同一であるため、300~400mm の領域において温度に差異はない。このような状態においては、改良コイルの寸法を大きくするか、或いは鉄筋中心位置 (350mm) におけるコンクリート表面の温度履歴を健全な鉄筋上のコンクリート表面温度 (図-13 (a)) と比較することにより腐食の有無が判定可能となる。後者においては、図-15 に示したように、腐食生成物の存在はコンクリート表面への熱拡散を抑制するため、腐食の程度により最高温度は低くなる。このような観点から、図-13 に示した鉄筋の中心位置における加熱停止直後からの温度上昇履歴を表したものが図-16 である。コンクリート表面の最高温度上昇量は健全 (2.9°C)、腐食領域 100mm (2.4°C)、腐食領域 50mm (2.3°C) になるにしたがって低下しており、上述した温度性状となっている。その差異は、いずれも約 0.5°C であり、腐食有無の判定はほぼ可能と考えられる。また、最高温度からの低下割合は、健全鉄筋に比べて腐食鉄筋が小さく、熱の蓄積ならびに放熱抑制といった腐食生成物の熱的特性を反映したのとなっている。

5. まとめ

本研究では電磁誘導加熱に使用するコイルを改良し、本システムの鉄筋を格子状に配筋したコンクリートの腐食診断への適用性を評価した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 改良コイルは鉄筋加熱した場合においても、ループ電流および結束箇所が発熱を解消し、加熱対象鉄筋を均一に加熱することが可能である。
- (2) 大気中で部分腐食鉄筋を有する鉄筋格子を加熱した場合、改良コイルの均一加熱領域である 100mm の範囲内であれば、腐食の有無を評価することが可能である。
- (3) コンクリート中に 50mm の部分腐食を有する鉄筋格子を配筋した場合、コンクリート表面の温度分布から腐食の有無を評価することが可能である。
- (4) コンクリート中に 100mm の部分腐食を有する鉄筋格子を配筋した場合、健全鉄筋を配筋したコンクリート表面の温度履歴との比較により腐食の有無を評価することが可能であると考えられる。

謝辞

コイル作成にあたって第一高周波工業の平山鋼太郎氏、友田勇氏にご協力していただき、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 堀江宏明・尾崎勝成・谷口修・大下英吉：熱画像処理に基づいたコンクリート内部の鉄筋網の鉄筋腐食性状評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.685-690，2007
- 2) 梅原稔之，大下英吉：電磁誘導加熱を用いた各種非破壊検査における鉄筋加熱むら解消法に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.30，No.1，pp.1143-1148，2008
- 3) 谷口修，重松文治，堀江宏明，大下英吉：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，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.173-185，2008
- 4) 大下英吉，堀江宏明，長坂慎吾，谷口修，吉川信二郎：電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいた RC 構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法，土木学会論文集 E，Vol. 65，No.1 pp.76-92，2009
- 5) 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