

論文 鉄筋網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

中央大学 理工学部土木工学科 学生会員 ○森宮 奈緒子
中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 正会員 大下 英吉

1. はじめに

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。既往の研究において、コンクリート中の鉄筋網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という問題があった¹⁾。

本研究では、結束箇所の発熱を解消し、対象鉄筋を均一に加熱することを目的として、電磁誘導加熱に用いるコイルの形状寸法の改良を行った。そして鉄筋網の温度性状を把握し、次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して加熱実験を実施し、コンクリート表面の温度性状を確認した。

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ため、その問題もあった。

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、大気中の鉄筋格子網を加熱した際の鉄筋表面の温度分布から、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。

2.1 コイルの形状寸法

改良コイルは図-2 に示すように $190 \times 115 \times 27$

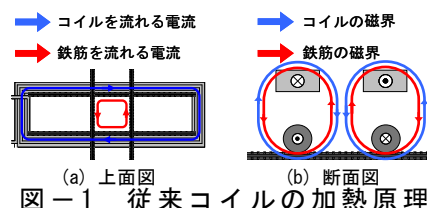


図-1 従来コイルの加熱原理

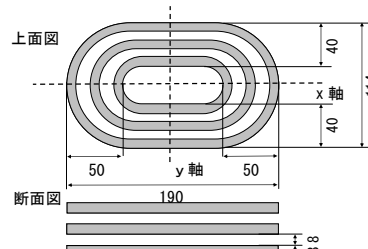


図-2 改良コイル概要

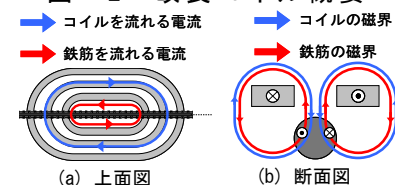


図-3 改良コイルの加熱原理

mm 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鉄筋である。コイルから鉄筋までの距離は43mmであり、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。コイルの負荷電力は0.2kW、加熱時間は120秒とした。

キーワード：非破壊検査，電磁誘導，鉄筋腐食

住所：東京都文京区春日1-13-27，電話：03-3817-1892，FAX：03-3817-1803

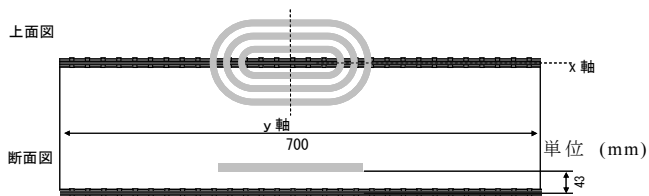


図-4 実験概要

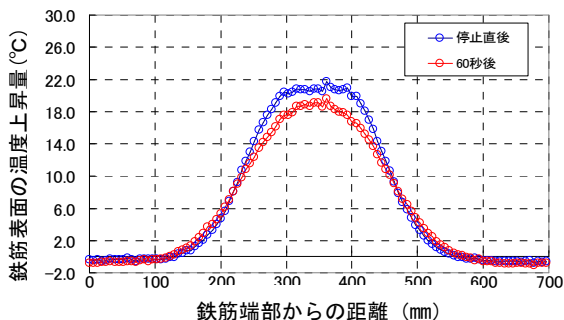


図-5 鉄筋表面温度上昇量（健全鉄筋単体）

(2) 鉄筋表面の温度性状

図-5は、加熱停止直後および60秒の時点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均一ではないものの、その差は約1℃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。

以上のことから、本研究で試作した形状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は広げることが可能であると考えられる。

3. 鉄筋格子網における加熱特性

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。同図は200×100mmの1格子鉄筋網であり、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2章と同じである。

3.2 格子部の加熱特性

既往の研究では、鉄筋格子網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

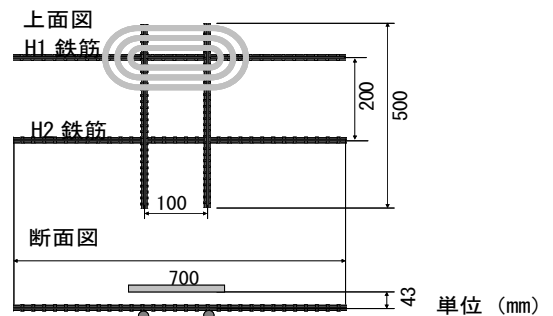


図-6 実験概要

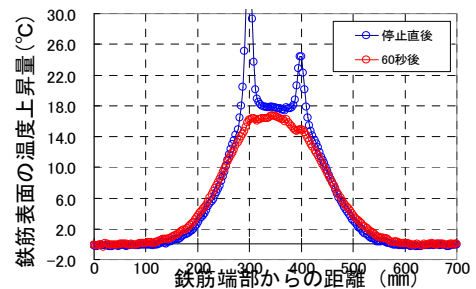
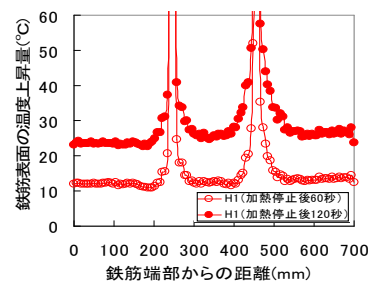


図-7 鉄筋表面温度上昇量分布（健全鉄筋格子）

図-8 梅原の実験結果(200×200mm)¹⁾

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60秒の時点における鉄筋表面の温度上昇量分布を示す。加熱停止直後において、結束箇所(鉄筋端部から300mmおよび400mm)の位置が高温となっており、60秒の時点では近傍の領域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積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ためである。

3.3 結束部からの熱移動性状

図-7では加熱停止直後の結束箇所において他の領域よりも高温となっており、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。

図-8は従来のコイルを用いた既往の研究結果を示したものであり、200×200mmの鉄筋格子の結束箇所に磁場の発生を制御可能な銅板を設置した状態で加熱を行ったものである¹⁾。同図

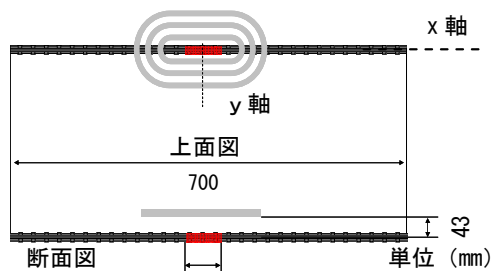


図-9 実験概要(部分腐食鉄筋単体)

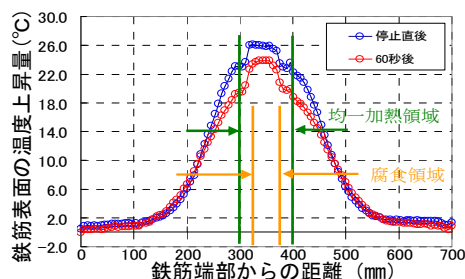


図-10 鉄筋表面の温度上昇量分布

では、結束箇所の温度上昇量は他の領域に比べて非常に高温になっており、その差は 40°C 以上にもなっている。

以上のことから、改良コイルを用いた鉄筋網の加熱は、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

コンクリート中の鉄筋を加熱した場合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、本章では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する。

4.1 鉄筋格子網の加熱特性

(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 であり、実験条件は 2 章と同じである。

図-10 は鉄筋表面の温度上昇量の分布である。加熱停止直後では 320~380mm の領域で一様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 25.1°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 の位置の温度上昇量は 22.7°C である。加

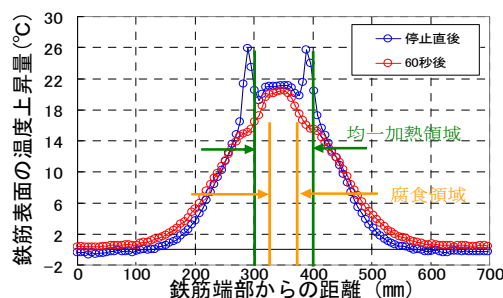


図-11 鉄筋表面の温度上昇量分布

表-2 熱的特性値

鋼	熱伝導率	51.30 W/m $^{\circ}\text{C}$
	比熱	0.47 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$
腐食生成物	熱伝導率	0.07 W/m $^{\circ}\text{C}$
	比熱	1.20 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$

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 の位置の温度上昇量は 22.7°C である。健全鉄筋 1 本を加熱した図-5 と比較すると、腐食部と健全部においての温度性状が異なっていることがわかる。これは表-1 に示す比熱が大きく熱伝導率が小さいという腐食性生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。

(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 の H1 鉄筋に 50mm の部分腐食を有する鉄筋を配筋したものである。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 2 章と同じである。

図-11 は鉄筋表面の温度上昇量分布である。この温度性状を図-7 に示した温度性状に関連付けて検討してみると、まず結束箇所については、図-7 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。図-7 の均一温度領域は 300~400mm であるため図-11 の同区間に生じている温度勾配は腐食領域の影響によるものと断定してよいであろう。また、均一温度領域については図-7 では結束箇所以外での温度の上昇はみられないが、同図では 325~375mm の範囲で一様に高温となっており、腐食の有無を確認することが可能である。以上のことから、改良コイルは、部分腐食を有する鉄筋網に対して有効であるといえる。

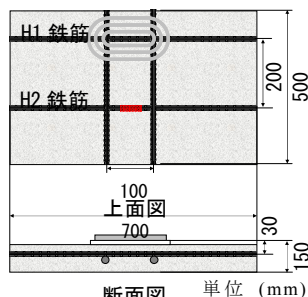


図-12 実験概要

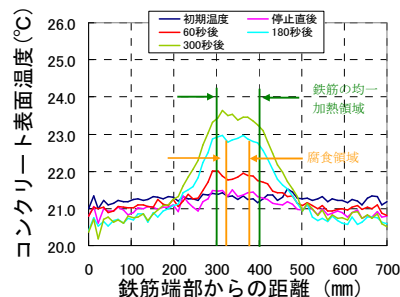
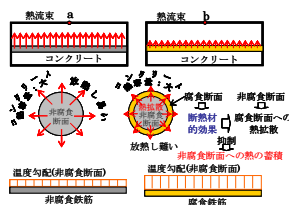


図-13 コンクリート表面温度分布

図-14 既往の研究成果²⁾

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は図-12に示すとおりであり、H1およびH2鉄筋にそれぞれ健全鉄筋と50mmの部分腐食を有する鉄筋を配筋したものである。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。同図は図-12のH2鉄筋(部分腐食領域50mm)に対応している。全ての温度分布で結束箇所の影響はみられなかった。コンクリート表面温度は、加熱停止後60秒の時点で300~400mmの範囲で均一に加熱されており、時間の経過とともに他の領域への熱拡散により、その領域は徐々に小さくなっている。既存の研究成果によると、図-14に示すように腐食生成物が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の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検討を行うと、加熱停止後60秒の時点での300~400mmの領域におけるコンクリート表面温度の最大値と最小値の差異は0.6°Cであり、閾値を0.5°C³⁾と仮定することにより、腐食の有無が確認できる。次に、図-13およびH1鉄筋(健全鉄筋)に対して実験を行った場合のそれぞれの鉄筋の中心位置(350mm)における加熱停止直後からの温度上昇量履歴を表したものが図-15である。コンクリ

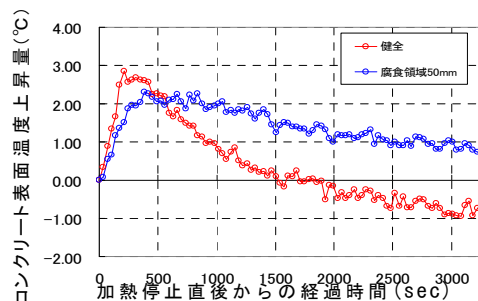


図-15 コンクリート表面の温度上昇量履歴

ート表面の最高温度上昇量は健全(2.9°C)、腐食領域50mm(2.3°C)となっており、上述した温度性状となっている。その差異は約0.6°Cであり、温度履歴からも腐食の有無の判定は可能である。また、最高温度からの低下割合は、健全に比べて腐食鉄筋の方小さく腐食生成物の熱的特性を反映したものとなっている。

5. まとめ

以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 改良コイルは鉄筋格子網を加熱した場合においても、ループ電流および結束箇所の発熱を解消し、加熱対象鉄筋を均一に加熱することが可能である。
- (2) コンクリート中に50mmの部分腐食を有する鉄筋網を配筋した場合、コンクリート表面の温度性状から腐食の有無を評価することが可能である。

参考文献

- 1) 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, pp1143-1148, 2008
- 2) 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(掲載決定)
- 3) 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