

論文 電磁誘導加熱によるコンクリート内部の鉄筋網の加熱性状評価に関する研究

堀江 宏明^{*1}・尾崎 勝成^{*2}・谷口 修^{*3}・大下 英吉^{*4}

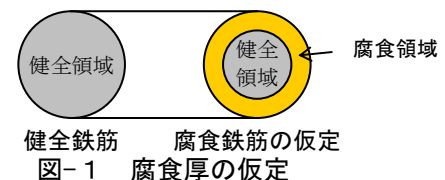
要旨：著者ら^{1),2),3),4)}はコンクリート構造物中の鉄筋を強制加熱し、コンクリート表面の温度変化を赤外線センサで測定することにより、コンクリート内部の様々な劣化性状を評価可能である新たな非破壊検査システムの構築に着手している。既往の研究¹⁾では非接触で内部の鉄筋を加熱可能な電磁誘導加熱を行い、鉄筋の温度上昇量を基に鉄筋腐食の定量的評価が可能であった。しかしながら、電磁誘導加熱での鉄筋網の加熱性状は未解明のままであった。そこで、本研究では鉄筋網の加熱性状を把握し、鉄筋網への本システムの適用性を議論する。

キーワード：非破壊検査、鉄筋腐食、電磁誘導

1. はじめに

著者らはコンクリート内部に存在する様々な劣化性状を同時に評価可能な新たな非破壊検査システムの構築に着手している。本システムの概要はコンクリート内部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し、熱伝導解析を併用することによって、鉄筋の腐食の有無や腐食量、空洞やひび割れの大きさや位置を評価可能なものである。

既往の研究^{1),2)}において、電磁誘導加熱を用いて鉄筋コンクリート中の鉄筋を強制加熱した場合、腐食鉄筋直上のコンクリート表面の温度性状は、健全鉄筋の場合のそれと比べて最高温度が低く、低下割合が緩やかであると報告した。また、鉄筋の温度上昇量と、それによって変化するコンクリート表面温度履歴から腐食厚を推定する手法も報告した¹⁾。本解析手法の概要は図-1に示すようにまず鉄筋の蓄積熱量、仮定腐食厚を初期条件としてコンクリート表面温度の実測値と計算値の差である評価関数を最小とする錆領域の熱伝導率を様々な仮定腐食厚に対して求める。そして実験により測定されている錆の



熱伝導率（真値）に一致する腐食厚を求め、この値が同定された腐食厚となる。本手法は、単一鉄筋を有する RC 部材という非常にシンプルな部材に対して適用性が確認されているが、実用に際しては、より複雑に配筋された RC 部材への適用性の確認が必要である。

そこで、本研究では、まずはじめに、鉄筋の温度上昇量とコンクリート表面温度履歴を用いた鉄筋の腐食量同定解析手法を示し、次に大気中で鉄筋網を加熱し、その加熱特性の評価を行い、電磁誘導加熱による鉄筋網加熱の腐食量同定解析手法への適用性を議論した。

2. 鉄筋腐食量同定解析手法の概要

2.1 腐食領域の推定方法

鉄筋腐食の推定は、まず腐食厚を仮定し、仮定腐食厚の熱伝導率を同定することにより、仮定腐食厚と仮定腐食厚の熱伝導率との近似式を求め、

*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 (正会員)

*3 五洋建設㈱ 技術研究所 主任 工修 (正会員)

*4 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

最終的に、近似式と真の腐食鉄筋の熱伝導率との関係から腐食厚を推定するというものである。

2.2 熱伝導率の同定手法

本研究では、共役勾配法的一种である Fletcher Reeves 法を用いて、以下に示す評価関数を最小化することにより熱伝導率の同定を行なった。

鉄筋周りの熱伝導率を求めるための評価関数を以下のように定義する。

$$J(\kappa) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \int_V (\phi_i(\kappa) - \eta_i)^T R_{ij} (\phi_j(\kappa) - \eta_j) dV dt \quad (1)$$

ここで、 κ は熱伝導率、ここで、 ϕ_i および η_i は、それぞれ観測点におけるコンクリート表面温度計算値およびコンクリート表面温度観測値、 R_{ij} は重み係数、 t_0 および t_f はそれぞれ時間の初期値および終端値、 V はボリュームである。

以下に計算のアルゴリズムを示す。

- Step1 熱伝導率の初期値 $\kappa^{i=0}$ (i は繰返し回数) 許容誤差 ε の設定
- Step2 $\phi^{i=0}(\kappa^0, t)$, $\frac{\partial \phi}{\partial \kappa}$ の計算 (ϕ は温度)
- Step3 $\frac{\partial J(\kappa^0, t)}{\partial \kappa}$ の計算, $d^0 = -\frac{\partial J(\kappa^0, t)}{\partial \kappa}$ の設定
- Step4 $J(\kappa^i + \alpha^i d^i)$ が最小となるステップ幅 α^i の計算
- Step5 $\kappa^{i+1} = \kappa^i + \alpha^i d^i$ の計算 (d^i は探索方向)
- Step6 $\phi^{i+1}(\kappa^{i+1}, t)$, $J(\kappa^{i+1})$ の計算
- Step7 if $|J(\kappa^{i+1}) - J(\kappa^i)| \leq \varepsilon$: goto End
else : goto Step8
- Step8 $\frac{\partial J(\kappa^{i+1}, t)}{\partial \kappa}$ の計算
- Step9 共役方向に関する勾配 β^i の計算
- Step10 $d^{i+1} = -\frac{\partial J(\kappa^{i+1})}{\partial \kappa} + \beta^i d^i$
- Step11 $i = i + 1$ とし, goto Step4

ステップ幅 α は、評価関数をステップ幅 α で微分し、ゼロと置くことにより

$$\alpha^{(i)} = - \frac{\int_{t_0}^{t_f} \int_V \left\{ d^{(i)} \frac{\partial \phi_i^{(i)}}{\partial \kappa} \right\}^T R_{ij} \{ \phi_j^{(i)} - \eta_j \} dV dt}{\int_{t_0}^{t_f} \int_V \left\{ d^{(i)} \frac{\partial \phi_k^{(i)}}{\partial \kappa} \right\}^T \left\{ d^{(i)} \frac{\partial \phi_k^{(i)}}{\partial \kappa} \right\} dV dt} \quad (2)$$

となる。また、共役方向に関する勾配 β^i は、繰

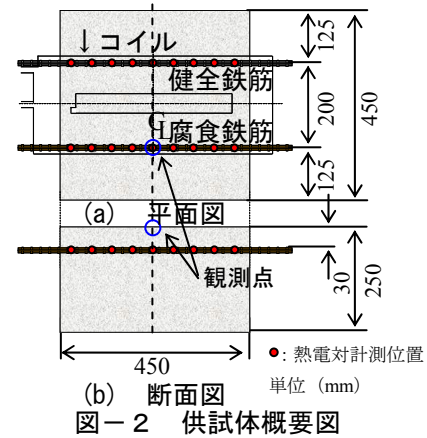


図-2 供試体概要図

り返し計算 ($i+1$) における評価関数の勾配の積を繰返し計算 (i) での評価関数の勾配の積で除すことにより

$$\beta^{(i)} = \frac{\left\{ \frac{\partial J}{\partial \kappa} \right\}^{(i+1)T} \left\{ \frac{\partial J}{\partial \kappa} \right\}^{(i+1)}}{\left\{ \frac{\partial J}{\partial \kappa} \right\}^{(i)T} \left\{ \frac{\partial J}{\partial \kappa} \right\}^{(i)}} \quad (3)$$

として、求めることができる。

2.3. 本手法の適用性評価

(1) 実験に用いた鉄筋コンクリート供試体

実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-2に示すように $450 \times 450 \times 250$ mm であり、かぶり 30mm の位置に鉄筋 D16 を 2 本配筋したものである。鉄筋は健全鉄筋および表面が一様に腐食している腐食鉄筋の 2 種類を用いた。

2.4 実験方法および条件

実験方法は、同図に示すように、コンクリート表面に電磁誘導加熱用コイルを設置し、加熱条件は事前に鉄筋の温度上昇量が 15°C となるように検討し、コイル負荷電力 2kW で 320 秒間加熱することとした。加熱終了後にコイルを取り除いた直後から赤外線センサによるコンクリート表面温度および熱電対による鉄筋表面温度を 5 秒間隔で 60 分間測定した。なお、室温は 23.7°C の一定条件で実施した。なお、使用した供試体は同環境下に数ヶ月間設置し、コンクリート内部が十分に乾燥後実施した。

2.5 解析モデルおよび解析条件

解析に用いた材料の熱的特性は、表-1^{3), 4)}に示す通りであり、コンクリート表面の熱伝達

係数は無風の環境下であることから $10\text{W/m}^2\text{°C}$ とした。解析モデルは図-3 (a) に示すような 2 次元モデルであり、鉄筋部分の拡大図を同図 (b) に示す。假定腐食領域では、 0.1mm 刻みにメッシュを作製した。また、同定に用いた観測値は図-2 に示す腐食鉄筋直上に位置するコンクリート表面の中心位置であり、実験で得られた温度履歴は図-4 に示す通りである。鉄筋は強制加熱中においては固定温度境界とし、熱電対により計測した鉄筋温度まで上昇させた後に、固定温度境界を解除した。また、鉄筋腐食断面において假定した腐食厚は 0.1mm から 1.0mm までの 0.1mm 間隔で設定した。

2.6 解析結果

解析で得られた假定腐食厚と熱伝導率の関係を図-5 に示す。縦軸は熱伝導率、横軸は假定腐食厚である。同図から、假定腐食厚と熱伝導率の関係はほぼ線形である。解析結果から近似直線を作成し、鉄筋腐食領域の真の熱伝導率を代入することにより、腐食領域は 0.03mm という推定結果を得た。実際に使用した腐食鉄筋の腐食厚は、 0.04mm であり、解析結果は実験結果と良好な一致を示している。ここで、假定腐食厚は 0.1mm 間隔で設定しているが、実際の腐食厚は 0.04mm とメッシュ幅よりも小さなものであるが、假定腐食厚と熱伝導率の関係は線形であることから、外挿により最小メッシュ幅以下の腐食厚であっても評価可能であると言える。以上のことから、電磁誘導加熱による鉄筋の温度上昇量は、非常に重要な初期条件であり、腐食厚の精度良い同定を行うには加熱条件の詳細な事前評価が不可欠である。

3. 電磁誘導加熱による鉄筋網の加熱特性

電磁誘導加熱では、あらかじめかぶりおよび鉄筋径を把握しておき、それを基に出力や加熱時間を設定することによって、鉄筋 1 本のみであれば鉄筋の温度上昇量を制御することは容易である。しかしながら、鉄筋網に対して電磁誘導加熱を適用した際の加熱特性は未解明のまま

表-1^{3),4)} 解析条件

	コンクリート	鉄筋(健全領域)	鉄筋(腐食領域)
密度 (kg/m^3)	2.40×10^3	7.85×10^3	5.30×10^3
比熱 (kJ/kg°C)	1.15	4.70×10^{-1}	1.20
熱伝導率 (W/m°C)	2.70	5.13×10^1	6.97×10^{-2}

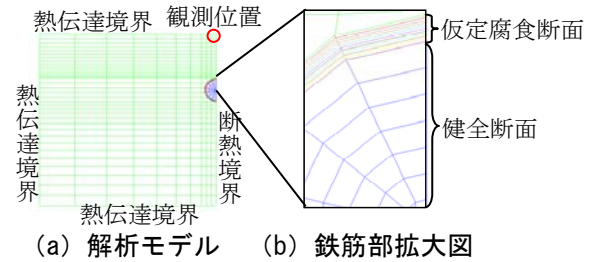


図-3 解析モデル

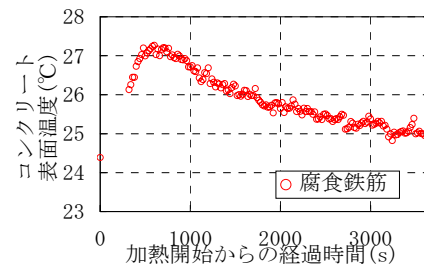


図-4 観測点でのコンクリート表面温度履歴

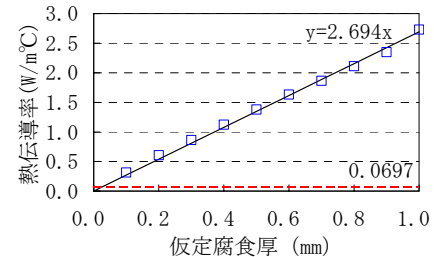


図-5 假定腐食厚～熱伝導率の関係

であった。そこで本章では、鉄筋網の加熱特性の評価を行うこととする。ここで、鉄筋網とは一般に複数の格子によって形成されたものを表すが、本研究においては基礎的研究として 1 および 2 格子鉄筋を対象とすることとする。なお、本章での実験には $980 \times 310 \times 12\text{mm}$ の矩形コイルを使用した。鉄筋を 2 本平行に配置した場合および鉄筋網での温度上昇量の差異を検討するためにコイル負荷電力は 3.2kW 、加熱時間は 60 秒の一定とした。なお、この加熱条件は、大気中で鉄筋を加熱する際に、単一鉄筋および鉄筋網の温度差が顕著となるように、鉄筋の温度上昇量を大きくし、且つ鉄筋の最高温度が赤外線センサの測定範囲である 100°C 以内となるよう設定したものである。

3.1 鉄筋網の加熱特性

(1) 実験方法

実験概要図は図-6 に示す。同図 (a) はコイ

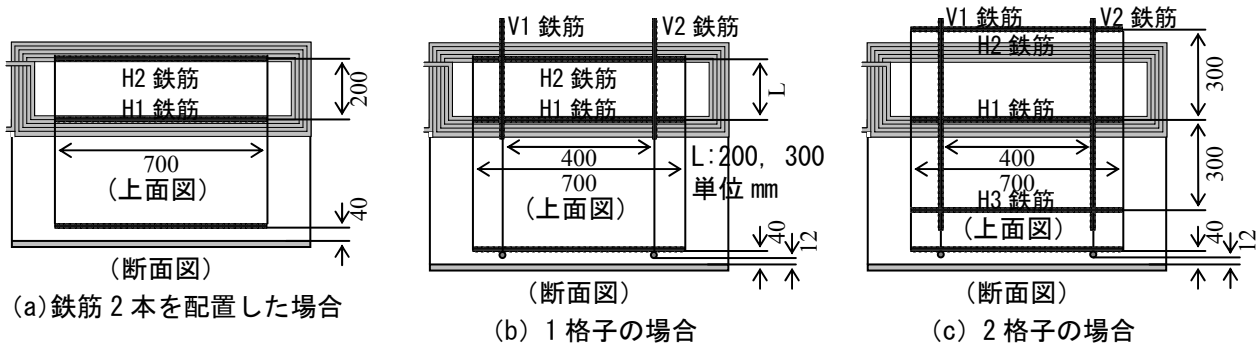


図-6 実験概要図

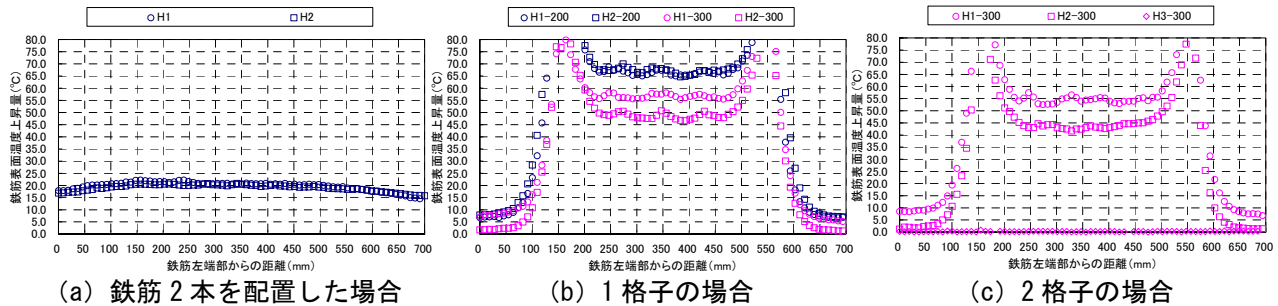


図-7 鉄筋表面の温度上昇量分布

ル長手方向に対して平行に 2 本の鉄筋を配置した場合、同図 (b) は 1 格子の場合であるが、図中の L に示すように、H1 鉄筋と H2 鉄筋の間隔が 200mm および 300mm の場合である。また、

(2) 実験結果

図-7 に加熱終了時における鉄筋表面の温度分布を示す。同図 (a) ~ (c) は図-6 (a) ~ (c) にそれぞれに対応した鉄筋表面温度分布である。なお、x 軸の端部からの距離とは、H1 および H2 鉄筋端部からの距離を示している。図-7 (a) から、鉄筋中心部では温度上昇量が 20.6°C であるのに対し、鉄筋網では 1 格子および 2 格子の両者共に温度上昇量は大幅に大きくなっている。また、鉄筋網の場合では、鉄筋端部からの距離が 150 および 550mm の箇所で特に発熱が大きくなっている。この箇所は結束箇所に相当する。結束線は断面積が小さいことから、抵抗値が大きいため、鉄筋に比べ発熱量が大きいのだと考えられる。

また、同図 (a) の場合では両端部近傍において若干の温度勾配が生じているが、ほぼ均一に加熱できているのに対し、鉄筋網では 1 格子および 2 格子共に 0~150 および 550~700mm の領域において極端に温度上昇量が小さくなってい

る。また、1 格子の H2-300 および 2 格子の H2-300 ともに H2 鉄筋に関してはコイルの範囲外に鉄筋が設置されているにもかかわらず、電磁誘導により加熱されている。以上のことから、鉄筋網に対して電磁誘導加熱を適用した場合、格子を 1 周するような電流（以下、ループ電流と称す）が流れていると考えられる。そのため、1 周する経路外の範囲である 0~150 および 550~700mm の範囲内はほぼ加熱されていないと考えられる。通常、鉄筋 1 本に対し電磁誘導加熱を適用すると、渦電流が微小面積に対して流れるために発熱する。しかしながら、鉄筋網の場合、渦電流ではなく、ループ電流が流れるために、温度上昇量に差異が生じたものと考えられる。つまり渦電流の方がループ電流よりも加熱効率が落ちるということである。また、図-7 (c) の H3 鉄筋に関しては温度上昇量が 0 である。これは、H1 および H3 鉄筋によって形成されている格子の面積に対して、コイル上に存在する面積が小さいために、H1 および H3 鉄筋によって形成されている格子にはループ電流が流れなかったと考えられる。

以上のことから、実構造物においては、格子面積に対してコイル上に存在する格子面積が大

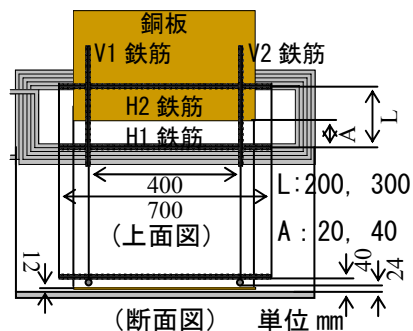


図-8 実験概要図（1 格子の場合）

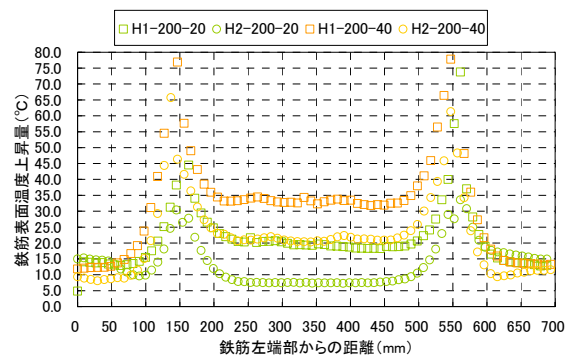
きい場合においては、渦電流ではなく、ループ電流が支配的になり、縦筋および横筋全ての鉄筋が加熱されるために、結束箇所においては横筋、縦筋および結束線が発熱し、結束箇所直上およびその近傍のコンクリート表面温度は他の領域に比べ温度が高くなると考えられ、複雑に配筋されているために、電流の流れが不透明であることから鉄筋網の温度上昇量の制御は困難であると言える。しかしながら、前述したように鉄筋の温度上昇量は腐食量同定解析手法を行うに当たっての重要な初期条件であることから、鉄筋網を加熱した際の鉄筋の温度上昇量を制御することは急務であると言える。そこで次節では温度上昇量の制御手法の検討を行うこととする。

制御手法としては銅板が有効であろう。銅板は電磁波を抑制する効果があるために、加熱対象とした鉄筋のみを加熱可能であると考えられる。また、抑制の程度には銅板の設置位置やその厚さなどがパラメータとして挙げられる。本研究では銅板の寸法は $600 \times 365 \times 1\text{mm}$ とし、設置位置をパラメータとすることとする。

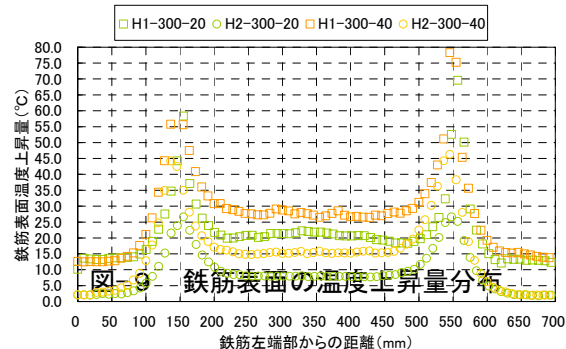
3.2 1 格子鉄筋網の加熱特性

(1) 実験パラメータおよび実験条件

1 格子の場合での実験概要図を図-8 に示す。鉄筋間隔やコイルから鉄筋までの距離は図-6 と同様である。銅板の設置位置については図中の A に示すように H1 鉄筋から 20 および 40mm だけ離れた位置に設置した。ここで、鉄筋名称に関して、例えば H1-200-20 の H1 は鉄筋番号、200 は H1 鉄筋中心から H2 鉄筋中心までの距離、20 は H1 鉄筋から銅板下端までの距離（ただし 0



(a) H1～H2 鉄筋間距離 200mm の場合



(b) H1～H2 鉄筋間距離 300mm の場合

は銅板を設置しない場合を示す) を示している。

(2) 鉄筋表面の温度上昇量分布

図-9 に加熱終了時における鉄筋表面の温度上昇量分布を示す。同図 (a) が H1 鉄筋と H2 鉄筋間距離が 200mm の場合、同図 (b) が H1 鉄筋と H2 鉄筋間距離が 300mm の場合である。同図から、両者共に銅板を設置することによって、温度上昇量は大幅に減少しており、H1 鉄筋と銅板の距離が近いほど温度上昇量は小さくなっている。銅板が H1 鉄筋から 20mm の位置に存在する場合には中心部の温度上昇量が両者共に 20°C 程度であり、図-6 (a) に示すように鉄筋を 2 本のみ加熱した場合とほぼ同じ温度度上昇量であると言える。

次に 0～50 および 650～700mm の領域の温度に着目すると、H1 および H2 鉄筋間隔が 200mm の場合においては、その領域の温度は銅板の位置に関わらずほぼ同じである。それに対し、図-7 (b) の H1-200 および H2-200 と比べる銅板を設置した場合の方が範囲内の温度は高くなっている。このことから、前述したように鉄筋網を銅板を設置することによってループ電流が発生しにくくなり、渦電流が流れやすくなるために、

前述したようにループ電流の経路外の範囲が銅板を設置しない場合の方が温度上昇量は大きくなるのだと考えられる。

以上のことから、銅板を設置した場合、鉄筋網に流れる電流はループ電流が発生しにくくなり、ループ電流に比べ熱効率の落ちる渦電流が発生し、それらの和が銅板の設置によって変動し、コイルと鉄筋表面までの距離が 40mm の場合では H1 鉄筋から 20mm だけ離れた場合において鉄筋網と鉄筋 2 本のみを加熱した場合と同様の温度上昇量になったのだと考えられる。

3.2 2 格子鉄筋網の加熱特性

実験に使用した鉄筋網は図-6 (c) に示したものであり、銅板の位置は前節を基に H1 鉄筋から 20mm だけ離れた位置に設置した。

図-10 に加熱終了時の鉄筋表面の温度上昇量分布を示すが、H1 および H2 鉄筋に関しては、1 格子の場合の H1 から H2 鉄筋までの距離が 300mm、銅板の設置位置が H1 鉄筋から 20mm の場合と同様である。図-7 (c) および図-10 における H3 鉄筋の温度上昇量を見ると、銅板の有無に関わらず 0 である。

以上のことから、コイル長手方向に直行する方向に連続して存在する格子に対しては、コイル上に存在する格子の面積が小さくなるようにコイルを設置することによって、ループ電流の経路を制御可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、電磁誘導加熱の問題点である鉄筋網を加熱した際の鉄筋の温度上昇量の制御を行った。制御方法としては電磁波を抑制する銅板を用いて、その設置位置をパラメータとして鉄筋網と鉄筋 1 本のみを加熱した場合との温度上昇量が一致する銅板の設置位置の確立を行った。

以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 電磁誘導によって鉄筋網を加熱した場合、鉄筋を 1 本のみを加熱した場合に比べはるかに温度上昇量は大きくなる。

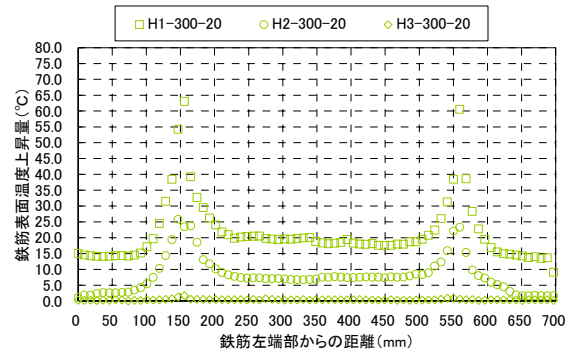


図-10 2 格子の鉄筋表面の温度上昇量

- 2) 電磁誘導によって鉄筋網を加熱した場合、H1 鉄筋からコイルまでの距離が 40mm の場合、銅板を H1 鉄筋から 20mm の設置することによってループ電流は抑制され、鉄筋 1 本のみを加熱した場合と同じ温度上昇量となる。

参考文献

- 1) 長坂慎吾, 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率同定手法に関する研究, 第 33 回土木学会関東支部技術学術講演集
- 2) 堀江宏明, 宮口往久, 谷口修, 大下英吉: 電磁誘導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評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1979 - 1984, 2006
- 3) 臼木悠祐, 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報告集, Vol.21, No.2, pp.1393 - 1398, 2004
- 4) 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報告集, Vol.25, No.1, pp.1679-1684, 2003