論文 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

梅原 稔之*1・大下 英吉*2

要旨:著者ら^{1),2}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部 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,磁界を抑制可能な銅板を利用し,結束部の影響を除去することによって鉄筋網における非 破壊劣化診断の適用性を議論する。

キーワード:非破壊検査,電磁誘導,鉄筋網

1. はじめに

コンクリート中に存在する剥離や空洞といった劣化 現象を非破壊により検査する手法として、コンクリート 表面をヒータ等で加熱し、赤外線サーモグラフィを用い てコンクリート表面の温度性状から判断するアクティ ブ法がある。アクティブ法は、一度に広範囲の領域を検 査することができるが、表面の温度むらによる測定精度 に問題がある。このような外的手法によりコンクリート 内部に熱エネルギーを蓄積あるいは拡散させる場合に は、加熱むらは回避できない重要な問題であるとともに、 その解消に向けた取組みが為されている。

著者らはコンクリート内部に存在する剥離、空洞や鉄 筋腐食といった劣化現象を非破壊、非接触によって同時 に評価を可能とする非破壊検査システム可能な新たな 非破壊検査システムの構築に着手している。その概要は, コンクリート内部の鉄筋を強制的に加熱することによ りコンクリート表面に向かった熱拡散を生じさせ、赤外 線センサにより測定したコンクリート表面の温度性状 から劣化現象を評価するものである。本システムは、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。しかしながら、縦横無 尽に鉄筋が交差し結束されている場合、結束部による接 触抵抗の影響で単一鉄筋を強制的に加熱した場合に比 べて鉄筋表面の発熱量が大きくなる。その結果、コンク リート表面の温度分布にむらが生じるという問題があ る。したがって、本システムを実構造物に適用するには、 加熱むらを解消する手法の確立が不可欠である。

本研究では,鉄筋網の結束箇所で生じる加熱むらの低 減ならびに均一加熱領域の拡大手法を確立することを 目的として,鉄筋網の温度性状を把握し磁場の発生を制

*1 中央大学	理工学部土木工学科(正	会員)	
*2 中央大学	理工学部土木工学科教授	工博	(正会員)

御可能な銅板を用いた検討を行う。また、コンクリート 表面の加熱性状を評価するため、コンクリート中に配筋 された格子鉄筋に対しても評価を行った。そして、鉄筋 網を配筋したコンクリート供試体に対して加熱実験を 実施し、鉄筋網の加熱むら解消法の適用性を議論する。 なお、本論文において、2章および3章においては鉄筋 表面温度を議論するため温度分布の不均一性を加熱む ら、4章においてはコンクリート表面温度を議論するた め温度分布の不均一性を温度むらと表記することとす る。

2. 鉄筋網の加熱特性

鉄筋網に対して電磁誘導加熱を用いた場合,結束部に おいて磁束が大きくなるとともに,格子を1周する電流 (以下,ループ電流と称す)が流れる。したがって,結束 部において高温になる他に,格子を形成していない1本 の鉄筋に比べても高温となるため,均一に加熱するのが 困難であった。この解消方法として,コイルと鉄筋の間 に銅板を設置することによりループ電流を生じさせる 磁場を解消させ,渦電流のみを発生させる手法¹⁾の報告 を行った。しかしながら,結束部において高温となる性 状やそれによる他の領域への熱拡散という問題に関し ては,未解明のままであった。

2.1 結束部からの熱拡散影響評価

(1) 実験方法

実験概要を図-1に示す。同図(a)はコイル長手方向に 対して 2 本の鉄筋を平行に配置した状態,同図(b)は 200×400mmの1格子鉄筋網に対してH1鉄筋中心から水 平方向20mmの位置に600×365×1mmの銅板(以下,銅板1と称す)を水平鉄筋の中心と銅板1の中心が一致す



るように設置した状態, 同図(c)は同図(b)に加えて H1 鉄筋の結束部の2箇所に100×200×10mmの銅板(以下, 銅板2と称す)を設置した状態である。また, 結束部は 結束線を用いて結束した。

本実験に用いた鉄筋は D16 鉄筋であり,電磁誘導加熱に 用いるコイルは 980×310×12mm の矩形形状であり,コ イルを使用し,コイルから鉄筋までの距離は 56mm であ る。コイル負荷電力は 3.7Kw,加熱時間は 120 秒とした。 なお,室温は 20.3℃である。

(2) 鉄筋表面の温度性状

図-2に加熱開始後 60 秒の時点および 120 秒の時点 における鉄筋表面の温度上昇量分布を示す。同図(a)~ (c)は、それぞれ図-1(a)~(c)に対応しており、各図 中に示す記号 H1、H2 は鉄筋位置であり、60、120 は加 熱開始後からの経過時間である。なお、均一加熱の対象 とした鉄筋は H1 鉄筋であり、以下では主として H1 鉄筋 に関する検討を行うこととする。

まず,図-2(a)に関して,H1,H2鉄筋ともにほぼ均 ーに加熱されている。一方,鉄筋網をなす同図(b)に関 しては,H1,H2鉄筋ともに結束部(鉄筋左端部から 150mm および 550mm)では他の領域に比べて高温となっ ている。加熱開始後120秒の温度分布では,結束部が高 温となることにより他の領域に熱拡散が生じ,時間の経 過とともに高温度領域が広くなるとともに、均一温度領 域が小さくなっている。特に,H1 鉄筋では,350mmの 位置における温度上昇量は加熱開始後 60 秒で 16.4℃, 120 秒で 32.5℃であり,同図(a)よりも高くなっている。 また、均一に加熱されている領域が加熱開始後 60 秒の 時点で 230~480mm, 120 秒の時点で 250~450mm であ り、結束部の影響により経過時間とともにその領域は小 さくなっている。銅板2を設置した同図(c)に関しては, 同図(b)と同様に H1, H2 鉄筋ともに結束部(鉄筋左端部 から150mmおよび550mm)では他の領域に比べて高温と なっている。しかしながら、同図(b)と比較すると、H1 鉄筋に関しては時間が経過しても高温度領域は広くな らず、均一温度領域も小さくなっていない。特に、350mm の位置における温度上昇量は加熱開始後60秒で13.0℃, 120 秒で 25.3℃であり, 同図(a) とほぼ同じである。また, 均一に加熱されている領域も加熱開始後 60 秒で 200~ 500mm, 120 秒で 210~490mm であり、結束部から他の 領域への熱拡散が生じにくくなっていることがわかる。

均一加熱の対象としていない H2 鉄筋の温度性状に関 しても、検討しておくこととする。同図(b),(c)ともに ほぼ同様の温度分布となっており、銅板1で覆われてい る 50~650mmの領域は結束部を除いて同図(a)よりも全 体的に温度上昇量が低くなっている。すなわち,H2 鉄筋



図-4 鉄筋表面温度上昇量分布

の温度上昇に関しては、結束部の発熱および銅板に覆われていない 0~50mm、650~700mm からの熱拡散のみに 起因するものと考えられる。

以上のことから,図-1(c)のように結束部の2箇所に 銅板2を設置することによって,結束部の発熱からの熱 拡散が抑制され,格子内の温度上昇量をほぼ均一にする ことが可能と考えられる。しかしながら,実構造物にお いては,鉄筋は縦横無尽に配筋された状態であり,鉄筋 間隔も様々であるため本手法の適用範囲を明確にする 必要がある。

次節では, 垂直鉄筋の鉄筋間隔を変化させて同様の実 験を行うこととする。

2.2 結束部の熱拡散制御における適用限界

前述したように,垂直鉄筋の鉄筋間隔を変えることに より適用範囲を確認にするため,銅板 1,2 を用いて, 鉄筋間隔を(a)200×300mm, (b)200×200mm, (c)200× 100mm とした実験を行う。

(1) 実験方法

実験概要を図-3に示す。コイル負荷電力,加熱時間, コイルから鉄筋までの距離は前節に同じである。銅板の 位置は,200×300mm では H1 鉄筋中心から水平方向に 40mm 離れた位置,200×200 および 200×100mm では H1 鉄筋中心から水平方向に 60mm 離れた位置に銅板 1 を設置した。また、銅板2の設置位置は、結束部の2箇 所とした。

(2) 実験結果

図-4に加熱開始後 60 秒の時点および 120 秒の時点 の鉄筋表面の温度上昇量分布を示す。

まず, 同図(a)に示す鉄筋間隔 200×300mm では, H1, H2 鉄筋ともに結束部では他の領域に比べて高温となっ ている。しかしながら,加熱開始後 120 秒の温度分布を 比較すると, H1 鉄筋は時間が経過しても高温度領域は広 くならず,均一温度領域も小さくなっていない。H1 鉄筋 の 350mm の位置における温度上昇量は,加熱開始後 60 秒で 14.2℃, 120 秒で 27.7℃である。また,均一に加熱 されている領域は加熱開始後 60 秒で 240~475mm, 120 秒で 270~430mm である。

次に, **同図**(b)に示す鉄筋間隔 200×200mm では, H1, H2 鉄筋ともに結束部では他の領域に比べて高温となっ ている。また,加熱開始後 120 秒後の温度分布を比較す ると,同様に H1 鉄筋は時間が経過しても高温度領域は 広くならず,均一温度領域も小さくなっていない。H1 鉄筋の 350mm の位置における温度上昇量は加熱開始後 60 秒で 12.9℃, 120 秒で 25.6℃であり,均一に加熱され



図-5 結束部からの熱拡散状

ている領域は加熱開始後 60 秒で 285~415mm, 120 秒で 305~395mm である。同図(a), (b) はいずれも図-2(c) に示した試験体に比べて, 鉛直鉄筋間隔が狭くなってい るため, 結束部からの熱拡散が格子内の温度分布に影響 しやすいが, 格子内の温度上昇量をほぼ均一にすること ができるものと考えられる。

一方,同図(c)に示す鉄筋間隔 200×100mm では,結 束部は他の領域に比べて高温にならず,銅板に覆われて いる H1 鉄筋の 250~450mm および H2 鉄筋の 50mm~ 650mm の領域において温度上昇量が低くなっている。こ れは,銅板の形状から格子内の鉄筋が銅板によってコイ ルに対して完全に覆われているためにループ電流が発 生せず,銅板で覆われていない領域で発生した熱拡散の みによるものと考えられる。この場合,結束部の発熱は 制御されているが,鉄筋に十分な熱量が蓄積されないた めに温度分布による劣化診断の適用が困難である。

以上のことから,計測対象となる水平鉄筋1本に対し て格子内の鉄筋が銅板によってコイルに対して完全に 覆われていなければ,本実験で検証した銅板形状にて結 束部からの熱拡散が抑制可能であり,本研究においては, 鉄筋間隔が 200×200mm 以上の1格子鉄筋網であれば, 鉄筋網を電磁誘導加熱した際に発生する加熱むら解消 に対して有効な手法であると言える。

3. 鉄筋網を配筋したコンクリートの加熱特性

前述したように、1 格子鉄筋網に対して計測対象鉄 筋を水平鉄筋1本に限定した場合,結束部2箇所に銅板 を置くことで結束部からの熱拡散が制御可能であり,格 子内の温度上昇量を均一にすることができる。しかしな がら,前章で対象とした試験体は鉄筋のみである。図-



		:	₹ 7 – 1	비다	衣			
Gmax	W/C	スランプ	空気量	単位量(kg/m ³)				
(mm)	(%)	(cm)	(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	60	10	5	168	280	826	996	2.80

5に示すように、同一の配筋状態にあるコンクリート中 の鉄筋を加熱した場合、結束部から多方向へ熱拡散する ためにコンクリート表面温度にむらが発生しやすくなる。 したがって、鉄筋網を配筋したコンクリート供試体を用 いた実験で前述した同様の効果が得られるか検証する 必要がある。

本章では,鉄筋網を配筋したコンクリート供試体で同様 の実験を行うことにより,鉄筋網を配筋したコンクリー トでの加熱特性を把握する。なお,鉄筋の加熱むらを解 消する一つの理由としては,コンクリート表面温度の不 均一性のみの情報から鉄筋腐食の有無を定性的に評価 することを可能とするためである。

3.1 実験方法

本実験に使用したコンクリート供試体の配合および 形状寸法をそれぞれ表-1,図-6に示す。同図(a)は 700×700×150mm,H1鉄筋表面からコンクリート表面 までの距離が30mm,鉄筋中心間距離200mmの水平鉄筋 2本を配筋したものであり,同図(b)は前述した実験にお いて適用限界であった200×200mmの1格子鉄筋網を配





(b)加熱停止後300秒の熱画像

図-7 水平鉄筋2本を加熱した場合





(b)加熱停止後300秒の熱画像 図-8 鉄筋網を加熱した場合(銅板なし)



(c)コンクリート表面温度分布



(c)コンクリート表面温度分布

●-H1-0 -H1-60 -H1-120

100 200 300 400 500 600

鉄筋端部からの距離 (mm)

(c)コンクリート表面温度分布

700

H1-300 - H1-600



(a)鉄筋表面温度分布



(b)加熱停止後300秒の熱画像

図-9 鉄筋網を加熱した場合(銅板あり)

筋したものである。同図(a)の供試体の鉄筋加熱方法は, まずコンクリート供試体の上に断熱材である発泡スチ レンボードを敷き,コイルの水平,鉛直方向の中心と鉄 筋中心が一致し,かつ鉄筋表面からコイルまでの距離が 56mm となるように設置した。

同図(b)の供試体については、H1鉄筋から60mmの位 置に銅板1,さらにH1鉄筋の結束部直上2箇所に銅板2 をコイルと発泡スチレンボードの間に設置し、鉄筋表面 からコイルまでの距離が56mmになるようにした。

コンクリート表面温度の計測は、室温を21.6℃の一定 とし、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。ま た結束部の熱拡散の比較を行うため、銅板2を設置せ ずに同様の条件での実験も実施した。なお,鉄筋自体の 温度も測定した。

3.2 コンクリート表面温度性状

ပ္ပ

度

見面

表

ク --

ハ † ^{ロ20</sub>}

図-7, 8, 9は, それぞれ図-6(a), 図-6(b)の供 試体で銅板 2 を設置しない状態, 図-6(b)の供試体で 銅板 2 を設置した状態の結果であり, 各図(a), (b), (c) は鉄筋表面温度, 加熱停止後 300 秒の熱画像, H1 鉄筋直 上のコンクリート表面温度分布を示す。

図-7(a)の鉄筋表面温度に関して、測定位置による 多少の差異はあるもののほぼ均一となっている。また、 同図(b),(c)の計測対象鉄筋直上におけるコンクリート 表面温度は一様になっており、均一な温度分布を示して いる。

一方,鉄筋網を配筋した図-8(a)においては,同図 (a)に示すように、結束部(鉄筋左端部から 250mm および 450mm)では他の領域に比べて高温となっている。同図 (b)では、結束部直上におけるコンクリート表面温度が 他の領域に比べて高温となっていることが明確であり, 結束部の影響により H1 鉄筋直上のコンクリート表面に 温度むらが生じている。同図(c)のコンクリート表面温 度も結束部からの熱拡散により、均一温度領域が存在し ない状態となっている。また、中心部における初期温度 からの温度上昇量は、加熱停止 600 秒の時点で最も高い 2.1℃となっているのに対して、結束部においては加熱停 止 300 秒の時点で最も高い 4.8℃となっており、コンク リート表面の温度変化において加熱終了後から最高温 度に達する経過時刻が中心と結束部で異なる。これは, 結束部から多方向に熱拡散しコンクリート表面温度に 差異として表れたためである。

また、図-9においては、同図(a)に示すように結束 部では他の領域に比べて高温となっている。しかし,図 -8(a)に比べて、結束部、格子内部ともに温度が低く なっている。同図(b)では、結束部を除きほぼ一様な温 度になっており、コンクリート表面の温度むらが図-8 (b)に比べて解消されていることがわかる。同図(c)のコ ンクリート表面温度分布に関しては、熱拡散が抑制され 均一な温度領域は,経時最高温度である加熱停止後 300 秒の時点で 300~400mm となっている。また、中心およ び結束部における初期温度からの温度上昇量がそれぞ れ 1.2℃, 2.0℃となっており, ともに加熱停止 300 秒の 時点で最も高くなっている。初期温度からの温度上昇量 は劣化性状を定量的に評価するための重要な初期値な ので、最高温度に達した加熱停止後300秒に限って述べ ることとする。これは、図-8(c)で見られた結束部か らの熱拡散が小さくなり、コンクリート表面温度変化の 違いがあまり発生しなかったことを意味するものであ る。コンクリート表面温度の経過時間における温度分布 もほぼ変化していないことから、前章で示した大気中と 同様に、コンクリート中に配筋された鉄筋網に対しても 熱拡散の抑制が可能であることがわかる。

図-7および、図-9の鉄筋表面温度とコンクリート 表面温度を比較すると、中心部のコンクリート表面の温 度上昇量は、いずれも 1.2℃となっているが、鉄筋表面 温度上昇量は図-7において 11.3℃、図-9においては 1.6℃となっており、若干の差異がある。そのため、格子 内の鉄筋表面温度に関してはより細かい領域に熱電対 を貼付し、コンクリート中での鉄筋表面温度上昇分布を 再検討することや、熱拡散制御法を用いた鉄筋網におけ る鉄筋腐食、剥離、空洞などの各種劣化診断への適用、 銅板 2 の寸法をさらに小さくすることによって本研究に おける鉄筋間隔の適用限界である 200×200mm のさらな る拡張,また銅板を用いても結束部における完全な発熱 制御手法はまだ確立されていないが,これに関しては今 後の課題としたい。

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 熱した際の鉄筋の加熱むらに対して、結束部直上に銅板 を設置することによる結束部の温度上昇量制御、結束部 からの熱拡散抑制を行い、鉄筋網の温度性状を評価した。 以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 大気中において電磁誘導で鉄筋網を加熱する際, 格子内の鉄筋がコイルに対して銅板で完全に覆われていなければ,結束部に銅板を設置することによって結束部からの熱拡散が制御され,格子内の 温度上昇を一定にすることができる。なお,本研究で用いた銅板形状では鉄筋間隔200×200mm以上 まで適用可能である。
- 2) 大気中において電磁誘導で鉄筋網を加熱し,鉄筋からコイルまでの距離が56mmの場合,鉄筋間隔が200×400mm,200×300mm,200×200mmの格子の時,銅板を水平鉄筋からそれぞれ20mm,40mm,60mmの位置に銅板1を設置し,結束部に銅板2をすることで,格子内の温度上昇量が鉄筋1本のみを加熱した場合と同じとなる。
- 3) 大気中と同様に、鉄筋網を配筋したコンクリート 供試体に対しても、結束部に銅板2を設置するこ とで結束部からの熱拡散が制御され、コンクリー ト表面温度の加熱むら解消に有効である。
- 4) 鉄筋間隔200×200mmを配筋したコンクリート供試体において、H1鉄筋から60mmの位置に銅板1を設置し、結束部の2箇所に銅板2を設置することで、中心部直上のコンクリート表面温度上昇量が水平鉄筋1本を加熱した場合と同じとなる。

参考文献

- 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
- 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