論文　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

茂木　淳[*1]・長坂　慎吾[*2]・谷口　修[*3]・大下　英吉[*4]

要旨：著者ら[1)]は，コンクリート内部の鉄筋腐食に関する新たな非破壊検査として，鉄筋を強制的に加熱し，コンクリート表面の温度履歴から鉄筋腐食性状を評価可能なシステム構築に着手してきた。昨年度までの成果は，小規模部材レベルに対しては本システムの適用性が確認されたが，実構造物レベルのような大規模部材レベルにおいては未着手である。本研究では中・大規模コンクリートスラブに対して本システムの適用を行い，実験および解析的手法の併用により本システムの適用性を評価した。

キーワード：非破壊検査，鉄筋強制加熱，鉄筋腐食，熱伝導解析

1. はじめに

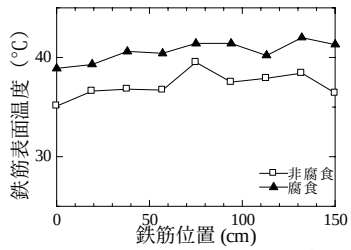
著者ら[1)]は，鉄筋コンクリート構造物の非破壊劣化診断技術の高精度化，高機能化を目指し，劣化要因の中でも特に重要である鉄筋腐食性状の定性的かつ定量的評価を可能とする新たな非破壊検査システムの構築に着手してきた。本システムの概略は，鉄筋コンクリート構造物中に縦横無尽に配筋されている鉄筋の通電性および熱伝導性を利用し，低周波型交流電流により鉄筋自体を通電加熱させ赤外線センサを用いて熱伝導により変動するコンクリート表面温度を経時的に測定するとともに，測定結果を用いた逆解析的手法により鉄筋の腐食性状を評価するものである。

既往の研究では，小規模部材レベルに本システムを適用し，コンクリート表面の温度性状に及ぼす鉄筋腐食領域の影響は，腐食領域が存在しない鉄筋に比べて最高温度が低く，また最高温度からの温度低下割合が緩やかであるという傾向を示すことが確認されている。しかしながら，実構造物レベルに対して本システムを適用可能とするためには，鉄筋自体の通電による加熱むら，それに及ぼす鉄筋長の影響，非腐食鉄筋自体と腐食鉄筋自体の温度性状，コンクリート表面温度性状に及ぼすかぶりの影響，および外気温変動を伴うコンクリート表面温度性状等の問題点が残されており，それらの問題点を解決することが必要である。なお，ここで言う加熱むらとは，鉄筋軸方向における温度差或いは温度勾配の有無を意味するものである。

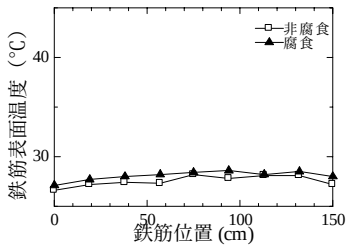
本研究では，本システムを実構造物レベルに適用するにあたり解明すべく上述の問題点のうち，鉄筋自体の温度性状すなわち比較的鉄筋長が長い鉄筋自体の通電による加熱むら性状，非腐食鉄筋と腐食鉄筋の温度性状を定量的に把握するとともに，本システムを中・大規模コンクリートスラブに適用した際のコンクリート表面の温度性状を及ぼす鉄筋腐食領域の定性的・定量的評価を行った。そして，これらの検討結果を基に，本システムの実構造物レベルへの適用性について議論を行った。

2. 鉄筋の加熱むらに及ぼす鉄筋長の影響と腐食領域の温度性状

*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　(仮会員)
*3 五洋建設（株）　技術研究所　(正会員)
*4 中央大学　理工学部土木工学科教授　工博　(正会員)

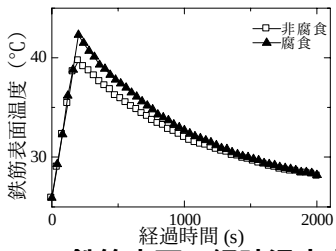


(a)　強制加熱終了時

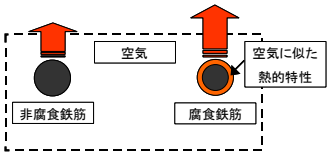


(b)　自然冷却 30 分後

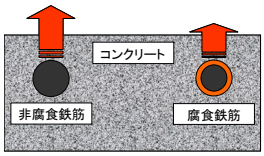
図－1　鉄筋表面温度分布



図－2　鉄筋表面の経時温度変化



(a)　大気中



(b)　コンクリート中

図－3　鉄筋腐食の有無による熱伝導

既往の研究で用いた小規模部材内の鉄筋長は 50cm であり，実構造物を想定するとより長い鉄筋自体の加熱むらの有無を確認しなければならない。一方で，通電加熱による鉄筋腐食領域の温度性状すなわち非腐食鉄筋および腐食鉄筋の温度特性を把握しておく必要がある。そして，それぞれの温度特性を有する鉄筋がコンクリート中に存在した場合，腐食領域の熱的特性がコンクリート表面の温度性状にどのような影響を及ぼすのかを既往の研究を参考に把握しておく必要がある。

そこで，本章では鉄筋長 150cm を有する非腐食および腐食鉄筋に対し強制加熱し，それに伴う鉄筋表面の温度性状を評価することとした。そして，これらの温度性状を基にコンクリート中の鉄筋腐食の有無による熱伝導メカニズムを解明することとした。

2.1 実験方法

周波数 50Hz の低周波型交流電流を用いて，鉄筋長 150cm を有する D16 全面非腐食および全面腐食鉄筋に対し一定出力電流 120A を 160 秒間通電させた。なお，本実験で用いた全面腐食鉄筋は，実構造物中において自然腐食した鉄筋を用いて実施した。鉄筋表面温度の測定は，通電直後から 30 分間実施した。鉄筋表面の温度測定には赤外線センサを使用し，鉄筋から赤外線センサまでの距離は 400cm である。なお，本計測においては，鉄筋表面温度を評価する際，鉄筋表面色に依存する放射率を無視し，放射率を一定 (ε =1.00)とした。

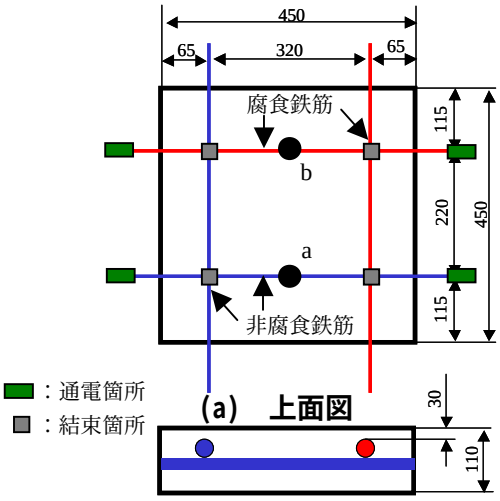
2.2 長い鉄筋長を有する鉄筋表面温度性状

図－1(a)および**(b)**は，それぞれ鉄筋長 150cm を有する全面非腐食および全面腐食に対する強制加熱終了時点，また強制加熱終了から 30 分間自然冷却された時点での鉄筋軸方向に位置する鉄筋表面温度分布である。**同図(a)**および**(b)**から全面非腐食および全面腐食鉄筋の鉄筋表面温度分布より，鉄筋位置の違いによって多少のバラつきを生じているが，ほぼ均一な鉄筋表面温度を示していることが確認できる。このことから，本加熱手法による鉄筋強制加熱は，長い鉄筋長を有する鉄筋に対してほぼ均一に加熱可能であり，小型あるいは大型コンクリートスラブ内の鉄筋腐食性状評価に対しても適用可能なものと判断できる。

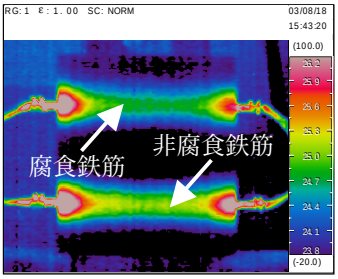
2.3 大気中に存在する鉄筋腐食の有無による鉄筋表面温度性状

図－2 は，全面非腐食および全面腐食鉄筋における鉄筋中心位置の経時温度変化である。全面非腐食および全面腐食の対比から，鉄筋腐食の有無により異なった温度性状を示していることが確認できる。これは，腐食領域は非常に粗な組織であり，その領域においては空気が多数存在する状態であることから，大気中に存在する腐食鉄筋自体では，腐食領域は空気と同じ性状を示すことから腐食領域を除いた非腐食領域のみが存在するものと考えられる。すなわち，**図－3(a)**に示すような鉄筋腐食の有無により熱伝導に差異が生じるものと思われる。

まず，腐食鉄筋の最高温度は，非腐食鉄筋に比べて約 3℃高くなっており，これは腐食領域の抵抗値が大きいことにより蓄積された熱量が大



図－4　中規模コンクリートスラブ供試体



図－5　500 秒時点での供試体表面の熱画像

きくなるためであり，この性状自体からも鉄筋腐食の有無が確認できるわけである。次に，腐食鉄筋では，腐食領域が空気と似た熱的特性により鉄筋の特性を示す径が小さくなるため，外気温の影響を受け易くなる結果として，最高温度からの温度低下割合は非腐食鉄筋に比べ急な傾向を示したものと考えられる。

2.4 鉄筋腐食領域が存在することによるコンクリートの熱伝導メカニズム

コンクリート中に存在する腐食鉄筋においては，腐食領域が極端に言えば空気と同等な熱的性質(大きな比熱，小さな熱伝導)と考えられることより，鉄筋腐食の有無に伴い**図－3(b)**に示すような熱伝導に差異が生じるものと思われる。すなわち，**同図(a)**に示した空気中に存在する鉄筋に関しては，腐食領域も空気に似た熱的特性を有するため，ほぼ同じ熱量が鉄筋から空気に移動することに対して，コンクリート内部に鉄筋が存在すると，鉄筋に蓄えられた熱が非腐食鉄筋ではコンクリートに吸収されるわけであるが，腐食領域が存在すると，腐食領域の熱的特

表－1　コンクリートの配合表

水セメント比(%)	最大骨材寸法(mm)	スランプ(cm)	細骨材率(%)
55.5	25	12	45.5
単位量(kg/m^3)			
水	セメント	細骨材	粗骨材
159	257	840	1030

性により鉄筋からコンクリートへの熱伝導が抑制されることになる。したがって，コンクリート表面の最高温度は非腐食鉄筋を有するコンクリートに比べ低くなるわけである。

次章では，上述した熱伝導メカニズムに基づき，コンクリートスラブに対して鉄筋の強制加熱を行い，コンクリート表面温度の経時変化から鉄筋腐食性状を定量的に評価を行う。

3.　中規模コンクリートスラブにおける鉄筋腐食の定量的評価

3.1 実験方法

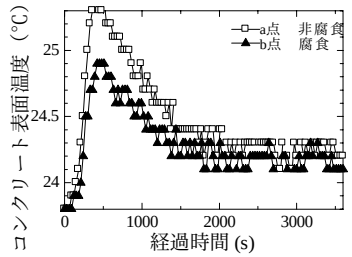
本実験に用いたコンクリートスラブ供試体は，**図－4** に示すように 45×45cm, 厚さ 11cm の供試体であり，かぶり厚さ 3cm および 4.6cm の位置に長さ 65cm の D16 異形鉄筋を配筋したものである。鉄筋は全面非腐食状態，事前に腐食させた全面腐食状態を有する 2 種類を用い，全面腐食鉄筋の腐食領域は表面から約 0.3mm のものを使用した。なお，コンクリートの配合は**表－1** に示す通りである。

腐食性状評価の対象とした鉄筋は，**図－4** に示すかぶり厚さ 3cm の 2 本の水平鉄筋であり，鉄筋の両端に 50Hz の低周波型交流電流を用いて一定電流 300A を 3 分間通電した。コンクリート表面温度の測定は，通電直後から 10 秒間隔で 60 分間測定した。また，通電箇所近傍の鉄筋表面温度も同時に測定した。なお，供試体から赤外線センサまでの距離は 150cm とし，室温は 23.8℃の一定条件で実施した。

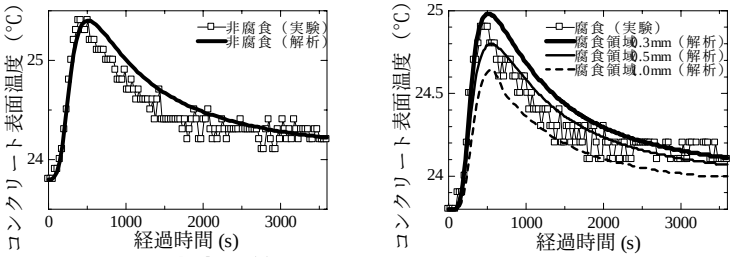
3.2 コンクリート表面の温度性状

(1) コンクリート表面の熱画像

強制加熱終了時における鉄筋表面温度は全面非腐食鉄筋で 35.1℃，全面腐食鉄筋では 36.6℃であり，腐食鉄筋の方が 1.5℃高い結果となっている。**図－5** は強制加熱終了から 500 秒経過した

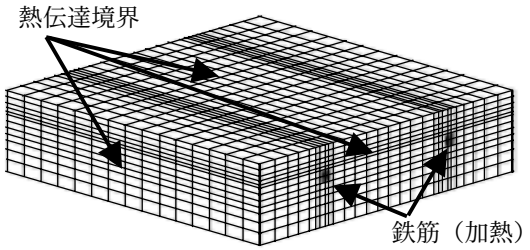


図－6　供試体表面の経時温度変化



(a)　非腐食鉄筋　　**(b)　腐食鉄筋**

図－8　実験および解析結果



図－7　解析モデル

表－2　解析に用いた熱的特性

材料	熱伝導率(W/m･℃)	比熱(kJ/kg･℃)
コンクリート	2.50	1.05
非腐食領域	82.79	0.60
腐食領域	0.29	1.20

時点での供試体表面の熱画像である。下側の鉄筋が全面非腐食鉄筋，上側が全面腐食鉄筋を示し，この熱画像から，鉄筋腐食の有無によりコンクリート表面温度に差異が明確に表れており，非腐食鉄筋では腐食鉄筋に比べ高温度領域が広いことがわかる。次項では，前章の**図－3(b)**に示した熱伝導性状をより詳細に評価する。

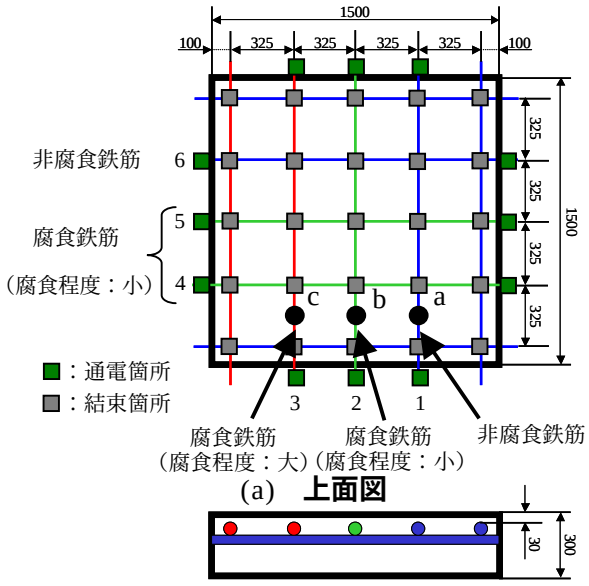
(2) **コンクリート表面の温度履歴**

図－6は**図－4**に示す鉄筋直上のコンクリート表面中心位置である a 点(全面非腐食)および b 点(全面腐食)の経時温度変化を示している。**図－6** に示す全面非腐食および全面腐食の比較から，強制加熱終了時において腐食鉄筋の表面温度が高いのにも拘わらず，コンクリート表面の最高温度は非腐食鉄筋よりも低く，また自然冷却過程における最大値からの低下割合は腐食鉄筋の方が緩やかな傾向を示していることが確認できる。すなわち，前章で推測した鉄筋腐食の有無による熱伝導の差異が想定される。全面非腐食鉄筋は鉄筋に蓄えられた熱が周囲のコンクリートの熱的性質(高い熱伝導，小さな比熱)により鉄筋からコンクリートへの熱移動が活発に行われる。その結果，コンクリート表面温度が急激に上昇し，その後外気温の影響により急激に温度低下が生じるものと考えられる。一方，全面腐食鉄筋においては，鉄筋に蓄えられた熱が錆の熱的性質(低い熱伝導，大きな比熱)によって鉄筋からコンクリートへの熱移動を抑制するため，鉄筋からの熱は徐々にコンクリートへ移動することとなる。その結果，コンクリート表面温度が緩やかに上昇し，最高温度は非腐食鉄筋のコンクリートに比べ低く，かつ，鉄筋に蓄えられた熱量が長時間に渡り放出されるため温度低下割合も緩やかとなることが考えられる。

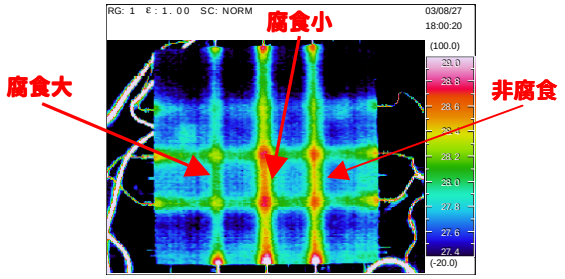
3.3 熱伝導解析に基づく鉄筋腐食領域の定量的評価

解析モデルは，**図－4** に示す供試体のコンクリート部および水平鉄筋部を対象とし，**図－7** に示すような 3 次元モデルである。鉄筋は，かぶり 4.6cm に位置する鉄筋を強制加熱していないことから影響が無いものとし，かぶり 3cm の位置のみに全面非腐食および全面腐食鉄筋を配置した。なお，鉄筋腐食領域の定量的評価に関しては，腐食領域をパラメータとした順解析を実施し，実験結果との対比により評価するものとした。なお，設定した腐食領域は鉄筋表面から 0.3，0.5 および 1mm である。解析に用いた熱的特性は，**表－2** に示す通りである。また，表面熱伝達率は 11.63(W/m^2･℃)[1]，外気温は 23.8℃とした。

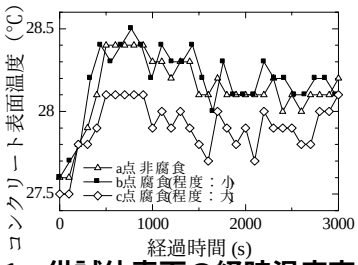
図－8(a)および**(b)**は，全面非腐食および腐食鉄筋を有する実験結果および解析結果を示したものである。太線が 0.3mm，細線が 0.5mm，破線が 1mm の腐食領域が存在する解析結果を示している。**同図(a)**より，解析結果の温度低下割合が若干ながら緩やかであるものの，本実験結果



図－9 大規模コンクリートスラブ供試体



図－10 600 秒経過時点での供試体表面の熱画像



図－11 供試体表面の経時温度変化

と良好な一致を示していることが確認できる。また，**同図(b)**より，腐食領域 0.3mm を有する解析結果が実験結果と同様な温度性状を示していることがわかる。上述の結果から，中規模コンクリートスラブに対する鉄筋腐食性状は定量的に評価可能であるものと考えられる。

次章では，大規模コンクリートスラブ供試体に対し実験および解析を行い，実構造物レベルにおける鉄筋腐食の定量的評価を行った。

4. 大規模コンクリートスラブにおける鉄筋腐食の定量的評価

4.1 実験方法

大規模コンクリートスラブ供試体は，**図－9** に示すように 150×150cm，厚さ 30cm の供試体であり，かぶり厚さ 3cm および 4.6cm の位置に長さ 170cm の D16 異形鉄筋を配筋したものである。鉄筋は全面非腐食状態，事前に腐食させた全面腐食状態(腐食程度：小および大)を有する 3 種類を用い，全面腐食鉄筋(腐食程度：大)の腐食領域は表面から約 1mm，全面腐食鉄筋(腐食程度：小)は鉄筋表面が孔食した状態のものを使用した。なお，コンクリートの配合は，**表－1** に示す中規模コンクリート供試体に使用したものと同じである。

コンクリート表面温度の測定方法は，中規模コンクリートスラブ供試体と同様なシステムで計測した。鉄筋の加熱は，**図－9** に示す鉄筋 1～6 に対し一定電流 300A を 3 分間通電し加熱した。供試体から赤外線センサまでの距離は 400cm とし，外気温は 27.5℃の一定条件で実施した。なお，次節で論じる対象とした鉄筋は，**図－9** に示すかぶり 3cm である鉄筋 1～3 とした。

4.2 コンクリート表面の温度性状

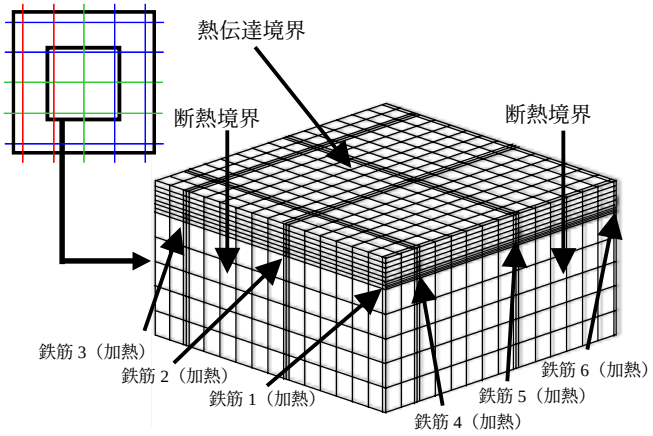
(1) コンクリート表面の熱画像

強制加熱終了時における鉛直方向の鉄筋表面温度は，それぞれ鉄筋 1，2，3 において 33.1℃，33.0℃，33.2℃であり，若干ではあるが腐食鉄筋(腐食程度：大)の方が高い結果となっている。**図－10** は，強制加熱終了から 600 秒経過した時点での熱画像である。前章の中規模コンクリートスラブと同様に，鉄筋腐食の有無によりコンクリート表面温度に差異が明確に表れている。

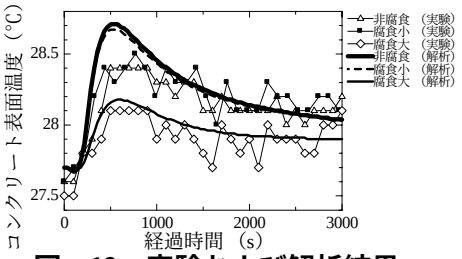
(2) コンクリート表面の温度履歴

図－11 は，**図－9** に示すかぶり厚さ 3cm に位置するそれぞれの鉄筋直上のコンクリート表面に位置する a，b および c 点での経時温度変化であり，△は非腐食鉄筋，■は腐食鉄筋(腐食程度：小)，◇は腐食鉄筋(腐食程度：大)を示している。

中規模コンクリートスラブと同様に，非腐食鉄筋に比べ腐食鉄筋を有するコンクリート表面温度は最高温度が低く，緩やかな温度低下割合



図－12　解析モデル



図－13　実験および解析結果

を示している。しかしながら，全面腐食(腐食程度：小)の鉄筋を有するコンクリート表面温度に関しては，非腐食鉄筋とほぼ同じ温度履歴を示している。これは，腐食状態が孔食であることにより，鉄筋表面に存在する孔食面積が非腐食面積よりも極小なことから，孔食部分からコンクリートへの熱伝導が殆ど無いものと考えられ，同様な温度性状を示したものと考えられる。

4.3 熱伝導解析に基づく表面温度性状

図－9 に示す供試体においては上下両表面への熱伝導が支配的となるため，解析モデルは**図－12** に示すように供試体の中心部分を対象とした。解析に用いた熱的特性は，中規模コンクリートスラブと同じ値を適用したが，腐食鉄筋(腐食程度：小)に関しては非腐食鉄筋と同じ値を用いた。なお，腐食鉄筋(腐食程度：大)における腐食領域の定量的評価に関しては，メッシュ分割の煩雑さから，本研究で設定した腐食領域は実物の鉄筋と同じ鉄筋表面から 1mm とした。実構造物は勿論のこと，このような比較的大規模なコンクリート対するメッシュ分割の簡易化に関しては，今後の課題としたい。

図－13 は，かぶり厚さ 3cm に位置する鉄筋直上のコンクリート表面温度の実験結果と解析結果の比較を示したものである。非腐食鉄筋，腐食鉄筋(腐食程度：小)および腐食鉄筋(腐食程度：大)に対応する解析結果が太線，細線および破線である。実験結果と解析結果の対比により，若干ながら解析結果の最高温度が高いものの，実験結果の傾向を精度良く評価しており，解析的手法を併用することにより，腐食領域の定性的評価は勿論のこと，定量的評価も可能であることが確認できるわけである。

以上のことより，本加熱手法による鉄筋腐食評価システムは実構造物レベルに対して定量的に評価可能なものと判断できる。しかしながら，本研究で対象とした鉄筋腐食評価はかぶり厚さ 3cm であり，より実構造物に対応するためにはかぶり厚さを考慮した鉄筋腐食の有無によるコンクリート表面温度性状を詳細に評価しなければならない。

5. まとめ

本研究では，鉄筋通電加熱に伴うコンクリート表面温度性状に及ぼす鉄筋腐食領域の定性的・定量的評価を行い，これらの検討結果から本システムの実構造物レベルへの適用性について議論を行った。

本研究から得られた結果を以下にまとめる。

(1) 鉄筋強制加熱によるコンクリート中の腐食鉄筋は，腐食領域で熱を抑制することから非腐食鉄筋を有するコンクリート表面温度よりも低くなることが確認された。

(2) 本加熱手法による鉄筋腐食評価システムは，小型および大型コンクリートスラブに対しても適用可能であり，定量的に評価できる。

参考文献

1) 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，pp1679-1684，2003