

論文 鉄筋腐食診断におけるコンクリート表面温度性状に及ぼすひび割れの影響に関する研究

根岸 沙織*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サーモグラフィで測定することで、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、腐食鉄筋を用いた鉄筋コンクリート供試体を加熱すると、健全鉄筋のそれに比べて温度上昇量が小さいことがわかった。本研究では鉄筋腐食によって生じるひび割れがコンクリート表面の温度性状に及ぼす影響について検討する。

キーワード：非破壊検査，電磁誘導，鉄筋腐食，腐食ひび割れ

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。各種劣化性状の中でも、特に鉄筋の腐食は構造性能や耐久性を低下されるばかりか、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¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾はコンクリート内部に存在する剥離、空洞、鉄筋の腐食といった各種劣化を非破壊かつ非接触によって定性的かつ定量的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電磁誘導法により強制的に加熱させ赤外線サーモグラフィで測定したコンクリート表面温度や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。

既往の研究における鉄筋腐食性状の定量評価に際しては、軸方向に比較的均一な腐食を生じた鉄筋および鉄筋の腐食膨張により生じるコンクリートの腐食ひび割れといった二次的劣化を排除するために、まず鉄筋を大気中に暴露させることにより腐食させ、そして所定の位置に設置した後にコンクリートを打設した試験体を対象とした。このような試験体を対象とすることにより、コンクリート表面の温度性状に影響を及ぼす要因は鉄筋腐食の有無のみとなり、その温度性状から鉄筋腐食量が定量的に評価されることとなったわけである。しかしながら、実構造物では鉄筋径、間隔、かぶり厚や腐食量によってはコンクリート表面に腐食ひび割れやコンクリートの剥離・剥落、錆汁と言った現象が生じるため、これらの影響を加味した鉄筋腐食診断手法の適用性評価ならびに拡張を行わなければならない。

本研究では、コンクリートの腐食ひび割れの存在が鉄



図 - 1 劣化診断システムの概要図

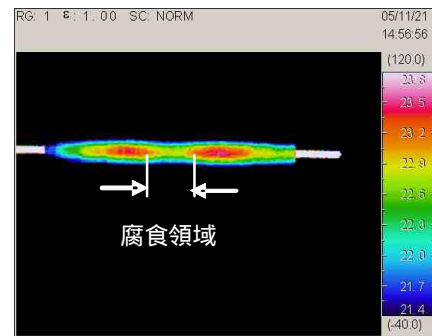


図 - 2 コンクリート表面の熱画像

筋腐食診断手法の推定精度に及ぼす影響を評価することを目的として、各種の幅や間隔を有するひび割れ群がコンクリートの表面温度性状に及ぼす影響を明らかにするとともに、本手法の適用限界を明確にした。

2. コンクリート表面温度に基づく鉄筋腐食診断手法

まず、著者らによる鉄筋腐食診断手法（以下、本手法と称す）の概略を示すこととする。本手法は、図 - 1⁵⁾に示すようにコンクリート内部に配筋された鉄筋を電磁誘導法により所定の温度まで均一に加熱し、熱伝導によって変動するコンクリート表面の温度性状に基づい

*1 中央大学 理工学部土木工科 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科教授 (正会員)

て鉄筋腐食の診断を行うものである。熱源である鉄筋の周りに腐食生成物が存在すると、コンクリート表面の温度性状は他の健全な表面に比べて異なるものとなる。腐食生成物の熱的物性値は鋼材に比べて熱伝導率が小さく比熱が大きいため、鉄筋からコンクリート表面に向かう熱を遮断するとともに内部に熱を蓄積するため、鉄筋の腐食が存在するコンクリート表面では、健全部に比べて最高温度は低く温度低下率も小さくなる(図-2³⁾)。このことからすると、コンクリート表面の温度性状が把握できれば、鉄筋腐食の有無ならびに腐食量が推定可能となる。言い換えれば、鉄筋腐食以外でコンクリート表面の温度性状に影響を及ぼす何らかの劣化要因が存在すると、鉄筋腐食量の推定精度が低下することになるわけである。

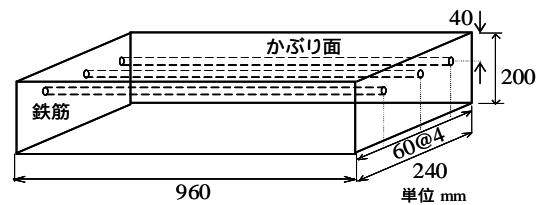
図-3³⁾は、鉄筋の腐食膨張圧によって生じたコンクリートの腐食ひび割れが存在する試験体に対して本手法を適用した際のコンクリート表面の温度性状(中央の鉄筋)をひび割れ幅と鉄筋の腐食率に関連させて示したものである。コンクリート表面の温度性状は、腐食ひび割れの有無によらず腐食率が大きい領域では温度が低く、小さい領域では高くなっていることが確認されるが、温度の絶対値に及ぼすひび割れ幅の影響度合いの定量化やそれらの腐食率との関連性は不明である。

3. コンクリート表面の温度性状に及ぼすひび割れ群の影響

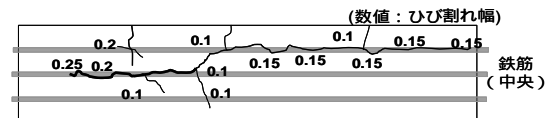
3.1 実験概要

本実験では人工的に鉄筋コンクリート供試体にひび割れを導入させ、ひび割れの存在のみがコンクリート表面の温度性状に及ぼす影響について検討する。まず人工ひび割れについて説明する。本実験では、ひび割れがコンクリート表面の温度性状に及ぼす影響の評価を目的としているため、各試験体の鉄筋の腐食率一定にし、ひび割れのみの変化で検討をしたい。実際に腐食ひび割れを発生させるためには、電気腐食を用いるが、複数の供試体に腐食ひび割れを発生させる際、電流の大きさ、時間を一定にしても各供試体の鉄筋の腐食率は一定にならず、各供試体の条件が異なってしまう。したがって、本実験では人工的にひび割れを発生させ、鉄筋は健全鉄筋を使用した。

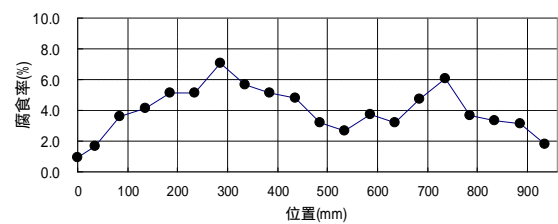
供試体は、図-4に示すように150×150×200mmの形状寸法であり、かぶり30mmの位置にD16鉄筋を配置した。人工ひび割れは、打設時に鉄板をかぶりコンクリートに鉄筋軸方向に鉄筋と同等の長さで入れ、脱型時に取り除くことで作製した。ひび割れの位置は鉄筋直上のコンクリート表面の温度性状を測定するため、鉄筋の中心から約5mmずらした場所とした。ひび割れ幅は幅の違い



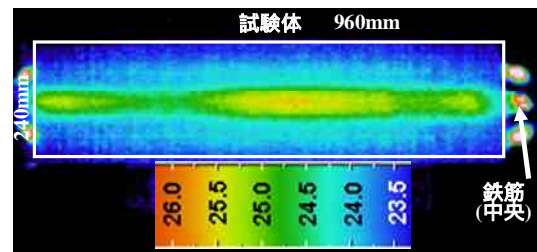
(a) 試験体の形状寸法



(b) 腐食ひび割れ(かぶり面)



(c) 鉄筋(中央)の腐食率分布



(d) コンクリート表面温度

図 3 腐食ひび割れ性状, 腐食率とコンクリート表面温度

による温度性状の影響を顕著にするため、表-1に示すように6種類である。

コンクリートの打設後供試体を十分乾燥させた状態で電磁誘導コイルを用いて供試体内部の鉄筋を強制加熱させ、赤外線サーモグラフィでコンクリート表面を120分間撮影した。赤外線サーモグラフィの種類はTH7100であり測定温度範囲-40~120℃, 最小検知温度差0.06℃, 有効画素数280×240画素である。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に示すとおりである。

3.2 ひび割れ幅の影響評価

図-5は、試験体の鉄筋軸方向に直交する中央断面に位置する鉄筋中心直上のコンクリート表面における温度履歴を示している。経過時間は電磁誘導加熱停止直後

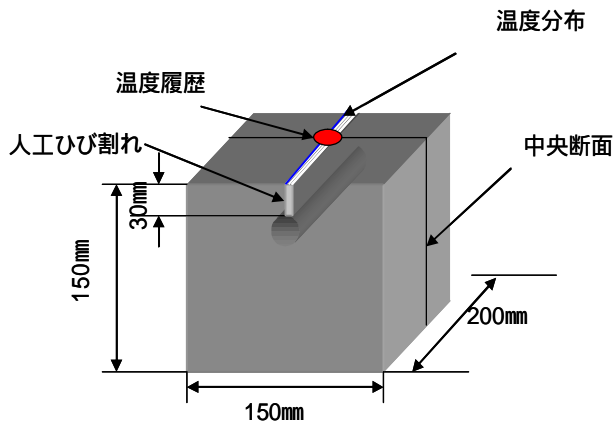


図 - 4 供試体寸法

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)	人工ひび割れ幅 (mm)
1.0	90	43	ひび割れ無し
			0.5
			1.0
			1.5
			2.0
			3.0

からの時間である。なお、図中の縦軸は加熱前からの温度上昇量であり、図中にはひび割れ幅毎の温度性状を示している。

まず、最高温度までの温度上昇量は、ひび割れ無しが最も大きく、ひび割れ幅の増加とともに小さくなっている。また、最高温度からの温度低下率は、ひび割れ幅が小さいほど大きくなっている。

次に鉄筋軸方向の温度分布に基づいてコンクリート表面温度に及ぼすひび割れ幅の影響を詳細に評価する。図 - 6 は、鉄筋中心直上に位置する鉄筋軸方向におけるコンクリート表面の温度分布を示しており、対象とした時間は加熱停止後 300 秒の時点である。各ひび割れ幅の鉄筋端部からの距離 50 mm から 150 mm 間の温度上昇量は均一である。温度上昇量はひび割れ無しが最も大きく、ひび割れ幅の増加とともに小さくなっている傾向が得られた。よってこの傾向は、鉄筋上の任意点で同じである。

このようなひび割れ幅による温度性状は、図 - 7 に示すように鉄筋からコンクリート表面に向かって拡散する熱の一部がひび割れ内部の空気に蓄積されコンクリート表面に伝わる熱が減少したことにあるものと考えられる。一般に熱容量は体積に比例して大きくなるので、ひび割れ幅が大きいほどひび割れ内の空気の体積が増加するため、それに比例してひび割れ内部の空気の温度を上げるために熱容量を必要とする。したがってコンクリート表面の温度上昇量はひび割れ幅の増加に伴い小さくなるということができる。

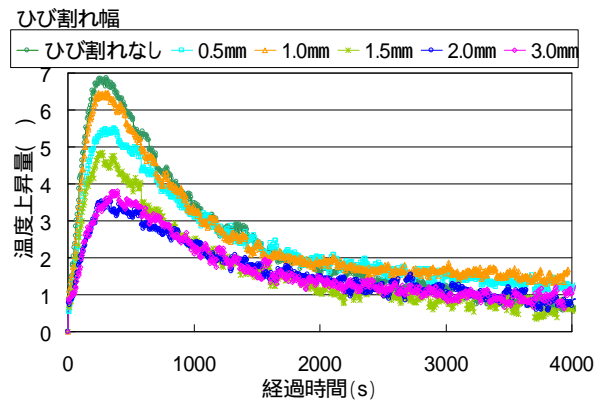


図 - 5 鉄筋長さ方向の中心の温度履歴

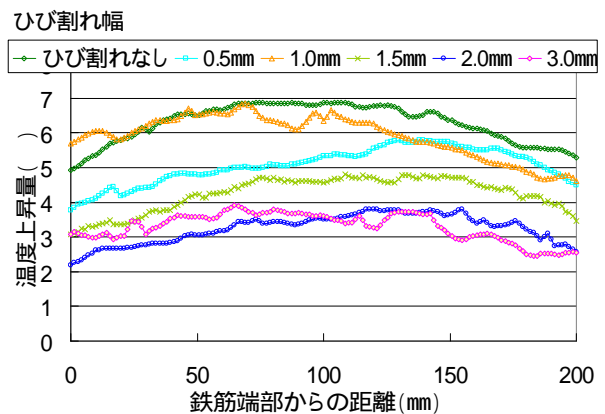


図 - 6 加熱停止後 300 秒の鉄筋軸状の温度分布

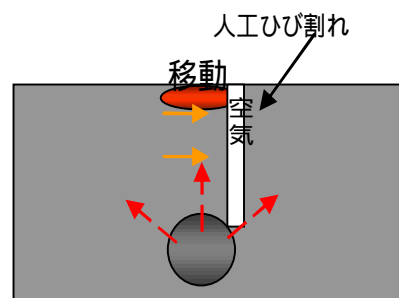
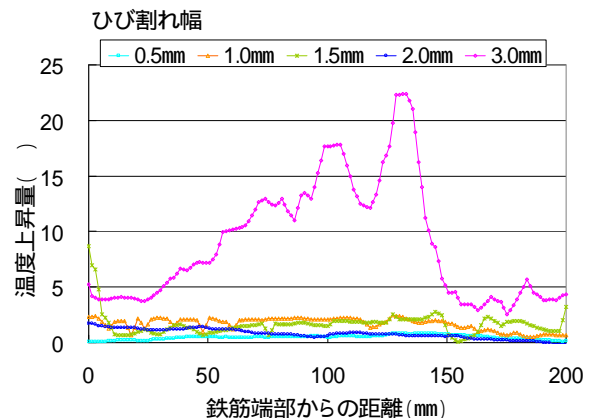


図 - 7 熱の移動の様子



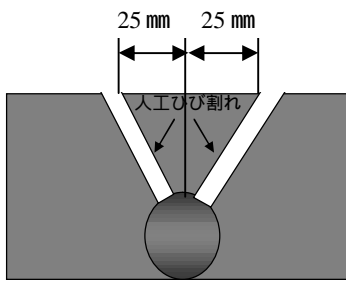


図 - 9 ひび割れ 2 本の形状

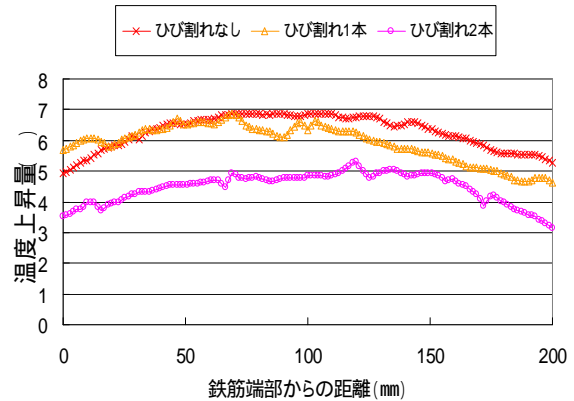
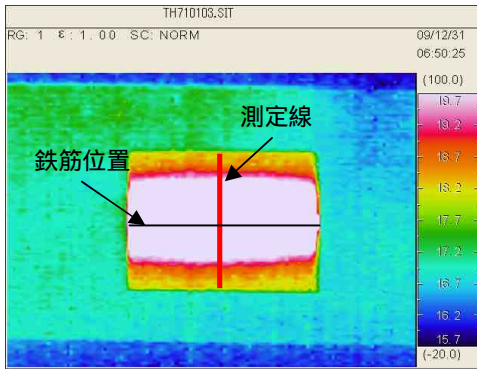
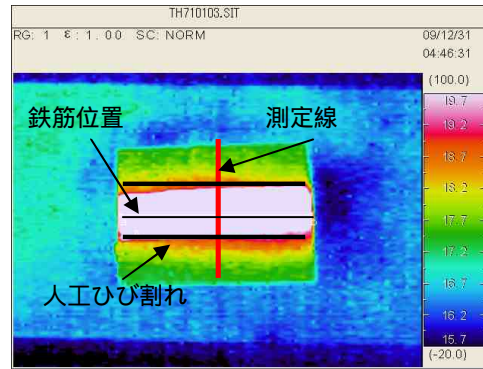


図 - 10 各ひび割れ本数の加熱停止後

300 秒の温度分布

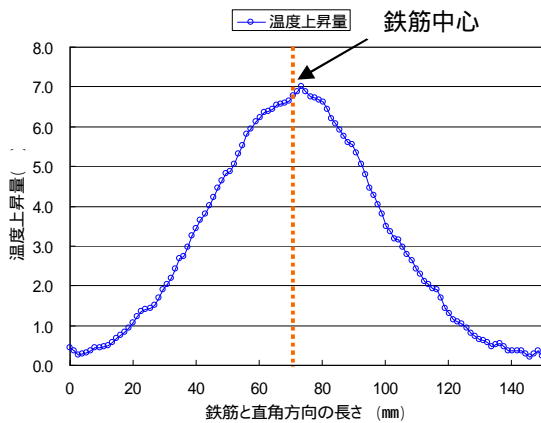


(a) ひび割れなし

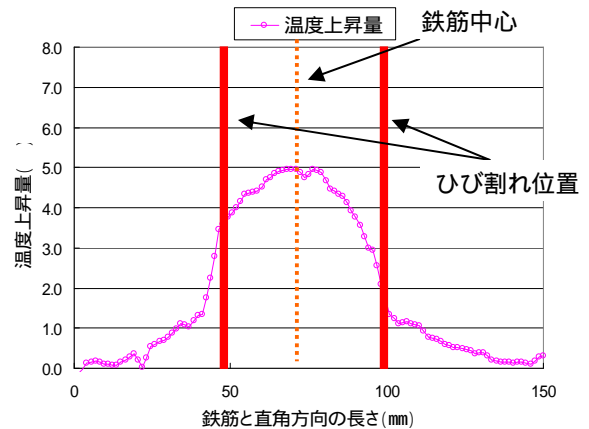


(b) ひび割れ 2 本

図 - 11 加熱停止後 300 秒の熱画像



(a) ひび割れなし



(b) ひび割れ 2 本

図 - 12 加熱停止後 300 秒の鉄筋と直角方向の温度上昇分布

図 - 8 はひび割れ上における鉄筋軸方向のコンクリート表面の温度分布を示しており、対象とした時間は加熱停止後の時点である。ひび割れ幅 3.0 mm の温度上昇量のみ、他の温度上昇量と比較して著しく大きくなっている。これは、赤外線サーモグラフィの観測対象が、通常のコンクリート表面ではなく、ひび割れ幅が大きいことによりひび割れ内部の鉄筋である可能性がある。赤外線サーモグラフィの観測対象の設定はできず、性能上の問題であると考えられる。またひび割れ幅 0.5 mm から 2.0 mm

でのコンクリート表面の温度上昇量はひび割れ内部の体積に依存することがわかった。

3.3 ひび割れ本数の影響評価

ひび割れ 2 本の供試体は、図 - 9 に示すように、鉄筋中心から左右 25 mm 離れた位置に鉄筋から放射状に人工ひび割れを発生させることにより作製した。なお、複数本のひび割れの場合の実験において、全てのひび割れ幅は 1.0 mm であり、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 と同じである。コイル

はかぶり 30 mm面の鉄筋軸方向にコイルの中心が沿うよう設置した。熱画像処理ソフトでの温度測定の位置は鉄筋上である。

図 - 10 に鉄筋中心直上に位置する鉄筋軸方向におけるコンクリート表面の温度分布を示す。温度上昇量はひび割れなしと比べ、ひび割れ 1 本が 0.6 , ひび割れ 2 本が 2.1 小さくなっており、ひび割れ本数が増加すると温度上昇量は減少している。これは、3.2 節で述べたように、ひび割れ幅が大きいほどひび割れ内の空気の体積が増加することに関連している。すなわち、ひび割れ本数が増加することでひび割れ内の空気の総体積が増加し、それに対応してより多くの熱容量を必要とするため、コンクリート表面の温度上昇量が減少したと言える。

また、図 - 11(a)にひび割れ無しの加熱停止後 300 秒の熱画像、同図(b)にひび割れ 2 本の加熱停止後 300 秒の熱画像を示す。熱画像中には鉄筋配筋の位置、熱画像処理の際の測定線を示してある。同図(a)の熱画像では鉄筋配筋位置を中心にコンクリート表面全体に熱が拡散していることがわかる。しかし同図(b)のひび割れ 2 本の熱画像においては、2 本のひび割れ間のみ熱が拡散し、ひび割れ外部への拡散は微小である。ひび割れ無し、ひび割れ 2 本の供試体の中央断面における鉄筋軸直交長さの温度分布を図 - 12 に示す。同図(a)はひび割れ無し、同図(b)はひび割れ 2 本の温度分布であり、対象とした時間は加熱停止後 300 秒後の時点である。いずれも 75 mmに鉄筋があり、同図(b)には 50 mmと 100 mmのコンクリート表面に向けひび割れが鉄筋から放射状に発生している。ひび割れなしで場合、鉄筋位置の 75 mmにかけて温度が緩やかに上昇しているが、ひび割れ 2 本ではひび割れが存在する付近で温度が急激に上昇している。これは、ひび割れ内部の空気がひび割れ外部への熱の拡散を妨げる役割をしているためだと考えられる。

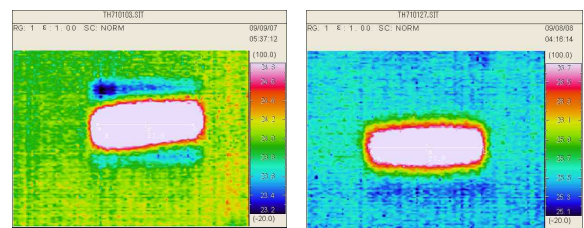
以上のことより、コンクリート表面の温度上昇量はひび割れの総体積に依存し、またひび割れは熱の拡散を妨げコンクリート表面の温度性状に影響を与えることがわかった。

4. 鉄筋腐食予測精度に及ぼすひび割れ性状の影響

本実験では、コンクリート表面の温度性状に及ぼすひび割れおよび鉄筋腐食の影響について、鉄筋が腐食した状態でひび割れが存在する場合と存在しない場合との比較によって検討することとする。試験体作製方法であるが、鉄筋が腐食した状態でひび割れが存在する試験体は図 - 4 の 150 × 150 × 200 mmのかぶり 30 mmの位置に D 16 鉄筋を配置した試験体を電食させることにより、鉄筋腐食させるとともに腐食ひび割れを誘発させた。発生したひび割れの幅は平均 0.15 mmであり、ひび割れの様子は



図 - 13 電食により発生させたひび割れの様子



(a) ひび割れなし (b) ひび割れあり

図 - 14 加熱停止後 300 秒の熱画像

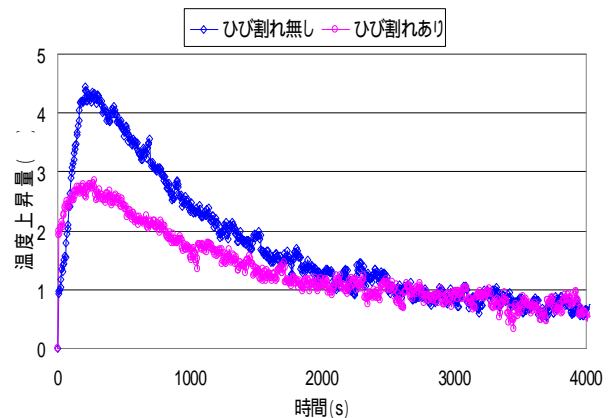


図 - 15 鉄筋の長さ方向の中心の温度履歴

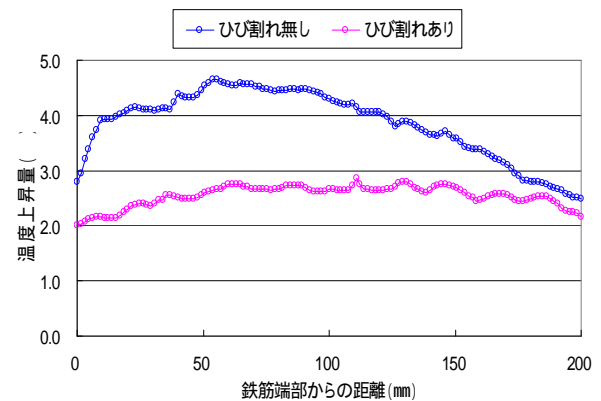


図 - 16 加熱停止 300 秒後の温度分布

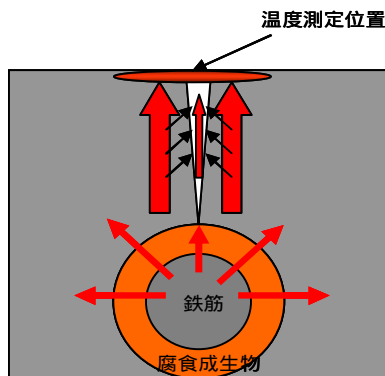


図 - 17 腐食ひび割れの場合の熱移動

図 - 13 に示す。一方、鉄筋が腐食した状態でひび割れが存在しない試験体は上述した試験体から腐食鉄筋をはつり出し、所定の位置に配置した後にコンクリートを打設することにより作製した。なお、電磁誘導加熱法及びコンクリート表面の温度の測定方法は前章に同じとする。

図 - 14 は、ひび割れが存在する場合としない場合の熱画像を示しており、対象とした時間は加熱停止後 300 秒の時点である。熱画像では違いを検討し難いので、図 - 15 に試験体の鉄筋軸方向に直交する中央断面に位置する鉄筋中心直上のコンクリート表面における温度履歴を示す。経過時間は電磁誘導加熱停止直後からの時間である。なお、図中の縦軸は初期温度からの温度上昇量であり、図中にはひび割れ有無の温度性状を示している。

まず、最高温度までの温度上昇量は、ひび割れ無しがひび割れありと比較して大きくなっている。また、最高温度からの温度低下率は、ひび割れ幅が小さいほど大きい。

次に鉄筋軸方向の温度分布に基づいてコンクリート表面温度に及ぼすひび割れ幅の影響を詳細に評価する。図 - 16 はコンクリート表面の温度分布を示しており、対象とした時間は加熱停止後 300 秒の時点である。鉄筋軸状の任意点においても、ひび割れが存在しない場合の温度上昇量は、ひび割れが存在する場合より大きい。これは前章に述べたように、ひび割れがコンクリート表面の温度性状に影響を及ぼしていることが腐食鉄筋を用いた供試体にも適用可能であり、熱の移動については図 - 17 に示す。なお、本実験では腐食鉄筋をはつり出した際若干の腐食生成物がコンクリート表面に付着したが、その量は僅かでありこれがコンクリート表面温度に与える影響はないものと考えている。また、ひび割れの影響を無視した状態でコンクリート表面の温度性状から鉄筋の腐食率を評価した場合、コンクリート表面の温度低下の原因として鉄筋の腐食が考えられ、実際の腐食率よ

り大きく評価することになる。これは鉄筋腐食精度において、腐食率を大きく判断し対応するという点で構造物の劣化診断においては安全性側の評価である。しかし、ひび割れ状況は目視で判断でき、今後の課題として、ひび割れの影響を加味した状態での評価が必要である。

5. まとめ

本研究ではひび割れがコンクリート表面の温度性状に及ぼす影響、鉄筋腐食予測精度に及ぼすひび割れ性状の評価をした。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1)ひび割れの有無はコンクリート表面の温度性状に影響を与え、人工ひび割れの有無でコンクリート表面の温度上昇に大きく影響を与える。
- (2)ひび割れがある場合、コンクリート表面の温度上昇はひび割れの総体積に依存する。
- (3)現時点で本実験条件において、ひび割れ幅 3.0 mm の以上の場合、ひび割れに沿って温度分布を測定するとサーモグラフィカメラの性質上、正常な測定をすることが難しい。
- (4)腐食ひび割れが存在する場合、鉄筋腐食の予測において、腐食率を大きく評価することになるが、安全側の評価である。
- (5)今後、ひび割れの影響程度を加味した評価が必要である。

参考文献

- 1) 森宮奈緒子, 大下英吉: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No. 1, pp.2029-2034, 2009
- 2) 堀江宏明, 宮口住久, 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.29, No.2, pp.685-690, 2007
- 3) 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
- 4) 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, No2, pp.685-690, 2007
- 5) 大下英吉, 長坂慎吾, 倉橋貴彦, 谷口修: コンクリート表面温度に基づく鉄筋腐食厚および腐食率の推定手法に冠する研究, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.442-458, 2009