

論文 アスファルト舗装した RC 床版における鉄筋腐食の評価手法に関する研究

金本 恒之介*1・大下 英吉*2・林 詳悟*3・福岡 養祐*4

要旨：著者らは電磁誘導法を用いて鉄筋を強制加熱し、コンクリート表面へと伝わった熱を赤外線サーモグラフィで測定することにより鉄筋腐食率を評価可能とする非破壊検査手法を開発した。既往の研究では、アスファルト舗装した RC 床版に本システムを適用する際の適用条件について熱伝導解析を用いて算出した。そこで本研究では、アスファルト舗装した RC 床版に本システムを適用し、アスファルト表面温度性状から鉄筋腐食の有無を評価した。また、アスファルト表面温度に顕著な差異を生じさせる加熱方法を提案し、熱伝導解析と実測の双方から有用性を検討した。

キーワード：非破壊検査, 赤外線サーモグラフィ, 電磁誘導, 鉄筋腐食, アスファルト, 熱伝導解析

1. はじめに

我が国における土木構造物は高度経済成長期に建設されたものが多く、建設から 50 年以上経過する構造物の急激な増加が予測される。そのため、老朽化した RC 構造物の維持管理と更新が重要な課題である。

昨今、RC 構造物の新設数は減少傾向にあり、既存の RC 構造物に対して適切な維持管理を施すことにより、構造物の延命化を図るという方式に移行している。その中でも、アスファルト舗装した RC 床版は我が国の基盤となる構造物であり、それらを維持する上で各種劣化性状を正確に把握することが必要不可欠である。

各種劣化要因の中でも鉄筋腐食は、構造物の構造性能や耐久性に大きな影響を及ぼす非常に重要な問題である。鉄筋腐食が生じると、鉄筋の断面減少の他に、腐食膨張圧が生じ、腐食ひび割れが発生する。このような劣化現象は各種性能を大幅に低下させることとともに、鉄筋腐食が過度に進行すると、コンクリート片の剥離・剥落を招き、第三者被害にも通ずる可能性がある。

現在、鉄筋腐食性状評価に広く用いられている手法には、自然電位法と分極抵抗法がある。前者は、鉄筋が腐食することによって変化する鉄筋表面の電位から、鋼材腐食の診断を行う電気化学的方法である。しかしながら、鉄筋腐食性状の定量的な評価は困難である。後者は、鋼材の腐食速度と分極抵抗の逆数が比例関係にあることを利用し、分極抵抗から鋼材の腐食速度を推定する方法であるが、現段階では鉄筋の質量減少率である腐食率の十分な評価精度を有していない。また、いずれの手法においても測定にあたってかぶりコンクリートを局所的に破

壊する必要がある。

一方、アスファルト舗装された RC 床版では舗装されたアスファルトをはつり、コンクリートを局所的に破壊しなければならないのが現状である。したがって、維持補修においてコスト面や交通規制などの問題がある。そこで、道路管理者はアスファルトをはつらずスクリーニングを行うことで簡易的な劣化診断を行っているが、鉄筋腐食の評価まで行うことはできない。そのため、新たな鉄筋腐食診断手法の開発が急務である。

このような背景から、著者ら¹⁾⁷⁾は RC 構造物の鉄筋腐食を定性的かつ定量的に評価可能とする非破壊検査手法(以下、本システム)を開発した。既往の研究⁸⁾では、本システムをアスファルト舗装した RC 床版に適用し、その有用性の検討を行った。本システムの概要は、電磁誘導によって鉄筋を非破壊・非接触で強制加熱し、鉄筋からアスファルト表面へと拡散する熱を赤外線サーモグラフィカメラによって検知するものである。RC 構造物内部の鉄筋に腐食が生じている場合、腐食生成物の断熱効果により、腐食鉄筋は健全鉄筋と比べてコンクリート表面の温度変化が小さくなる。したがって、赤外線サーモグラフィカメラで撮影した熱画像を分析することで鉄筋腐食の有無を正確に評価することが可能である。

本研究では、健全試験体と腐食試験体の加熱終了時のアスファルト表面温度に着目し、鉄筋腐食の有無の評価を行った。また、アスファルト表面温度に顕著な差異を生じさせる加熱方法を検討した。具体的には、アスファルト表面に散水を行うことで熱伝導率の増加を促し、健

*1 中央大学 理工学研究科都市環境学専攻 (学生会員)

*2 中央大学 理工学部都市環境科教授 工博 (正会員)

*3 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 技術部 (正会員)

*4 第一高周波工業 (株) 技術部

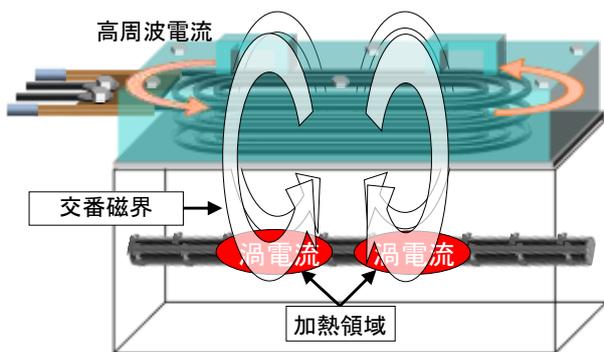
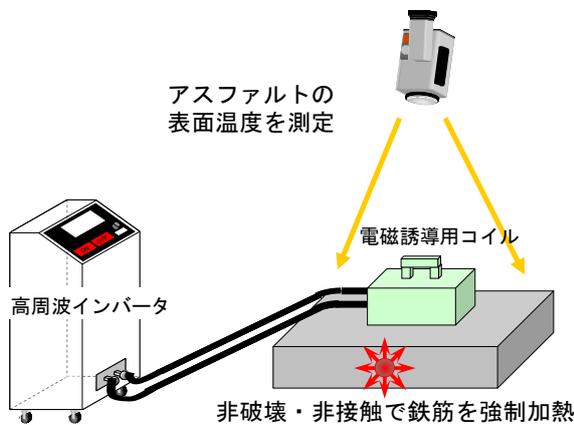
全試験体と腐食試験体の顕著な温度差から腐食評価を行った。

2. 鉄筋腐食推定手法の概要

本章では、本システムの基となる鉄筋腐食診断システムの概要を示すとともに、電磁誘導と赤外線サーモグラフィの併用によって RC 床版内部の鉄筋腐食を検知するメカニズムについて説明する。

本システムの概要図を図-1 に示す。電磁誘導により RC 構造物内部の鉄筋を非破壊・非接触で強制加熱し、鉄筋からコンクリート表面に伝搬した熱を赤外線サーモグラフィで検知することで、各種劣化性状を診断するものである。

具体的手法は、電磁誘導コイルを高周波インバータに接続し、図-2 に示すように高周波電流をコイルに負荷することにより交番磁界を発生させる。発生した交番磁界の影響範囲が RC 床版内の鉄筋に達すると、鉄筋に渦電流が発生し鉄筋自体の抵抗により発熱する。この熱は鉄筋からコンクリート表面へと鉄筋断面に対して放射状に伝搬する。そして、鉄筋直上のコンクリート表面温度を赤外線サーモグラフィカメラによって測定することで鉄筋からコンクリート表面へ供給される熱量を把握することが可能となる。



鉄筋が腐食している場合は図-3 に示すように、鉄筋からコンクリート表面への熱拡散が腐食生成物の熱的物性により抑制され、健全な状態に比べてコンクリート表面温度が低下することとなる。熱的物性とは、表-1 に示すような熱伝導率や比熱のことであり、腐食生成物が健全鉄筋に比べ、比熱が大きく熱伝導率が小さいという断熱材的效果を有していることがコンクリート表面の温度低下の原因である。したがって、腐食鉄筋の場合と健全鉄筋の場合で、コンクリート表面に温度差が表れ、この温度差から鉄筋腐食を評価することが可能である。

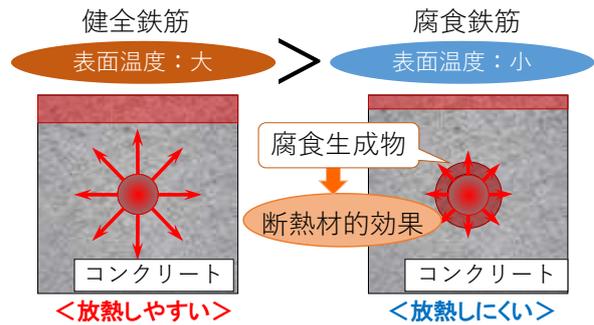


表-1 各構成材料の熱的物性値

構成材料	物性	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg°C)	熱伝導率 (W/m°C)
非腐食鉄筋		7850	0.47	51.3
腐食生成物		5300	1.2	0.0156
コンクリート		2400	1.15	2.7
アスファルト		2120	0.92	0.74
ゴム		910	1.9	0.13

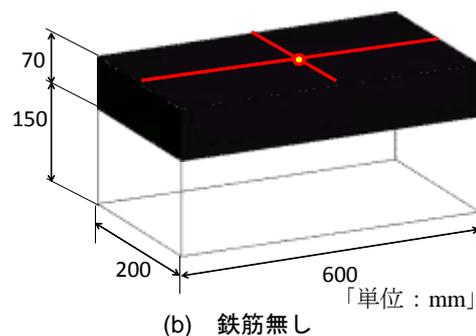
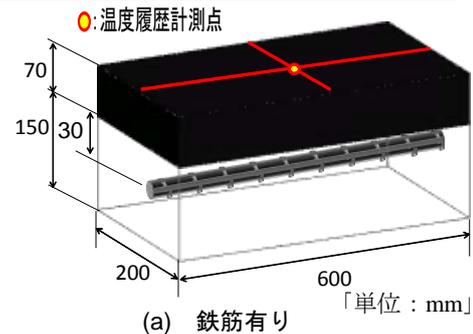


図-4 試験体概要図

表-2(a) コンクリートの配合

単位量(kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
W	C	S	G	A
171	290	798	1003	1.2

表-2(b) アスファルトの配合

配合比(%)					
6号	7号	砕砂	粗砂	細砂	石粉
33	23	21	6	11	6

3. アスファルト試験体への適用

本章では、本システムをアスファルト試験体に適用することで鉄筋腐食の評価を行った。また、電磁誘導コイルによるコイル自体からの発熱(以下、輻射熱)を考慮し、実験条件に及ぼす影響を評価する。

3.1 実験概要

試験体概要図を図-4(a), (b)に示す。試験体の形状寸法は 600×200×220mm であり、実構造物と同様にコンクリート層の上面にゴム性防水層であるフレッシュシートを敷き、アスファルト混合物を打設したものである。アスファルト層の厚さは 70mm、アスファルト表面から鉄筋までのかぶり厚は 100mm である。かぶり 100mm の位置に D16 異形鉄筋 (SD295A) を配筋した。なお、コンクリートとアスファルトの配合は表-2(a), (b)に示すとおりである。

試験体は表-3 に示すように、健全鉄筋を用いた健全試験体および鉄筋全長を目標腐食率 5.0%で腐食させた腐食鉄筋を用いた腐食試験体とした。なお、鉄筋の腐食方法には目標に定めた腐食率(目標腐食率)になるように制御し易い電食試験法を採用し、あらかじめ腐食させてから鉄筋を試験体に埋設した。昨今、アスファルト表面にひび割れ等の変状が生じる前段階で鉄筋腐食の有無やその程度を非破壊で評価する手法が強く求められている。この観点から、ひび割れや空洞等が一切存在しない本試験体の作製方法となった。すなわち本研究では、鉄筋腐食の影響のみによる温度差について検討することとなる。なお、試験体名称は D(鉄筋径), AK(かぶり厚), C(目標腐食率), (実験条件)の順に記載されており、無筋試験体の場合は N, 散水なしの場合は d, 散水ありの場合は w と表記した。電磁誘導加熱による鉄筋温度の制御は、設定した電力を所定の時間までコイルに負荷させることにより実施した。

アスファルト表面の温度測定は赤外線サーモグラフィカメラにより実施し、電磁誘導コイルを設置する前に初期温度を測定し、電磁誘導加熱終了後 5 秒間隔で測定

表-3 試験体パラメータ

試験体名称	鉄筋径(mm)	かぶり(mm)	目標腐食率(%)	実験条件
D16-AK100-C0-d	16	100	0	散水なし
D16-AK100-C5-d			5	
D16-AK100-C0-w			0	散水あり
D16-AK100-C5-w			5	
D16-AK100-N-w	-	-	-	

した。また、温度履歴計測点はアスファルト表面の中央とし、輻射熱を低減するために試験体とコイルの間に 5mm の空気層を設けて試験を実施した。

3.2 鉄筋加熱条件

長田ら⁹⁾は赤外線サーモグラフィカメラを用いた腐食率算定を行う際の限界閾値に関する検討を行い、温度差が 0.5℃以上であれば判別性に十分な信頼があるとしている。また、一般的なコンクリートの特性においてコンクリート中の鉄筋の温度が 100℃(鉄筋 ΔT=80℃)を超えると、鉄筋の急激な温度膨張によりコンクリートにひび割れが発生することが考えられている。そこで、本研究では限界閾値 0.5℃を超え、コンクリートのひび割れを起こす危険性を排除できる鉄筋の適用限界を 100℃とした。また、アスファルトの熱伝導率はコンクリートと比べて小さいため、鉄筋からの熱がアスファルト表面に伝わりにくくなっている。そのため、鉄筋加熱時間は 60 分とし、電力は 10kW および 8kW の 2 パラメータとした。鉄筋の温度上昇量の測定は熱電対を使用した。

3.3 実測結果

健全試験体と腐食試験体における電磁誘導加熱終了後からの温度履歴を図-5(a), (b)に示す。図-5(a), (b)はそれぞれ 10kW, 8kW 加熱であり、図中には鉄筋加熱終了時の温度差を拡大したものも併記している。

既往の研究^{1)~7)}において、本システムを適用した際、図-6 に示すように加熱終了後から一定時間経過後に温度上昇量が最大となる。しかし、本研究では加熱終了直後に温度上昇量が最大となっている。この原因は、鉄筋からアスファルト表面へ拡散する熱の影響とコイルからの輻射熱の影響によるものであると考えられる。電磁誘導加熱の際、高出力で長時間にわたってコイルに通電すると、コイル自体が高温となりアスファルト表面に熱が輻射される。そこで、アスファルト表面に及ぼす輻射熱の影響を把握するために、コイル底面に蛍光式光ファイバー温度計を設置し、鉄筋加熱時のコイル底面温度を測定した。その結果を図-7(a), (b)に示す。同図に示す通り、健全試験体と腐食試験体のコイル底面温度の差異は極めて微小であった。そのため本研究では、図-5(a), (b)における健全試験体と腐食試験体の鉄筋加熱終了後のアスファルト表面温度上昇量の差は、コイルの輻射熱

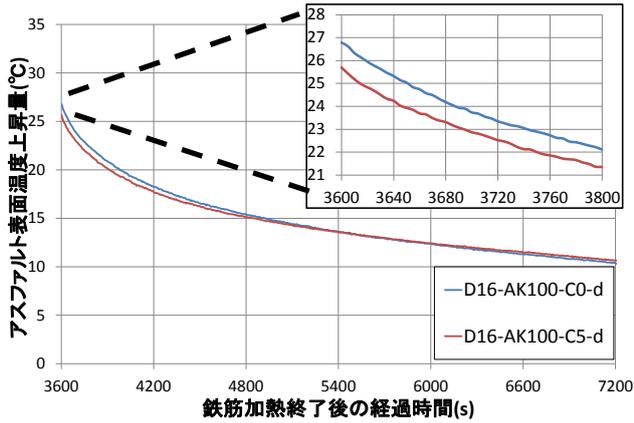


図-5(a) 健全と腐食のアスファルト表面温度履歴 (10kW)

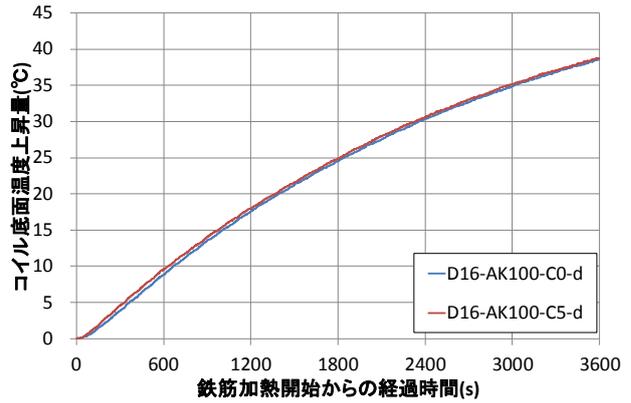


図-7(a) コイル底面温度上昇量 (10kW)

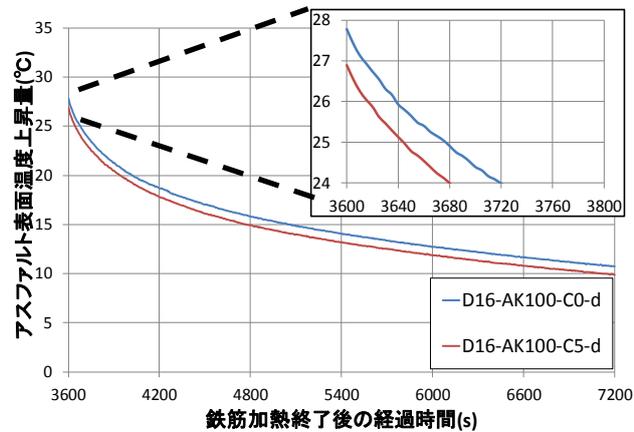


図-5(b) 健全と腐食のアスファルト表面温度履歴 (8kW)

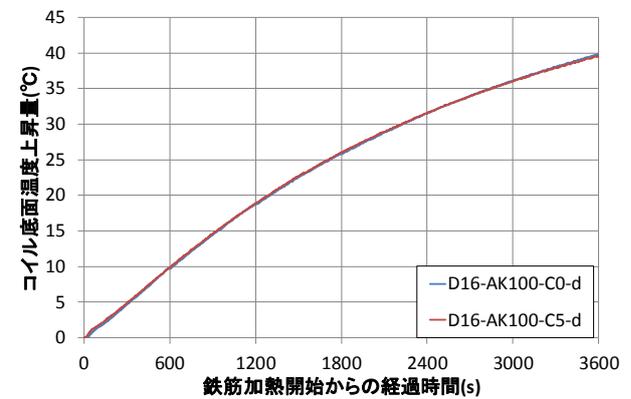


図-7(b) コイル底面温度上昇量 (8kW)

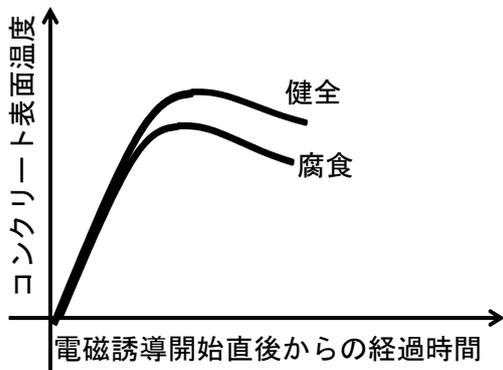


図-6 コンクリート表面の温度履歴

の影響によらないものと考えられる。また、図-5(a)、(b)の健全試験体と腐食試験体において、電磁誘導加熱によって鉄筋に蓄積される熱量は、腐食率0%から5%の範囲では鉄筋腐食の有無によらずほぼ同じであった。したがって、実測の健全鉄筋と腐食鉄筋の温度上昇は等しい。すなわち、健全試験体と腐食試験体のアスファルト表面温度上昇量の差は鉄筋からの熱拡散によるものと考えられる。したがって、コイル除去時の温度差から鉄筋腐食評価を行うことが可能である。

4. 鉄筋からの熱拡散を促進させる実験条件

本章では、鉄筋からアスファルト表面への熱伝導性を向上させる方法を提案する。それにより、鉄筋に与える熱量が小さくても、アスファルト表面に温度差をもたらすことを可能とする。既往の研究¹⁰⁾においてアスファルト混合物に散水することで熱伝導率の増加を促すことができ、その値は含水の有無によってアスファルトの熱伝導率のおよそ1.5倍となることが報告されている。そこで、散水有りの場合と散水無しの場合のアスファルト表面温度差を熱伝導解析と実測により比較する。

4.1 散水条件による熱伝導解析

本実験と同様に電力を10kW(鉄筋の温度上昇量 ΔT は、実測値である3600秒の間で50°Cとなるように設定)、鉄筋加熱時間を60分とし、熱伝導解析を用いて計算した。熱伝導解析には図-4の試験体と同様の寸法でメッシュを切ったモデルを用いた。また、境界条件はモデルの上面が外気との境界であるため断熱条件とした。なお、外気温度、および各構成材料に与えた初期温度を20°Cとし、アスファルトの熱伝導率は表-1の0.74(W/m°C)を1.5倍した1.11(W/m°C)とした。また、解析に用いた各構成材料の熱的物性値は表-1に示した値である。

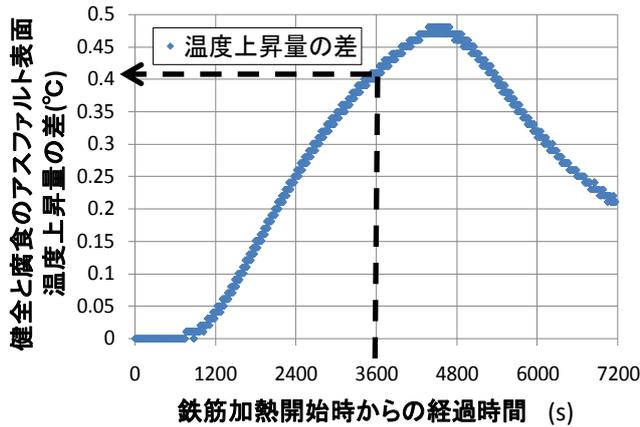


図-8(a) 健全と腐食の温度上昇量の差 (散水あり)

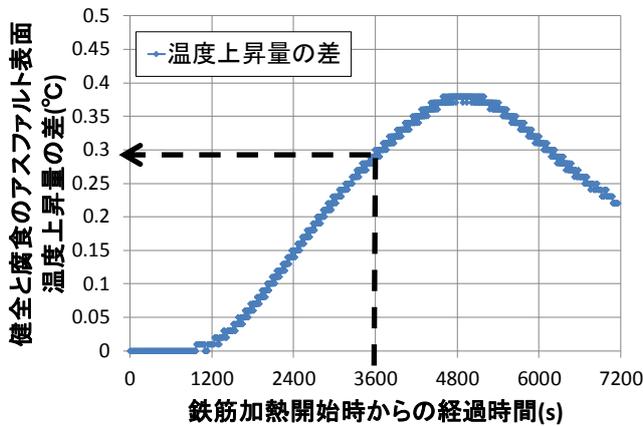


図-8(b) 健全と腐食の温度上昇量の差 (散水なし)

表-4 散水の有無の温度差 (解析)

	加熱終了時の温度差
解析結果(散水なし)	0.29°C
解析結果(散水あり)	0.41°C

図-8 (a) は散水を行った場合の健全試験体と腐食試験体の温度上昇量の差を表わしている。鉄筋加熱終了時(3600秒)に0.41°Cの温度差を示した。

ここで、既往の研究⁸⁾で示した散水無しの場合の熱伝導解析を図-8 (b) に示し、散水有りの場合と散水無しの場合のアスファルト表面の温度差を比較したものを表-4 に示す。鉄筋加熱終了時における、健全試験体と腐食試験体の温度上昇量の差が0.29°Cから0.41°Cへと大きくなったことがわかる。したがって、アスファルト表面に散水することで顕著な温度差をもたらすことを解析的に示した。

実際はコイルの輻射熱の影響により、散水の効果が時間とともに変化する可能性がある。しかし、解析では鉄筋からアスファルト表面に拡散する熱のみによる表面温

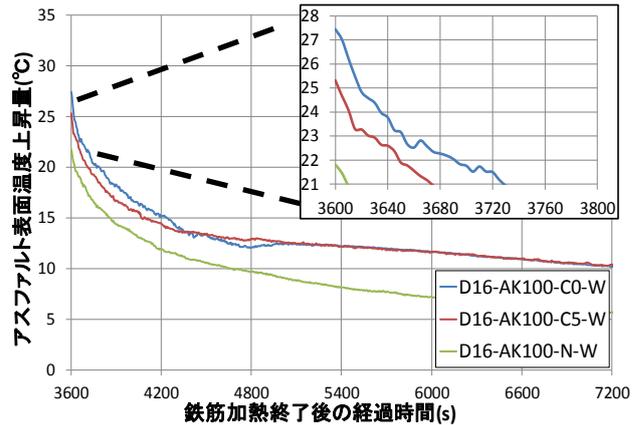


図-9(a) アスファルト表面温度履歴 (10kW)

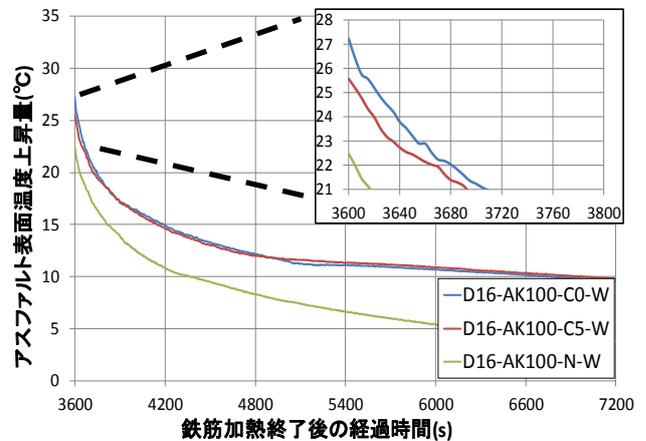


図-9(b) アスファルト表面温度履歴 (8kW)

表-5 散水の有無の温度差 (実測)

	加熱終了時の温度差(10kW)	加熱終了時の温度差(8kW)
実測結果(散水なし)	1.08°C	0.89°C
実測結果(散水あり)	2.13°C	1.66°C

筋からアスファルト表面に拡散する熱のみによる表面温度性状に及ぼす鉄筋腐食の影響を評価するためにコイルの輻射熱の影響を完全に除去した。したがって、輻射熱の影響によって生じる水の蒸発を考慮せずに熱伝導解析を実施した。今後は、輻射熱の影響を考慮した熱伝導解析について検討する。

4.2 散水条件による実測

前節では、熱伝導解析により散水の有用性を示した。本節では試験体に対して散水を適用し、その有用性の検討を行う。図-4 に示す試験体に対して散水を実施した。本実験では、アスファルト表面に水量250mlを一度に散水し、アスファルト全領域に浸透するまで放置した。その後、電磁誘導による加熱を10kWおよび8kWの電力で鉄筋加熱時間を60分として行った。また、無筋試験体に本システムを適用することで、アスファルト表面温度性

状に及ぼすコイルの輻射熱の影響を検知することができる。また、健全試験体と腐食試験体は、無筋試験体と比較をすることで鉄筋からの熱拡散の影響を詳細に評価することが可能となる。

健全試験体、腐食試験体および無筋試験体における電磁誘導加熱終了以降の温度履歴を図-9(a), (b)に示す。図中には鉄筋加熱終了時の温度差を拡大したのも併記している。図-9(a)の鉄筋加熱終了時に着目すると、健全試験体(27.4°C)および腐食試験体(25.3°C)は、無筋試験体の表面温度(21.8°C)を上回っており、一定時間経過後はアスファルト表面温度差が徐々に開いていく。図-9(b)の鉄筋加熱終了時においても、健全試験体(27.2°C)および腐食試験体(25.6°C)は、無筋試験体の表面温度(22.5°C)を上回っており、一定時間経過後はアスファルト表面温度差が徐々に開いていく。このことから、鉄筋加熱終了以降に鉄筋からの熱拡散の影響があることが確認され、腐食評価が可能であることを示した。

図-5, 図-9 で示した、散水の有無と電力の差異を表-5 に示す。まず、散水の有無による温度差の差異は、加熱電力が 10kW の場合、鉄筋加熱終了時で健全試験体と腐食試験体でおよそ 2 倍となっている。加熱電力が 8kW の場合においても、鉄筋加熱終了時で健全試験体と腐食試験体でおよそ 2 倍となっている。

次に、加熱電力の差異が温度差に及ぼす影響であるが加熱電力が 8kW の散水ありの温度差 1.66°Cは、加熱電力が 10kW の散水なしの温度差 1.08°Cを上回っている。したがって、散水を行うことで加熱電力を小さくしても腐食の評価が可能であることを示した。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究の腐食程度に限定されるが、本システムを利用することで、アスファルトで舗装した RC 床版内の鉄筋腐食の有無は評価できる可能性がある。
- (2) アスファルト混合物で舗装した RC 床版内の鉄筋腐食評価において、健全試験体と腐食試験体のアスファルト表面温度上昇量の差は、鉄筋からの熱拡散によるものであり、加熱終了時の温度差から鉄筋腐食評価を行うことが可能であることを示した。
- (3) アスファルト表面に散水することにより、鉄筋に与える熱を小さくしても鉄筋腐食の判断が可能であることを実験的に示した。
- (4) アスファルト表面に散水することにより、アスファルト表面に顕著な温度差をもたらすことを解析、実験ともに示した。

謝辞：本研究は西日本高速道路エンジニアリング四国(株)ならびに第一高周波工業(株)との共同研究であり、関係各位に感謝の意をここに表す。

参考文献

- 1) 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.76-92,2009.2
- 2) 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関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.442-458, 2009.10
- 3) 矢寄早織, 今井嵩弓, 大下英吉: コンクリートの表面温度性状に基づく鉄筋腐食の簡易診断手法に関する研究, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.411-416, 2012.8
- 4) 谷口修, 重松文治, 堀江宏明, 大下英吉: 電磁誘導加熱を利用したコンクリート表面の温度性状に基づく RC 構造物の空洞検出システムの開発に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.173-185, 2008.2
- 5) 堀江宏明, 尾崎勝成, 谷口修, 大下英吉: 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, コンクリート工学年次論文集, 第 29 巻, 2 号, pp.685-690, 2007.7
- 6) 根本早季, 今井嵩弓, 大下英吉, 林詳悟, 福岡養祐: 鉄筋腐食推定手法の剥離空洞存在領域への拡張, コンクリート年次論文集, 第 35 巻, No.1, pp.1825-1830, 2013.7
- 7) 金本恒之介, 大下英吉, 林詳悟, 福岡養祐: 剥離・空洞を誘発した鉄筋腐食の定量的評価に関する研究, コンクリート年次論文集, 第 37 巻, No.1, pp.1729-1734, 2015.7
- 8) 上田峻也, 大下英吉, 林詳悟, 福岡養祐: アスファルト混合物で舗装した RC 床版内部の鉄筋腐食検知手法に関する研究, コンクリート年次論文集, 第 38 巻, No.1, pp.2181-2186, 2016.7
- 9) 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.121-133,2004.8
- 10) 田中貴子, 藤本明宏, 福原輝幸: 排水性舗装の熱伝導率の水分依存性, 雪氷研究大会講演要旨集,41-41, 2010.12