

論文 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

上田 峻也*1・大下 英吉*2・林 詳悟*3・福岡 養祐*4

要旨: 著者ら^{1)~4)}は、電磁誘導法を用いてコンクリート内部の鉄筋を強制加熱し、鉄筋からの熱拡散をコンクリート表面で検知するという鉄筋腐食の非破壊検査手法(以下、本システム)を開発した。既往の研究^{1)~4)}では、未舗装の RC 床版に本システムを適用し、鉄筋腐食量の定量的な評価を可能とした。そこで本研究では、アスファルト混合物で舗装した RC 床版に本システムを適用し、鉄筋腐食の有無を評価した。また、熱伝導解析を用いてアスファルト試験体に対する本システムの有用性を検討するとともに、本システムの適用条件について検討する。

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

我が国の RC 構造物は、高度経済成長期などに集中的に建設され、急速に老朽化が進んでいる。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。なかでも、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。

RC 構造物の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能に大きな影響を及ぼす非常に重要な問題である。鉄筋腐食が生じることにより腐食膨張圧が生じ、コンクリートにひび割れが発生する。これにより、コンクリート片の剥離・剥落を招き、耐荷力の低下に直結する問題となっている。

現在、鉄筋腐食診断手法として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。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。しかし、いずれの手法においても鉄筋腐食量の定量的な評価は困難であり、かぶりコンクリートの局所的な破壊が必要であった。そのため、鉄筋腐食性状を非破壊かつ定量的に評価する非破壊検査手法の開発は急務である。

このような背景から、著者らは既往の研究^{1)~4)}におい

て 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。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、鉄筋からコンクリー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、コンクリート表面温度には変化が生じる。したがって、鉄筋の周りに生じる腐食生成物の断熱効果により、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。このことは、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腐食の有無を正確に評価することが可能となる。

本研究では、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。強制加熱した鉄筋の熱拡散により生じるアスファルト表面の温度性状から鉄筋腐食の有無を検討するとともに熱伝導解析を用いて本システムの適用条件について検討する。具体的には、まず実測結果と実測の実験条件(外気温度、各構成材料の初期温度)に併せた熱伝導解析結果の比較をし、実測結果に及ぼす実験条件の影響について検討する。これを考慮した上で、鉄筋からの熱拡散の影響のみによる健全試験体と腐食試験体との有意な温度差を熱伝導解析により示し、腐食率算定に必要な温度差(限界閾値)を用いて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の提案をする。さらに、その加熱方法を用いて本システムの適用条件について検討する。

*1 中央大学 理工学部都市環境科 (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

2. 鉄筋腐食率推定手法

本章では、鉄筋腐食診断システムの概要を示すとともに、実験概要を以下に示す。

2.1 鉄筋腐食推定手法の概要

本システムの概要図を図-1 に示す。鉄筋の加熱方法に関しては、電磁誘導コイルを高周波インバータに接続し、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。交番磁界の影響範囲が RC 床版中の鉄筋に達すると、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、アスファルト混合物を介してアスファルト表面へと伝搬する。そして、鉄筋直上のアスファル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アスファルト表面へ供給される熱量を把握することが可能となる。

鉄筋腐食が生じている場合は図-2 に示す通り、拡散する熱が小さくなる。これは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ためである。したがって、腐食鉄筋の場合と健全鉄筋の場合で、アスファル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。

2.2 実験概要

試験体概要図を図-3 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は 100mm である。かぶり 100mm の位置に D16 異形鉄筋 (SD295A) を配筋した。

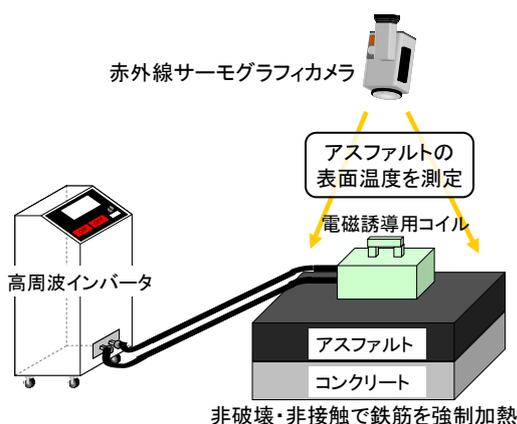


図-1 本システムの概要図

表-1 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(%)
D16AK100N	16	100	0
D16AK100C5	16	100	5

試験体は、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比較的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。試験体パラメータを表-1 に示す。試験体名称は D(鉄筋径), AK(かぶり厚), C(目標腐食率)の順に記載されており、腐食率 0% の場合は N 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。

本研究では、電磁誘導加熱による鉄筋の温度上昇量 ΔT を 50°C とし、鉄筋加熱時間は 60 分とした。また、鉄筋の温度上昇量 ΔT の測定は熱電対を使用した。

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、電磁誘導コイルによるコイル自体からの発熱(以下、放射熱)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。

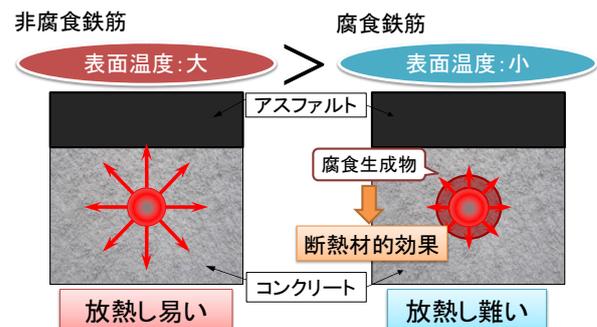


図-2 鉄筋腐食によるアスファルト表面温度の変状

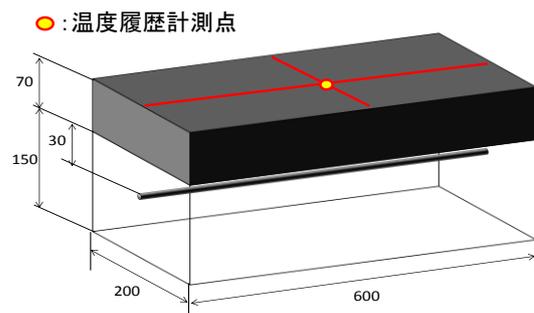


図-3 試験体概要図

3. アスファルト表面温度性状

電磁誘導加熱では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る。したがって、コイルの発熱を抑制するために一般的には通水を施すが、完全には輻射熱を除去できない。仮に、このような状態にあるとコイルの輻射熱がアスファルト表面に拡散することによって、アスファルト表面の温度が上昇する。本来、本システムでは鉄筋からアスファルト表面に向かって拡散する熱により生じる温度変化量に基づいて、鉄筋腐食の評価を行うものであるが、このような輻射熱が存在するとその評価自体が困難となる。

本章では、電磁誘導コイルの輻射熱の影響を示すとともに、実測結果と実測の実験条件に併せた熱伝導解析結果との比較を行い、実験条件に及ぼす影響を評価する。

3.1 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の温度履歴を図-4 に示す。既往の研究^{1)~4)}において、本システムを適用した際、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後に温度上昇量が最大となっている。この原因は、強制加熱された鉄筋からの熱拡散ではなく、コイルからの輻射熱が支配的であると考えられる。また図-4

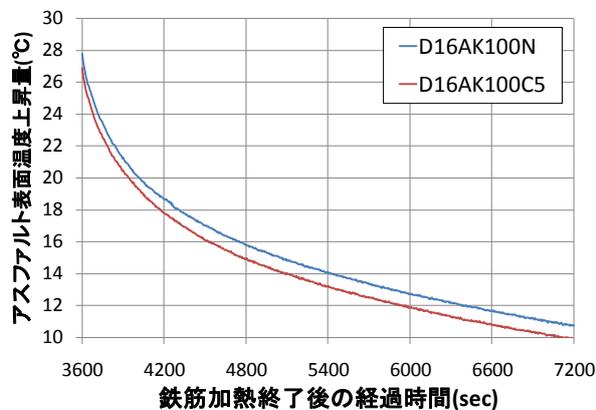


図-4 健全と腐食のアスファルト表面温度履歴

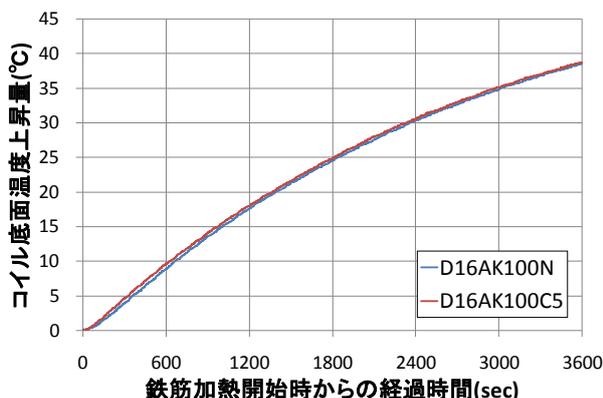


図-5 コイル底面温度上昇量

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、実測の非腐食鉄筋と腐食鉄筋の温度上昇は等しい。

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、アスファルト試験体に本システムを適用するためには、大きな熱量を鉄筋に与える必要があり、鉄筋を強制加熱するコイルの負荷電力を大きくしなければならない。これにより、コイルに内蔵しているフェライトコアの温度が上昇するため、鉄筋加熱中にコイル底面からの輻射熱がアスファルト表面へ伝達する。図-4 から、伝達する輻射熱の影響により鉄筋加熱終了のコイル除去時にアスファルト表面温度は最高温度となる。このことより、アスファルト表面温度上昇量のピークを確認することができず、強制加熱した鉄筋からの熱の影響を正確に判断することは極めて困難である。

そこで、コイルからの輻射熱がアスファルト表面に及ぼす影響を把握する必要があり、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-5 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-4 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、コイルの輻射熱の影響によらないものと考えられる。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。

このことを確認するため、コイルの輻射熱を完全に除去して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度性状に及ぼす鉄筋腐食の影響を解析的に評価することとする。

3.2 熱伝導解析

実測結果と実測の実験条件(外気温度、各構成材料の初期温度)に併せた熱伝導解析結果の比較をし、実験条件に

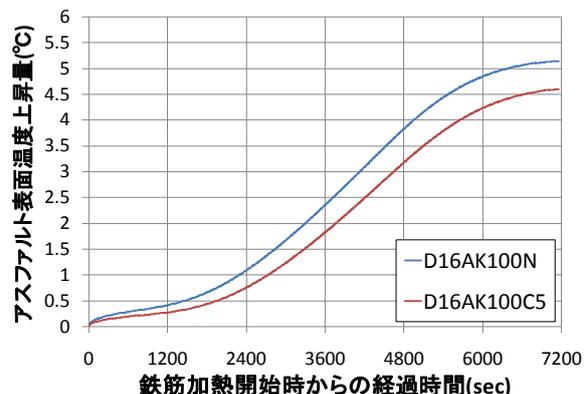


図-6 解析結果

及ぼす影響評価を示す。実測の実験条件(外気温度, 各構成材料の初期温度)に併せた熱伝導解析結果を図-6に示す。同図は健全試験体と腐食試験体の鉄筋加熱開始時からのアスファルト表面における温度履歴であり, 鉄筋の温度上昇量 ΔT は, 実測値である3600秒の間で50°Cとなるように設定した。

熱伝導解析に与えた外気温度と各構成材料の初期温度を表-2に示す。アスファルト以外の各構成材料の初期温度は実測の外気温度を使用しており, アスファルトの初期温度は電磁誘導コイルを設置する前に測定した実測の温度を使用することとした。また, 解析に用いた各構成材料の熱的物性値を表-3に示す。

解析結果である図-6の健全試験体と腐食試験体とのアスファルト表面温度上昇量の差は, 鉄筋加熱終了時点で0.53°C, 加熱終了から1440秒後に最大となる0.66°Cであり, 健全試験体では腐食試験体に比べて温度上昇が大きくなっている。このような性状は既往の研究と一致しており, 本システムのアスファルト舗装材への適用が確認できる。しかしながら, 実測の温度履歴である図-4は鉄筋加熱終了時点で0.89°C, 加熱終了から約1400秒後に最大となる0.97°Cであり, 解析結果は実測結果に比べて, 僅かではあるが温度差は小さい。これらの差は外気温度の解析条件に依存していると考えられる。すなわち, 実測では実験中の外気温度の微小な温度変化があり, 少なからずアスファルト表面へ影響を及ぼすと考えられるが, 解析では外気温度の温度変化の影響を考慮していない。

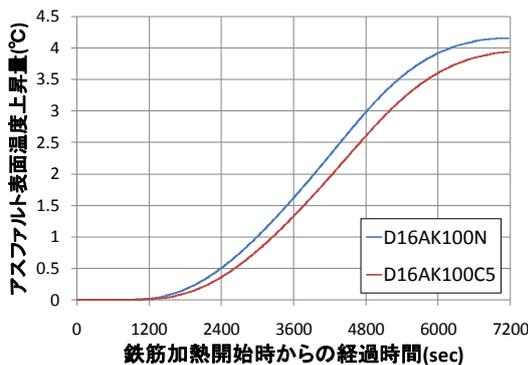


図-7(a) 鉄筋加熱による有意な温度差

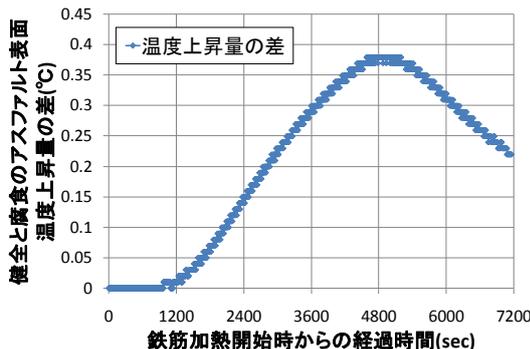


図-7(b) 健全と腐食の温度上昇量の差

4. 鉄筋加熱による影響のみでの温度差

本章では, 鉄筋加熱のみの影響によるアスファルト表面温度履歴を熱伝導解析によって確認するとともに, 腐食率の算定に必要な温度差について検討する。

4.1 アスファルト表面に生じる有意な温度差

3.2で実施した熱伝導解析では, 電磁誘導加熱実験の条件に合致させた初期条件と境界条件の基で実施されたものである。すなわち, 表-2に示したように健全試験体と腐食試験体においてそれらを構成する材料の初期温度や外気温度が異なるものであり, それらの差異は少なからずアスファルト表面温度に影響を及ぼすことになる。したがって, アスファルト表面温度に及ぼす鉄筋腐食の有無を詳細に評価するためには, 構成材料の初期温度や外気温度を同一とした熱伝導解析で実施しなければならない。初期温度と外気温度を統一した熱伝導解析の結果を図-7に示す。同図は健全試験体と腐食試験体の鉄筋加熱開始時からのアスファルト表面における温度履歴であり, 鉄筋の温度上昇量 ΔT は, 実測値である3600秒の間で50°Cとなるように設定した。外気温度, 各構成材料(アスファルト, 鉄筋, コンクリート, ゴム, 腐食生成物)の初期温度を20°Cとして与えた同図(a)は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において鉄筋からの熱拡散のみによる差を示している。同図(b)は同図(a)の健全試験体と腐食試験体の温度上昇量の差を示しており, 鉄筋加熱終了時点で, 0.29°C, 加熱終了から約1400秒後に最大となる0.38°Cである。以上の実測および解析結果を表-4に示す。表-4の解析結果(3.2)は, 実測の

表-2 解析で与えた各構成材料の初期温度

(a) 健全試験体

構成材料	初期温度(°C)
非腐食鉄筋	16.7
コンクリート	16.7
アスファルト	15.4
ゴム	16.7
外気温度	16.7

(b) 腐食試験体

構成材料	初期温度(°C)
非腐食鉄筋	17.2
腐食生成物	17.2
コンクリート	17.2
アスファルト	16.4
ゴム	17.2
外気温度	17.2

表-3 解析に用いた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

表-4 アスファルト表面温度上昇量の差

	加熱終了時の温度差	最高温度差
実測結果	0.89°C	0.97°C
解析結果(3.2)	0.53°C	0.66°C
解析結果(4.1)	0.29°C	0.38°C

実験条件に併せた解析結果であり、解析結果(4.1)は、外気温度および各構成材料(アスファルト、鉄筋、コンクリート、ゴム、腐食生成物)の初期温度を 20℃として与えた解析結果である。なお、表-4 は実測結果および解析結果におけるアスファルト表面温度上昇量の差を示しており、実測結果の鉄筋加熱終了から約 1400 秒後の最高温度差 0.97℃と解析結果の鉄筋加熱終了から約 1400 秒後の最高温度差 0.38℃を比較することで、実測結果は外気温度による影響が支配的であることが確認された。

4.2 鉄筋腐食率の算定に必要な温度差

長田ら⁵⁾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。本研究においても限界閾値を 0.5℃とする。

ここで表-4 の通り、鉄筋加熱のみの影響によるアスファルト表面温度差は最大で 0.38℃であり、限界閾値に達していない。そのため腐食率算定を行うことが困難である。このことから次章では、限界閾値を超えるような鉄筋加熱方法の提案をする。

5. 鉄筋加熱方法の提案および鉄筋の過度な温度上昇を防ぐ実験条件

本章では、腐食率算定をするための鉄筋加熱方法を提案するとともに、鉄筋の過度な温度上昇を防ぐための実験条件について検討する。

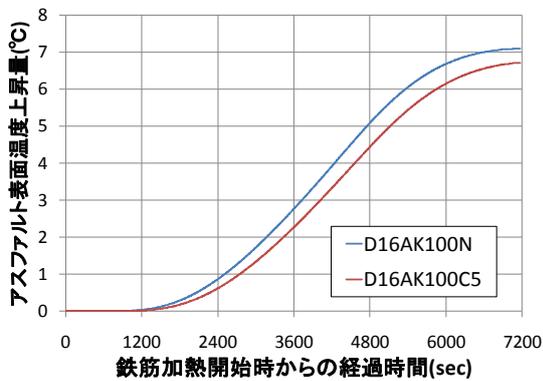


図-8(a) 鉄筋 $\Delta T=87^\circ\text{C}$ 時の温度履歴

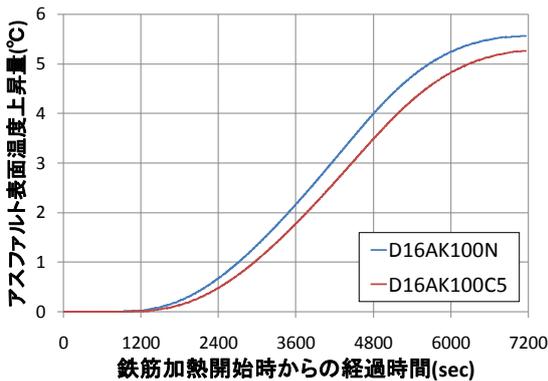


図-8(b) 鉄筋 $\Delta T=67^\circ\text{C}$ 時の温度履歴

5.1 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

前章で示した限界閾値 0.5℃を満たす鉄筋加熱方法を熱伝導解析により計算した結果を図-8 に示す。ここで、外気温度、各構成材料の初期温度を 20℃とする。同図(a) は鉄筋加熱終了時に温度差が限界閾値となるアスファルト表面温度履歴である。また、同図(b)は最高温度差が限界閾値となるアスファルト表面温度履歴である。

なお、同図(c)は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。図-8(a)は、鉄筋加熱終了時が限界閾値となるように設定しているため、鉄筋加熱終了後の温度履歴を計測する必要がなく、加熱終了直後のアスファルト表面温度の測定のみで腐食率の算定が可能となる。

しかしながら、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 $\Delta T=80^\circ\text{C}$)を超えると、鉄筋熱の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。そのため本研究においても、鉄筋温度の適用限界を 100℃とする。

そこで同図(c)の鉄筋の過度な温度上昇を防ぐためには、最高温度差が限界閾値となるような熱の与え方が望ましい。そこで同図(c)に示す通り、鉄筋が $\Delta T=67^\circ\text{C}$ になるように熱を与えることで腐食率の算定が可能となる。また、コンクリートのひび割れを起こす危険性を排除できる。

以上のことを踏まえ、外気温度および各構成材料の初期温度が 20℃の際、腐食率を算定するのに必要な鉄筋の温度上昇量、アスファルト表面の温度上昇量の差を検討した。その結果を表-5、図-9 に示す。表-5 は、アスファルト舗装した RC 床版内の鉄筋の温度上昇量 ΔT が 67℃以上 80℃以下であれば腐食率の算定が可能となることを示している。

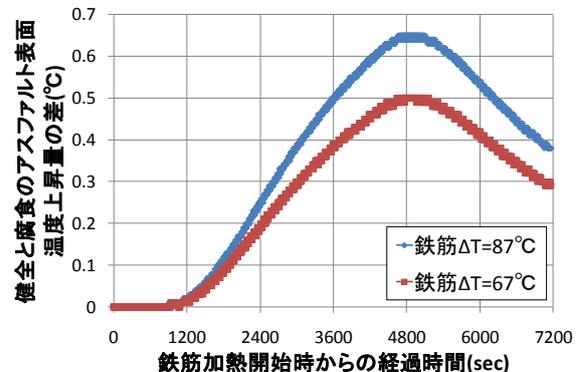


図-8(c) 健全と腐食の温度上昇量の差

表-5 腐食率算定に必要な鉄筋 ΔT

鉄筋 ΔT	最高温度差
最小 67℃	限界閾値 0.5℃
最大 80℃	0.6℃

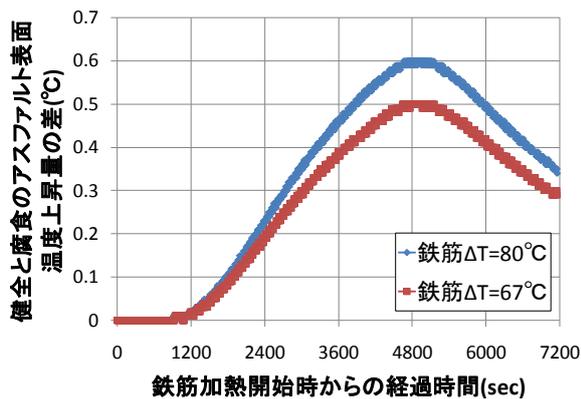


図-9 健全と腐食の温度上昇量の差

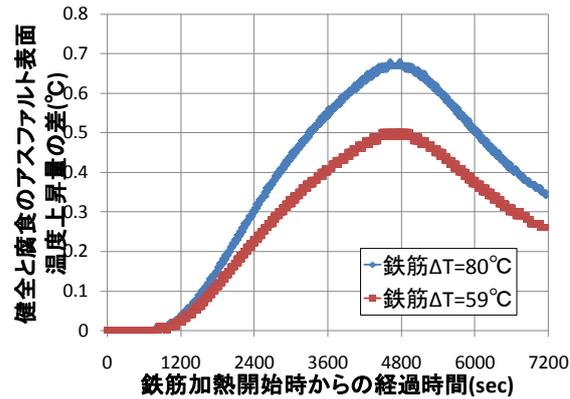


図-10 散水条件による解析結果

表-6 散水条件時の鉄筋 ΔT

鉄筋ΔT	最高温度差
最小59°C	限界閾値0.5°C
最大80°C	0.68°C

5.2 鉄筋からの熱拡散を促進させる実験条件

本節では、鉄筋からアスファルト表面への熱の伝達度合いを大きくする方法を提案する。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⁹⁾において排水性舗装の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、その値はアスファルトの熱伝導率のおよそ1.2倍となることが報告されている。

実際は電磁誘導加熱を60分行うことと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。

前述の限界閾値と鉄筋の温度上昇量の限界値を考慮した熱伝導解析による腐食率の算定に必要な鉄筋ΔTおよび温度差を表-6、図-10に示す。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を0.888(W/m°C)とした。表-6および図-10は、アスファルト表面に散水することで、鉄筋からの熱拡散が小さくても腐食率の算定を可能とすることを解析的に示している。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本システムを利用し、アスファルト混合物で舗装したRC床版内の鉄筋腐食の有無を示した。
- (2) 実測結果と解析結果の比較により実測結果に及ぼす実験条件の影響を示し、鉄筋加熱のみの影響によ

り生じる健全試験体と腐食試験体との有意な温度差を示した。

- (3) 鉄筋腐食率の算定に必要な温度差(限界閾値)を用いて、熱伝導解析による鉄筋加熱方法の提案をし、鉄筋の温度上昇量ΔTの本システムの適用範囲が67°C以上80°C以下であることを示した。
- (4) 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腐食率の算定が可能であることを解析的に示した。

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) 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, コンクリート工学年次論文報告書, 第37巻, No.1, pp.1729-1734, 2015, 7
- 4) 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, コンクリート工学年次論文報告集, 第35巻, No.1, pp.1825-1830, 2013, 7
- 5) 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
- 6) 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