

# 論文 IH を用いた鉄筋腐食量の定量的な非破壊検査に関する基礎的研究

中村亮太\*1・中澤里\*2・六郷恵哲\*3・小林孝一\*4

**要旨：**鉄筋腐食を非破壊で定量的に把握することを目的として、IH と赤外線サーモグラフィを用いた新しい技術について基礎的な検討を行った。本研究では、IH を用いて鉄筋を強制加熱し、コンクリート表面の温度性状をサーモグラフィによって測定し、鉄筋径および腐食率の異なる供試体による温度性状の違いを検討した。その結果、腐食率が大きくなるとコンクリート表面への熱の拡散が小さくなり、コンクリートの表面温度の上昇量が小さくなった。

**キーワード：**非破壊検査, 鉄筋腐食, IH, 赤外線サーモグラフィ

## 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化要因の中でも特に鉄筋腐食は、劣化の速度が大きく、劣化が性能低下に与える影響も大きい。また、昨今の公共事業縮小の動きのもとで、限られた財源の中でできるだけ劣化の初期段階で、かつ、多くの構造物を正しく診断する為に、非破壊で、かつ定量的に劣化診断を行うことのできる手法の開発が求められている。

鉄筋腐食の調査においては、従来は自然電位法、分極抵抗法などの電気化学的手法が用いられることが多かったが、鉄筋腐食量を定量的に把握することは困難であった。

このような状況のもとで、大下らによって電磁誘導加熱(以下 IH)と赤外線サーモグラフィを併用して鉄筋腐食を非破壊で調査する方法が提案された<sup>1)</sup>。この方法は図-1<sup>2)</sup>に示すように、腐食生成物は健全な鉄筋に比べ、2 桁ほど、更にコンクリートと比較しても 1 桁熱伝導率が小さく、腐食した鉄筋に IH により発生した熱がコンクリート中へ拡散しにくい性質を利用している。IH を使うことでかぶりコンクリート下の鋼材のみを熱し(図-2<sup>2)</sup>)、コンクリート表面の温度分布をサーモグラフィによって計測し、温度の違いによって鉄筋の腐食を検知する非破壊診断技術である。

本方法を実用化する為には、温度性状に影響を及ぼす要因である鉄筋径・腐食率・ひび割れ・錆汁・かぶり・環境条件の温度性状への影響を把握する必要がある。

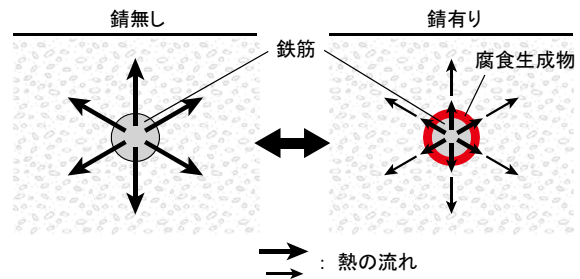


図-1 腐食が熱拡散に与える影響<sup>2)</sup>

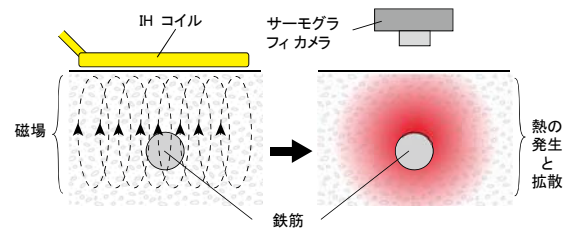


図-2 IH とサーモグラフィを用いた鉄筋腐食の非破壊調査<sup>2)</sup>

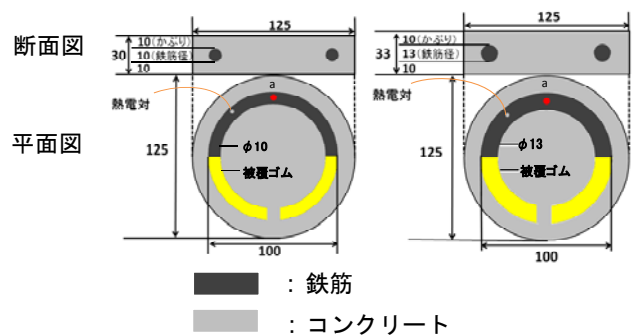


図-3 供試体概要

表-1 コンクリート配合表

スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
7.0	55	4.6	49.4	180	327	810	920	0.8175

\*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

\*2 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科

\*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 准教授 博(工) (正会員)

そこで、本研究では鉄筋温度とコンクリート表面の熱画像によって鉄筋径及び腐食率と温度性状の関係を調査し、IHを用いた鉄筋腐食の非破壊診断検査手法について基礎的検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験供試体

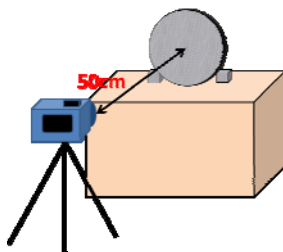
本実験に用いた供試体は、図-3に示すとおり直径125mmの円柱供試体で、かぶり10mmの位置に外径100mmのφ10またはφ13円形丸鋼を配置した。なお鉄筋については、今回使用する加熱装置のIHコイルの形状に合わせて円形とすることで加熱ムラを無くす事を目指した。供試体の高さはφ10を用いた場合が30mm、φ13を用いた場合が33mmである。鉄筋については、全面腐食が生じるとその膨張圧によって供試体が割裂破壊してしまう恐れがある為、乾燥後ゴム質になる塗料を使用し、半分をゴムによって被覆し防食した。したがって、図-3の平面図における供試体上側半分のみを対象として検討を行った。

コンクリートの配合強度は35N/mm<sup>2</sup>とし、示方配合は表-1に示す。鉄筋の目標腐食率は0, 2, 5, 10%とし、表-2に示す1体ずつ計8種の供試体で実験を行った。腐食には電食を用い、電食時間については下記の式(1)<sup>3)</sup>を使い決定した。

$$W=0.766 \times IT \quad (1)$$

ここで W：腐食量(g),

IT：積算電流量(A・h)である。



鉄筋径(mm)	腐食量(%)
10	0
	2
	5
	10
13	0
	2
	5
	10

図-4 表面温度の測定

### 2.2 腐食率の算出

電食終了後、供試体の鉄筋をはつり出し60℃のクエン酸水素アンモニウム10%水溶液に24時間浸けて、除錆を行った。その後、目標腐食率0%の供試体の鉄筋質量の減少量を差し引くことにより、実際の腐食率を算出した(表-3)。目標とした腐食率に比べ大きい為、目標とした腐食率と大小関係が同じであった為、結果に大きな影響を与えないと考えた。なお、以降は供試体の呼称として実際の質量減少率ではなく、目標質量減少率を用いる。

表-3 実際の腐食率

φ10			
目標腐食率(%)	鉄筋質量(g)	質量減少量(g)	質量減少率(%)
0	170.8	0	0
2	168.2	2.6	2.93
5	164.3	6.5	7.34
10	157.7	13.1	14.8
φ13			
目標腐食率(%)	鉄筋質量(g)	質量減少量(g)	質量減少率(%)
0	273.8	0	0
2	270.4	3.4	2.39
5	265.7	8.1	5.70
10	254.5	19.3	13.58

### 2.3 実験方法

IH装置として、定格出力4.6kWの家庭用のIH調理器を用いた。このIH装置に供試体を載せ最大出力で加熱を行った。加熱時間については、鉄筋に発生した熱が拡散してコンクリート表面の温度が変化すること、および加熱時間が長すぎると供試体が小さい為供試体全体に熱が伝播してしまい鉄筋及びその腐食の検知が困難になることから、予備試験を行って決定することとした。その結果、加熱時間をφ10供試体では300秒、φ13供試体では240秒間と設定した。なお、加熱による鉄筋の熱膨張で供試体にひび割れが発生することが懸念されたが、目標腐食率0%の供試体を使用した予備実験および以降に述べる本実験においても、加熱によるひび割れの発生は確認されなかった。今回の供試体はかぶりが小さくひび割れの発生しやすい条件であったが、加熱に起因するひび割れは確認されなかった為、実構造物に対しての使用も問題ないと判断した。

加熱開始時から熱電対によって鉄筋の温度を5秒間隔で測定した。加熱終了後は図-4のように、コンクリート表面をサーモグラフィカメラで撮影した。供試体からカメラまで50cmで撮影し、撮影時間は加熱終了30秒後から390秒間で撮影間隔は30秒間隔とした。

実験は、室温約20℃で無風の室内で行い、環境の違いが結果に影響を与えないように努めた。なお、サーモグラフィカメラにはThermo Shot F30を使用し、その性能については表-4に示す。コンクリート表面を測定する際の放射率はカメラに内蔵している放射率テーブルの中でコンクリートへの測定を対象としたε=0.92を用いた。

## 3. 鉄筋の温度変化

### 3.1 鉄筋径の影響

図-5は、目標腐食率0%の供試体中の異なる径の鉄筋の温度上昇を比較したものである。φ13の加熱を停止した240秒時点の温度差は6.8℃であり、鉄筋径が大きい方が温度上昇量も大きい。IHによる加熱の場合には金属の表面付近が加熱される為、加熱装置に対する投

影面積が大きいφ13 鉄筋の方が温度上昇量が大きくなったものと考えられるが、この結果から鉄筋径が大きい場合のほうが診断が容易であるといえる。

表-4 サーマグラフィの性能

検出器	2次元非冷却センサ
測定精度	±2℃または読み値の±2%
最小検知温度差	0.1℃
温度測定範囲	-20℃~100℃
フレーム時間	8.5フレーム/秒

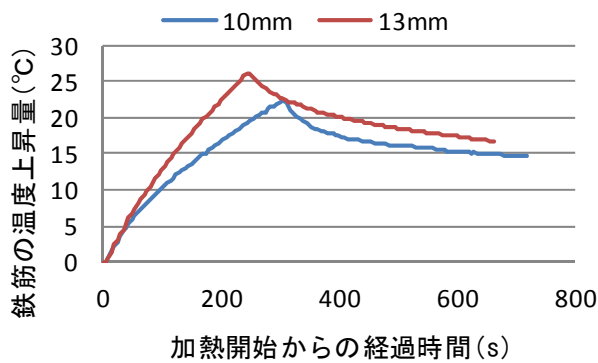


図-5 鉄筋径が温度上昇に与える影響

### 3.2 腐食量の影響

図-6 に熱電対により測定した加熱開始からの鉄筋の温度履歴を示す。ただしφ13 の目標腐食率 10%供試体については、電食中に熱電対が断線してしまった為、この検討では除外している。φ10 供試体において鉄筋の最高温度は目標腐食率0%が22.4℃、2%が22.7℃、5%が22.0℃、10%が21.0℃とほとんど差がなかった。既報<sup>1)</sup>では腐食率の高いほうが鉄筋の熱が拡散するのを阻害する為、鉄筋自体の温度は高くなるとの結果が示されているが、本研究ではこれらとは異なる結果となった。

本研究では円形の鉄筋を用い、腐食膨張圧による供試体の割裂破壊を防ぐ為に、鉄筋の半円部分にゴム被覆を施して、この部分に電食が生じないようにした。ただし、後述するコンクリート表面の温度分布測定結果によれば、この部分の方がコンクリート表面の温度が高く、ゴム被覆を通じて鉄筋の熱が容易にコンクリート中に拡散していると考えられる。したがって、鉄筋表面の錆層が熱拡散を阻害するものの、隣接するゴム被覆部分から熱が逃げ、結果として鉄筋温度に腐食率の影響が認められなくなったものと考えられる。このような状況である為に、本研究で採用した供試体形状には改良の必要があるが、一方で腐食の有無にかかわらず鉄筋の温度が一定となる為に、同一の境界条件下で錆層による熱拡散阻害がコンクリート表面温度に与える影響を評価できると考

え、この供試体で検討を続行することにした。

図-6 (b)のφ13 供試体の場合も腐食率が鉄筋温度に与える影響は小さかったが、目標腐食率 2%の供試体のみは若干温度上昇量が小さかった。その原因は明らかではないが、腐食の不均一な進行や、かぶり径が小さい為に粗骨材の存在によりコンクリートの熱伝導率が不均一となっている影響などが考えられる。今後、1本の鉄筋に複数の熱電対を取り付け、その温度分布を調査する必要があるものとする。

## 4 熱画像による温度性状の検討

### 4.1 加熱終了後の熱画像による検討

加熱終了後 30 秒経過時にサーモグラフィカメラで撮影した熱画像が図-7である。φ10、φ13 共に腐食率が小さいほうが鉄筋に沿った部分の温度上昇が大きく、供試体内の鉄筋直上部分での温度差も小さい。一方、腐食率の大きい供試体に関してはゴム被覆部分から遠くなるほど温度が下がっており、腐食生成物の温度拡散を阻害する性質が確認できた。

また腐食率の大きい(目標腐食率 5%, 10%)供試体では温度が急変していたり、局所的に温度の高い部分が線状に存在していることがあり、これらの供試体では最大で幅 0.6mm 程度の腐食ひび割れを境に温度が急激に落ちていた。このような現象を示した供試体の例として、φ13 目標腐食率 5%供試体(図-7 (g))のかぶり部分のひび割れを図-8に示す。ひび割れが存在すると鉄筋から外側及び、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するとされており<sup>4)</sup>この影響によるものであると考えた。

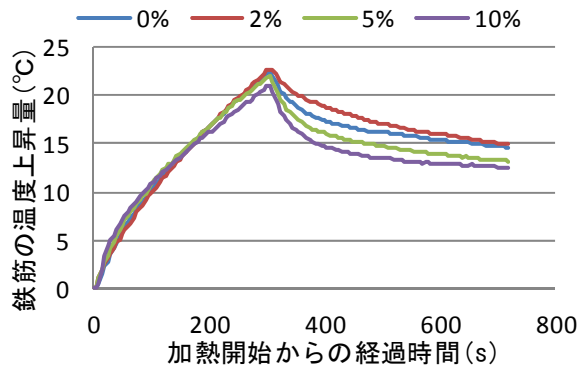
### 4.2 鉄筋腐食率と鉄筋径の差によるコンクリート表面の温度履歴

図-9 に加熱停止以後のコンクリート表面の温度の経時変化を示す。なお温度は、図-3 中の a 点においてサーモグラフィによって測定した温度の経時変化である。

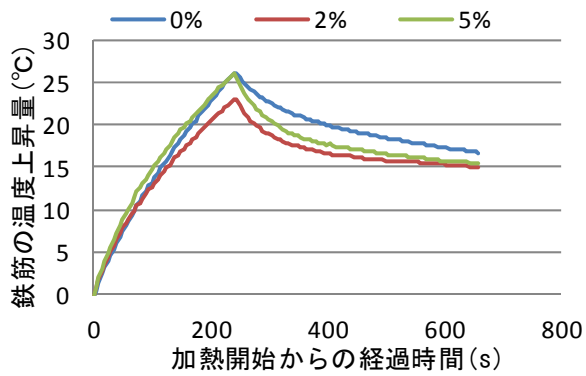
2.2 実験方法で述べたように環境条件による影響を少なくし、各供試体での差をなくすよう努めた。腐食率の大きいものは温度が低く、腐食率の小さいものは温度が高い。また、腐食していない(0%)鉄筋においては加熱停止後すぐに温度が低下しているのに対して、腐食しているものは鉄筋の加熱を停止しても1分程度の間は温度が上昇し続けている。これは、腐食生成物の熱伝導率が小さく、かぶりコンクリートに熱が伝わるのも遅い為であると考えられる。

撮影開始時(加熱停止 30 秒後)と終了時(加熱停止 420 秒後)との温度差を表-5にまとめた。どちらの鉄筋径でも目標腐食率 0%供試体では大きく温度が低下してお

り、目標腐食率 5%、10%の供試体は上昇している。また目標腐食率 5%供試体と 10%供試体との差は小さい。今回の供試体はかぶりが小さい為、電食により発生した腐食生成物が供試体外に流出しやすい。よって、ある程度腐食が進むとそれ以上腐食率が大きくなっても鉄筋周りに残留する腐食生成物の量は頭打ちになる。その為、目標腐食率 5%以上ではコンクリート表面温度に差が出なかったと考えられる。

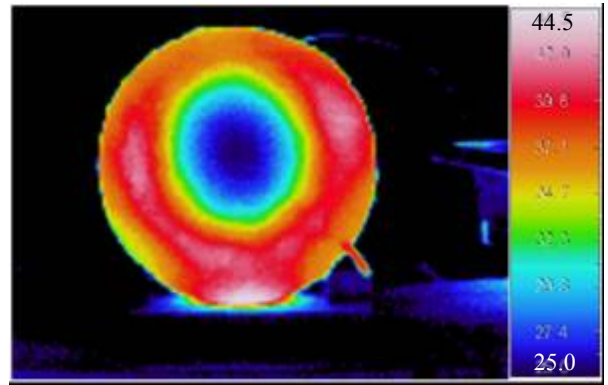


(a)  $\phi 10$  供試体

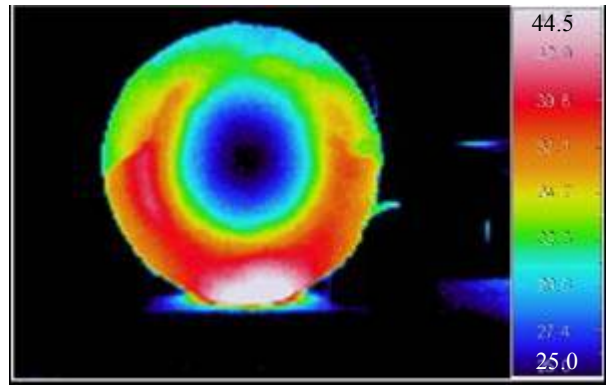


(b)  $\phi 13$  供試体

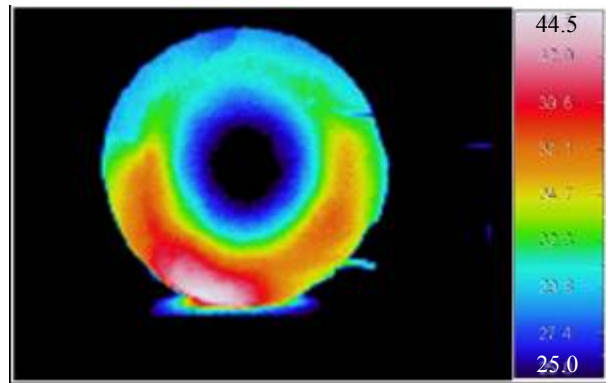
図-6 加熱開始から 660 秒間の鉄筋温度



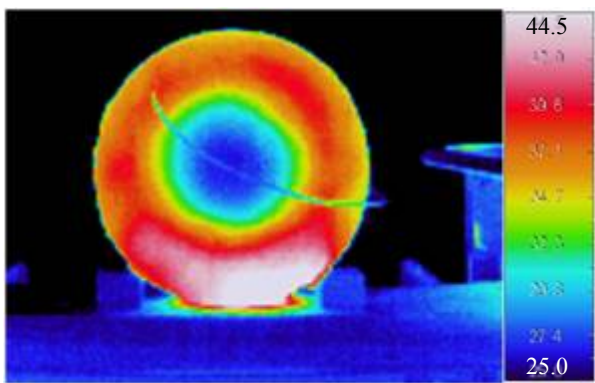
(b) 10mm 2%供試体



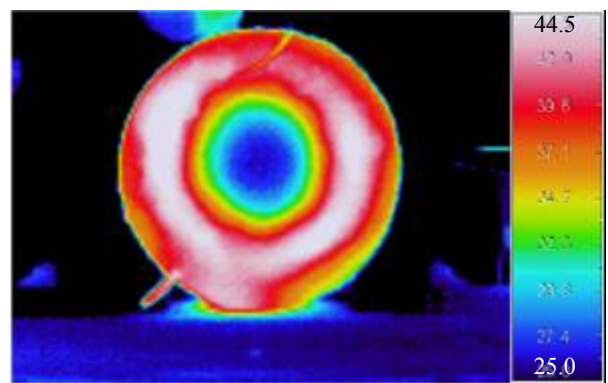
(c) 10mm 5%供試体



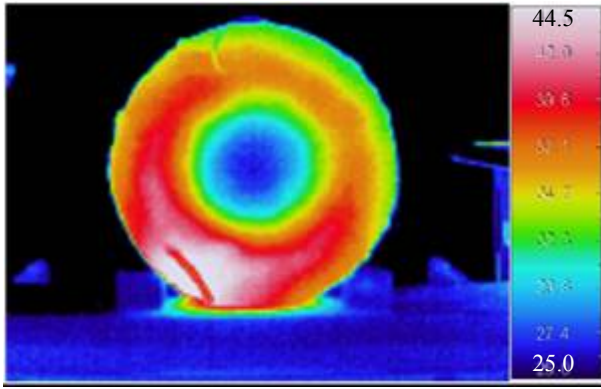
(d) 10mm 10%供試体



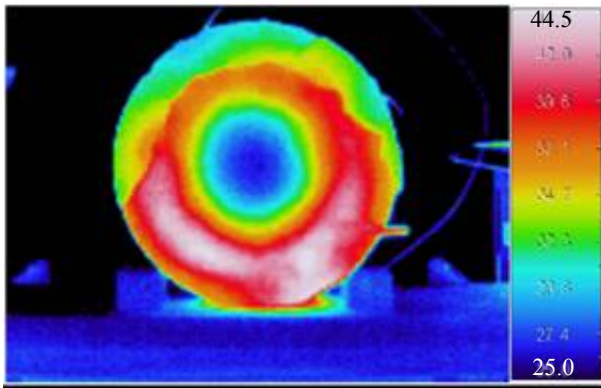
(a) 10mm 0%供試体



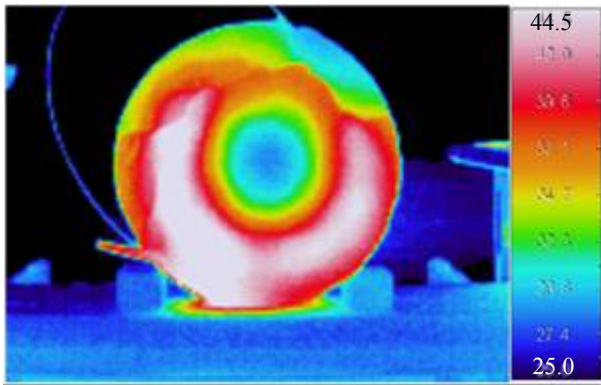
(e) 13mm 0%供試体



(f) 13mm 2%供試体



(g) 13mm 5%供試体

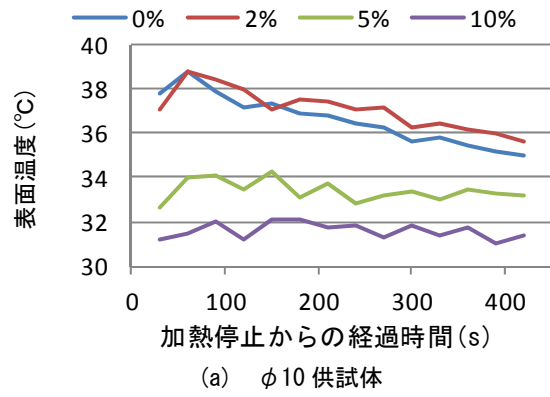


(h) 13mm 10%供試体

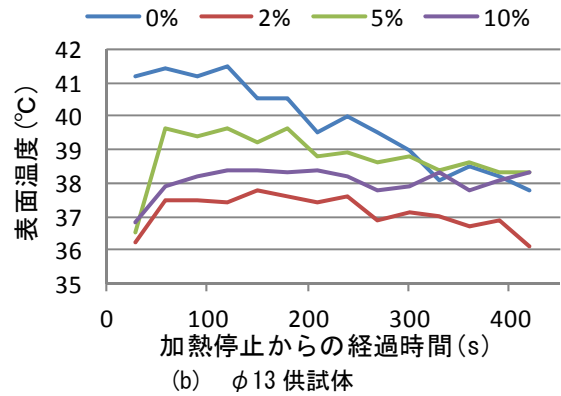
図-7 加熱終了後 30 秒経過時点での熱画像



図-8 13mm 5%供試体の表面画像



(a) φ10 供試体



(b) φ13 供試体

図-9 コンクリート表面の温度推移

表-5 コンクリートの表面の温度差

鉄筋径 (mm)	腐食量 (%)	開始時の温度 (°C)	終了時の温度 (°C)	温度差 (°C)
10	0	37.8	35	-2.8
	2	37.1	35.6	-1.5
	5	32.6	33.2	0.6
	10	31.2	31.4	0.2
13	0	41.2	37.8	-3.4
	2	36.2	36.1	-0.1
	5	36.5	38.3	1.8
	10	36.8	38.3	1.5

## 5. まとめ

本研究では、IH で鉄筋を加熱し、サーモグラフィでコンクリートの表面温度を計測する手法を用いて、鉄筋腐食量を非破壊で定量的に把握する手法の確立を目指し、基礎的検討を行った。具体的には鉄筋腐食率と鉄筋径が温度性状に及ぼす影響の評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) IH で鉄筋加熱する際に、鉄筋径が大きくなるほど温度上昇量も大きくなる
- (2) 加熱直後のコンクリート表面の温度は腐食率が大きいものほど低く、小さいものは高い。
- (3) かぶり1cmの鉄筋コンクリートの場合、腐食率が5%程度あれば加熱終了後、経過時間による温度減少が起こらず、逆に若干の上昇が見られる。

- (4) かぶり 1cm の場合, 腐食率が 5%を超えるとそれ以上はコンクリート表面の温度性状がそれほど変わらない。
- (5) 腐食率 5%を超える際に発生するひび割れ幅 0.6mm 程度の大きなひび割れについては, 熱の伝播を阻害する。

#### 謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)22560460, 代表者:小林孝一)の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 茂木淳, 一ノ瀬晴幸, 大下英吉: 熱画像処理に基づくコンクリート部材の劣化性状評価システムに

関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1593-1598, 2002

- 2) K. Kobayashi, N. Banthia: Corrosion detection in reinforced concrete using induction heating and infrared thermography, Journal of Civil Structural Health Monitoring, Springer (掲載決定)
- 3) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988
- 4) 根岸沙織, 大下英吉: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1745-1750, 2010