

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 8 月 28 日現在

機関番号：13701
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560460
 研究課題名（和文） RC 構造の鋼材腐食量を完全非破壊で定量的に測定する新奇な手法の確立
 研究課題名（英文） A new non-destructive test method that can estimate corrosion amount on rebar quantitatively
 研究代表者
 小林 孝一（KOBAYASHI KOICHI）
 岐阜大学・工学部・准教授
 研究者番号：20283624

研究成果の概要（和文）：本研究では、本研究では、電磁誘導加熱（IH）と熱伝導解析を用いた新たな非破壊診断法によって、鉄筋コンクリート部材内の鉄筋の腐食状況について定量的な診断を行なうことを目指した。その結果、かぶりコンクリートを IH で加熱することは可能であり、また、コンクリートの表面温度と鉄筋の温度を測定することにより、両者の温度はかぶりコンクリート、鉄筋径、腐食量によって影響を受けることが明らかとなった。特に鉄筋に腐食が生じた場合には、腐食生成物の熱伝導率が低いことから、鉄筋の温度が高くなる、コンクリート表面温度が低くなる、という特徴が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：This study aimed at developing a new non-destructive test method using induction heating (IH) and infrared thermography for quantitative assessment of rebar corrosion. Rebars under cover concrete were heated with an IH device, and the effects of rebar diameter and corrosion amount on the temperature distribution on the cover concrete surface were investigated using an infrared thermography camera. A larger corrosion amount suppressed heat diffusion from the rebars to the cover concrete and reduced the increase in surface temperature of the cover concrete.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：電磁誘導加熱，鉄筋腐食，非破壊，赤外線サーモグラフィ，熱伝導解析

1. 研究開始当初の背景

我が国では、橋長 15m 以上の道路橋梁のうち、供用開始後 50 年が経過している橋梁の割合は、現在は 6%ほどであるが、20 年後にはおよそ 40%に達すると予想されている。建設予算も削減される中で、今後は既存の構造物をいかに合理的に維持管理して行くかが大切になる。特に、長い海岸線を有する我が

国では、RC 構造物の劣化原因のうち鋼材腐食への対策が非常に重要である。

塩害は他の劣化機構と比較して、比較的モデル化が単純であるため、劣化が構造性能に与える影響、という観点からの研究がもっとも進んでいる劣化機構ではあるが、実際に構造物を維持管理する上での最大の問題点は、劣化した構造物中の鋼材の腐食状況を確認

することが困難であることである。

2. 研究の目的

IH（電磁誘導加熱）と赤外線サーモグラフィを用いる方法は、かぶりコンクリート中の鋼材の腐食量を、完全非破壊で定量的に測定出来る可能性がある。IHは他の加熱方法と異なり、自ら熱を発生する熱源は有さず非接触で磁性体のみを加熱する。このIHを利用して、かぶりコンクリート下の鋼材のみに熱を与えることができる。錆の熱伝導率が元の鋼材の1/1000、あるいはコンクリートの1/40と非常に小さいために、加熱された鋼材からコンクリートへの熱の伝播が、両者の界面に存在する錆の存在によって阻害されることを利用する。鋼材に腐食が発生している場合には鋼材を加熱してもコンクリート表面の温度上昇が小さくなることにより、鋼材の腐食の発生を検知、あるいはその量を定量的に測定することが可能になる。

3. 研究の方法

供試体にかぶり10mm又は20mmでφ10又はφ13の鉄筋を配置した。鉄筋は、0, 2, 5, 10%の目標腐食率で二個ずつを作成した。一般の構造物を模擬する目的で、水セメントを55%とした。

本実験においては、電食で鉄筋の腐食量が0, 2, 5, と10%となるように腐食させた。腐食時間は式(1)から算出した。

$$W=0.766 \times I \cdot T \quad (1)$$

ここで W : 腐食量 (g), $I \cdot T$: 積算電流量 (A・h) である。

本研究では、電磁誘導加熱機・赤外線サーモグラフィカメラ・熱電対とデータロガーを用いた。それぞれの特徴及び性能について以下に説明する。

電磁誘導加熱機：HITACH 家庭用 IH 調理器 HT-D60S（定格出力 3kW）を用いた。

赤外線サーモグラフィカメラ：NEC Avio のサーモショット F30 であり、放射率を 0.92 に設定した。

データロガー：東京測器研究所の TDS-303 を用いた。

4. 研究成果

図-1 は、φ10-かぶり 10 mm の供試体の鉄筋温度とコンクリート表面温度を比較するものである。加熱中はすべてのコンクリート表面温度が鉄筋温度より小さく、加熱停止後は鉄筋温度が急に低下するが、コンクリート表面温度は一旦上昇し、そして徐々に低下する。φ10 鉄筋の供試体のかぶり 10 mm と 20 mm のコンクリート表面温度の最高温度と加熱中止直後の温度の差はそれぞれ 3°C と 1.4°C 程度であり φ13 鉄筋の供試体のかぶり 10 mm と 20 mm の平均温度の差はそれぞれ

4.9°C と 2.7°C 程度であり、かぶりが大きいとコンクリート表面温度の最大温度と加熱停止直後の温度の差が小さい。

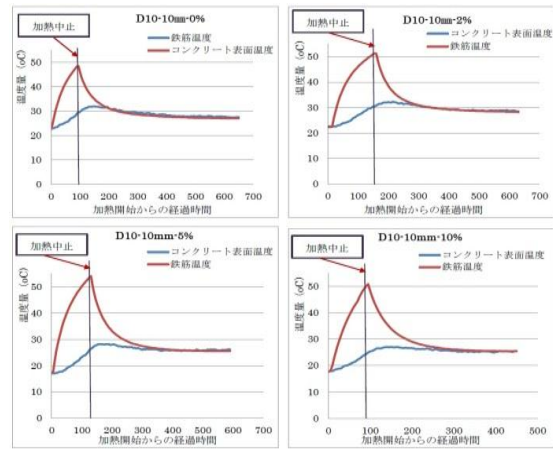


図-1 鉄筋温度とコンクリート表面温度との比較（φ10mm, かぶり 10mm）

図-2 に、同じ鉄筋径かつ腐食度で、かぶりが異なる鉄筋の温度を比較する例を示す。同じ鉄筋径かつ腐食度のかぶり 10 mm と 20 mm の各供試体の鉄筋の平均温度差は φ10 で 12.45°C であり、φ13 で 13.45°C である。同じ鉄筋径と腐食度でかぶりが大きければ大きい方が鉄筋の温度上昇が小さい。

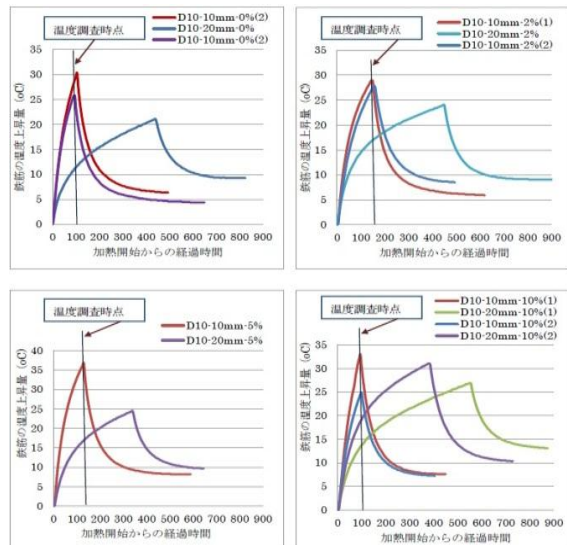


図-2 かぶりが鉄筋の温度上昇に与える影響（φ10mm, かぶり 20mm）

図-3 に φ13 鉄筋の温度上昇の例を示す。かぶり 20 mm の場合には、腐食の有る鉄筋の温度上昇は無腐食の鉄筋より高い。しかし、かぶり 10 mm の場合に、0% と 2% 腐食度の鉄筋の温度上昇の差は小さく、逆にこれらの温度上昇と 5% と 10% 腐食度の鉄筋の温度

上昇の差はかなり大きい。即ち、かぶりが小さい供試体では、腐食度が同程度の供試体の鉄筋上昇温度の差は小さく、腐食度の差が大きい供試体の鉄筋上昇温度の差は大きい。

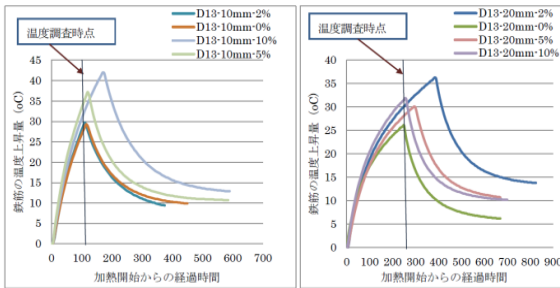


図-3 腐食度の鉄筋温度への影響 (φ13)

図-3 に腐食度とコンクリート表面温度の比較を表す。図-4 に加熱中止から最高温度に達するまでの経過時間と腐食度の関係を示す。図-4 によると、腐食度が高ければ高いほど加熱停止からコンクリート表面が最高温度に至るまでの経過時間が大きい。また図-3 には、腐食度が大きい方が、最高温度到着後のコンクリート表面の温度低下の速度が小さい。

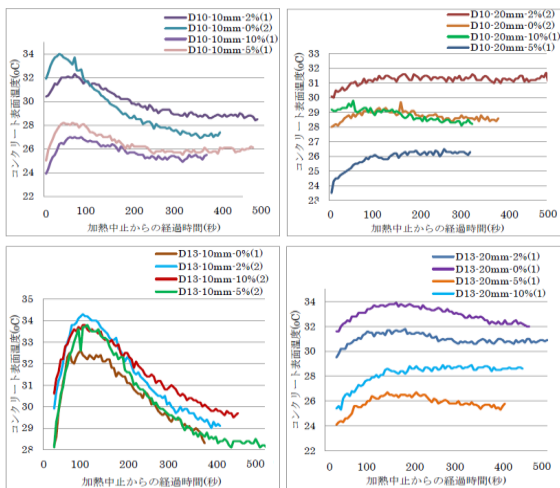


図-4 腐食度とコンクリート表面温度との比較

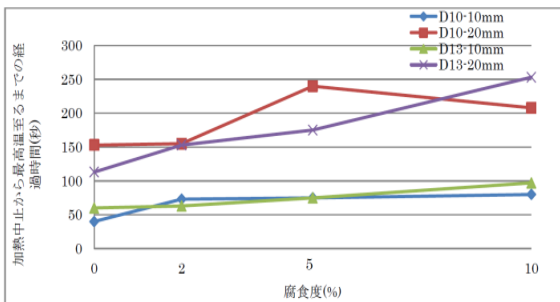


図-5 加熱中止から最高温までの経過時間と腐食度の比較

図-6 と図-7 は、それぞれ鉄筋加熱直後と加熱停止後 30 秒目のコンクリート表面温度の分布を表す。なお、加熱時間は 1 分 50 秒である。加熱停止直後には、鉄筋の防錆処理部分が腐食された部分より温度が高く、腐食度が高ければ高いほどコンクリート表面温度が低いと見られる。加熱停止 30 秒後には、腐食度が低い方が、コンクリート表面の鉄筋位置の周辺の温度が高い。

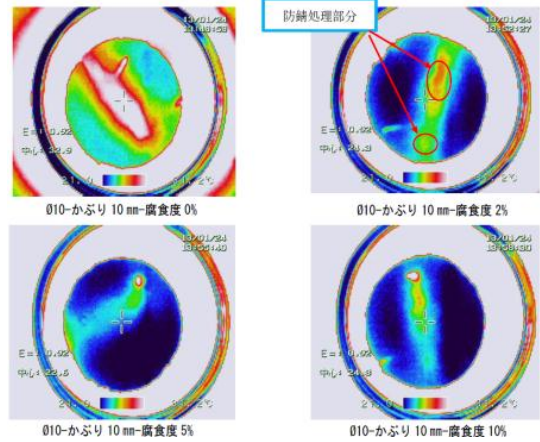


図-6 加熱停止直後のコンクリート表面温度分布

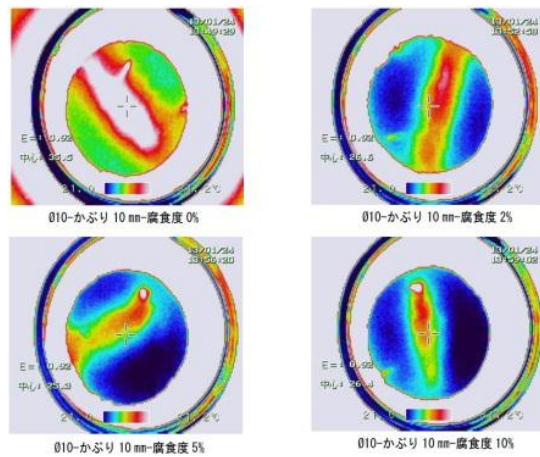


図-7 加熱停止 30 秒後のコンクリート表面温度分布

表-1、表-2 に、本解析で診断した結果の例を表す。解析で予測した結果と実測値との間には、かなり差がある。

本解析の計算結果によると、コンクリート内部を移動するエネルギーは、腐食が無い場合にほぼコンクリートと含有水分を拡散する熱であり、腐食が有る場合には、腐食生成物が熱拡散に与える影響が大きい。腐食性生物の寄与が小さいことは腐食度が低いことを表し、例えば、φ10-かぶり10mm-腐食度10%の場合、解析の結果は腐食度11.24%であ

表-1 鉄筋腐食率の解析値と実測値の比較
(かぶり 10mm, 単位: %)

鉄筋径	目標値	解析値	実験値
φ 10	0	11.26	0
	2	9.19	3.06
	5	9.66	7.83
	10	11.24	15.48
φ 13	0	12.3	0
	2	12.51	3.15
	5	12.15	4.11
	10	11.13	9.98

表-2 鉄筋腐食率の解析値と実測値の比較
(かぶり 20mm, 単位: %)

鉄筋径	目標値	解析値	実験値
φ 10	0	17.45	0
	2	14.07	3.60
	5	13.03	6.78
	10	22.34	10.24
φ 13	0	5.9	0
	2	4.89	3.35
	5	1.67	4.11
	10	2.4	12.9

り、この場合の熱移動はコンクリートと含有水分を経由する熱とほぼ等しい。この時、コンクリートとそこに含まれる水が与える熱流の最大値は約 35W/m であり、コンクリート内部の熱放射による熱流の最大値は、約 35×10^{-5} W/m であった。一方、φ 13-かぶり 10 mm-腐食度 0%の供試体でも、腐食度は 12%程度と計算されたため、この解析については前提条件の見直しを含め、改良の必要がある。

以上のように、本研究では、電磁誘導加熱と熱伝導解析を用いた新たな非破壊診断法によって、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食状況を定量的な診断することを目指した。コンクリート供試体のかぶりや鉄筋径・鉄筋腐食度の影響について評価した。更に、熱伝導解析も実施した。また、実際の鉄筋腐食状況と実際の腐食量がコンクリート表面温度に与える影響の評価も行った。本研究にて得られた成果は、以下のようになる。

- ① 加熱中において、コンクリート表面温度は鉄筋温度より低く、加熱中止後に鉄筋温度が急に低下するがコンクリート表面温度は一旦上昇し、そして徐々に低下する。
- ② かぶりが大きいとコンクリート表面の温度上昇が小さくコンクリート表面温度の最大温度と加熱中止直後の温度の差が小さい。
- ③ 鉄筋直径が大きいほど鉄筋の上昇温度と加熱停止からの温度低下が大きい。
- ④ 腐食のある鉄筋の温度上昇は、腐食のな

い鉄筋より大きい。

- ⑤ 腐食度が大きいほど加熱中止からコンクリート表面が最高温度に至るまでの経過時間が長い。また、腐食度が大きい方が、最高温度到着後のコンクリート表面の温度低下の速度が小さい。
- ⑥ 本研究の腐食診断解析はまだ信頼性が不高くないため、改良する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Koichi Kobayashi, Nemy Banthia: Corrosion Detection in Reinforced Concrete using Induction Heating and Infrared Thermography, Journal of Civil Structural Health Monitoring, Vol. 1, pp. 25-35, 2011. (査読有)
- ② 中村亮太, 中澤里, 六郷恵哲, 小林孝一: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp.1697-1702, 2011. (査読有)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Koichi Kobayashi, Ryota Nakamura, Sato Nakazawa and Keitetsu Rokugo: A quantitative assessment of steel corrosion by a new NDT method with IH, Concrete Solutions, Proceedings of concrete solutions, 4th international conference on concrete repair, pp. 369-379, Dresden, Germany, 26-28, Sep. 2011

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 孝一 (KOBAYASHI KOICHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 20283624

(3) 連携研究者

六郷 恵哲 (ROKUGO KEITETSU)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 40127155

小澤 満津雄 (OZAWA MITSUO)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号: 80313906