

論文 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

堀江 宏明^{*1}・宮口 往久^{*2}・谷口 修^{*3}・大下 英吉^{*4}

要旨：著者^{1),2),3),4)}らはコンクリート構造物中に配筋されている鉄筋を強制加熱し、コンクリート表面の温度変化を赤外線センサで測定することにより、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。本研究では、非破壊・非接触でコンクリート内部の鉄筋を加熱可能な電磁誘導で強制加熱を行い、腐食した鉄筋がコンクリート表面温度性状に及ぼす影響を把握するとともに、かぶりをパラメータとした場合の鉄筋腐食がコンクリート表面に及ぼす影響を評価し、本システムの適用性を議論した。

キーワード：非破壊検査，鉄筋腐食，強制加熱，電磁誘導

1. はじめに

著者らはコンクリート内部に存在する様々な劣化性状を同時にかつ高精度に評価可能な新たな非破壊検査システムの構築に着手している。本システムの概要は、鉄筋コンクリート構造物中に配筋されている鉄筋を強制加熱させ、コンクリート表面の温度変化を赤外線センサで測定することによって、鉄筋腐食の有無、空洞やひび割れの大きさや位置および鉄筋とコンクリート表面間に存在する打継ぎ部の付着性状を評価可能なものである。また、熱伝導解析と併用することで鉄筋腐食の有無のみならず腐食量まで評価可能であった。

既往の研究で^{1),2),3),4)}鉄筋の強制加熱手段として通電加熱を用いていたが、この方法は、実構造物では鉄筋が縦横無尽に配筋されているために、電流が迷走し想定外の箇所が発熱する問題を有していた。さらに鉄筋に通電用の電極を設置するために構造物の一部をはつる必要があり、構造物に損傷を与えるという問題点もあった。そのため、通電加熱手法を改善し、非破壊・非

接触での鉄筋加熱手法を確立することで、本システムはさらに実構造物へ適用可能とつながるわけである。

また、既往の研究では¹⁾、かぶりに対する本手法の適用限界は30mmであった。しかしながら、実構造物においてはそれ以上のかぶりを有するものも多く、その適用限界の拡張も望まれていた。すなわち、本システムを実構造物レベルに適用するためには、更なる基礎的研究の遂行が不可欠であった。

そこで本研究では、まず新しい加熱手段として非破壊・非接触でコンクリート内部の鉄筋を加熱可能な電磁誘導を用い（以下、電磁誘導加熱と称す）、本システムに対する有効性を確認し、鉄筋表面に一樣に腐食厚さが存在する鉄筋（以下、全面腐食鉄筋と称す）がコンクリート表面温度性状に及ぼす影響を把握した。さらにかぶりをパラメータとして全面腐食鉄筋がコンクリート表面温度性状に及ぼす影響を評価することによって、本システムの適用性を議論した。

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科 (非会員)

*3 五洋建設㈱ 技術研究所 主任 工修 (正会員)

*4 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

2. 電磁誘導加熱の概要

電磁誘導加熱は商用電流をインバータによって高周波電流に変換しコイルに通電することによって、コイルから発生した磁界の影響により磁性体にうず電流によるジュール熱を発生させるものである⁵⁾。非磁性体であるコンクリートは加熱されず、コンクリート内部の鉄筋のみを非破壊・非接触で加熱させることが可能な方法である。電磁誘導加熱では、コイルへの負荷電力を大きくすることによって、被加熱物に対して短時間に大きな熱量を与えることが可能である。

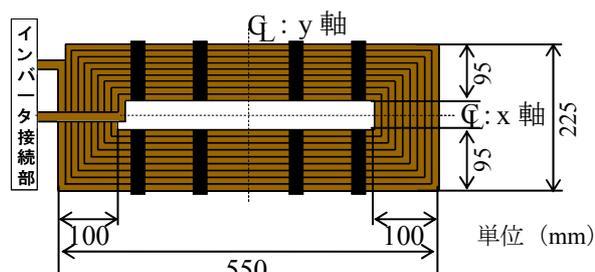


図-1 コイル概要図

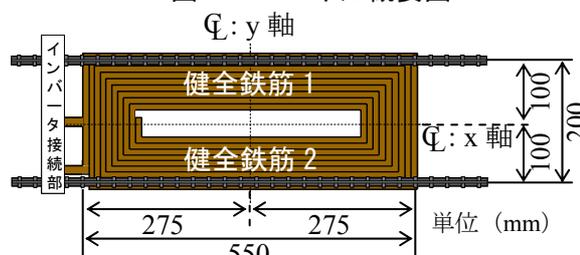


図-2 実験概要図

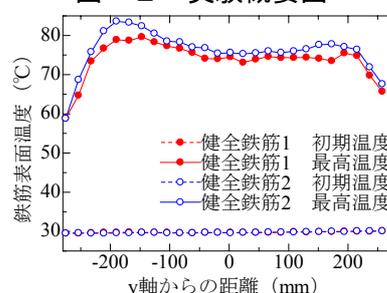


図-3 鉄筋表面温度分布

3. 電磁誘導による加熱性状

既往の研究では¹⁾ 全面腐食鉄筋がコンクリート表面温度性状に及ぼす影響を評価するために、全く腐食していない鉄筋（以下、健全鉄筋と称す）と全面腐食鉄筋を同時に通電加熱しコンクリート表面温度を比較することで行ってきた。2台の低周波型アーク式交流電源装置を用いて通電加熱していたため同じ量の電流を2本の鉄筋に通電することが可能であった。しかしながら、電磁誘導加熱では2本の鉄筋を同時にかつ均等に加熱できるかはコイルの形状や設置方法に依存すると考えられる。

そこで、本章では、電磁誘導を用いて大気中およびコンクリート内部の健全鉄筋を加熱した場合の鉄筋表面の温度分布を示し、本実験に使用するコイルの形状における鉄筋の加熱むらに対する検討を行うこととする。

3.1 大気中の鉄筋温度性状

(1) 実験方法

実験に使用するコイルは、図-1に示すように、550×225×10mmであり、寸法は左右対称である。同図に示すようにコイル水平方向中心をx軸、鉛直方向中心をy軸とする。

鉄筋の設置方法は図-2に示すようにこのコイルに対し、かぶり40mmの位置に長さ750mmの健全な鉄筋D16を2本、鉄筋中心間距離は200mmとし、両鉄筋間の中心がx軸となるように配置した。コイル負荷電力は4kW、加熱時間

は120秒とし、赤外線センサまでの距離は2000mm、室温は28.1°Cの一定条件で実施した。

(2) 鉄筋表面の温度分布

図-3に鉄筋表面の温度分布を示す。点線が初期温度、実線が最高温度時の温度分布である。同図より、コイルx軸から100mmの位置に2本の鉄筋が存在する場合、両端部近傍では加熱むらの影響があるものの、y軸から150mm程度位置まではほぼ均等に加熱可能であることが分かる。

3.2 コンクリート内部の鉄筋温度性状

(1) 実験方法

実験に使用したコンクリート供試体は図-4に示すような700×650×150mmであり、かぶり30mm、鉄筋中心間距離200mmとし、健全な鉄筋D16を2本配置した。なお、コンクリートの配合は、表-1に示す通りである。鉄筋には鉄筋中心から鉄筋軸方向にそれぞれ50mm間隔で熱電対を貼付した。

コイルに電流を負荷することによって電磁誘

導コイル自体が 30℃～40℃程度になることからコンクリート供試体の上に断熱材として厚さ 10mm の発泡スチレンボードを敷き、その上に同図に示すように図-1 に示す電磁誘導コイル中心の x 軸が両鉄筋間の中心と一致するように設置した。コイル負荷電力は 2kW, 加熱時間は 270 秒とし、鉄筋表面温度は熱電対により 5 秒間隔で測定し、室温は 26.3℃の一定条件で実施した。なお、本研究に使用した供試体は全て、打設後十分に養生し、乾燥させた後に実験に使用した。

(2) 鉄筋表面の温度分布

図-5 に熱電対による鉄筋表面の温度分布を示す。供試体中心を 0 とし、左側を負、右側を正とし、点線が初期温度、実線が最高温度時の温度分布である。同図から両鉄筋ともコイル y 軸から 150mm 以内ではほぼ均等に加熱可能であり、その領域ならば 2 本の鉄筋はほぼ同一温度となること分かった。

以上のことから、本研究に用いる電磁誘導コイルによる加熱特性は、図-1 の x 軸から 100mm の距離では、y 軸から 150mm 程度以内では均等に加熱可能であり、その領域内であれば 2 本の鉄筋の比較が可能であると言える。

4. コンクリート内部の鉄筋腐食が及ぼす

コンクリート表面温度性状

既往の研究^{1),3)}で、通電加熱終了後の腐食した鉄筋を有するコンクリート表面の温度性状は、健全鉄筋の場合のコンクリート表面温度に比べて最高温度が低く、温度低下の勾配が緩やかであると報告した。全面腐食鉄筋や健全部と腐食部が混在する鉄筋でも同様な成果が得られており、本システムにおいて鉄筋の腐食性状を定性的、定量的に評価が可能であった。

既往の研究では鉄筋加熱を通電加熱により行っていたものであることから、本研究では、電磁誘導加熱を用いた場合において全面腐食鉄筋がコンクリート表面温度性状に及ぼす影響を解明することとした。なお、全面腐食鉄筋は、気中で放置し、錆厚が 0.1mm 程度まで形成された

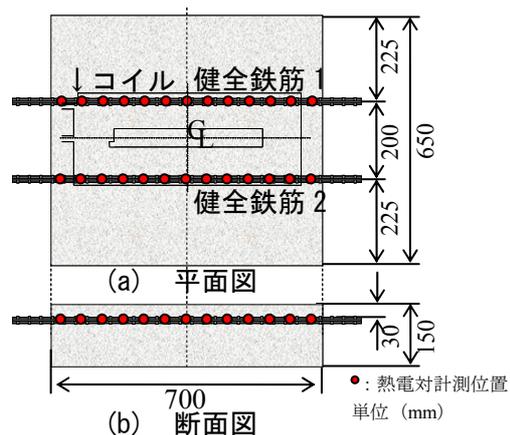


図-4 供試体概要図

表-1 コンクリート配合表

W/C(%)	単位量(kg/m ³)			
	粗骨材最大寸法(mm)	スラブ(cm)	空気量(%)	細骨材率(%)
60	20	10	5	43
	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤
162.0	270.1	850.6	995.4	2.7

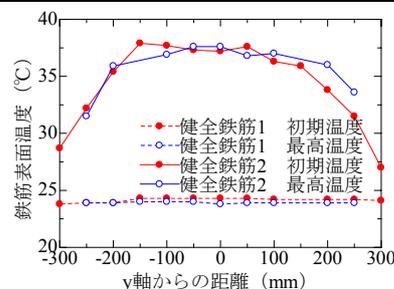


図-5 供試体中の鉄筋表面温度分布

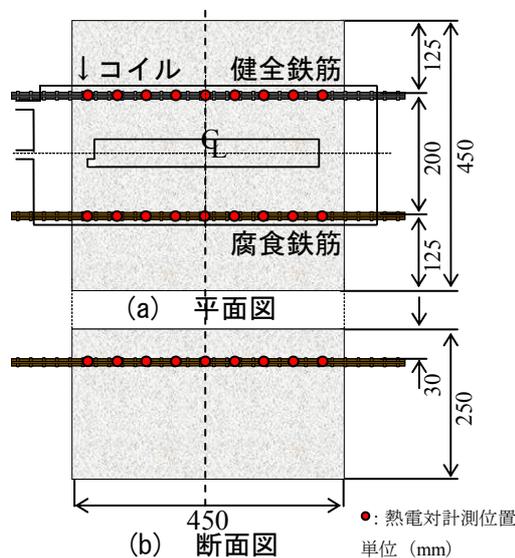


図-6 供試体概要図

鉄筋を使用した。

4.1 実験方法

本実験で用いた供試体の形状および寸法は図-6 に示すように 450×450×250mm, かぶり 30mm の位置に長さ 750mm の鉄筋 D16 を 2 本配置した。使用した鉄筋はそれぞれ健全鉄筋および全面腐食鉄筋である。なお、鉄筋中心間距離

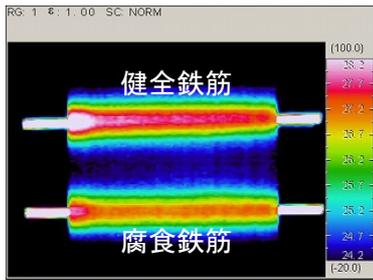


図-7 加熱停止から300秒後の熱画像

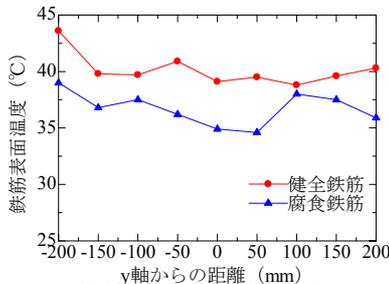


図-8 加熱停止直後の鉄筋表面温度分布

は200mmである。2本の鉄筋表面にはそれぞれ50mm間隔で熱電対を貼付し、腐食鉄筋には錆の上に貼付した。なお、コンクリートの配合は、表-1に示す通りである。

鉄筋加熱方法は、前章の実験と同様にコンクリート供試体の上に断熱材として厚さ10mmの発泡スチレンボードを敷き、その上に電磁誘導加熱コイルをコイルx軸と鉄筋間中心とが一致するように同図に示すように設置した。加熱停止条件は2本の鉄筋の温度のうち、加熱温度上昇量が約20°Cとなった時点zとした。コイル負荷電力は2kW、加熱時間は315秒であった。

コンクリート表面温度の計測は、赤外線センサを使用し、初期温度を計測後、加熱が終了し電磁誘導加熱コイル撤去直後から5秒間隔で90分間測定し、熱電対により鉄筋の表面温度も5秒間隔で同時に測定した。なお、コンクリート供試体から赤外線センサまでの距離は2500mm、室温は23.7°Cの一定条件で実施した。

4.2 コンクリート表面の温度性状

図-7に加熱停止から300秒後の熱画像を示す。この熱画像から、健全鉄筋直上のコンクリート表面温度の方が高くなっていることが明確に確認できる。

図-8に熱電対による加熱停止直後の鉄筋表面温度分布を示す。中心部では健全鉄筋表面温

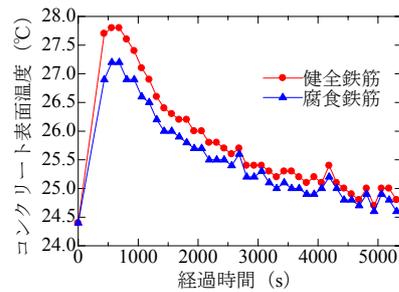


図-9 コンクリート表面の経時温度変化

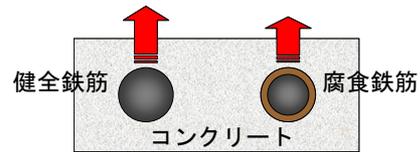


図-10 鉄筋腐食の有無による熱伝導

度に比べ腐食鉄筋表面温度の方が4.2°C低くなっていることが分かる。また、図-9に供試体中心部におけるコンクリート表面の経時温度変化を示すが、最高温度が健全鉄筋直上のコンクリート表面温度よりも腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度の方が約0.7°C低くなっており、温度低下の勾配が緩やかになっている。これは腐食領域の熱的特性が空気と同様の高い比熱、低い熱伝導率を持つことから、供給した熱が逃げ難く保温効果があると考えられる。そのため図-10に示すように腐食領域内部の鉄筋の熱が腐食領域に伝わりにくいために2本の鉄筋に同量の熱量を与えても健全鉄筋直上のコンクリート表面温度よりも腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度の方が低くなったと考えられる。

5. かぶりコンクリート

表面温度性状に及ぼす影響

前述したように既往の研究ではかぶりが30mmの腐食鉄筋評価までが適用限界であった。そこで本章では、加熱手段の発展に伴い適用範囲の拡張を目指し、かぶり50mm、70mmにおける腐食鉄筋のコンクリート表面温度に及ぼす影響を評価した。

5.1 実験方法

本実験で用いた供試体の形状および寸法は図-11に示すように450×450×250mm、a面はかぶり50mmおよびb面はかぶり70mmとし、長さ

表-2 実験条件

かぶり(mm)	コイル負荷電力(kW)	加熱時間(s)	外気温(°C)
50	4	1030	21.6
70	6	780	21.7

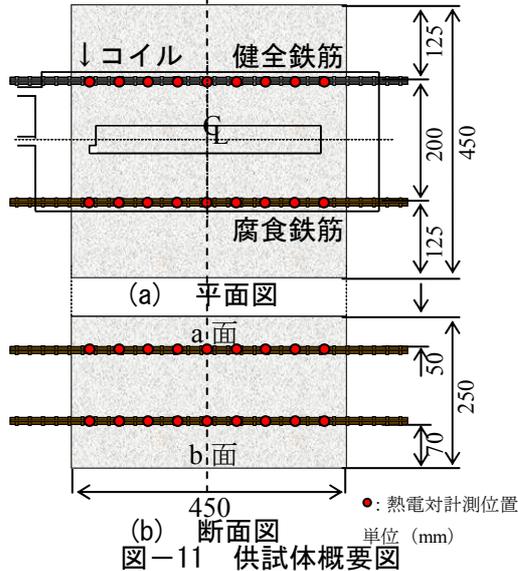


図-11 供試体概要図

750mm の鉄筋 D16 を 2 本ずつ計 4 本配置した。使用した鉄筋は、a 面、b 面それぞれに健全鉄筋および全面腐食鉄筋を 1 本ずつ配置した。鉄筋中心間距離はそれぞれ 200mm とした。

4 本の鉄筋表面には 50mm 間隔で熱電対を貼付した。なお、コンクリートの配合は、前述の実験と同様の配合とし表-1 に示す通りである。

加熱方法および計測方法は、4.1 節に示した方法と同様であるが、かぶり 70mm の場合には、かぶり 50mm と同様の加熱温度とするため、負荷電力を大きくする必要があり、コイルからの熱がコンクリート表面に伝わってしまうおそれがあった。そこで断熱材に厚さ 20mm の発泡スチレンボードを使用することとした。

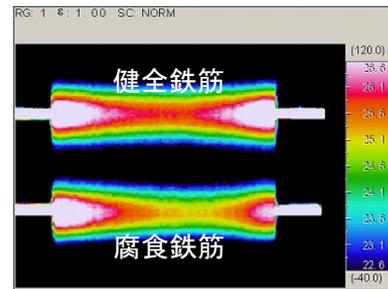
加熱停止条件はかぶりが前章の実験に比べ大きいことから 2 本の鉄筋の温度のうち、最高温度上昇量が約 30°C となった時点で加熱停止とすることとした。負荷電力、加熱時間、および外気温は表-2 に示すような条件で実験を行った。なお、計測時間は加熱停止から 120 分とした。

5.2 コンクリート表面の温度性状

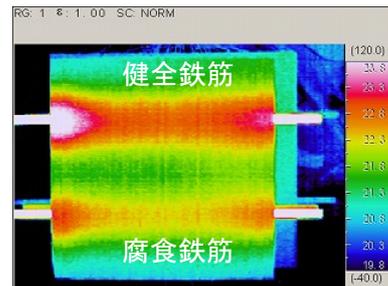
健全および腐食鉄筋の長手方向の中心位置における初期温度、加熱停止時の表面温度を表-3 に示す。また、図-12 にそれぞれ加熱停止から 600 秒後の熱画像を示す。この熱画像から、

表-3 鉄筋表面温度

かぶり(mm)	健全鉄筋		腐食鉄筋	
	初期温度(°C)	加熱停止直後(°C)	初期温度(°C)	加熱停止直後(°C)
50	25.1	40.3	24.6	37.1
70	21.9	37.8	21.8	33.5



(a) かぶり 50mm の場合



(b) かぶり 70mm の場合

図-12 加熱停止から 600 秒後の熱画像

健全鉄筋直上のコンクリート表面温度の方が高くなっていることが明確に確認できる。しかしながら、同図(a)では腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度は中心部近傍でむらのある温度分布となっている。これはコイルが供試体の右より設置されてしまったためだと考えられる。温度むらはコンクリート内部における鉄筋の温度でも確認でき、健全鉄筋よりも腐食鉄筋の方がかぶり 50mm の場合は 3.2°C、かぶり 70mm の場合は 4.3°C 低くなっており、かぶり 50mm の場合における鉄筋の温度差はかぶり 30mm および 70mm の場合の温度差よりも小さくなった。また、図-13 に供試体中心部におけるコンクリート表面の経時温度変化を示すが、このグラフから分かるように最高温度が健全鉄筋直上のコンクリート表面温度よりも腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度の方が約 0.7°C 低くなっており、温度低下の勾配が緩やかになっている。この結果は前章に示した温度特性と一致している。

また、今回は記載していないが、かぶり 50mm の場合において、コイル負荷電力を大きくすると短時間に大きな熱量を与えることが可能であ

ることから、コイル負荷電力を大きくし加熱時間を短縮した場合には、コンクリート表面の温度差は 0.7°C よりも小さくなった。また、逆にコイル負荷電力を小さくした場合には鉄筋は温度がほぼ上昇しなかった。これはかぶり 70mm でも同様の傾向であった。このことから、鉄筋を早く加熱した場合には健全鉄筋と腐食鉄筋の温度差は小さくなり、逆に時間をかけて加熱するとその差は大きくなるということが分かった。

以上のことから、かぶりが大きくなるほど加熱時間を延ばすことやコイル負荷電力を上げ、鉄筋に十分な熱量を与えることによって本システムにおける鉄筋腐食性状の評価はかぶり 70mm までの構造物に対して適用可能であることが分かった。

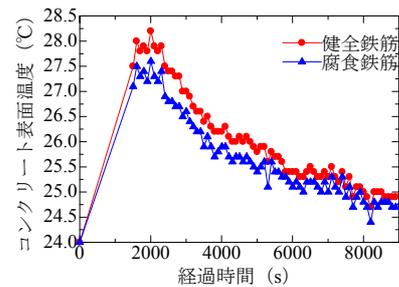
また、鉄筋腐食の有無の絶対評価は、まず、鉄筋が健全な状態にあるという仮定のもとで、熱伝導解析を行い、実測結果と解析結果に対してコンクリート表面温度の比較を行う。両者がほぼ同じ値であれば、その箇所の鉄筋は健全であるが、異なる場合には腐食を生じていることとなる。そして、後者の領域に関して、逆解析手法により腐食厚の同定を解析的に実施するわけであるが、これに関しては今後の課題となる。

6. まとめ

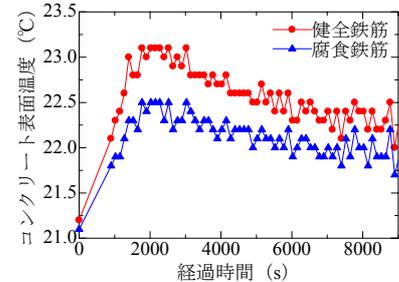
本研究では、新たな鉄筋強制加熱手段である電磁誘導加熱を考案しその適用性を評価した。さらに、かぶりをパラメータとした場合における全面腐食鉄筋がコンクリート表面温度性状に及ぼす影響を把握することによって、本システムの適用性を評価した。

以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 電磁誘導加熱により非破壊・非接触でコンクリート内部の鉄筋を加熱することが可能であることが分かった。
- (2) 鉄筋を電磁誘導加熱した場合、腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度は健全鉄筋直上のコンクリート表面温度よりも低く、下がり勾配は緩やかになる。



(a) かぶり 50mm の場合



(b) かぶり 70mm の場合

図-13 コンクリート表面の経時温度

- (3) 本システムを腐食した鉄筋を有するコンクリート部材に適用した際、かぶりは 70mm までは適用可能である。

参考文献

- 1) 茂木淳, 長坂慎吾, 谷口修, 大下英吉: 鉄筋強制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非破壊検査手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1989 - 1994, 2004
- 2) 白木悠祐, 長坂慎吾, 谷口修, 大下英吉: 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいたコンクリート内部の空洞・ひび割れ非破壊検査手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1393 - 1398, 2004
- 3) 白木悠祐, 堀江宏明, 谷口修, 大下英吉: 熱画像処理を用いた非破壊検査手法による部分的な鉄筋腐食評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1741 - 1746, 2005
- 4) 高沢健二郎, 白木悠祐, 谷口修, 大下英吉: 鉄筋強制加熱による熱画像処理に基づいた補修効果の確認手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1849 - 1854, 2005
- 5) 中村宏, 柴田眞喜夫: 実務に役立つ電気磁気, pp120, 株式会社オーム社, 1996