

論文 鉄筋の実応力測定におけるEMセンサーの適用性

青木 優介^{*1}・黒川 章二^{*2}・羅 黄順^{*3}・嶋野 慶次^{*4}

要旨 : EM(Elasto-Magnetic)センサーとは、磁性材料の透磁率が温度と応力により変化する性質を利用して開発された鉄筋の実応力測定センサーである。本研究では、EMセンサーの実構造物への適用に際する基礎的知見を得ることを目的に、1本の鉄筋から求めた応力算出式その他鉄筋への適用性、センサーの設置条件が測定に及ぼす影響、センシングにより磁化した鉄筋の性質、について実験的に検討した。その結果、製造年代や工場、規格が異なる鉄筋に対する応力算出式の適用性を示した。また、設置条件や周辺環境は測定にほとんど影響を及ぼさないこと、磁化後の鉄筋の力学的特性や耐腐食性は変化しないことを明らかにした。

キーワード : EMセンサー, 実応力測定, PC鋼棒, 透磁率, 腐食

1. はじめに

EM(Elasto-Magnetic)センサーとは、磁性材料の透磁率が温度と応力により変化する性質を利用して開発された鉄筋の実応力測定センサーである¹⁾。その測定原理は、測定対象となる鉄筋の透磁率-温度-応力の三者関係をあらかじめ求めておき、現場において鉄筋の透磁率と温度をセンサーにより測定することで、鉄筋に導入されている実応力を算出するというものである。

現在までに、PC鋼材単線・より線および異形鉄筋における応力の測定実験が行われており、いずれもロードセルと遜色ない精度で応力を測定できると報告されている²⁾³⁾。加えて、設置点が自由、応力伝達系に影響しないなどの利点を有しており、構造物の健全度を継続的に管理できるセンサーとして汎用が期待されている。

本研究では、EMセンサーの実構造物への適用に際する基礎的知見を得ることを目的に、一本の鉄筋から求めた応力算出式その他鉄筋への適用性、センサーの設置条件が測定に及ぼす影響、センシングにより磁化した鉄筋の性質、について実験的に検討した。

2. EMセンサーの概要

本研究で用いたEMセンサーの断面図を図-1に示す。センサーは、鉄筋の透磁率と温度を測定するものである。センサー中の一次コイルに変動電流を流すと、鉄筋の磁束密度に変化が生じて、二次コイルに誘導電圧が発生する。この誘導電圧から鉄筋の透磁率が求められる。鉄筋の温度は温度センサーにより測定される。

3. キャリブレーション

3.1 主旨

検討に入る前に、今回の実験で用いる鉄筋の応力算出式、すなわち、透磁率-温度-応力の三者関係をあらかじめ求めておく必要がある。

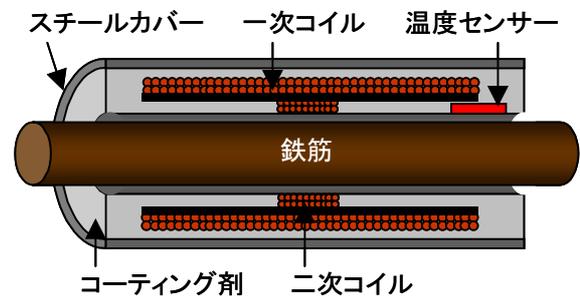


図-1 EMセンサーの断面

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科助手 工博 (正会員)

*2 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科教授 工修 (正会員)

*3 (株)計測リサーチコンサルタント 管理部企画開発室 工博 (正会員)

*4 木更津工業高等専門学校 第二技術班 (正会員)

著者らは、この作業をキャリブレーション、求められる三者関係をキャリブレーション関数と称している。

3.2 キャリブレーション関数の関数形

本研究では、鉄筋の透磁率に対する温度と応力の影響を表現するため、式(1)の関数形をキャリブレーション関数として用いることとした²⁾。

$$\mu(\sigma, T) = \mu(0, 0) + \alpha T + m_1 \sigma^2 + m_2 \sigma \quad (1)$$

ここで、 $\mu(\sigma, T)$: 応力 σ (kN/mm²)、温度 T (°C) の鉄筋における透磁率、 $\mu(0, 0)$: 応力 0、温度 0°C の鉄筋における透磁率、 α : 無応力下の透磁率-温度関係から求められる実験定数、 m_1, m_2 : 一定温度下における透磁率-応力関係から求められる実験定数、である。右辺第 2 項が温度の影響、第 3, 4 項が応力の影響を表現している。このうち、透磁率 $\mu(\sigma, T)$ と温度 T は実測時にセンサーにより測定するので、キャリブレーションにおいて透磁率 $\mu(0, 0)$ 、実験定数 α および m_1, m_2 を決定しておけば、応力の算出が可能となる。

3.3 キャリブレーション関数の決定

(1) キャリブレーション試験

今回対象とした鉄筋は、 $\phi 15\text{mm}$ の PC 鋼棒 (1989 年, N 社 I 工場製造, C 種) である。EM センサーと鋼棒の組みを写真-1(a)に示す。

キャリブレーションの状況を写真-1(b)(c)に示す。鋼棒の長さは 1500mm であり、両端 250mm を載荷試験機とのフック長としている。中央部に EM センサーを取り付け、その箇所の透磁率と温度を測定する。鋼棒を囲む炉内では、-20°C ~ 60°C までの温度を一定にできる。

(2) 透磁率 $\mu(0, 0)$ と実験定数 α の決定

無応力下における鋼棒の透磁率-温度関係を図-2に示す。温度の変化幅は、実環境下を想定して -20°C ~ 40°C としている。

温度の上昇にともない透磁率が一定の割合で低下している。実測値を式(1)により近似することにより、 $\mu(0, 0) = 1.753$, $\alpha = -0.002$ と決定した。

(3) 実験定数 m_1, m_2 の決定

-20°C ~ 40°C まで 4 水準の温度条件下における

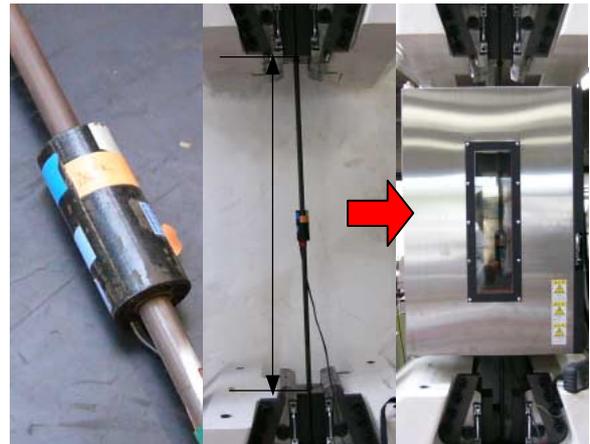


写真-1 キャリブレーションの様子

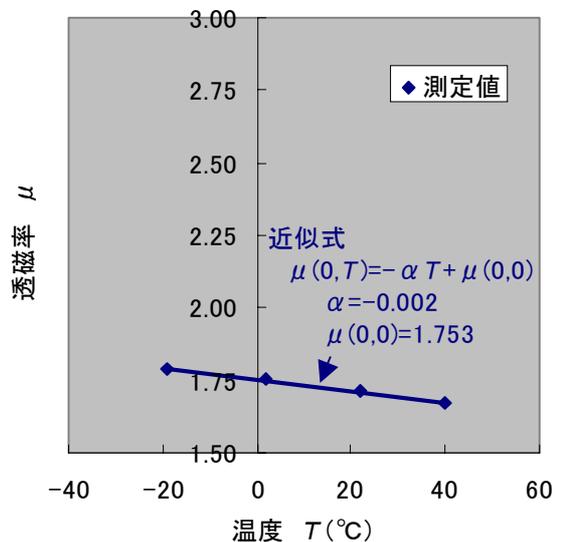


図-2 無応力下における鋼棒の透磁率-温度関係

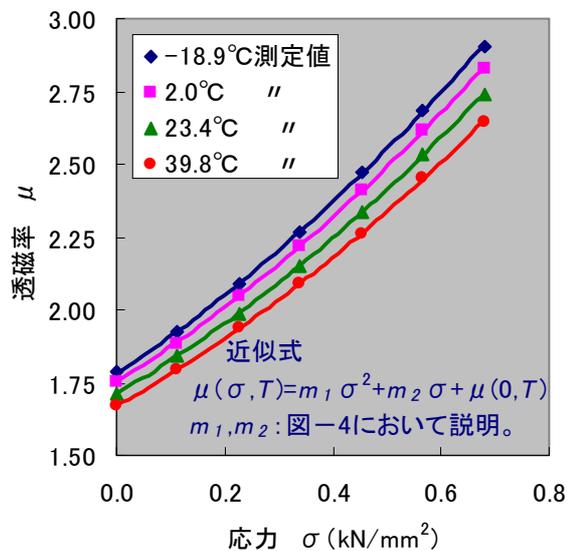


図-3 一定温度下における鋼棒の透磁率-応力関係

鋼棒の透磁率－応力関係を図-3に示す。応力の変化幅は、対象とした PC 鋼棒の引張強さの約 60%に相当する 0.68kN/mm^2 までとしている。

いずれの温度水準においても、応力の増大にともない透磁率が增大している。増大割合は一定ではなく、応力が大きくなるほどに透磁率の増大割合が大きくなっている。

温度水準別にみると、応力の増大にともなう透磁率の増大割合がそれぞれの温度で異なっている。このことは、鋼棒の透磁率に及ぼす温度と応力の影響が互いに独立ではなく、両者に複合効果があることを意味している。より高精度な応力算出のためには、この複合効果も表現できるキャリブレーション関数としなければならない。ここでは、応力の影響項にかかる実験定数 m_1, m_2 を式(2)に示すように温度 T の関数とすることで、複合効果を表現することにした。

$$\begin{aligned} m_1 &= aT + b \\ m_2 &= cT + d \end{aligned} \quad (2)$$

係数 a, b, c, d は、図-4に示す m_1, m_2 －温度関係より求められる。それぞれ、 $a = -0.001$ 、 $b = 0.640$ 、 $c = -0.003$ 、 $d = 1.144$ と決定した。

(4) キャリブレーション関数の精度

キャリブレーション関数の精度を検証するために、キャリブレーションを行った鋼棒を用いて応力測定実験を行った。実験の状況は、写真-1(b)と同様である。-20℃～40℃まで 4 水準の温度条件のもと、0～120kN まで引張载荷を行い、途中 20kN ごとに载荷試験機の荷重から求められる応力と EM センサーにより測定される応力（厳密には、EM センサーにより測定された鋼棒の透磁率と温度をキャリブレーション関数に代入して算出された応力）を比較した。

試験結果を図-5に示す。いずれの温度条件下においても、EM センサーで測定される応力は、载荷試験機で測定される応力とほぼ一致している。今回求めたキャリブレーション関数は、当該鋼棒用の応力算出式として十分な精度を有しているといえる。

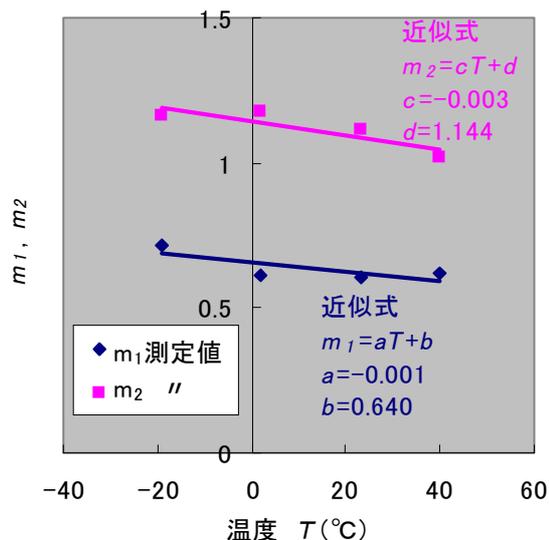


図-4 実験定数 m_1, m_2 －温度関係

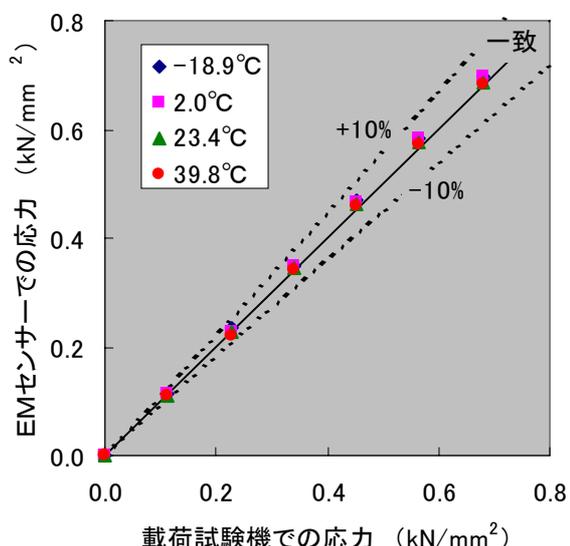


図-5 キャリブレーション関数の精度検証のための応力測定試験結果

4. キャリブレーション関数の他鉄筋への適用性

4.1 主旨

現段階では、キャリブレーション作業にかなりの手間がかかる。また、既設構造物中の鉄筋の実応力を測定する場合、キャリブレーション用として対象鉄筋の一部を切り出す必要がある。仮に、同径の鉄筋であれば、製造条件や規格が異なっても同じキャリブレーション関数により応力が算出できるとなれば、以後のキャリブレーションの必要はなくなり、問題が解消する。

ここでは、前章と同径ではあるが、製造年代、製造工場、規格が異なる鉄筋について応力測定

試験を行い、それらの応力を前章で求めたキャリブレーション関数により正確に算出できるかどうかを確かめることで、キャリブレーション関数の他鉄筋への適用性を検討することとした。

4.2 対象とした鉄筋

対象とした鉄筋を表-1に示す。いずれも前章でキャリブレーションを行ったφ15mmPC鋼棒と同径である。各鋼棒の試験本数は3本としたが、3本ともほとんど同じ試験結果となったため、以降のグラフには1本のみ結果を載せている。

4.3 応力測定試験の結果

各鋼棒における応力測定試験の結果を図-6に示す。なお、応力測定試験は1本の鋼棒について3回繰り返しており、図-6はそのうちの2,3回目の測定値を平均したものである。1回目の測定値を除外した理由は次節に述べる。

キャリブレーションを行った鋼棒と同ロットとなる1989-I-Cの鋼棒については、EMセンサーにより測定される応力と载荷試験機により測定される応力がほぼ一致している。このことから、同ロットの鉄筋の場合、そのうちの1本から求めたキャリブレーション関数が、他の鉄筋に対しても完全に適用できるといえる。

キャリブレーションを行った鋼棒と製造年代が異なる2003-I-Cの鋼棒については、EMセンサーにより測定される応力が一律9%程度小さくなった。これと工場が異なる2003-A-Cの鋼棒、規格が異なる2003-I-Bの鋼棒についても同じ結果となった。このことから、製造年代が異なる鉄筋の場合、ある1本の鉄筋から求めたキャリブレーション関数により応力を算出すると、いくらかの誤差が生じる可能性があるといえる。一方、製造年代さえ同じであれば、工場の違い、規格の違いにかかわらず、ある1本の鉄筋から求めたキャリブレーション関数が、他の鉄筋に対しても適用できる可能性があるといえる。

これらの結果の汎用性を高めるためには、より多くの鉄筋について試験を行うと同時に、鉄筋の組成とキャリブレーション関数との関係の調査を行うことが必要であろう。

表-1 対象としたPC鋼棒

製造年代	製造工場	規格	呼称
1989年	I工場	C種	1989-I-C
2003年	I工場	C種	2003-I-C
	A工場	C種	2003-A-C
	I工場	B種	2003-I-B

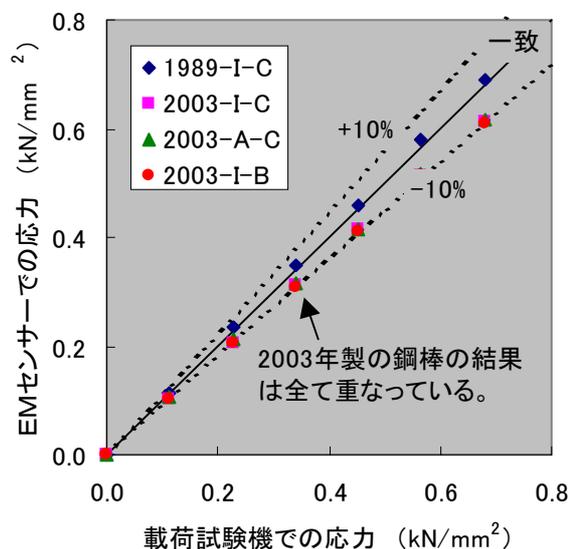


図-6 各鋼棒における応力測定試験結果

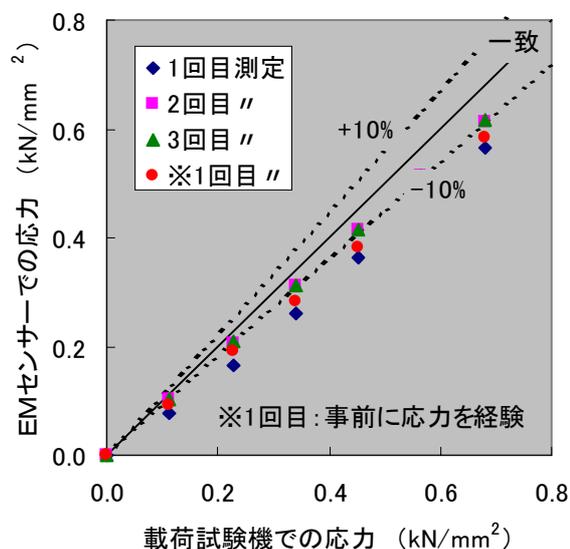


図-7 応力測定試験1,2,3回目の結果

4.4 処女鉄筋における測定の注意

図-7は、2003-I-Cの鋼棒1本における1,2,3回目の応力測定結果である。1回目の測定値に特に大きな誤差が生じている。これは、2,3回目測定時の鋼棒が1回目の測定により荷重と磁化を経験しているのに対し、1回目測定時の鋼棒はどちらも経験していないことが原因だと考えた。

図中の「※1回目測定」は、事前に 0.68kN/mm^2 の応力を経験させた同種鋼棒の1回目の測定値である。応力を経験していない場合よりも、誤差が小さくなっていることがわかる。磁化の影響については今後の検討課題である。

5. センサーの設置条件が測定に及ぼす影響

5.1 主旨

EM センサーを実構造物に適用する前提として、センサーの設置状況や周辺環境が測定に及ぼす影響を把握しておく必要がある。ここでは、キャリブレーションに用いた鋼棒と同ロットの鋼棒を用いて、鉄筋の長さ、センサーの設置位置、周辺磁界、周辺水分を変化させた応力測定試験を行い、それら条件の変化が測定に及ぼす影響について検討した。

5.2 変化させた試験条件

応力測定試験の条件を表-2にまとめる。なお、各ケースともに表に記した変化以外は全て基準条件と同じである。応力測定試験の方法および測定結果の扱いは前章に準じている。

5.3 検討結果

各条件下における応力測定試験の結果を図-8に示す。全ての測定結果に差は見られない。今回程度の条件変化では、EMセンサーの測定にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

6. EMセンサーにより磁化した鉄筋の性質

6.1 主旨

EMセンサーによるセンシングを一度でも経験した鉄筋は磁化する。磁化は、EMセンサーの設置位置を境に土が逆転し、 1500mm のPC鋼棒の場合、端部付近で $\pm 4.5\text{mT}$ 程度となる。

EMセンサーを実構造物に適用する前提として、鉄筋が磁化することによりその力学的特性および耐腐食性が変化するかどうかを確認しておく必要がある。ここでは、EMセンサーにより磁化させた鋼棒と通常の鋼棒を用いて引張試験および腐食試験を行い、両者の試験結果を比較することで変化の有無を確認することとした。

表-2 試験条件

基準条件	鋼棒の長さは 1500mm 、センサーは鋼棒中央に設置、周辺磁界・水分なし。
鉄筋長さ	鋼棒の長さを 1000mm とする。
設置位置	鋼棒中央より 250mm 下げてセンサーを設置する。
周辺磁界	センサーの 20cm 横に強力磁石を置く。
周辺水分	センサー部に水を噴霧し続ける。

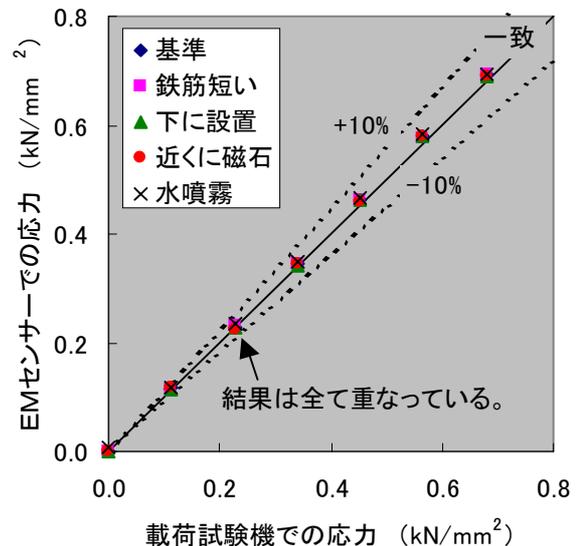


図-8 各条件下における応力測定試験結果



写真-2 腐食試験の様子

6.2 引張試験および腐食試験の方法

引張試験には表-1に示す2003-I-CのPC鋼棒を用いた。同ロットの中から2本を選択し、そのうち1本をEMセンサーにより磁化させた。荷重は載荷試験機により測定し、ひずみは鋼棒中央に貼り付けたひずみゲージにより測定した。

腐食試験も同じく2003-I-CのPC鋼棒を用いた。長さ 250mm に切断した鋼棒を6本作成し、そのうち3本をEMセンサーにより磁化させた。6本とも 1.0% の塩水に浸漬した後、恒温恒湿室(温度 20°C 、湿度 50%)の湿度調整装置の前に並べて腐食を促した(写真-2)。4ヵ月後、腐食状況を目視により比較した。

6.3 引張試験および腐食試験の結果

磁化有り，磁化無しとした PC 鋼棒の引張試験結果を図-9 に示す。両者は全く一致することから，EM センサによる磁化では，鉄筋の力学的特性は変化しないといえる。

腐食試験開始から 4 ヶ月後の鋼棒の腐食状態を写真-3 に示す。磁化有り，磁化無しとした PC 鋼棒の腐食状況に明確な差は表れていない。EM センサによる磁化では，鉄筋の耐腐食性も変化しないといえる。

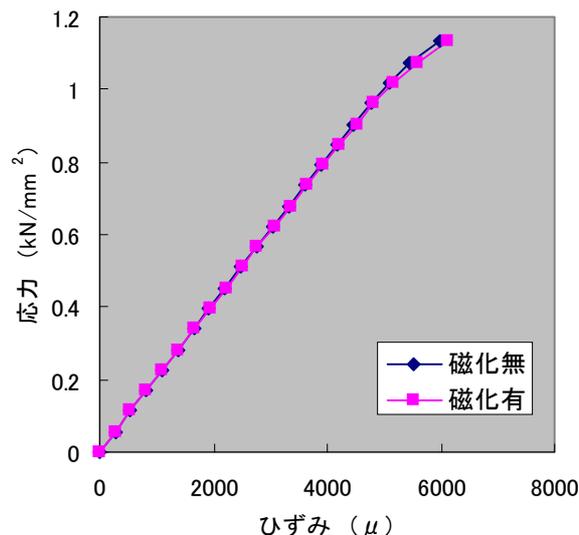


図-9 磁化有，磁化無鋼棒の引張試験結果

7. まとめ

本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 鉄筋の透磁率に対する温度と応力の影響には複合効果が認められる。本研究で使用したキャリブレーション関数は，この複合効果を表現できる形とした。
- (2) キャリブレーション関数の他鉄筋への適用性について，
 - a) 同ロットの鉄筋の場合，そのうちの 1 本から求めたキャリブレーション関数が，他の鉄筋に対しても完全に適用できる。
 - b) 製造年代が異なる鉄筋の場合，ある 1 本の鉄筋から求めたキャリブレーション関数により応力を算出すると，いくらかの誤差が生じる可能性がある。
 - c) 製造年代さえ同じであれば，工場の違い，規格の違いにかかわらず，ある 1 本の鉄筋から求めたキャリブレーション関数が，他の鉄筋に対しても適用できる可能性がある。これらについては，より多くの鉄筋について試験を行うと同時に，鉄筋の組成との関係を調べる必要がある。
 - d) 荷重および磁化を経験していない処女鉄筋での応力測定には注意を要する。
- (3) センサーを設置する鉄筋の長さ，設置位置，周辺磁界，周辺水分が変化しても，EM センサーの測定は影響を受けない。
- (4) EM センサーによる磁化では，鉄筋の力学的特性および耐腐食性は変化しない。



写真-3 磁化有，磁化無鋼棒の腐食試験結果

謝辞

本実験に際し，木更津高専環境都市工学科の松崎裕亮君には多大なご助力を頂きました。ここに記し，深く感謝致します。

参考文献

- 1) Chen,Z.L. et al : A new magneto-elastic stress/corrosion sensor forcable-stayed bridge using measurement of anhysteretic curve, 2nd Workshop on ATUEDM, Kyoto, July.2000
- 2) 黒川章二ほか：EM センサを用いた PC 梁張材の引張力モニタリング実験，土木学会応用力学論文集，Vol.5, pp.817-826, 2002.9
- 3) 眞岸 徹ほか：EM(Elasto-Magnetic)センサーによる鉄筋現有応力測定技術の開発（その 1），土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部，Vol.57, pp.435-436, 2002.9