

論文 コンクリート中の鉄筋腐食過程の AE 法による解明

古川 智洋^{*1}・友田 祐一^{*2}・大津 政康^{*3}・木嶋 政智^{*4}

要旨：塩害は鉄筋コンクリート内部の鉄筋腐食を引き起こし、構造物自体の機能低下に至る現象であり、社会的に大きな問題となっている。そのため、構造物内部の鉄筋腐食を早期に発見する非破壊検査法の確立が重要視されている。本研究では、鉄筋コンクリート構造物の塩害による鉄筋腐食の発錆時期を正確に評価するために、浸漬乾燥繰り返し実験を行った。実験中に、連続的に AE 計測を行い、塩分浸透試験も実施した。AE 発生挙動とその発生位置、塩分浸透量を比較検討した。その結果、鉄筋腐食の劣化進行過程において、腐食開始時期とコンクリートひび割れ発生時期を明確に検出できる可能性が明らかとなった。

キーワード：塩分浸透，鉄筋腐食，アコースティック・エミッション

1. はじめに

近年、我が国では塩害によるコンクリート構造物の被害が深刻化している。塩害は鉄筋腐食を伴うものだが、構造物の外観からその腐食状況を判別することは困難であり、ひび割れや錆汁などの顕著な腐食が見られるようになってから判明することがほとんどである。そのため、コンクリート中の鉄筋腐食過程を定量的に予測できる非破壊検査法の確立が重要な課題となっている。最近制定された土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」¹⁾によれば、塩害による鉄筋腐食の劣化進行過程を図-1のようにまとめている。図-1より、塩害の進行状況を把握するには、鋼材の腐食開始時期と腐食ひび割れ発生時期の精度の高い予測が必要となる。

現在のところ非破壊検査法による鉄筋腐食の評価では、自然電位法が主体となっている²⁾。しかし、自然電位法はコンクリート表面での電気的評価にすぎず、測定値はコンクリートの環境条件にかなり影響を受けることが報告されている²⁾。そこで、非破壊検査のモニタリング技法として、アコースティック・エミッション

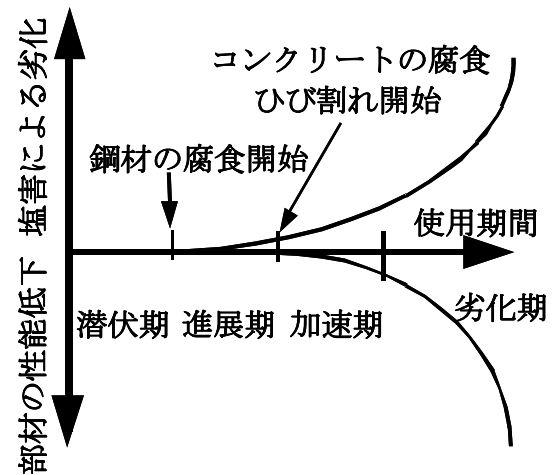


図-1 塩害による劣化進行過程

(AE) 法を適用した。従来の研究³⁾によれば、AE 法を用いることにより、鉄筋腐食の進展に伴い活発に AE 現象が検出されることが知られている。また、AE 計測は自然電位法よりも早く鉄筋腐食を評価できる可能性も示唆されている。

本研究では浸漬乾燥実験中に AE 法による計測を行った。そして、AE 発生挙動と塩分浸透状況を比較することにより、鉄筋腐食の進行過程を AE 監視から定量的にモニタリングする可能性を検討した。

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻 (正会員)

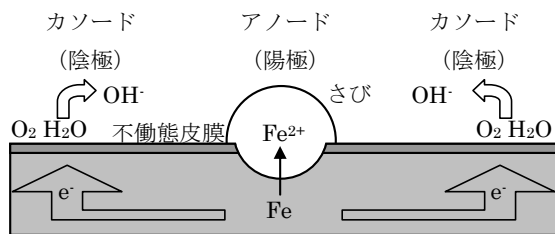
*2 熊本大学 工学部技術部 (正会員)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

*4 熊本大学 工学部環境システム工学科

2. 鉄筋の電気化学的腐食機構⁴⁾

塩害では鋼材表面の不動態皮膜が塩化物イオンにより破壊されることで腐食が開始する。



アノード反応： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

カソード反応： $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$

図-2 鋼材の腐食反応模式図

腐食反応は図-2 に示すように鋼材表面から鉄イオン (Fe^{2+}) が細孔溶液中に溶け出すアノード反応と鉄イオンが鋼材中に残した電子 (2e^-) が酸素と水と反応するカソード反応に分けて考えられている。鋼材の腐食はこれらが同時に起きることにより進行するものであり、A) アノード反応により溶け出した (Fe^{2+}) がカソード反応により生成した OH^- と反応することにより水酸化第二鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) を生成する。B) これが腐食生成物となる。AE 計測では、この A), B) の 2 つの反応時の発生を対象としている。

3. AE パラメータ解析

3.1 RA 値と平均周波数

AE パラメータ解析は、AE の発生数や図-3 に示す AE 波形の形状の特性値により、AE 源の発生条件などの特徴が把握できる。例えば、コンクリートひび割れが生じた場合における種類により、引張破壊とせん断破壊では、AE の立ち上がり時間及び周波数分布に違いが生じる。そこで、立ち上がり時間は、しきい値の設定に影響されることを考慮し、最大振幅値により立ち上がり時間を除した RA 値(立ち上がり時間/最大振幅値)を用いて評価した。さらに、周波数分布の

相違を考慮し、AE の周波数特性値として解析に用いられている継続時間によりカウント数を除した平均周波数(カウント数/継続時間)を採用した。このとき、ひび割れの識別⁵⁾は図-4 のように 2 つのパラメータにより引張型とせん断型に分類できる。

なお、今回の実験では、浸漬時と乾燥時でこれらのパラメータに変動が生じるため、14 日間毎に平均して評価を行った。

3.2 b 値

地震学では Gutenberg-Richter が、地震の規模(マグニチュード)を震央から 100km の箇所に設置された標準地震計が記録した紙上の、地震の

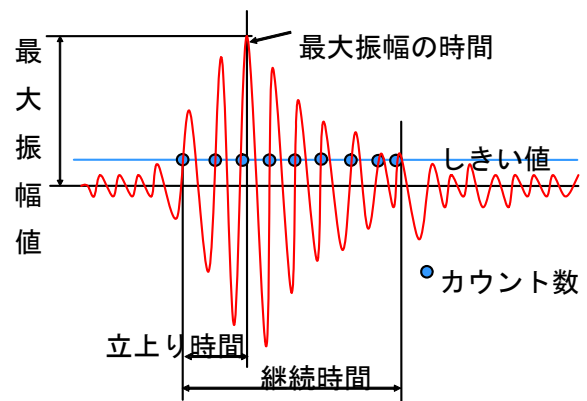


図-3 AE パラメータ

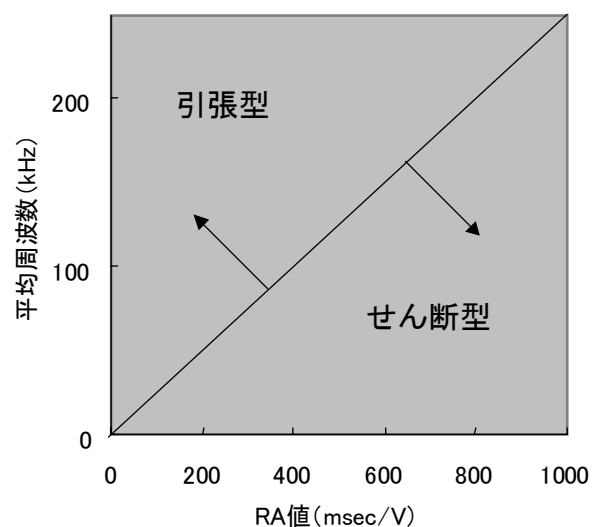


図-4 ひび割れ識別

表-1 コンクリートの配合表

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				NaCl (kg)
					W	C	S	G	
20	8	55	5.8	42.7	9	16	37	58	12

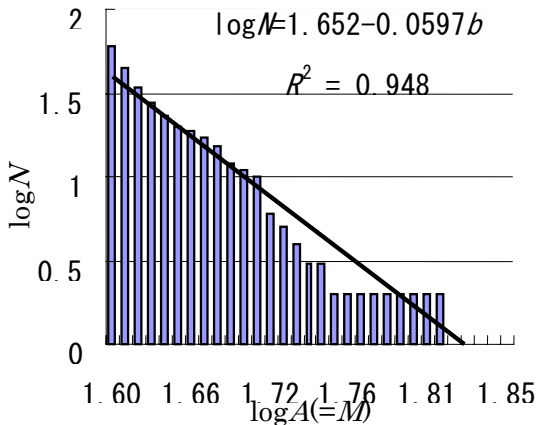


図-5 AE 振幅分布

最大振幅値をマイクロン単位で読み取り、その常用対数として式(1)のように定義した⁶⁾。

$$M = \log A \quad (1)$$

ここに、 M : マグニチュード

A : 一現象の最大振幅値

この M と、それより小規模な地震の累積頻度 N の間に、式(2)のような関係が成り立つ。

$$\log N = a - bM \quad (2)$$

図-5には、式(2)を両対数表示として、それぞれの時期において式(2)の傾きである b 値を算出した例を示す。 b 値は、AE の振幅分布から得られる情報として、材料の変質や劣化を対象とし、材料や変形機構だけに依存するものである。例えば、塑性変形を含めた微小ひび割れに伴う AE では一般に小さい振幅分布が多く b 値は大きくなる。一方、マクロなひび割れ発生に対する b 値は小さい値を示す。なお、 b 値は式(3)により dB から電圧への単位換算のため 20 倍して評価を行った。

$$A = 20 \log V_p \quad (3)$$

ここに、 V_p : 信号のピーク値(μV)

4. 実験概要

コンクリート配合表を表-1 に示す。供試体の練り混ぜ水には NaCl 水溶液を用い、初期の全 Cl 量が 0.3 kg/m^3 となるように調整した。この全 Cl 量 (0.3 kg/m^3) は、示方書⁷⁾に示された促進試験における鋼材腐食発生限界量 ($0.3 \text{ kg/m}^3 \sim 0.6 \text{ kg/m}^3$)⁷⁾を考慮して決定した。実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-6に示すような $250 \times 300 \times 100 \text{ mm}$ の板状のもので、鉄筋には SD295-D13 を使用し、かぶり厚を 20mm とした。供試体は 28 日標準水中養生後、底面以外にエポキシ樹脂を塗布し、塩分の浸透を底面だけに限定した。塩分濃度を測定するコアの採取、鉄筋のはつり出しを行うため、図-6のような供試体を 4 個作製した。その後、3%NaCl 水溶液の入った水槽に供試体を 7 日間浸漬と、7 日間乾燥させる浸漬乾燥繰り返し実験を行った。実験中には、図-6 に示す位置 (供試体上面) に AE センサーを設置した後、連続的に AE 測定を行った。なお、しきい値は 40dB、AE センサーは共振周波数 150kHz の特性を持つセンサーを使用し、周波数帯域は 10kHz~300kHz、ゲインは 60dB (プリアンプ 40dB+メインアンプ 20dB) として行った。そして、腐食の発生が予測された時点でコアを採取し、浸透面から 5cm の深さまで 1cm 毎に切断粉碎し、硬化コンクリート中の全塩分と可溶性塩分量を、電位差滴定法により求めた。その塩分浸透試験の結果と AE 発生挙動を比較検討した。

また、AE がどの場所で発生しているのか位置の確認を行うために、AE イベントによる解析を行った。なお、4 個のセンサーのうち 3 個以上のセンサーにおいて位置の確認ができる AE ヒットを 1 イベントと定義している。本研

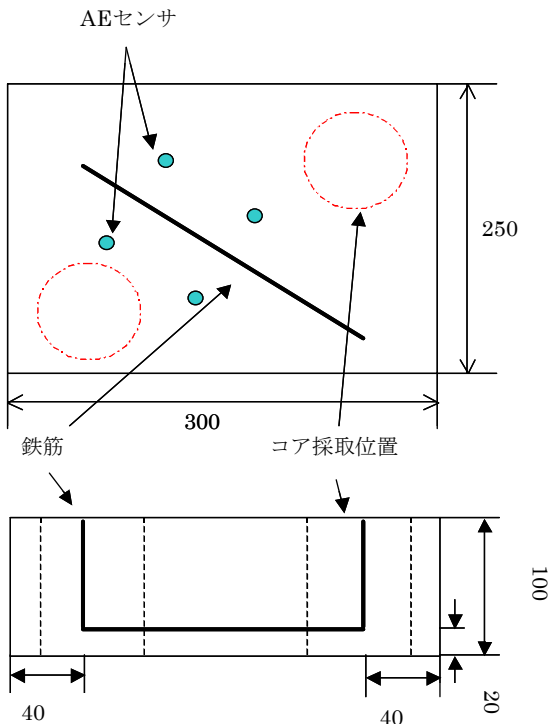


図-6 実験供試体図

究では鉄筋の腐食箇所の確認ができるかについての検討を行った。

5. 実験結果

図-7 に実験中の AE ヒット数の発生状況を示す。実験開始後の 14 日目から 21 日目にかけて、最初の AE 頻発期が確認できた（以降、第一時期）。その後、56 日目から 63 日目にかけて瞬間的に二度目の AE 頻発期が確認できた（以降第二時期）。なお、AE 頻発期については、他の時期と比較して、明らかに AE ヒット数の多い時期とした。

56 日目から 63 日目において AE 頻発期が確認されたことから、70 日目にコア供試体を採取し、塩分浸透試験を実施した。70 日目において採取したコアから塩化物イオン量を測定し、さらに実験開始期に行った供試体の塩化物イオン濃度の初期値とから塩分浸透予測解析を行った。その結果を図-8 に示す。ここでは、既報の方法（ERF）と（独）港湾空港研究所による方法⁸⁾で解析している。この結果から、第一時期において鋼材腐食限界量の全 Cl⁻量（0.3kg/m³～

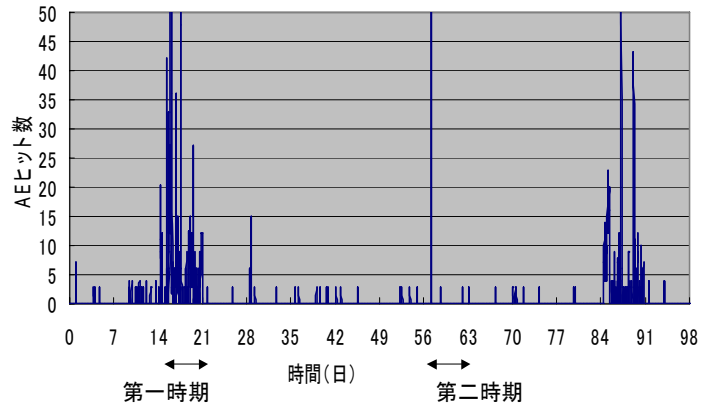


図-7 AE ヒットの発生挙動

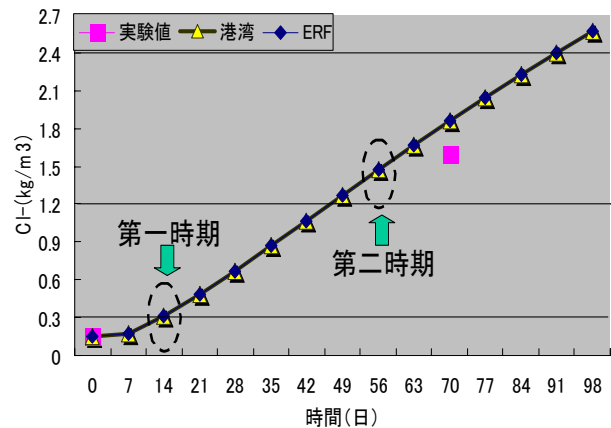


図-8 かぶり位置における塩化物イオン濃度

0.6kg/m³) にほぼ一致し、第二時期においては示方書のコンクリートひび割れ開始期に当たると推測されている全 Cl⁻量（1.2kg/m³～2.4kg/m³）の濃度範囲に一致していることが分かる。したがって、第一時期と考えられる 14 日目から 21 日目にかけて鉄筋腐食が開始され、図-1 による潜伏期から進展期に移行していると思われる。なお、実験後に鉄筋をはつり出したところ、70 日時点では目視でも確認できるほどに、鉄筋の腐食が進行していた。このことより、第二時期と考えられる 56 日目から 63 日目にかけて、錆が目視により確認できる程に鉄筋腐食の速度が速くなっていると思われる。つまり、図-1 における進展期から加速期に移行していることが認められた。

次に、AE パラメータ解析の結果を示す。b 値、RA 値、平均周波数の経時変化を図-9、図-10 に示す。図-9 より、AE 頻発の第一時期に当た

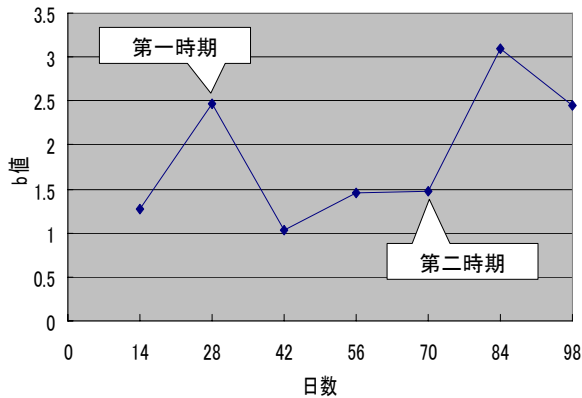


図-9 b 値の経時変化

る 14 日目から 28 日目にかけて b 値が大きく増加していることが分かる。このことより、14 日目から 28 日目にかけて微小ひび割れが発生していると考えられる。一方、56 日目から 70 日目にかけては第一時期と比較して、b 値が低くなっている。このことより、第二時期において大きな亀裂を伴うひび割れが発生していると考えられる。供試体表面にはひび割れは確認できなかったが、はつり出した鉄筋が目視で確認できるほどに腐食していたことから、鉄筋近傍においてはひび割れが発生していたと思われる。

また、図-10 より RA 値・平均周波数は第一時期に当たる 14 日目から 28 日目にかけては、RA 値と比較して平均周波数自体は顕著に高いという傾向を示したわけではなかった。しかし、RA 値は 28 日目以降減少し、70 日目以降再び増加している。一方、平均周波数は 42 日目以降増加し、70 日目以降再び減少している。つまり 42 日目以降、RA 値と平均周波数は逆の傾向を示している。この傾向を踏まえると、せん断型ひび割れの卓越した発生があるのではないかと思われる。また、第一時期以降から第二時期まで含めて、平均周波数が大きく RA 値が小さいことから、引張型ひび割れの卓越した発生が推測される。その後、84 日目以降は RA 値が大きく平均周波数が小さいことから、再びせん断型ひび割れの卓越した発生があると思われる。

次に、AE 発生 の位置標定を行った結果を図-11、図-12 に示す。図-11 が第一時期と考

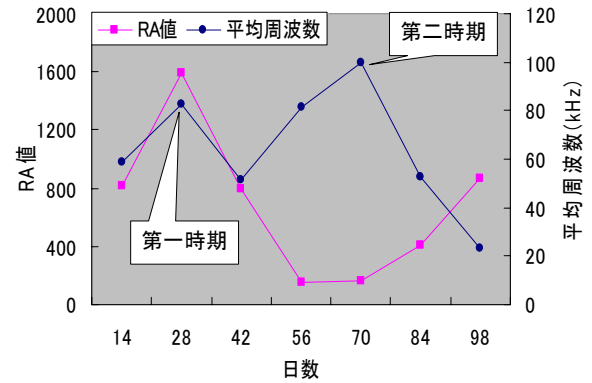


図-10 RA 値と平均周波数の経時変化

えられる 3 週目から 8 週目にかけての位置標定の結果であり、図-12 は第二時期と考えられる 9 週目から 12 週目にかけての位置標定の結果を示す。

図-11 から分かるように、AE 発生 の第一時期である 14 日目から 21 日目までの AE の発生位置はセンサー付近のものがほとんどであり、鉄筋付近からは標定されていない。このような傾向は、第一時期以降の 8 週目まで同じであった。図-7 のように、14 日目から 21 日目の間には AE のイベント数が多く、センサー位置に誤標定されるほどに標定困難な多くの AE ヒットが鉄筋の各所から発生したことが考えられる。原因の一つとして、鉄筋内部からの腐食開始に

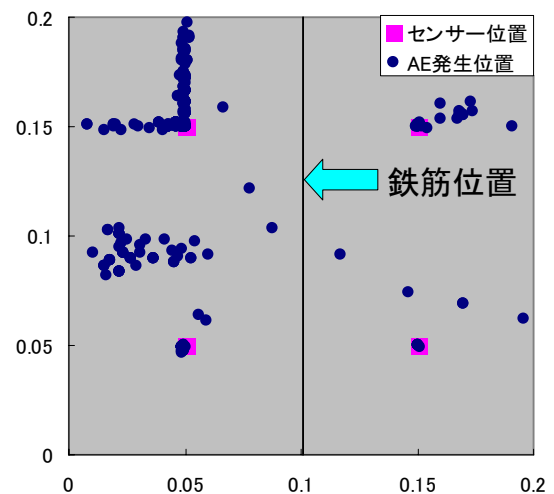


図-11 3~8 週における AE 発生 の位置標定
・単位 (m)

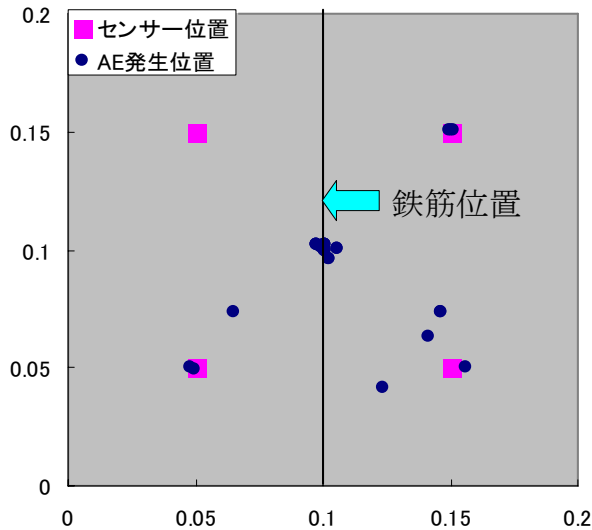


図-12 9～12週におけるAE発生の位置標定
・単位 (m)

より鉄筋の広い範囲で同時にAEが発生するような状況も考えられる。しかし、この点の検証については今後の課題と考えている。AE発生の第二時期である56日目から63日目にかけては、鉄筋中央付近からAEが発生している(図-12参照)。このことから、第二時期において腐食生成物の発生に伴う引張型ひび割れの発生があったものと考えられる。この時期において鉄筋付近からAEの発生が標定されたことから、鉄筋腐食の位置を決定できる可能性が明らかになったと考えられる。

6. 結論

本研究により、以下のような結論が得られた。

- (1) b値の経時変化、塩分浸透試験から、鋼材腐食限界量の全Cl量が $0.3\text{kg/m}^3 \sim 0.6\text{kg/m}^3$ となる第一時期においては多数の微小なひび割れ、全Cl量が $1.2\text{kg/m}^3 \sim 2.4\text{kg/m}^3$ となる第二時期においては大きな亀裂を伴うひび割れがそれぞれ発生することが確認された。
- (2) RA値と平均周波数の関係から、第一時期においてはせん断ひび割れ、第二時期にお

いては引張ひび割れが発生していると考えられた。

- (3) AE発生挙動と塩分浸透試験の結果を比較検討した結果、鉄筋腐食の劣化進行過程において、腐食開始時期(第一時期)とコンクリートひび割れ発生時期(第二時期)を明確に検出できる可能性が明らかとなった。
- (4) 位置標定の結果、第二時期において、鉄筋付近から顕著なAE発生が評定された。したがって、位置標定において鉄筋腐食箇所が把握できることが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」，2001年制定
- 2) Sanchun,Y. Kejin,W. W.Jason Weiss. and Surendra,P.S. : Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of reinforced concrete, ACI MATERIALS JOURNAL, Vol.97, No.6,pp637-644,Nov./Dec.2000
- 3) A.Moczko,A.Pszonka and P.Stroeven:Acoustic Emission as a useful tool for reflecting cracking behavior of concrete composites, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.805-812, Sep.1995
- 4) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三：鉄筋腐食の診断, 森北出版, 1993
- 5) 社団法人日本建材産業協会：建産協規格集・コンクリートの非破壊検査方法, 2003年制定, pp.47-64, 2003.3
- 6) 大津政康：アコースティックエミッションの理論と特性, 森北出版, 1988
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」, 2002年制定
- 8) 友田祐一, 田中正俊, 志水寿光, 大津政康：AE法によるコンクリート中の鉄筋腐食過程の定量的モニタリングに関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26,No.1,pp.1797-1802,2004.7