

論文 AE 法による鉄筋腐食モニタリングに関する考察

友田 祐一^{*1}・小林 廉^{*2}・田中 正俊^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化が近年、大きな社会問題となっている。そこで、コンクリート構造物の塩害における環境条件を考慮して浸せき乾燥繰り返し実験を行った。実験中には、アコースティック・エミッション(AE)法と自然電位法による測定を行った。この実験結果を基に、自然電位とAE発生挙動による鉄筋腐食の評価について検討した。また、塩分浸透予測をFEM解析とコンクリート標準示方書「維持管理編」により実施した。これらの結果をAE発生挙動と比較することにより、AE法による鉄筋腐食の発錆時期及びコンクリート劣化進行過程の定量的なモニタリングの可能性について検討を試みた。

キーワード：鉄筋腐食，塩分浸透予測，アコースティック・エミッション，モニタリング

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性に関する規制が近年厳しくなっている。これは、高い耐久性及び施工性を評価されていたコンクリート構造物がメンテナンスフリーでは対処できなくなり、これまで建設されてきたコンクリート構造物の劣化が大きな社会問題となってきた背景がある。これらの問題に対応するために、2001年制定・コンクリート標準示方書「維持管理編」¹⁾において、コンクリート劣化に伴う様々な耐久性照査法が規定されており定量的な照査が提示されている。コンクリート構造物の塩害は、配合、施工法、環境条件等によりコンクリート内部において鉄筋の腐食進行速度が大きく異なる。そのため、塩害を定量的に評価するには鉄筋腐食の時期を早期の段階で把握することが不可欠となる。この意味から、実構造物における塩害の維持管理には、鉄筋腐食の発錆時期を正確に評価できるモニタリング技術の開発は急務と考えられる。

そこで、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(AE)法の適用を考察した。AE法とは、材料の破壊過程を評価する有効な

検査手法である。これまでの研究成果^{2), 3)}として、塩分浸透の促進実験である電食実験にAE法を適用することにより、早期の段階で鉄筋腐食を発見でき、コンクリート劣化の進行過程をモニタリングできる可能性が明らかとなっている。しかし、電食による鉄筋腐食は、自然に発錆する現象ではないため、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

そこで、本研究では塩害における環境条件を考慮した浸せき乾燥繰り返し実験にAE法を適用した。実験では、コンクリートの塩分浸透による鉄筋腐食の過程を検討するため、AE法と自然電位法による計測を行った。この実験結果に基づいて、塩分浸透の予測解析を行い、AE発生挙動と塩分浸透状況の比較により鉄筋腐食の進行過程をAE監視により定量的にモニタリングする可能性について検討した。

2. 塩分浸透予測

2.1 拡散係数

拡散係数の決定には、非定常浸透理論における塩化物イオン(以下、Cl⁻と記載)の浸透過程を用いた2001年制定・土木学会・コンクリート標

*1 熊本大学 工学部技術部 (正会員)

*2 遠州鉄道(株) 工修 (正会員)

*3 熊本大学 大学院自然科学研究科

*4 熊本大学 自然科学研究科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 剤
10	8.5	55	8.0	43	178	323	725	1145	0.129

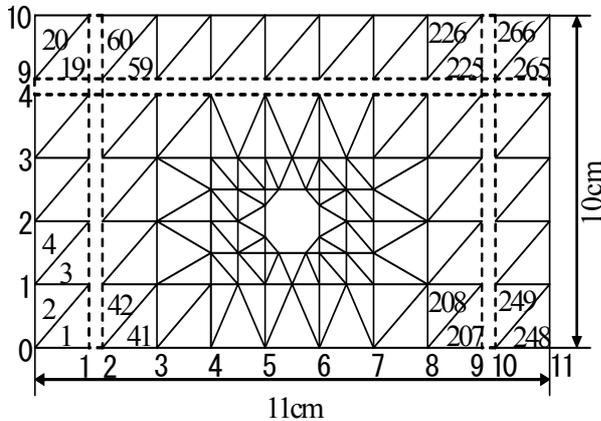


図-1 FEM解析モデル

準示方書「維持管理編」に示されている式(1)の回帰式及び、2002年制定・土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」⁴⁾に示されている式(2)の回帰式よりコンクリート配合に対応したCIの拡散係数 D を求めた。

$$\log D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47 \quad (1)$$

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + (W/C) - 2.5 \quad (2)$$

ここに、 D : 拡散係数、 W/C : 水セメント比式(1)の D (cm²/sec)と式(2)の D (cm²/年)の単位は、 D (cm²/sec)に統一して解析を行った。

なお、今回の浸せき乾燥繰り返し実験は、室温 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度 70%程度と同室内において実施しているために、以下の解析では乾燥の影響は考慮していない。

2.2 示方書による解析

塩分浸透予測の解析は、コンクリートの表面CI濃度 (kg/m³) C_0 を一定とする式(3)を用いた。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (3)$$

ここに、

C : 浸透面からの距離 x (cm)、実験期間 t (sec) における CI 濃度 (kg/m³)

C_0 : コンクリートの表面 CI 濃度 (kg/m³)

erf : 誤差関数

この場合、表面 CI 濃度 C_1 は式(4)より求めた。

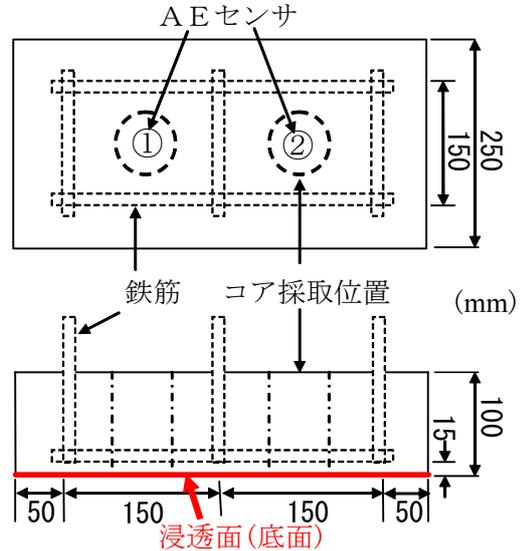


図-2 実験供試体

$$C_1 = \frac{C_{(x)}}{1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}} \quad (4)$$

ここに、

$C_{(x)}$: 各実験における浸透面からの距離

0.5cm~2.5cm までの CI 濃度 (kg/m³)

さらに、式(4)より求めた浸透面からの距離 0.5cm~2.5cm までの表面 CI 濃度 C_1 を平均して見掛けの表面 CI 濃度を推定した。

2.3 FEMによる解析

2次元 FEM 解析については、図-1のような鉄筋コンクリート断面モデルを作成し、式(3)と同じ境界条件で拡散方程式を解くことにより要素数 266 の各節点における CI 量を求めた。

3. 実験概要

実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。鉄筋コンクリート供試体は、図-2に示すように $250 \times 400 \times 100$ mm の板状とし、かぶりを 15mm とした。また、示方書⁴⁾による促進試験の鋼材腐食限界 CI (0.3kg/m³~0.6kg/m³) 量を考慮して、コンクリート中に混入する NaCl を細骨材に置き換え、CI換算を行うことにより供

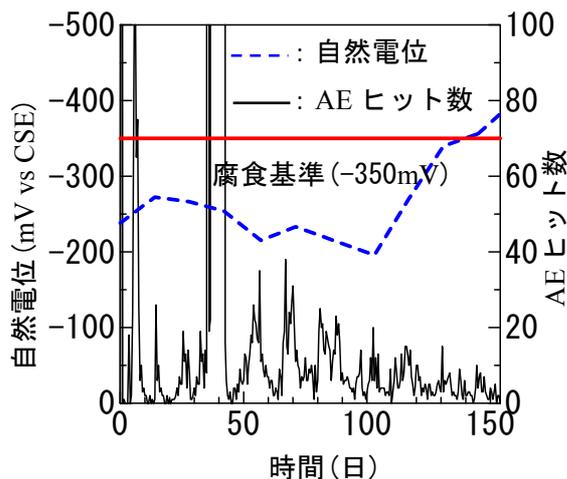


図-3 自然電位とAEヒット数

試体の初期 Cl^- 量が 0.3kg/m^3 以下となるよう作製した。

供試体は、28日間標準水中養生後、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。その後、3%NaCl水溶液の入った水槽に供試体を7日間浸せき7日間乾燥させる浸せき乾燥繰り返し実験を約5ヶ月間(154日)行った。実験終了後の供試体は、図-2に示す位置でコアを採取し、浸透面から5cmの深さまで1cm毎に切断・粉砕した試料により、硬化コンクリート中の全塩分量と可溶性塩分量⁵⁾を測定した。

浸せき乾燥繰り返し実験中に、鉄筋腐食の目安として供試体表面を20点(5cm間隔)に分割を行い、7日間毎に銅-硫酸銅電極(CSE)により自然電位を測定した。この場合、分割した点の半数以上が鉄筋腐食の評価基準である -350mV ⁶⁾よりマイナスとなった時を実験終了とした。また、自然電位計測と平行して、塩害による鉄筋腐食を初期の段階で把握するため、AE法により図-2に示す2ヶ所の位置にAEセンサを設置しMISTRAS-AEシステム(PAC社製)で測定した。AEセンサは、周波数帯域60~1000kHz、共振周波数60kHzの特性を持つ広帯域型のUT-1000を使用して実施した。

4. 実験結果

既往の研究成果^{2), 3)}として電食実験中にAE

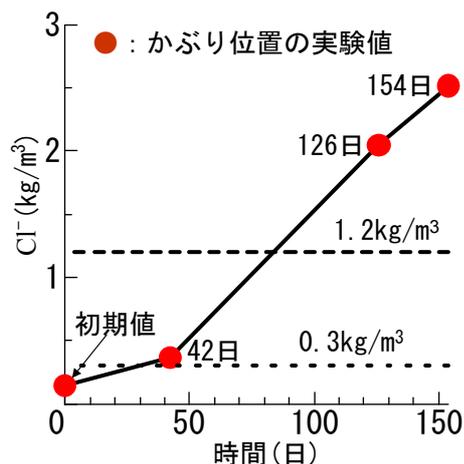


図-4 繰り返し実験におけるかぶり位置の全塩分量

測定を行った結果より、コンクリート中のかぶり位置での Cl^- 量が示方書⁴⁾による鋼材腐食限界 Cl^- ($0.3\text{kg/m}^3 \sim 0.6\text{kg/m}^3$)量に達する時期に、AE発生が顕著になる第一次期と実環境での暴露実験における鉄筋腐食の規制値 Cl^- ($1.2\text{kg/m}^3 \sim 2.4\text{kg/m}^3$)量に達する第二次期が確認されている。これらの成果を基に、自然電位値とAE発生時期とから各実験終了の時期を決定した。その結果、今回の実験では、第一次期42日目、第二次期126日目、自然電位測定での -350mV よりマイナスとなった154日目を実験終了時期とした。各実験終了後の供試体は、コンクリート中の全塩分量と可溶性塩分量の測定を実施した。

AE発生挙動と自然電位を比較した154日目までの結果を図-3に示し、各時期までのかぶり位置における Cl^- 量の測定結果を図-4に示す。図-3よりAE発生が顕著に現れる時期は42日目付近で、このときのかぶり位置での Cl^- 量は図-4のように 0.37kg/m^3 であった。このように示方書⁴⁾に示された、促進試験における鋼材腐食限界 Cl^- ($0.3 \sim 0.6\text{kg/m}^3$)量に達していることがわかる。したがって、AE発生挙動の第一次期において鉄筋腐食が開始されたと考えられる。ただし、この時点で実際に、鉄筋をはつり出したところ、腐食は認められなかった。第二次期126日目については、顕著なAE発生は見られないが、図-3のように自然電位が急速にマイナス方向に向かっていることが確認された。こ

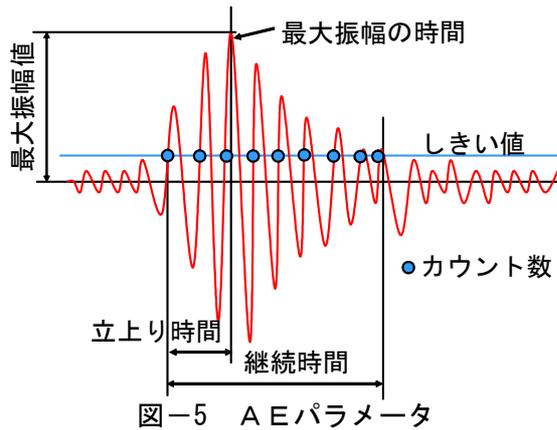


図-5 AEパラメータ

の時期におけるかぶり位置でのCI量は図-4のように鉄筋腐食の規制値であるCI(1.2kg/m³)量を越えている。実際に鉄筋をはつり出したところ鉄筋腐食が認められた。これは、この時期から鉄筋の腐食速度が速くなり、錆が目視でも確認できる程に進んだものと考えられる。

これらの結果より、既往の研究成果^{2), 3)}である電食実験の結果と同様な結果が浸せき乾燥実験においても認められることが確認された。したがって、AE法と自然電位法を行うことにより鉄筋腐食の時期を早期の段階でモニタリングできる可能性が明らかとなった。これは、実構造物の塩害に関する耐久性照査を促進実験である電食実験により評価できる可能性も示しており、コンクリートの塩害における劣化予測に適用できる可能性が確認できた。

5. 解析結果

5-1 AEパラメータ解析

(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-5に示すAE波形の形状の特性値により、欠陥の発生条件などの特徴が把握できる。例えば、コンクリート劣化が生じた場合における破壊の種類により、引張とせん断破壊では、AEの立上り時間及び周波数分布に違いが生じる。そこで、立上り時間は、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上り時間を除したRA値(立上り時間/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、

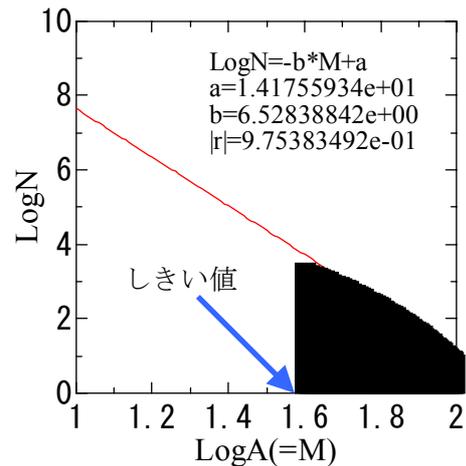


図-6 AE振幅分布

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)の検討も行った。

なお、今回の実験では、しきい値を40dBに設定して実施した。

(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(5)のように定義した⁷⁾。

$$M = \text{Log}A \quad (5)$$

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(6)のような関係が成り立つ。

$$\text{Log}N = a - bM \quad (6)$$

ここに、 N : 累積頻度 a, b : 定数

図-6には、式(6)を両対数表示として、それぞれの時期において式(6)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、塑性変形に伴うAEでは一般に小さい振幅分布が多く b 値の値は大きくなる。一方、クラック発生に対する b 値は小さい値を示す。このように、 b 値の変化は、破壊の進展を示す重要な因子とされている。

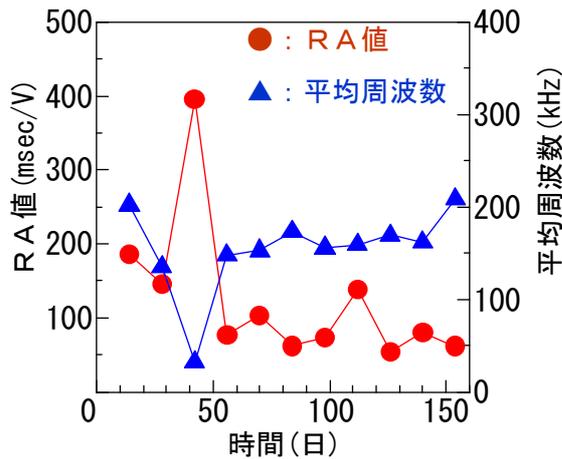


図-7 RA値と平均周波数の解析比較

(3) AE解析結果

図-7に、RA値と平均周波数の関係を示し、図-8には、電圧変換を考慮した相対的b値の解析結果を14日間毎に平均して示す。いずれの結果も第一次期である40日目頃に急激な変化が見られる。これは、 Cl^- 量が 0.3 kg/m^3 を越えた時期であり、RA値と平均周波数よりコンクリート中の引張型クラック発生が推測され、b値よりその規模が非常に小さいことも分かる。また、120日頃にRA値とb値に変化が見られ、RA値の増加としての引張クラック発生とb値のわずかな上昇による小規模なクラック発生が認められる。今回の実験では、自然電位が急速にマイナス方向へ向かっているこの時期を第二次期とした。この時点では、鉄筋腐食の規制値である Cl^- 量が 1.2 kg/m^3 を大きく越えていることから鉄筋腐食の速度が速くなり、小規模な引張クラックの発生が見られたと考えられる。

5-2 塩分浸透予測結果

(1) かぶり位置での浸透予測

浸透予測に用いた拡散係数及び表面 Cl^- 量は、示方書の式(1)より求めた $9.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、表面 Cl^- 量 6.158 kg/m^3 と式(2)より求めた $6.05 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、表面 Cl^- 量 7.608 kg/m^3 を用いて、示方書の式(3)とFEMによる解析を行った。図-9に、かぶり位置の Cl^- 量解析結果と塩分浸透試験による実測値を比較して示す。42日以降の結果については、実測値と式(1)、式(2)の拡散係数による式(3)の解析値は、ほぼ同程度の値を示し

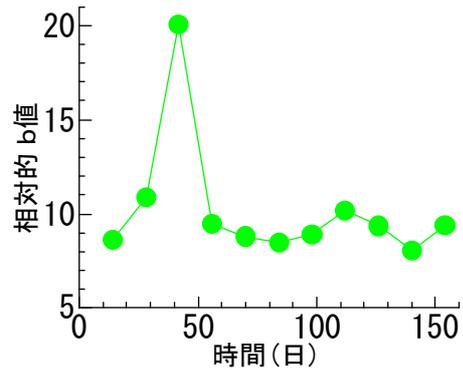


図-8 b値の解析結果

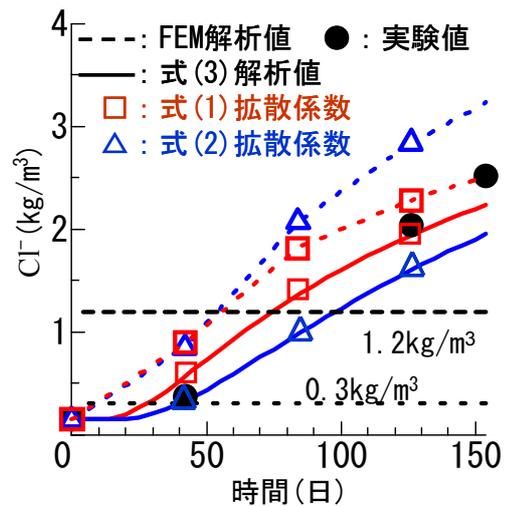


図-9 塩分浸透解析結果の比較

ている。

また、式(2)によるFEM解析では、式(1)に比べて拡散係数は小さいが、表面濃度が大きいいため、解析結果が大きな値になったと考えられる。

なお、今回の浸せき乾燥繰り返し実験では、湿度70%程度の室内で実施しているが、FEM解析に関しては、安全側に Cl^- 量浸透を予測しているようである。しかし、示方書による解析では、危険側に Cl^- 量浸透を解析していることから長期における Cl^- 量の浸透予測に関しては、乾燥等の影響を考慮する必要性が認められた。

(2) FEMによる Cl^- 濃度分布

FEM解析によって得られた鉄筋付近の Cl^- 量分布を図-10に示す。式(1)より求めた42日毎における168日まで解析結果は、図のように鉄筋付近での Cl^- 量が明らかに示方書に規定された一次元挙動より高くなっていることが確認できる。これは、鉄筋付近になると Cl^- 量が大きく

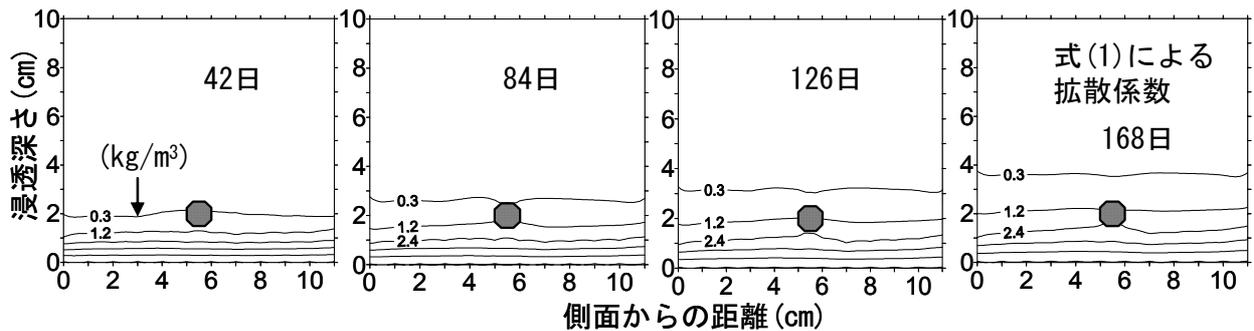


図-10 FEMによるCl⁻量の分布

なる報告⁸⁾と一致している。この結果、図-9のようにFEM解析でのCl⁻量が高くなった理由が明らかとなった。

6. まとめ

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及び劣化の進行過程を定量的にモニタリングする技術の開発について、塩害における環境条件を考慮した浸せき乾燥繰り返し実験にAE法を適用して検討を試みた。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- (1) 浸せき乾燥繰り返し実験においてAE法と自然電位法を適用することにより鉄筋腐食の時期を早期の段階でモニタリングできる可能性が明らかとなった。また、電食実験と同様な結果が認められ、実構造物の塩害に関する耐久性照査を促進実験である電食実験により評価できる可能性が示された。
- (2) 示方書に示された、促進試験における鋼材腐食限界Cl⁻量0.3~0.6 kg/m³の妥当性が確認され、鉄筋腐食のCl⁻量規制値である1.2 kg/m³を越える時期より鉄筋腐食の速度が速くなり、AE計測により微小クラック発生が確認された。
- (3) 式(1)の拡散係数における示方書及びFEM解析値では、長期におけるCl⁻量の浸透予測できることが確認されたが、示方書による解析においては、危険側に予測していることから、乾燥の影響を考慮する必要性が認められた。また、FEMによる濃度分布の解析を行うことにより鉄筋付近でのCl⁻量が他の

部分に比して高くなることが確認できた。

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」、2001年制定、2001。
- 2) 友田祐一，小林廉，大津政康：コンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する定量的評価の考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.859-864，2001.7
- 3) 小林廉，田中正俊，友田祐一，大津政康：AE法による鉄筋コンクリートの塩害劣化の早期判定法の開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24，No.1，pp. 771-776，2002.6
- 4) 土木学会：土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」，2002年制定，2002
- 5) 船戸巳和男：硬化コンクリート中に含まれる塩分分析法，日本セメント（株），中央研究所共同実験資料，1984
- 6) 小林豊治，米澤敏男，出頭圭三：鉄筋腐食の診断，森北出版，1993
- 7) 大津政康：コンクリート材料におけるアコースティック・エミッション特性とその発生機構に関する基礎的研究，京都大学学位論文，pp.47-61，1982
- 8) Stanley C. Kranc, Alberto A. Sagues, and Francisco J. Presuel-Moreno :Decreased Corrosion Initiation Time of Steel in Concrete due to Reinforcing Bar Obstruction of Diffusional Flow., ACI MATERIALS JOURNAL, Vol.99, No.1, pp.51-53, Feb.2002