

論文 電食実験によるコンクリート中の鉄筋腐食に関する考察

森 香奈子^{*1}・木嶋 政智^{*2}・友田 祐一^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨：近年、鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食による被害が数多く報告され、維持管理の必要性から鉄筋腐食によるコンクリートの劣化進行過程を早期に評価する非破壊検査技術の開発が求められている。その基礎的な検討として本研究では、電食による鉄筋腐食時のコンクリート中の劣化進行過程をアコースティック・エミッション (AE) 法により観察した。その結果、劣化進行過程について、3つの AE 発生時期が明らかとなり、その際の鉄筋の内部情報を走査型電子顕微鏡により明らかにした。

キーワード：鉄筋腐食, 劣化進行過程, アコースティック・エミッション, 走査型電子顕微鏡

1. はじめに

コンクリート構造物は、これまでメンテナンスフリーと考えられてきたが、近年では様々な劣化被害が報告されるようになった。そのためにコンクリート構造物の維持管理の必要性から、早期に劣化を評価することが重要となっている。コンクリート構造物の劣化被害の重要な原因として、塩害がある。現在までのところ、鉄筋コンクリート構造物の表面にひび割れや錆汁が目視で確認されることによってコンクリート内部の鉄筋腐食が明らかになることが大半を占めており、コンクリート中の劣化進行過程を早期に評価する非破壊検査法の開発が急務と考えられている。

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、塩害による劣化進行過程は図-1のように、鋼材の腐食開始およびコンクリートの腐食ひび割れ開始を遷移時期として、潜伏期・進展期・加速期を定めている。そして、塩化物イオン量の規制値を定めているが、この値は構造物の設置環境条件や構造腐食許容量などの条件によって異なることから²⁾、塩化物イオン量のみから鉄筋腐食の有無を確実に判断することは困難と考えられている。

コンクリート中の鉄筋腐食の評価に一般的に利用されているのは、電気化学的手法の自然電位法である。しかし、自然電位法の計測値は環境条件の影響を多く受けるため単独での利用には適さないことが報告されている³⁾。一方、アコースティック・エミッション (以下 AE と表記) 法を適用すれば、コンクリート中の鉄筋腐食に伴う AE 波を検出でき、その過程で2つの活発な AE 発生時期が確認できることが報告されている⁴⁾。そして、特徴的な AE 発生後に鉄筋のはつり出しを行って、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察により、早期の鋼材腐食の

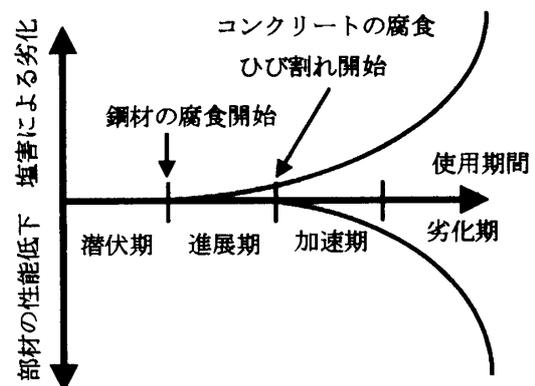


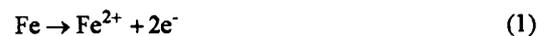
図-1 塩害による鉄筋コンクリートの劣化進行過程

発生が確認されている。

この成果を踏まえて、本研究では、促進実験として知られる電食実験に AE 法を適用する基礎的研究を実施した。AE 発生挙動と鉄筋発錆の状態およびコンクリートの膨張ひび割れの状況を比較することで、コンクリート中の劣化進行過程を考察した。さらに鉄筋を走査型電子顕微鏡により観察することにより、目視では判断できない腐食状況の確認を試みた。

2. 鉄筋腐食過程

塩害によるコンクリート中の鉄筋腐食は図-2のように、塩化物イオンにより鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されることによって開始する⁵⁾。この場合の鉄筋表面でのアノード反応とカソード反応は、



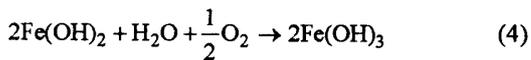
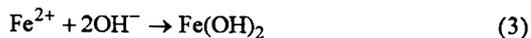
であり、さらに反応が進むと、

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科 (正会員)

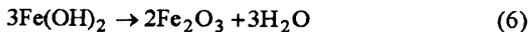
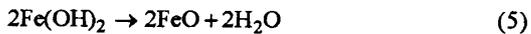
*2 熊本大学大学院 自然科学研究科

*3 熊本大学 工学部技術部 技術専門職員 博(工) (正会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 工博 (正会員)



この水酸化鉄（腐食生成物）は水を失って、



と、さらに酸化鉄に変わる場合もある⁶⁾。

Melchers らの報告によると、鉄筋腐食過程は図-3 に示すとおり 4 つの時期に分けて評価できることが明らかになっている⁷⁾。第 1 時期には鉄筋表面に薄い錆の膜が形成され、第 2 時期には薄い錆の膜が全体に広がり溶存酸素がなくなっていくことで腐食速度が遅く進展する。第 3 時期では再び腐食速度が速くなり鉄筋の内部にも錆が形成される。そして、第 4 時期にはほぼ一定の速度で鉄筋の腐食が進展する。このように、図-1 と異なり 2 つの明確な進展期により鉄筋の腐食過程は評価されている。既報⁴⁾では、第 1 および第 3 の 2 つの時期が AE 発生挙動から明確に判別できることを明らかにしている。

ところで、Yuan らの報告によると、浸漬乾燥繰返し実験と電食実験では鉄筋腐食過程が異なることが報告されている⁸⁾。浸漬乾燥繰返し実験下では鉄筋の塩化物イオン浸透面側のみが腐食するのに対して、電食実験下では鉄筋腐食が全体に広がるとされている。そこで、このような電食過程での AE 発生挙動について基礎的考察を行った。

3. AE 法⁹⁾

AE 発生で対象となるのはコンクリート中の鉄筋腐食生成物の発生と、その膨張圧によるコンクリートのひび割れである。AE 計測によれば、AE の発生数や図-4 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を把握できる。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、RA 値（立ち上がり時間 / 最大振幅値）と AE の周波数特性値として解析に用いられている平均周波数（カウント数 / 継続時間）を解析パラメータとして適用した。図-5 の RA 値と平均周波数の関係によりひび割れ識別が可能であり¹⁰⁾、RA 値が大きく平均周波数が小さいならばせん断型ひび割れ、RA 値が小さく平均周波数が大きいならば引張型ひび割れと分類される。本分類法を腐食過程で検出される AE 法に適用し、ひび割れの識別を行った。

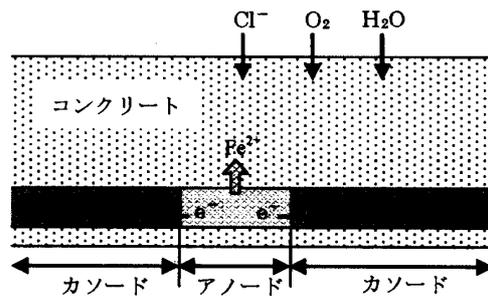


図-2 コンクリート中の鉄筋腐食

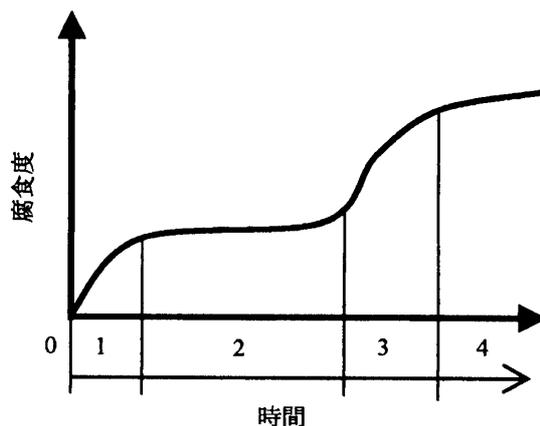


図-3 鉄筋腐食過程

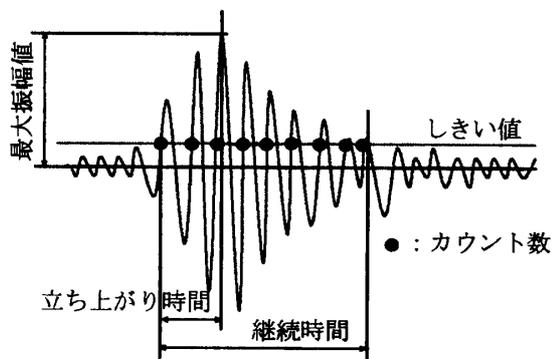


図-4 AE パラメータ

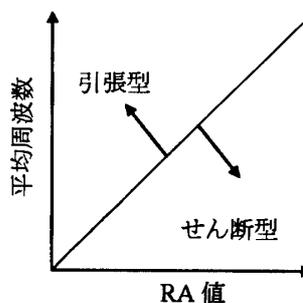


図-5 ひび割れ識別基準

4. 実験概要

鉄筋コンクリート供試体は図-6 に示すように 100×100×400mm の角柱で、鉄筋は SD295-D13 を使用し、かぶりは 45mm とした。また、塩化物イオン量を測定するためのコア採取、鉄筋のはつり出しのために、同様の供試体を別に 2 個作製した。コンクリートの配合は表-2 に示す。全ての供試体は 28 日間標準水中養生後、側面にエポキシ樹脂を塗布し、塩分の浸透を底面に限定した。さらに、露出した鉄筋にもエポキシ樹脂を塗布して電食実験を行った。そして、供試体表面にひび割れが確認できたところで実験終了とした。電食実験装置は図-7 に示す通り、水槽の底の銅板上に供試体を載せ、鉄筋に陽極、銅板に陰極を接続して 40mA の定電流を通电した。電食実験中には、図-8 のように AE センサを 6 個設置し、自然電位計測時以外は連続的に AE 計測を行った。なお、AE 計測装置には、DiSP (PAC 社製) を使用し、周波数帯域は 10kHz~2MHz、ゲインは 60dB (プリアンプ 40dB+メインアンプ 20dB)、しきい値は 40dB として計測を行った。AE センサには、R15 (共振周波数 150kHz) を使用した。

外部電源から切断後、ほぼ 1 日おきに自然電位計測器により浸透面側から電位計測を行った。計測には、携帯型腐食診断器 SRI-CM-II (四国総合研究所製) を使用した。計測位置は図-9 に示す 3 箇所とし、供試体表面を湿润状態に保って計測を行った。参照電極は銀-塩化銀電極を使用して、計測値は飽和銅-硫酸銅電極 (C.S.E.) の値に変換し、3 箇所の平均値を求めた。

5. 実験結果

5.1 AE 計測による評価

図-10 に 1 時間ごとの 6CH 全ての累積 AE ヒット数と AE イベント数を示す。AE イベントとは、6 個の AE センサの内 5 個以上の AE センサによって 1 個の AE ヒットが計測された事象のことである。実験開始後、47 時間から 92 時間経過するまでに、最初の AE 頻発期が確認された。その後、189 時間から 214 時間経過するまでに 2 回目、229 時間経過後に 3 回目の AE 頻発期が確認された。324 時間経過し、図-11 のように供試体のかぶりにひび割れと錆汁の目視による確認後、実験終了とした。以降、47 時間から 92 時間を第一時期、189 時間から 214 時間を第二時期、229 時間から 324 時間を第三時期とす

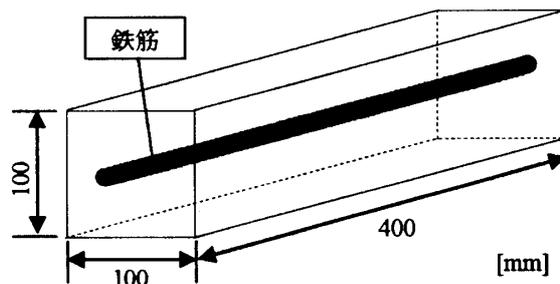


図-6 実験供試体

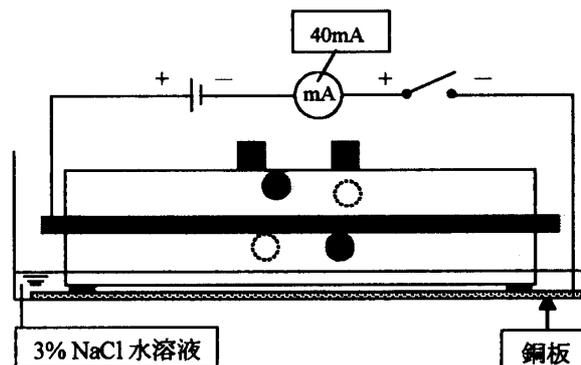


図-7 電食実験装置

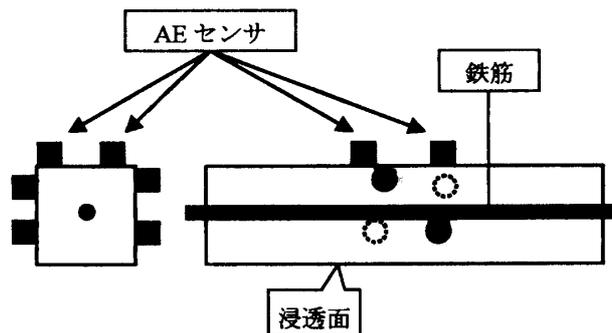


図-8 AE センサの配置

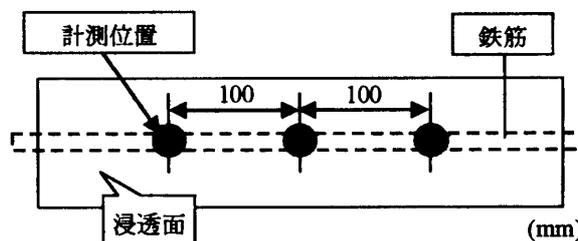


図-9 自然電位計測位置

表-2 コンクリートの配合

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	混和剤 A
20	4.5	55	6.5	41.8	180	327	704	1170	0.098

る。

図-12 に、1 時間ごとの累積 AE ヒット数と自然電位計測の結果を示す。実験開始直後の自然電位はプラスに向かっているが、第一時期には急速にマイナスに向かっていることが確認できた。その後、再び緩やかにプラスに向かっているが、第三時期には-350mV よりもマイナスの値になった。このように自然電位と AE 発生挙動は相関があり、両者を加味すれば、腐食過程の同定に有効であると考えられる。

累積 AE ヒット数の発生挙動は Melchers ら鉄筋腐食過程の報告とよく一致しており、AE 計測で確認された第一時期が図-3 の 1 の時期に、第二時期が図-3 の 3 の時期に該当すると考えられた。したがって、AE の発生挙動から、最初に頻発した第一時期では、鉄筋表面の酸化皮膜が破壊され、第二時期では鉄筋表面に形成された腐食生成物が酸化皮膜の内側全体に生成され、第三時期では鉄筋内部に鋼食ひび割れが入り、錆の膨張圧によりコンクリート内部に発生したひび割れが、表面にまで進行することによって AE が発生すると推測された。

5.2 走査型電子顕微鏡による評価

第一時期、第二時期、第三時期終了後に供試体から鉄筋をはつり出し、鉄筋表面の腐食の様子を目視により確認した。その結果、第一時期では錆は確認できず、第二時期では薄い錆の膜が確認でき、第三期では鉄筋腐食は明確に確認できた。その後、はつり出した鉄筋を走査型電子顕微鏡（日本電子製 JSM-5600）により観察し、エネルギー分散型 X 線分光器（oxford 製 LINK-ISIS 付属）を用いて構成元素の分析を行った。図-13 (a) と図-13 (b) は第一時期終了後、図-14 (a) と図-14 (b) は第二時期終了後、図-15 (a) と図-15 (b) は実験終了後の鉄筋表面と鉄筋断面の画像である。

第一時期では、鉄筋表面に通常形成されている黒皮（酸化皮膜）が溶けて剥離しているのが確認された。なお、鉄筋内部の腐食は見られなかった。第二時期では、表面の黒皮がほとんど剥離し、図-14 (a) のように、黒皮の下にある鉄筋表面の錆が確認できた。第三時期では鉄筋内部に腐食が広がり、大きなひび割れが生じていることが確認でき、図-15 (b) から鉄筋の内部のひび割れが鉄筋中心方向に発生していることがはっきりと確認できた。また、図-15 (a) の画像の倍率は 1,500 倍であり、図-14 (a) の画像が 10,000 倍であることから第三時期での鉄筋腐食による膨張圧の大きさが確認できる。すなわち、第一時期では鉄筋表面の黒皮が破壊され、第二時期では鉄筋表面全体の黒皮がなくなったことによって鉄筋内部に錆が生成され、第三時期では鉄筋内部にひび割れが発生することにより腐食が速くなることが確認された。また、鉄筋表面からの画像を比較することよ

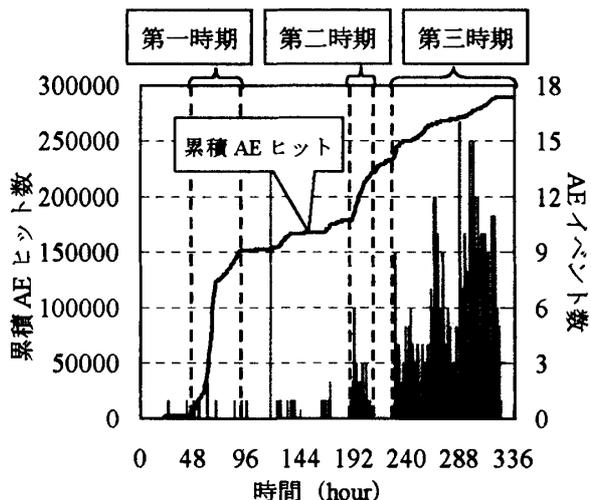


図-10 累積 AE ヒット数と AE イベント数

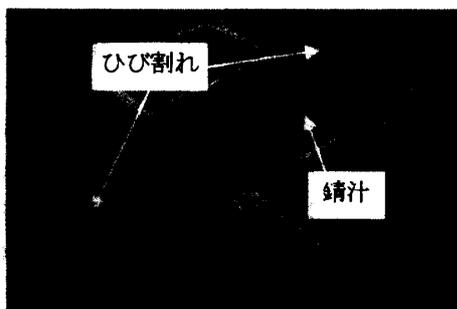


図-11 実験終了時の供試体写真

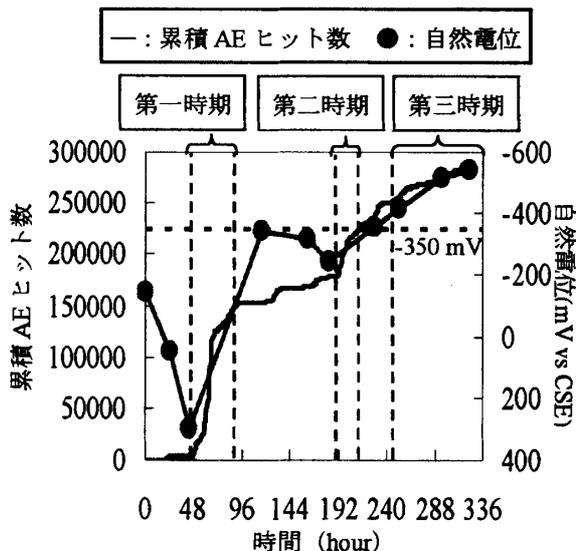


図-12 累積 AE ヒット数と自然電位の関係



図-13(a) 第一時期・表面 SEM 画像



図-14(a) 第二時期・表面 SEM 画像

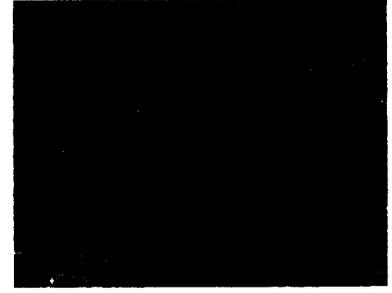


図-15(a) 第三時期・表面 SEM 画像



図-13(b) 第一時期・断面 SEM 画像



図-14(b) 第二時期・断面 SEM 画像



図-15(b) 第三時期・断面 SEM 画像

って、第一時期と第二時期では浸透面側とその反対側の腐食の程度に差が見られたが、第三時期になると鉄筋表面の腐食は全体に一樣であった。この結果は、Yuan らの報告と一致しており、電食実験では鉄筋表面全体に腐食が発生することが確認できた。

図-16 に第二時期での鉄筋断面の組織画像を示す。画像の白の部分はパーライト組織（フェライトとセメンタイトが交互に並んだ組織）である。これより、鉄筋内部の組織に変化はなかった。

図-17 にエネルギー分散型 X 線分光器による元素分析の結果を示す。第三時期では鉄筋内部から塩素が確認され、腐食速度が速くなることが確認できた。

これらの結果から、AE 発生の第一時期は図-1 の劣化進行過程の潜伏期から進展期の遷移時期、第二時期は進展期から加速期の遷移時期、第三時期は加速期または劣化期にあたり、コンクリート表面の錆汁から目視で鉄筋腐食が確認でき、AE 計測により進行過程の 3 つの時期が認められた。

5.3 AE パラメータ解析

各時期のひび割れ識別結果を図-18～図-20 に示す。図-18 と図-20 から、第一時期と第三時期には引張型ひび割れの優勢な発生が確認できたが、図-19 より第二時期は第一時期と比較して明らかにせん断型ひび割れの増加が確認できた。

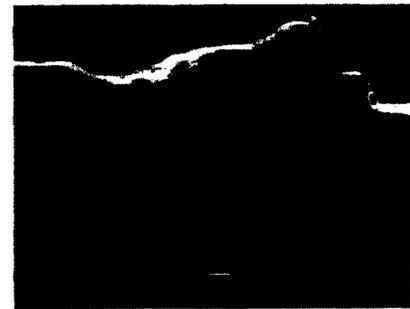


図-16 第二時期・断面 SEM 組織画像

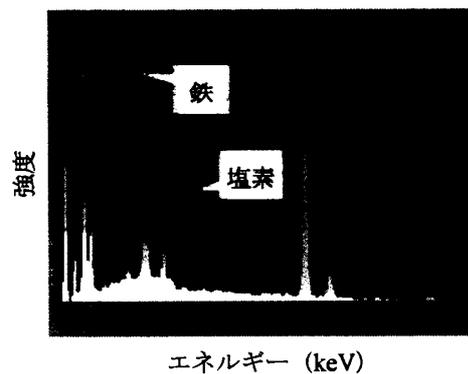


図-17 第三時期の元素分析結果

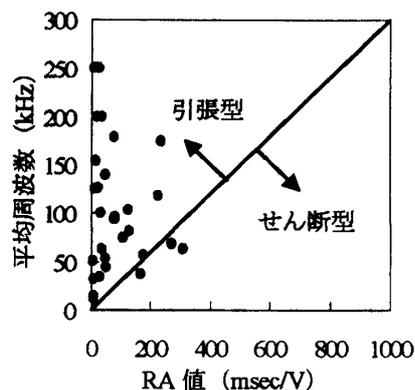


図-18 第一時期のひび割れ識別

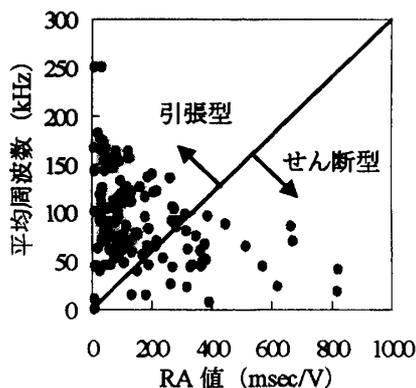


図-19 第二時期のひび割れ識別

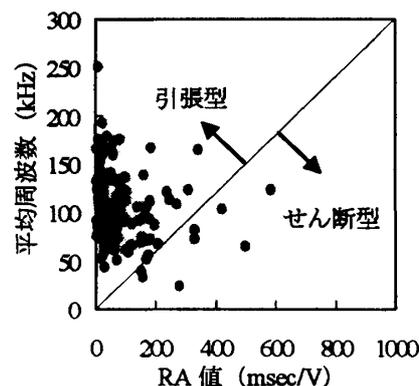


図-20 第三時期のひび割れ識別

6. 結論

塩害による鉄筋コンクリートの劣化進行過程を評価するために、電食実験中に AE 法による計測を行った結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 電食実験では、鉄筋コンクリートの劣化進行に伴う 3 つの AE 発生時期の存在が明らかとなった。
- (2) 走査型電子顕微鏡の観察により、鉄筋表面の酸化皮膜が破壊され鉄筋腐食が進行し、塩素の進入により腐食速度が速くなることが確認でき、第三時期では鉄筋表面全体に腐食していたことから、Yuan らの報告と一致することが明らかとなった。
- (3) AE 頻発第一時期と第三時期は引張り型ひび割れが発生し、第二時期はせん断型ひび割れの発生が増加することが解明できた。

参考文献

- 1) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」，2001
- 2) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書「施工編」，2002
- 3) 大即信明：塩害(II)，技報堂出版，pp.120-121，1991
- 4) 友田祐一：鉄筋コンクリートの腐食機構の解明と定量的腐食モニタリングに関する研究，熊本大学学位論文，2006.3
- 5) 大即信明：塩害(I)，技報堂出版，31p，1987
- 6) 世利修美：金属材料の腐食と防食の基礎，成山堂書店，2006
- 7) Melchers, R. E. and Li, C. Q.: Phenomenological Modeling of Reinforcement Corrosion in Marine Environments, ACI Materials Journal, Vol.103, No.1, pp.25-32, Jan./Feb.2006
- 8) Yuan, Y., Ji, Y., and Shah, S. P.: Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.104, No.1, pp.344-347, May./June.2007
- 9) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論（第2版），pp.1-2，2005
- 10) 日本建材産業協会：2003 年制定建産協規格集・コンクリートの非破壊検査法，pp.47-64，2003