

論文 AE 法による浸漬乾燥繰返し実験の鉄筋コンクリート腐食過程のモニタリング

川崎 佑磨^{*1}・友田 祐一^{*2}・大津 政康^{*3}

要旨：近年、塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化被害が数多く報告されており、鉄筋腐食に伴うコンクリート構造物の劣化進行過程を早期に評価することは非常に重要である。本研究では、塩害による環境条件を考慮した浸漬乾燥繰返し実験中に、アコースティック・エミッション（AE）モニタリングを実施し、鉄筋の腐食開始時期とコンクリートのひび割れ発生時期について検討した。その結果、SiGMA 解析により AE 発生源の位置標定およびひび割れ識別の可能性が示された。さらに、走査型電子顕微鏡による鉄筋断面の観察を行い、「鉄筋の腐食開始時期」を AE モニタリング技術により早期に評価できる可能性を明らかにした。

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、SiGMA 解析、走査型電子顕微鏡

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、近年では様々な劣化が問題となっており、もはやメンテナンスフリーではない状況となっている。この原因の一つとして、コンクリート中の鉄筋腐食による構造物の性能劣化が挙げられる。鉄筋腐食の非破壊検査法における現状では、電気化学的手法である自然電位法や分極抵抗法が一般的に広く用いられている。しかし、構造物の置かれた多種多様な環境条件等に大きく影響されることも判明しており、これらの手法のみで補修・補強の時期を判断することは難しいとされている¹⁾。

塩害による鉄筋コンクリートの劣化進行過程は、土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」²⁾によれば、図-1 のように示されている。これによれば、塩害による劣化進行過程を「鉄筋の腐食開始」と「コンクリートの腐食ひび割れ開始」の二つの時期について評価しており、塩化物イオン (Cl⁻) 量の限界濃度が定められている。しかし、この限界濃度についても多くの報告がされており³⁾、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であるとされている⁴⁾。

一方、非破壊検査手法の一つである、アコースティック・エミッション (AE) 法を適用すれば、コンクリート中の鉄筋腐食に伴う AE の検出が可能であることが報告されている⁵⁾。その過程で 2 つの活発な AE 発生時期が確認されている。

Melchers らの報告によると、海洋環境下の鋼材の腐食過程は図-2 のように 4 つの phase に分けて評価できることが明らかになっている⁶⁾。これによると、phase1 と phase3 の 2 つの時期で腐食が進行することが示され、これらが AE の発生挙動と一致することが確認されている

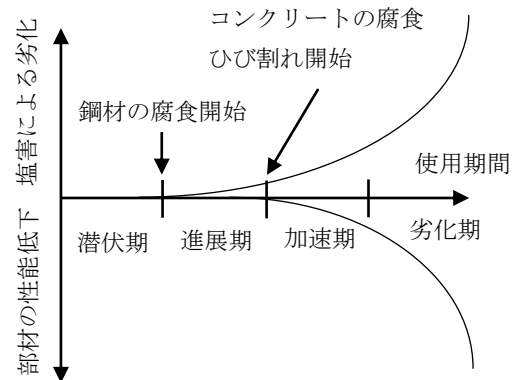


図-1 塩害による鉄筋コンクリートの劣化進行過程

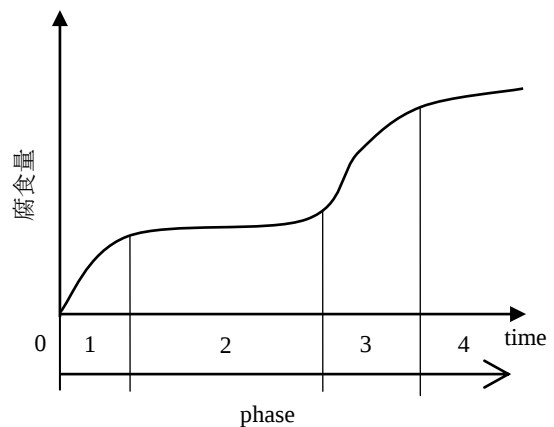


図-2 鋼材の腐食過程

⁷⁾。したがって、塩害による劣化の進行過程は図-1 のような単調増加的なものではなく、図-2 のように 2 段階の進展過程と見なすべきと考えられる。

本研究では、鉄筋コンクリート供試体の環境条件を考

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学 工学部技術部技術専門職員 工博 (正会員)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科複合材料新領域科学専攻教授 工博 (正会員)

慮した浸漬乾燥繰返し実験中に AE 法を適用し、鉄筋腐食の劣化進行過程のモニタリングの有効性を検討した。AE 発生挙動と鉄筋の腐食発生およびコンクリートのひび割れ発生時期の比較に関して、SiGMA (Simplified Green's functions for Moment tensor Analysis) 解析⁸⁾を適用し、鉄筋の腐食開始時期の AE 発生源の位置標定やひび割れ識別の検討を行った。そして、鉄筋を走査型電子顕微鏡により観察することで、実際の腐食状況との対応を確認した。

2. 解析理論

2.1 AE パラメータ解析

鉄筋コンクリートの劣化進行過程で AE 計測の対象となるのは、鉄筋の腐食生成物の発生と腐食生成物の膨張圧によるコンクリートのひび割れである。図-3 に AE 計測により検出した AE 波形の形状を示す。日本建材産業協会規格 (JCMS) では、式(1)と式(2)で定義される RA 値と平均周波数の AE パラメータを使用することにより引張り型とせん断型のひび割れ識別が規定されている⁹⁾。

$$\text{RA 値} = \text{立ち上がり時間} / \text{最大振幅値} \quad (1)$$

$$\text{平均周波数} = \text{カウント数} / \text{継続時間} \quad (2)$$

既往の研究¹⁰⁾では、鉄筋の腐食開始時期に該当する 1 回目の AE 頻発期には、RA 値が大きくなり平均周波数が低いせん断型ひび割れが確認されている。コンクリートのひび割れ開始時期に該当する 2 回目の AE 頻発期には、RA 値は小さくなり平均周波数は高くなる引張り型ひび割れが確認されている。本研究では腐食の発生位置と発生期間を限定することによって、より詳細な腐食過程の状況を AE パラメータで検討する。

2.2 SiGMA 解析

弾性体内部で発生した AE 波が、弾性体の境界面上に設置された AE センサによって検出されるとき、到達する AE 波の初動振幅値 $A(x)$ は、次式によって表される¹¹⁾。

$$A(x) = C_s \cdot \frac{\text{Ref}(t, \gamma)}{R} \cdot \gamma_p \gamma_q M_{pq} \cdot DA \quad (3)$$

ここで、 C_s は AE センサの感度も含めた材料の物性値の係数、 R はひび割れ発生点 x' から検出点 x への距離、 γ_p 、 γ_q はその方向余弦、 DA はひび割れ面の面積、 $\text{Ref}(t, \gamma)$ は AE センサ設置点での検出点への入射角を考慮した反射係数である。また、式(3)を解きモーメントテンソル M_{pq} の独立な 6 個の成分を決定するため、6 箇所以上の検出点が必要となる。

SiGMA 解析では、AE 波の到達時間と AE 波の初動振幅値の 2 つのパラメータを用いて、AE 発生源の位置標定を行い、ひび割れの種類や運動方向を決定する。AE 発生源の x' の位置標定は、各検出点 x_i での AE 波の到達時間差 t_i と弾性波速度 v_p 、検出点間距離 $R_i (i=1 \sim n-1)$ を用いて式(4)を解くことによって算出される。

$$R_i - R_{i+1} = |x_i - x'| - |x_{i+1} - x'| = v_p t_i \quad (4)$$

これにより、AE 発生源の位置を求め、ひび割れの種類は、引張り型ひび割れ (Tensile Crack)、混合型ひび割れ (Mixed-mode Crack)、せん断型ひび割れ (Shear Crack) に識別される。従来の SiGMA 解析では、AE 波の初動部を手作業で読み取る必要があったが、最近になり AE 波の初動部を自動読み取りする手法が開発されている¹²⁾。本研究では、この自動読み取り手法を用いて解析を行う。

3. 実験概要

鉄筋コンクリート供試体は図-4 に示すように、 $100 \times 75 \times 400 \text{ mm}$ の角柱で、鉄筋は SD295A-D13 を使用し、かぶり厚は 20 mm とした。また、鉄筋のはつり出しを行うために、同様の供試体を 3 個作製した。コンクリートの

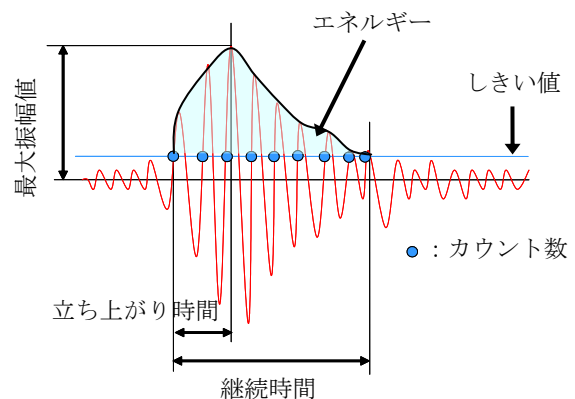


図-3 AE パラメータ

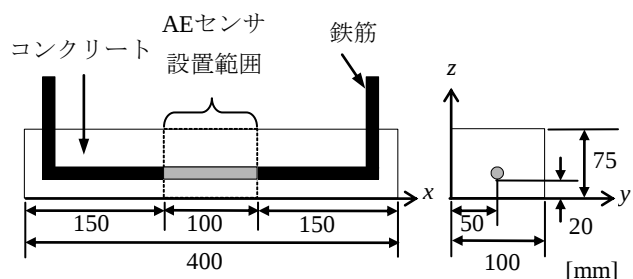


図-4 実験供試体

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (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 減水剤 A
10	8	55	5	44.6	187	340	751	1113	1.632

配合は表－1 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、塩化物イオンの浸透を底面に限定した。さらに、中央 100mm 以外の鉄筋にもエポキシ樹脂を塗布し、7 日間毎に浸漬乾燥繰り返し実験を行った。また、実験前の鉄筋位置の全 Cl 濃度は 0.175kg/m^3 であった。実験中には、図－5、表－2 に示すように 6 個の AE センサを供試体表面に設置し、自然電位計測時以外は連続的に AE モニタリングを実施した。なお、鉄筋腐食過程における AE 発生源の位置標定結果の大半が、AE センサで囲まれた範囲内から得られたことより¹³⁾、供試体中央 100 mm 四方の上面と側面に AE センサを配置した。実験では、AE センサは R-15 (共振周波数 150 kHz, PAC 社製), AE 計測装置には DiSP (PAC 社製) を使用した。また、AE 計測の周波数帯域は 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 とした。

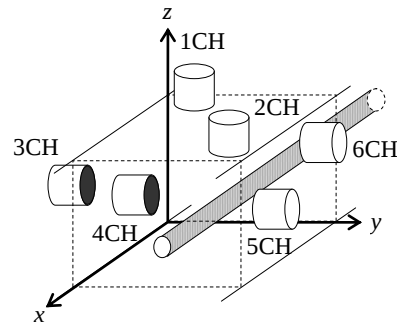
4. 実験結果

4.1 AE 発生挙動

図－6 に、1 時間毎の 6 個の AE センサ全ての累積 AE ヒット数と AE イベント数の関係を示す。本実験での AE イベント数とは、1 つの AE 現象に対して、6 個の AE センサ全てで検出された個数としている。このとき、AE イベントを定義するためのイベント定義時間 EDT(Event Definition Time) は $100\mu\text{s}$ とした。なお、EDT は、実験供試体の P 波速度 (4031m/s) および実験供試体の長さ (400mm) を考慮して決定した。図－6 より、実験開始後 28 日目および 70 日目に AE イベント数の増加が確認された。その後、126 日目を経過した頃から、AE ヒット数と AE イベント数の顕著な増加が確認された。図－2 に示した Melchers らの鉄筋腐食過程の報告を参考に、鉄筋表面に腐食が発生する phase1 を 28 日目、鉄筋に腐食が進行し、その膨張圧によりコンクリートのひび割れが生じる phase3 を 126 日目以降と評価した。これらの結果より、実験開始から 126 日目までは鉄筋での腐食生成物の発生による影響を受けた AE が発生し、126 日目以降は、その膨張圧によるコンクリートのひび割れによる AE が主として検出されたと考えた。

4.2 AE パラメータ解析結果

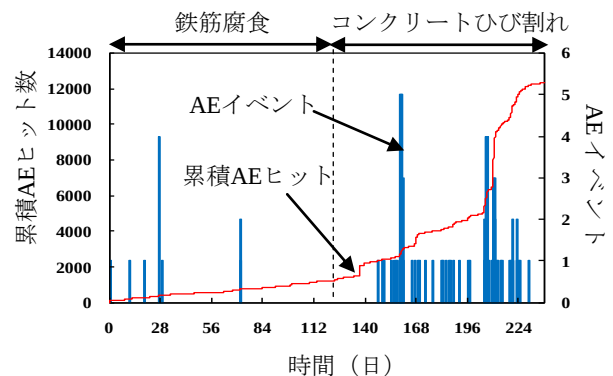
図－7 に、RA 値と平均周波数の関係を示す。ただし、AE エネルギーが 0, AE カウント数が 1 となる AE データを削除して、残された AE データを対象とし、100 個の AE ヒットデータを母数として移動平均値を算出した。28 日目および 70 日目になると、RA 値の増加および平均周波数の減少が確認された。これらの時期は、鉄筋の腐食生成物による影響が考えられることから、浸漬乾燥繰り返し実験でも、既往の研究¹⁰⁾との一致が確認された。ま



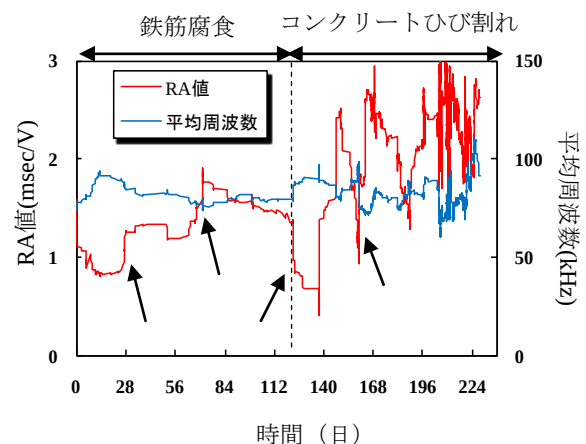
図－5 AE センサ配置

表－2 AE センサの座標

	x(m)	y(m)	z(m)
1CH	0.010	0.030	0.075
2CH	0.100	0.070	0.075
3CH	0.090	0.000	0.045
4CH	0.020	0.000	0.030
5CH	0.095	0.100	0.033
6CH	0.010	0.100	0.055

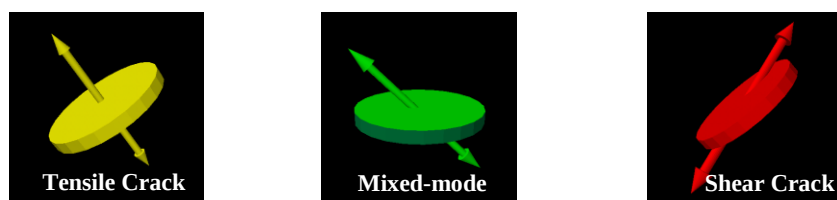


図－6 累積 AE ヒット数と AE イベント数

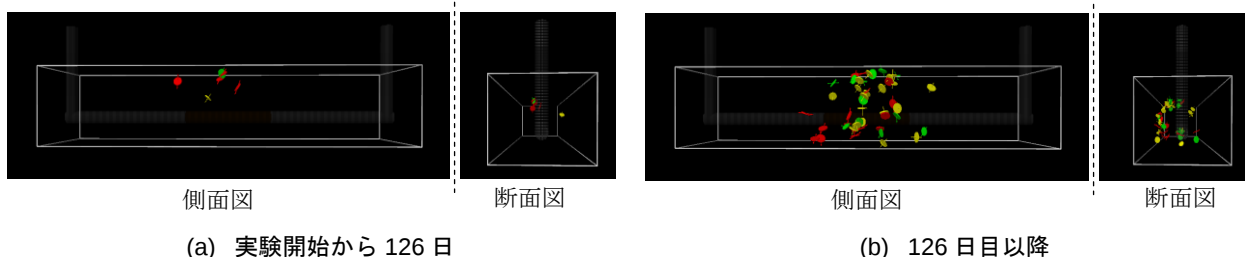


図－7 RA 値と平均周波数の移動平均値の関係

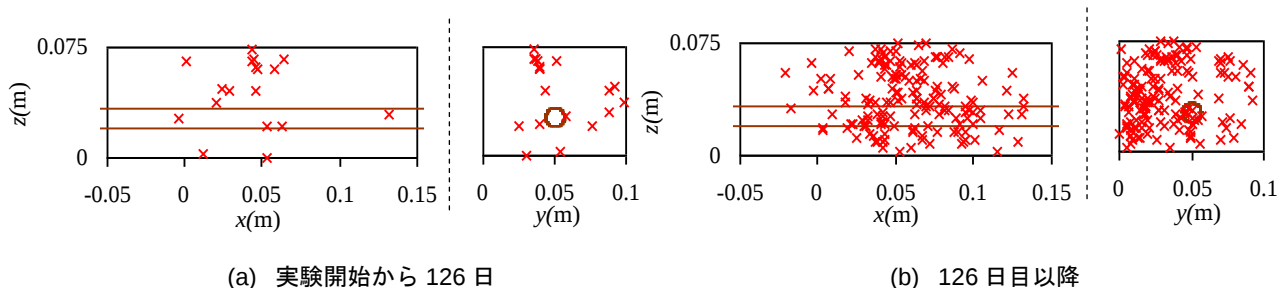
た、126 日目を経過した直後に、RA 値の減少および平均周波数の増加が確認された。なお、126 日目以降でも RA 値の増加および平均周波数の減少時期が確認されてい



図－8 SiGMA 解析に用いたクラックモデル



図－9 SiGMA 解析結果



図－10 位置標定結果

ることから、ここでも鉄筋腐食が進行していると推測される。これらの結果により、鉄筋の腐食生成物発生過程では、RA 値の増加および平均周波数の減少が確認され、その膨張圧によるコンクリートのひび割れが卓越する時期には、RA 値の減少および平均周波数の増加が確認された。なお、126 日目を経過した直後には、図－6 では AE イベントは確認されなかった。これは、位置標定可能な大きな AE が検出されなかったため、AE パラメータ解析を行えば、早期にコンクリートのひび割れ発生時期を判断できる可能性が示された。

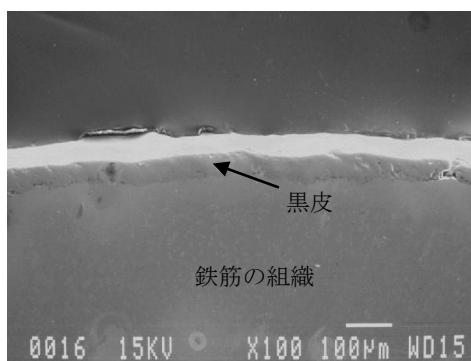
4.3 SiGMA 解析結果

実験により得られた AE 波形より SiGMA 解析を行い、AE 発生源の 3 次元の位置標定およびひび割れ識別を行った。SiGMA 解析において、P 波速度は 4031m/s、ポアソン比は 0.2 として、解析には AE イベントのみを使用した。図－8 に SiGMA 解析に用いたクラックモデルを示す。解析では、全 146 個の AE イベント中、55 個の AE イベントが同定された。鉄筋の腐食生成物発生時期には 6 個、その膨張圧によるコンクリートのひび割れ時期には 49 個が検出された。

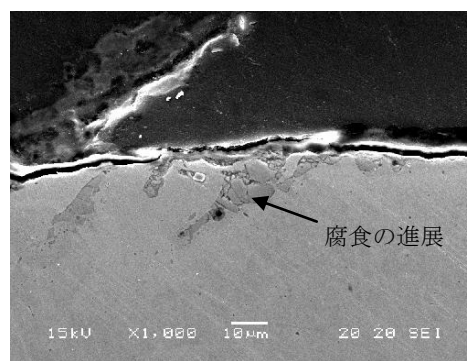
それぞれの SiGMA 解析結果を図－9 に示す。鉄筋の腐食生成物発生時期では、AE イベント数も少なく、ほ

とんどの AE イベントが供試体上部に同定された。これは、鉄筋の腐食生成物発生時期は、微小な規模の AE 現象が多いためと考えられる。また、鉄筋の腐食生成物発生時期では、せん断型ひび割れが多く検出された。膨張圧によるコンクリートのひび割れ時期では、多くの AE イベントが鉄筋付近に同定され、146 日目には鉄筋から供試体底面に向かって位置標定された。このことから、鉄筋腐食の膨張圧に伴うひび割れの進展を位置標定できる可能性が明らかとなった。また、200 日目頃に供試体底面に錆汁が付着していたことから、SiGMA 解析によりコンクリート内部のひび割れが目視によりコンクリート表面に確認される前に予測できる可能性が確認された。膨張圧によるコンクリートのひび割れと予測される時期では、引張型ひび割れが検出された後、供試体左側でせん断型ひび割れの卓越が確認された。

このように、SiGMA 解析によって、ひび割れ機構の同定を行えた事象が数少なかったため、AE イベントを 6 個の AE センサ中 5 個で検出された個数として Location 解析を行った。Location 解析は、AE 発生源の位置標定を行うが、SiGMA 解析のようなひび割れ識別は検出することができない。P 波速度は同じく 4031m/s、ポアソン比は 0.2 とした。Location 解析では、全 493 個の AE イベント



(a) 実験開始から 28 日後



(b) 実験開始から 70 日後

図-11 SEM 画像

ト中、180 個の AE イベントが同定された。鉄筋の腐食生成物発生の時期には 19 個、膨張圧によるコンクリートのひび割れ時期には 161 個発生した。

それぞれの位置標定結果を図-10 に示す。鉄筋の腐食生成物発生の時期では、鉄筋に位置標定されていることが確認される。鉄筋位置に標定された時期は 28 日であり、これは図-7 に示す RA 値と平均周波数の関係に一致している。したがって、この時期に鉄筋表面に腐食生成物が形成された可能性が示された。また、SIGMA 解析では位置標定されなかった鉄筋の腐食生成物発生の際の微小な AE 現象が、Location 解析により早期に評価できる可能性が示された。その後、膨張圧によるコンクリートのひび割れ時期では、鉄筋表面および鉄筋内部に AE 発生源が標定された後、供試体左側に AE 発生源が多く標定された。これらから、コンクリート中のひび割れは、供試体左側に進展している可能性が明らかとなった。160 日目頃に AE 発生源が鉄筋内部および鉄筋付近に位置標定された。これらの結果は、図-6 に示す 160 日目頃の AE イベントの急激な増加および図-7 に示す 160 日目頃の RA 値の急激な減少および平均周波数の増加が確認されている時期と一致しており、鉄筋内部にクラックが発生することにより、腐食進度の増加が推測される。このように AE パラメータ解析および Location 解析を行うことで、コンクリートの腐食ひび割れ発生を早期に判断できる可能性が示された。

4.4 SEM による結果

実験開始から 28 日目と 70 日目終了後に供試体中から鉄筋をはつり出し、鉄筋表面の腐食の状況を目視により観察した。その結果、28 日目と 70 日目で目視による腐食生成物は確認できなかったが、28 日目では、鉄筋表面の黒皮が剥離しているのが確認された。浸透面側とその反対側では、腐食による黒皮の剥離の程度に大きな差が確認された。70 日目では、鉄筋表面の黒皮がほとんど剥離しているのが確認されが、浸透面側とその反対側では、

28 日目と同様に腐食による黒皮の剥離の程度に大きな差が確認された。

その後、これらの鉄筋を走査型電子顕微鏡（日本電子製 JSM-5600）により観察した。図-11(a)に 28 日終了後、図-11(b)に 70 日終了後の鉄筋断面の画像を示す。42 日終了後では、鉄筋表面に通常形成されている黒皮が剥離していることが確認されたが、図-11(a)に示されているように、鉄筋表面に黒皮が残っており、鉄筋内部への腐食の進行は確認されなかった。70 日終了後では、鉄筋表面の黒皮がほとんど剥離していることが確認され、さらに、図-11(b)に示されているように、鉄筋内部に腐食の進行が確認された。

これらの結果と図-7 を比較すると、黒皮の剥離が確認された 28 日目に、RA 値の増加および平均周波数の減少が確認されており、さらに、図-10 では鉄筋の表面付近に AE 発生源が位置標定されている。同様に、70 日目でも RA 値の増加および平均周波数の減少が確認されており、AE 発生源の位置標定も鉄筋付近に標定されている。したがって、AE パラメータ解析および位置標定を行うことで、浸漬乾燥繰返しの微小な AE 現象による鉄筋の腐食生成物発生の際の破壊過程を評価できる可能性が明らかとなった。

5. まとめ

塩害による鉄筋コンクリートの鉄筋腐食の劣化進行過程を評価するために、実環境を考慮した浸漬乾燥繰返し実験を行った。本研究では、鉄筋の中心部 100mm に腐食の発生を限定することで、より詳細な腐食過程のモニタリングを検討した。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- (1) AE モニタリングを適用することにより、塩害による鉄筋の腐食開始時期およびその膨張圧によるコンクリート中のひび割れ開始時期を早期に判定できる可能性が示された。

- (2) 浸漬乾燥繰返し実験では、3つの AE ヒット数と AE イベント数の増加が確認され、これらの挙動と Melchers らによる鉄筋腐食過程の報告との一致が明らかとなった。
- (3) AE パラメータ解析結果により、鉄筋の腐食生成物発生の時期には RA 値が大きく平均周波数が小さくなり、その膨張圧によるコンクリートのひび割れ時期には RA 値が小さく平均周波数が大きくなる可能性が示された。さらに、AE パラメータ解析を行うことで、鉄筋の腐食生成物発生の時期およびその膨張圧によるコンクリートのひび割れ時期を早期に評価できる可能性が示された。
- (4) 浸漬乾燥繰返し実験の微小な AE 現象による破壊メカニズムを把握するために、SiGMA 解析が有効であることが明らかとなった。さらに、ひび割れが目視によりコンクリート表面に確認される前に SiGMA 解析により予測できる可能性が示された。また、腐食生成物の膨張圧によるコンクリートのひび割れが発生していると予測される時期では、引張り型ひび割れが発生し、その後せん断型ひび割れが卓越することが確認された。
- (5) SiGMA 解析では捉えることのできなかった、鉄筋の腐食生成物発生の時期の非常に微小な AE 現象を、Location 解析を行うことで、早期に評価できる可能性が明らかとなった。
- (6) 走査型電子顕微鏡(SEM)の画像により、目視では判断できない鉄筋腐食の状況が確認され、それらの結果は AE 発生挙動および AE パラメータ解析結果、さらに位置標定結果と一致しており、SEM の有意性が示された。

以上の結果より、これまでは不確実性が危惧されていた電気化学的な手法に、AE 法を加えることで、より精度の高い鉄筋腐食の判定が早期に実現可能であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 大即信明：塩害 (2)、技報堂出版, pp.120-121, 1991
- 2) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」、pp.97-100, 2001
- 3) 武若耕司, 丸屋剛, 下村匠, 山口明伸, 竹田宣典：コンクリート工学, Vol.47, No. 11, pp.23-32, 2009.11
- 4) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書「施工編」、pp.24-28, 2002
- 5) 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, pp.108-123, 2006.3
- 6) Melchers, R. E. and Li, C. Q.: Phenomenological Modeling of Reinforcement Corrosion in Marine Environments, ACI Materials Journal, Vol.103, No.1, pp.344-347, May./June. 2007
- 7) 友田祐一, 木嶋政智, 森香奈子, 大津政康：非破壊検査法によるコンクリート中の鉄筋腐食に関する評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.763-768, 2007
- 8) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久：AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol.42, No.10, pp.570-575, 1993
- 9) 日本建材産業協会規格：2003 年制定アコースティック・エミッション法によるコンクリートひび割れ監視方法, pp.23-28, 2003
- 10) Masayasu Ohtsu and Yuichi Tomoda,: Phenomenological Model of Corrosion Process in Reinforced Concrete Identified by Acoustic Emission, ACI Materials Journal, Vol.105, No.2, pp.194-199, 2008
- 11) M. Ohtsu and K. Ono,: A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Functions in a Half Space, Journal of AE, Vol.3, No.1, pp.124-133, 1984
- 12) 大野健太郎, 下園晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康：AE 波初動部の自動読み取り開発による SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, Vol.57, No.11, pp.531-536, 2008
- 13) 川崎佑磨, 森香奈子, 友田祐一, 大津政康：AE 法による乾湿繰返し下の鉄筋コンクリート腐食過程のモニタリング, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, No.9, pp.1-8, 2009