

論文 AE 法を用いた鉄筋腐食の膨張圧によるひび割れ進展機構の考察

森 香奈子*1・友田 祐一*2・大津 政康*3

要旨: コンクリート構造物の塩害による劣化被害は重大な問題であり、早期の対処が必要となる。そこで本研究では、鉄筋腐食に伴う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 モニタリングを実施し、AE 発生挙動による評価と得られた AE 波形への SiGMA 解析の適用を行った。その結果、鉄筋腐食とコンクリート中のひび割れ発生に伴う AE 現象が確認され、SiGMA 解析によりコンクリート中のひび割れの位置標定およびひび割れ識別の可能性が示された。また、Ib-value 解析によるひび割れ規模の推定の有意性も確認された。

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, Ib-value

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てきた。その中で、鉄筋コンクリートは塩害による劣化によって、鉄筋腐食を伴い構造物の性能が低下するという問題がある。本来、鉄筋コンクリートは、アルカリ性のコンクリートによって鉄筋表面に不動態皮膜が形成されるため、鉄筋の腐食を防ぐ効果がある。しかし、コンクリート中に塩化物イオン (Cl⁻) 等が進入し、鉄筋表面に到達すると不動態皮膜が破壊され、鉄筋腐食が開始する。

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」¹⁾において、図-1 のように示されている。これによれば、劣化進行過程の主要因として潜伏期は Cl⁻濃度、進展期以降は鋼材の腐食速度が期間を決定することになる。しかし、鋼材の腐食発生限界 Cl⁻濃度の値は構造物の設置環境条件や鋼材腐食許容量などの条件によって異なることから²⁾、Cl⁻濃度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考えられている。また、腐食の可能性や腐食速度を評価する一般的な手法は、電気化学的手法の自然電位法や分極抵抗法であるが、これらの結果のみで補修・補強を決定するのは難しいとされている³⁾。そこで、コンクリート構造物の維持管理を行うために、劣化の初期段階を評価できる非破壊検査手法の開発が必要であると考えられる。

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 (以下、AE と表記) 法を適用することにより、コンクリート中の鉄筋腐食に伴う AE 現象の検出が可能であり、その過程で 2 つの活発な AE 発生時

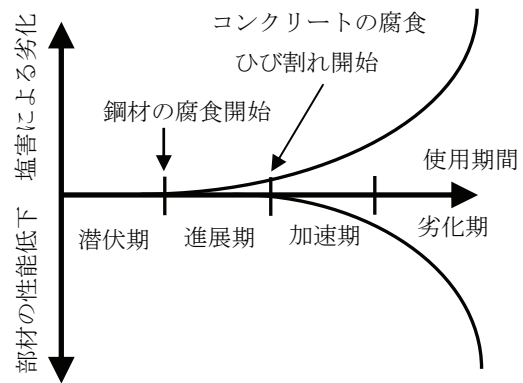


図-1 塩害による鉄筋コンクリートの劣化進行過程

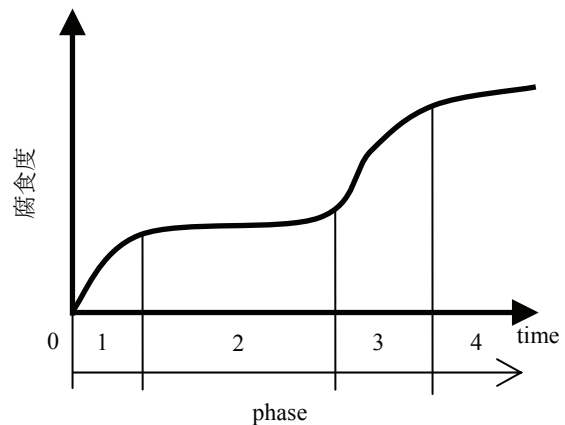


図-2 鉄筋腐食過程

期が確認できること、さらに特徴的な AE 発生後に、目視では判断できないほどの早期の鉄筋腐食が確認されることが報告されている⁴⁾。ところで、Melchers らの

*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)

報告によると、鉄筋腐食過程は図-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⁵⁾。図-2 は、phase1 と phase3 の 2 つの段階で腐食が激しく進行することを示しており、このことは上述の AE 法による実験結果との一致が確認されている⁶⁾。

そこで、本研究では、鋼材腐食の促進実験として電食実験中に AE 法を適用し、鉄筋コンクリートの劣化進行過程のモニタリングを実施した。その後、AE 発生挙動と鉄筋腐食発生およびコンクリートひび割れ発生時期を比較した。そして、AE 波形解析手法の SiGMA (Simplified Green's functions for Moment tensor Analysis) 解析⁷⁾を適用し、AE 発生源の位置標定やひび割れ識別を行い、*Ib*-value⁸⁾によるひび割れの規模との関係についても検討した。

2. 解析理論

2.1 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⁹⁾。

$$A(x) = C_s \cdot \frac{\text{Ref}(t, \gamma)}{R} \cdot \gamma_p \gamma_q M_{pq} \cdot DA \quad (1)$$

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 センサ設置点での反射を考慮するための検出点への入射角を考慮した反射係数である。また、 M_{pq} は AE 波の発生源となったひび割れの種類や運動方向に関する情報を持ったモーメントテンソルである。モーメントテンソル M_{pq} は 2 階の対称テンソルであることから、式(1)を解き独立な 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 x' の位置標定は、各検出点 x_i での AE 波の到達時間の差 t_i と弾性波速度 v_p 、検出点間距離 $R_i (i=1 \sim n-1)$ を用いて次式を解くことによって得られる。

$$R_i - R_{i+1} = |x_i - x'| - |x_{i+1} - x'| = v_p t_i \quad (2)$$

これにより、AE 発生源の位置を求め、次に各検出点で観測された AE 波の初動振幅値を式(1)の左辺 $A(x)$ に代入することで、モーメントテンソルの固有値解析よりひび割れの種類や運動方向が決定できる。ひび割れの種類は、引張型ひび割れ (Tensile crack)、混合型ひび割れ (Mixed-mode)、せん断型ひび割れ (Shear crack) に識別される。

2.2 AE振幅分布

AE の発生総数 N と最大振幅 a を両対数でプロットすれば、AE 振幅分布を次式で表現できる¹⁰⁾。

$$\log N = \alpha - b \log a \quad (3)$$

ここで、 α 、 b は定数。

式(3)で、傾きは $-b$ と負で表されることより、 b 値が小さいならば規模の大きな現象の多い破壊過程、逆に b 値が大きければ規模の小さな現象の多い破壊過程を示していることになる。

AE 振幅分布を b 値のようなパラメータを用いて数値的に表現する場合には、式(3)のように一つの直線で近似されることが前提となる。そこで、 b 値決定の振幅分布範囲を、得られた AE データを元に算出した平均値 μ と標準偏差 σ を用いて決定することにより、一意的に b 値を次式から求める「改良 b 値 (*Ib*-value)」が提案されている⁸⁾。

$$Ib = \frac{\log_{10} N(w_1) - \log_{10} N(w_2)}{(a_1 + a_2)\sigma} \quad (3)$$

ここで、 $N(w_1)$ は振幅 $\mu + a_1 \sigma$ 以上の AE 累積数、 $N(w_2)$ は振幅 $\mu - a_2 \sigma$ 以上の AE 累積数であり、 $(a_1 + a_2)\sigma$ は振幅の範囲を表している。なお、平均値と標準偏差を算出するための AE データ数を 100 とし、 $a_1 = 1.0$ 、 $a_2 = 0$ として *Ib*-value を求めた。

3. 実験概要

本実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-3 に示すように $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱で、鉄筋は SD295-D13 を使用し、かぶりは 45 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、Cl⁻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、電食実験を行った。そして、供試体表面にひび割れが目視により確認できた後に実験終了とした。電食実験装置は図-4 に示すように、水槽の底の銅板上に供試体を置き、鉄筋を陽極、銅板を陰極として 40 mA の電流を通電した。

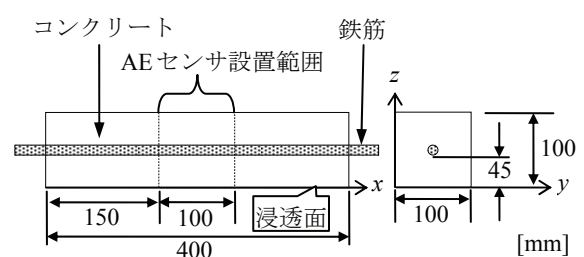


図-3 実験供試体

表-1 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	8	55	6	41.8	180	327	704	1170	0.098

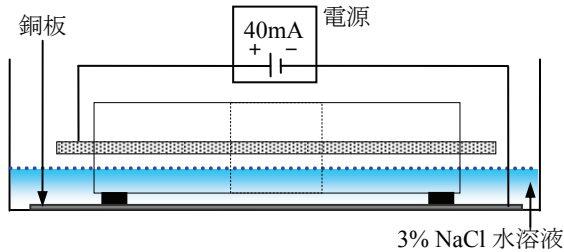


図-4 電食実験装置

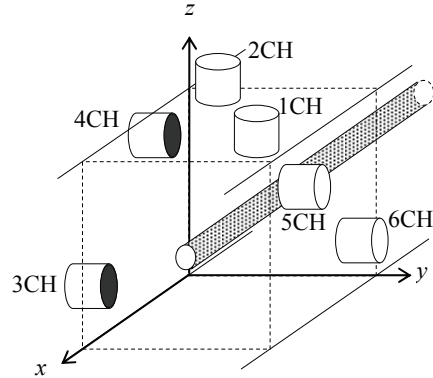


図-5 AE センサ配置

電食実験中には、図-5、表-2のように6個のAEセンサを供試体表面に設置し、自然電位計測時を除いて連続的にAEモニタリングを実施した。ただし、自然電位計測の結果については既に発表済みであるため¹¹⁾、本論文中には記載しない。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ることより⁶⁾、供試体中央100mm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150kHz、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。

表-2 AE センサの座標

	x (m)	y (m)	z (m)
1CH	0.090	0.090	0.100
2CH	0.010	0.030	0.100
3CH	0.085	0.000	0.033
4CH	0.030	0.000	0.085
5CH	0.090	0.100	0.075
6CH	0.020	0.100	0.033

4. 実験結果

図-6に、1時間ごとの、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。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である。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30μsとした。図-6より、通電開始後47時間から70時間までに、1回目のAEヒットの頻発が確認された。そして、190時間から233時間までに2回目のAEヒットの頻発が、250時間経過以降はAEイベントの頻発が確認された。299時間経過時には、図-7に示すように供試体の浸透面に錆汁と小さなひび割れが目視により確認され、その後、供試体軸方向に大きなひび割れが確認されたことより345時間経過時に実験終了とした。AEヒットとAEイベントの発生傾向から、通電開始から70時間までをstage1、70時間から190時間までをstage2、190時間から250時間までをstage3、そして250時間以降をstage4とする。

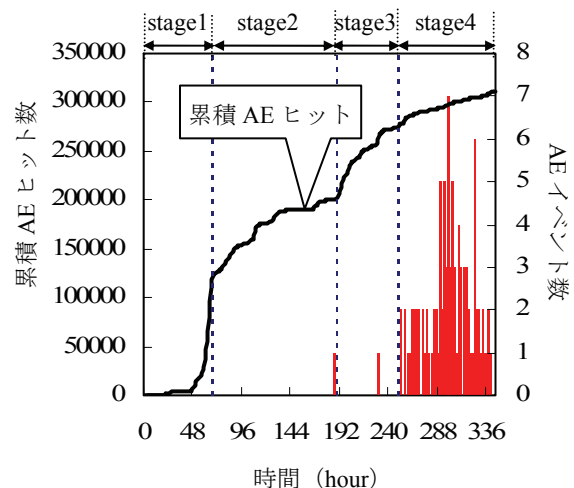


図-6 累積AEヒット数とAEイベント数

累積AEヒット数の発生挙動は、図-2に示したMelchersらの鉄筋腐食過程の報告とよく一致しており、図-6のstage1からstage4が図-2のphase1からphase4

にそれぞれ該当すると考えられる。すなわち、stage1 から stage3 までは鉄筋腐食に伴い AE が発生し、stage4 では鉄筋腐食の膨張圧によりコンクリート中にひび割れが進展することによって AE が発生したと考えられる。stage1 終了後にはつり出した鉄筋は、目視による観察では腐食が確認できなかったが、走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察では鉄筋表面の黒皮の剥離が確認できた。また、AE 計測の結果と図-1 の劣化進行過程を比較した場合、stage1 が潜伏期、stage2 と stage3 が進展期、そして stage4 が加速期に該当すると今回の実験では判断した。

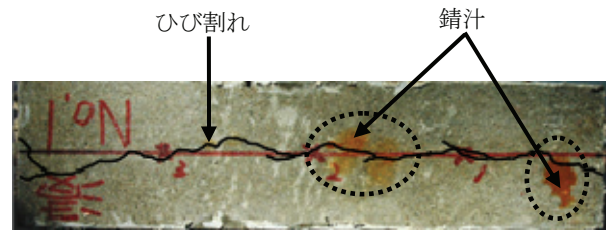


図-7 実験終了時の供試体（浸透面側）

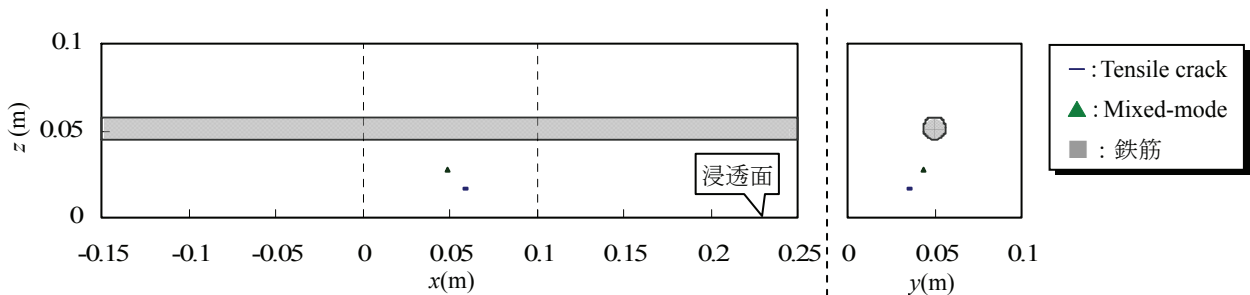


図-8 SiGMA 解析結果 (stage2, stage3)

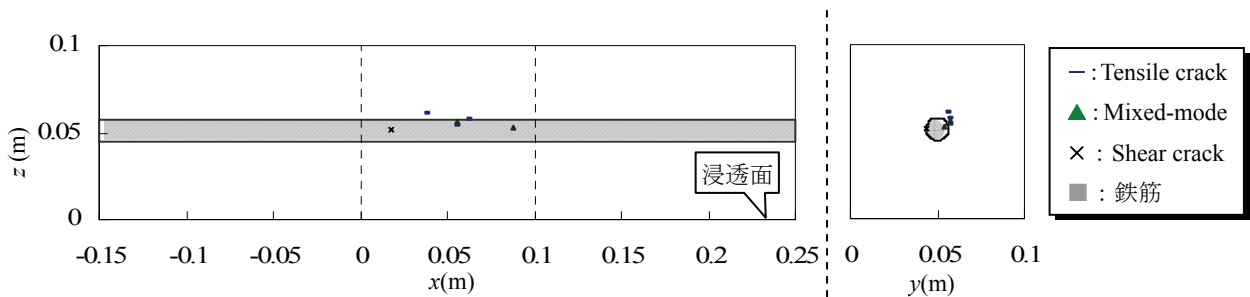


図-9 SiGMA 解析結果 (250-263 時間)

5. 解析結果

実験により得られた AE 波形に SiGMA 解析を行い、AE 発生源の 3 次元位置標定とひび割れ識別を行った。このとき検出波形の初動部読み取りには、AE 波形初動部の自動読み取り手法¹²⁾を適用した。SiGMA 解析において、縦波速度は 4223km/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。

解析では全 123 個の AE イベント中、101 個の AE イベントが位置標定できた。この 101 個の AE イベントは、stage1 では 0 個、stage2 と stage3 でそれぞれ 1 個、stage4 で 99 個発生した。stage2 と stage3 の位置標定結果を図-8 に示す。ここでひび割れ識別は、stage2 で混合型、stage3 で引張型が発生した。stage1 では AE イベントが発生せず、stage2 と stage3 でも少なかったことより、コンクリート中に鉄筋腐食の膨張圧によるひび割れが発生

する前の鉄筋腐食過程では、微小な規模の AE が多いためイベント数が検出できないことが確認できた。また、位置標定可能な 2 つの AE 発生源も鉄筋から離れた位置に標定されており、標定される位置も信頼性が低いことが明らかとなった。

stage4 の初期に該当する 250 時間から 263 時間までの SiGMA 解析結果を図-9 に示す。この図に示した時間帯は、コンクリートの腐食ひび割れが開始する時期と推測される。実際に鉄筋周辺に AE 発生源が標定されている。

stage4 全体の位置標定結果を図-10 に示す。stage4 では、鉄筋周辺を始め、浸透面方向にも AE 発生源が確認された。このことから、鉄筋腐食の膨張圧に伴うひび割れ進展を位置標定できる可能性が明らかとなった。

AE イベントの *Ib*-value 解析結果を図-11 に示す。290 時間から 300 時間までに *Ib*-value が低下していることが確認できた。したがって、この時期に規模の大きな破壊

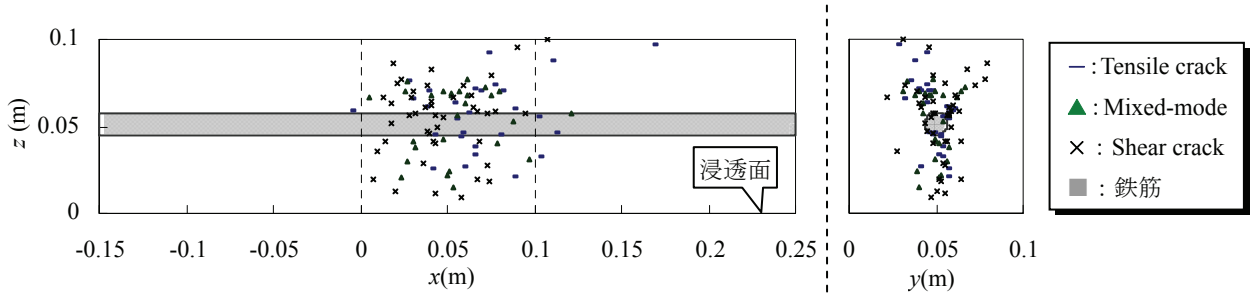


図-10 SiGMA 解析結果 (stage4)

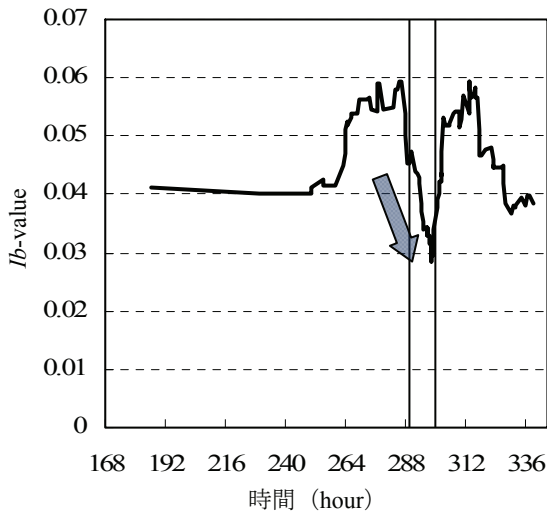


図-11 AE イベントの /b-value

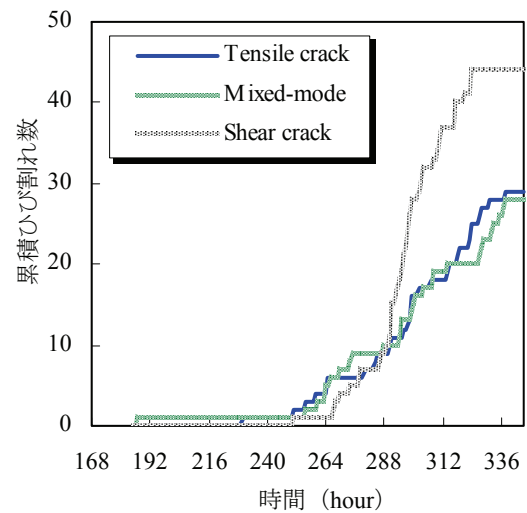


図-13 種類別の累積ひび割れ数

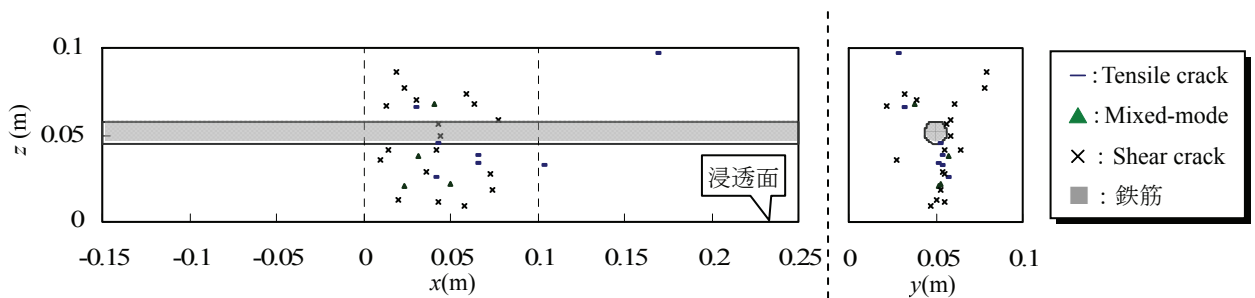


図-12 SiGMA 解析結果 (290-300 時間)

が発生したと考えられる。そこで、290 時間から 300 時間までの SiGMA 解析結果を図-12 に示す。浸透面方向での AE 発生源が顕著であることが確認できた。さらに、299 時間経過時には錆汁や小さなひび割れが供試体表面から目視により確認できたことより、299 時間以前にコンクリート内部にひび割れが進展していたと推測できる。これらの結果より、 I_b -value の低下がひび割れの規模を推定するのに有効であり、さらに SiGMA 解析により表面には顕在化していないコンクリート内部のひび割れを予測できる可能性が明らかとなった。

SiGMA 解析による 1 時間ごとのひび割れ識別結果を図-13 に示す。AE イベント発生初期には、引張り型と混合型ひび割れが増加し、コンクリート表面にひび割れが見られるようになる 299 時間ごろには、せん断型ひび割れが増加していることが確認できた。したがって、鉄筋腐食の膨張圧によるひび割れ発生初期では、引張り型と混合型ひび割れが発生し、その後微小ひび割れを繋ぐように大きなひび割れが形成されるときには、せん断型ひび割れが発生することが明らかとなった。

6. まとめ

本研究の結論を以下に示す。

- (1) AE モニタリングを適用することにより、塩害による鉄筋腐食開始時期、コンクリート中の鉄筋腐食によるひび割れ開始時期を評価できる可能性が示された。
- (2) SiGMA 解析を適用することにより、鉄筋腐食によるコンクリート中のひび割れ進行過程について位置標定できる可能性が示された。
- (3) SiGMA 解析結果より、コンクリート中のひび割れ発生初期では引張型と混合型ひび割れが発生し、その後せん断型ひび割れが増加することが確認された。
- (4) コンクリート表面にひび割れが顕在化する直前に、*Ib*-value が低下することが明らかとなった。

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) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 塩谷智基：地盤内破壊評価法へのアコースティック・エミッションの適用に関する研究，熊本大学学位論文，1998.3
- 9) 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
- 10) 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.24,38-40，2005
- 11) 森香奈子，木嶋政智，友田祐一，大津政康：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.1137-1142，2008
- 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