

論文 鉄筋コンクリート腐食過程のハイブリッド非破壊評価

北浦 美涼^{*1}・川崎 佑磨^{*2}・友田 祐一^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨：コンクリート構造物はメンテナンスフリーであると考えられていたため、多くの構造物に使用されてきた。しかし近年、コンクリート構造物の劣化被害が問題視されている。特にコンクリート中の鉄筋腐食による劣化が多いため、鉄筋腐食の劣化進行過程を早期に評価し適切な補修・補強を行う必要がある。本研究では、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）法と電気化学的手法を併用し、鉄筋コンクリートスラブ供試体の腐食過程の早期評価を試みた。その結果、腐食過程に伴う AE の発生と電気化学的評価とを併用することで、鉄筋コンクリートの腐食過程を高精度で評価できる可能性が示された。

キーワード：アコースティック・エミッション、鉄筋腐食、劣化進行過程、自然電位、分極抵抗

1. はじめに

近年、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いる¹⁾。その原因の一つとして、塩化物イオンの浸入等によるコンクリート中の鉄筋腐食が引き起こされ、構造物が劣化する。現在まで、鉄筋腐食の有無の評価は、目視や電気化学的手法、およびコンクリート中の塩化物イオン濃度などが非破壊検査法に利用されている。しかし、目視での評価は検査員の主観に影響され、客観的で精度の高い記録として残すのは困難である。また、電気化学的手法である自然電位法および分極抵抗法は、構造物の置かれた多種多様な環境条件等の影響を大きく受けることが判明している²⁾。塩化物イオン濃度に関しては、土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」³⁾において、塩化物イオン濃度の限界濃度が定められているが、この限界濃度の実務性については現在も検討されており⁴⁾、塩化物イオン濃度のみから鉄筋腐食の有無を確実に判断することは難しい。したがって、コンクリート中の鉄筋腐食過程を早期に確実に評価する非破壊検査法の開発が重要となっている。

近年、非破壊検査法の一つである、アコースティック・エミッション（AE）法を適用することにより、コンクリート中の鉄筋腐食に伴う AE 波が検出でき、「鉄筋の腐食開始」および「その膨張圧に伴うコンクリートのひび割れ開始」における AE 発生時期が確認されている⁵⁾。また、これまでの研究⁶⁾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 AE 法を適用し、AE 波形解析手法である SiGMA（Simplified Green's function for Moment tensor Analysis）解析⁷⁾を行うことで、AE 発生源の 3 次元位置標定やひび割れ識別の可能性を明らかにした。SiGMA 解析に用いるクラックモデル、および解析結

果⁸⁾の一例をそれぞれ図-1、図-2 に示す。この結果から、目視によりコンクリート表面でひび割れが確認される前に、コンクリート内部の微細ひび割れを位置標定できることが示された。しかし、SiGMA 解析を適用するためには、適用する対象物に対して 6 ヶ所以上の AE 検出点を必要とすることから、AE センサの設置面の確保等が課題として挙げられる。

そこで本研究では、これまで研究対象としていた鉄筋コンクリート角柱供試体ではなく、実構造物を想定した鉄筋コンクリートスラブ供試体を用いて、浸漬乾燥繰返し実験中に AE 法を適用した。AE センサの数も従来の 6 個から 2 個へ減らし、少数の AE センサから得られた AE データを用いて AE パラメータ解析を行った。これに、電気化学的手法である自然電位法および分極抵抗法の計測結果と比較することで、鉄筋の腐食開始時期の早期評価を試み、ハイブリッド非破壊試験法の実用性を検討した。



図-1 SiGMA 解析に用いるクラックモデル

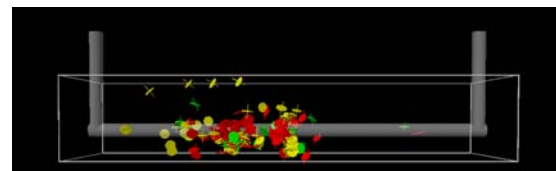


図-2 SiGMA 解析結果の一例⁸⁾

*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 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻（正会員）

*3 熊本大学 工学部技術部技術専門職員 工博（正会員）

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻教授 工博（正会員）

2. 理論

2.1 海洋環境下の塩害

Melchers らの報告によると、海洋環境下の鉄筋腐食過程は図-3 に示すように 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⁹⁾。Phase1 では酸素と水が供給されることにより鉄筋表面で腐食が発生する。Phase2 では鉄筋表面に腐食生成物が形成されることによって、酸素の供給が抑制され、腐食速度が遅くなる。その後、Phase3 では再び腐食速度が速くなり、無酸素状態で鉄筋内部に錆が形成される。Phase4 では、ある一定の速度で腐食が進行する。つまり、鉄筋腐食過程には Phase1 と Phase3 のように 2 つの腐食の加速時期があることを示している。この 2 つの腐食の加速時期については、AE 法による実験結果との一致が確認されている⁵⁾。

2.2 自然電位法²⁾

金属がその存在する環境において維持している電位のことを自然電位という。自然電位の計測方法は、コンクリート中の鉄筋とコンクリート表面上の照合電極との電位差を計測するものであり、照合電極（飽和塩化銀電極、飽和硫酸銅電極等）と電位差計から成り立つ。健全なコンクリート中は強アルカリ環境であるため、鉄筋表面には不動態皮膜が形成され防食作用が働く。この時期の電位は-100~-200mV（CSE：飽和硫酸銅電極基準）を示すが、塩化物イオンの浸入や中性化などが起こると、鉄筋が活性状態となり、その電位は卑（-）の方向へ変化する。この卑の電荷を計測するのが自然電位法であり、コンクリート構造物中の鋼材の腐食可能性について診断が可能である。また、特に高価な機器を必要とすることなく、計測も簡便に行うことができる。

一方で、自然電位法の問題点として、計測値が安定しないことや、判定基準と異なる評価がなされることが挙げられる。これは、コンクリート中の鉄筋腐食の発生する環境条件が様々であり、コンクリート自体の材料特性の相違によるものである。また、コンクリート構造物中の鉄筋の電位は、コンクリートを介して計測されるため、計測値は必ずしも鉄筋上の電位を示すとは限らない。なお、自然電位計測値における鉄筋腐食の評価基準は表-1 に示す ASTM C-876¹⁰⁾が広く用いられている。

2.3 分極抵抗法

コンクリート構造物中の鉄筋の腐食速度を評価するために用いられるのが分極抵抗法である。コンクリート表面に当てた外部電極から内部鉄筋に微弱な電流を負荷した時に生じる電流変化量から、腐食速度（腐食電流密度）と反比例の関係にある分極抵抗を求める。その原理式を式(1)に示す。

$$I_{corr} = K \cdot I / R_{ct} \quad (1)$$

ここで、 I_{corr} は腐食電流密度 (A/cm^2)、 R_{ct} は分極抵抗 (Ω

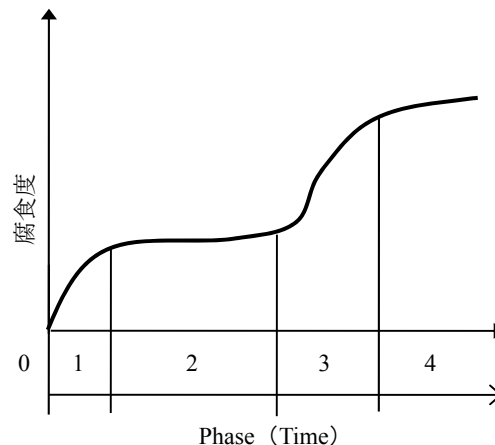


図-3 海洋環境下の鉄筋腐食過程

表-1 腐食評価基準

ASTM (米国)	
電位	腐食の確率
-200mV < E	90%以上の確率で腐食なし
-350mV < E ≤ -200mV	不確定
E ≤ -350mV	90%以上の確率で腐食あり

(mV, CSE)

表-2 腐食速度の判定基準

分極抵抗 $R_{ct}(k\Omega cm^2)$	腐食速度の判定
130 から 260 より大	不動態状態 (腐食なし)
52 以上 130 以下	低から中程度
26 以上 52 以下	中から高程度
26 未満	激しい, 高い

cm^2)、および K は金属の種類や環境条件によって異なる比例定数 (V) であり、コンクリート中の鋼材腐食に対しては 0.026V がよく用いられる¹¹⁾。

分極抵抗を求める方法は、直流法と交流法に大別される。近年、コンクリート中の鉄筋を対象とする実施例は、交流法によるものが多い。我が国では、分極抵抗による腐食速度の評価基準について自然電位法のように規格化されていない。そのため、ヨーロッパコンクリート委員会による判定基準を参考資料として表-2 より判定した¹¹⁾。なお、本研究では交流法を用いて計測を行った。

2.4 AE パラメータ解析

(1) AE パラメータ

AE とは、「固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義される¹²⁾。AE 計測により検出された AE 波形のパラメータを図-4 に示す。検出された AE 信号

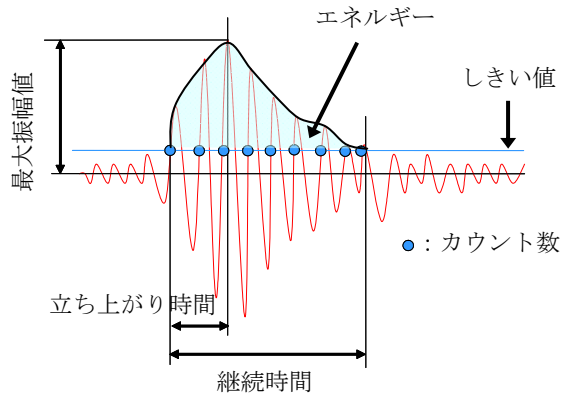


図-4 AEパラメータ

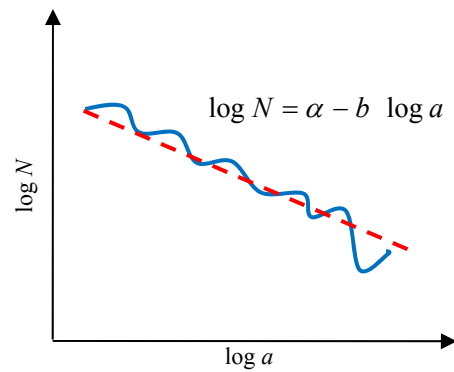


図-5 AE 振幅分布の概念図

には、発生要因に関する情報等が含まれる。

(2) Ib-value 解析

地震学の分野では、マグニチュード M とその規模以上の地震の発生総数 N との間に式(2)の関係が成立する。これは Gutenberg-Richter 式と呼ばれる¹²⁾。

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

ここで、 α 、および b は定数、 $M = \log a$ となる。

AE 現象は、発生総数 N と最大振幅値 a を図-5 に示すように両対数でプロットすれば、式(2)のように表現できる。ほぼ一直線となり、傾きが $-b$ と負であることから、振幅の大きい AE 現象の発生は少なく、振幅の小さい AE 現象の発生が多いことを意味する。そこで、AE では振幅分布から分布の統計的諸量により b 値算出の振幅範囲を決定する「改良 b 値 (Ib -value)」が提案されている¹³⁾。ここでは、式(3)のように、経時的に得られる AE データをもとに算出した平均値 μ と標準偏差 σ を用いて決定することにより一意的に Ib -value が求められる。一般的に Ib -value が急激に減少しているならば、規模の大きな AE 現象が多く発生していることを意味する。

$$Ib = \frac{\log_{10} N(w_1) - \log_{10} N(w_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (3)$$

ここで、 $N(w_1)$ は振幅 $\mu - \alpha_2\sigma$ 以上の AE 累積数、 $N(w_2)$ は振幅 $\mu + \alpha_1\sigma$ 以上の AE 累積数であり、 $(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma$ は振幅の範囲を表している。本研究では、AE 振幅分布の評価に Ib 値を用いた。このとき、 Ib -value 算出の基準となる AE データ数を 100 個とした。最小値 $(\mu - \alpha_2\sigma)$ と最大値 $(\mu + \alpha_1\sigma)$ をほぼ直線で近似できるような α_1 および α_2 の値を、それぞれ実験により得られた AE データを用いて算出した。

3. 実験概要

実験に用いた鉄筋コンクリートスラブ供試体は図-6 に示すように、 $1000 \times 570 \times 75$ mm の板状で、鉄筋は SD295-D13 を使用し、かぶり厚は 20 mm とした。また、

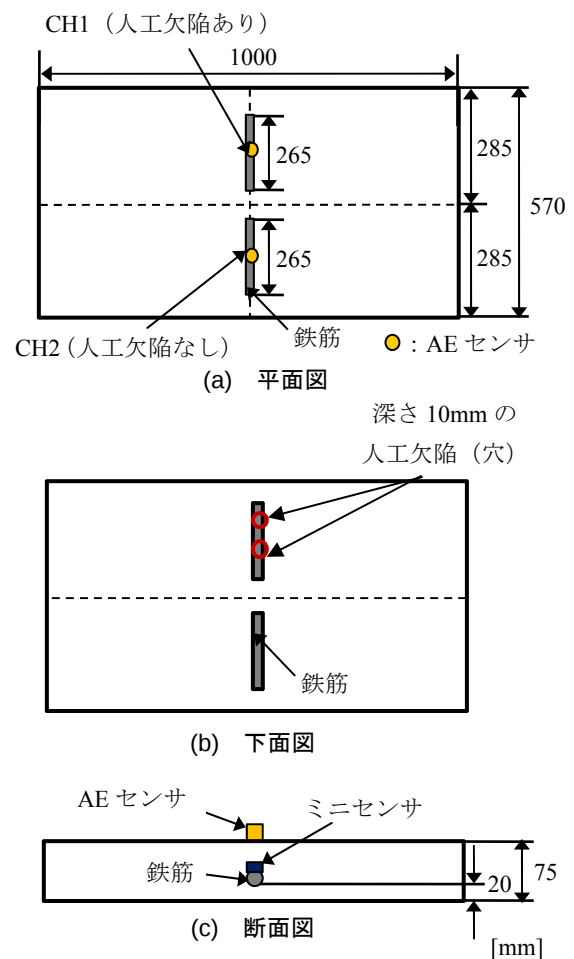


図-6 スラブ供試体図

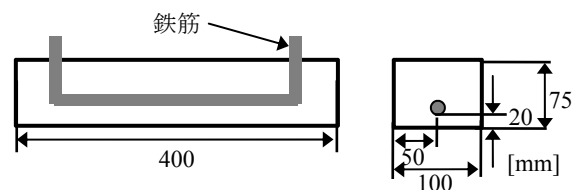


図-7 小型供試体図

AE 発生挙動により鉄筋腐食の発生が予測された時点で、鉄筋のはつり出しを行うために、図-7 に示す小型供試体を作製した。コンクリートの配合を表-3 に示す。練り混ぜ水に NaCl 水溶液を使用した結果、実験前の硬化コンクリート中の全塩化物イオン濃度は 0.325kg/m^3 であった。この全塩化物イオン濃度は土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」³⁾に記載された促進試験における鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 ($0.3\sim 0.6\text{kg/m}^3$) を考慮した。供試体は 28 日間湿潤養生後、3%NaCl 水溶液に 7 日間浸漬後 7 日間乾燥させる繰返し実験を行った。実験では、図-6(a)に示すように供試体表面に AE センサを 2 個取り付け、自然電位および分極抵抗計測時以外は継続的に AE 計測を行った。

また、腐食を促進させるため、図-6(b)に示すように供試体の片側底面 2 ヶ所に直径 10mm、深さ 10mm の人工欠陥（穴）を設けた。人工欠陥を設けた側に配置したセンサを CH1、人工欠陥を設けていない側に配置したセンサを CH2 とした。AE 計測では、AE 計測装置は DiSP（PAC 社製）、AE センサは R-15（共振周波数 150kHz、PAC 社製）を用いた。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。

また、図-6(c)に、打設時に鉄筋表面に取り付けた埋め込みミニセンサ（日本建築総合試験所製）の位置を示す。実験では、7 日間毎に自然電位計測および分極抵抗計測を供試体内部（ミニセンサ）で行った。参照電極に銀―塩化銀電極を使用し、計測後に飽和銅―硫酸銅電極

（CSE）の値に変換した。

4. 実験結果

4.1 AE 発生挙動と自然電位計測値

1 時間毎の累積 AE ヒット数と自然電位計測値の関係を図-8 に示す。図中の破線は自然電位計測値の腐食評価基準となる -350mV を表している。

実験開始から AE ヒット数の増加が CH1（人工欠陥あり）、CH2（人工欠陥なし）のどちらにおいても確認され、28 日目頃に最初の AE 頻発期が確認された。その後、AE ヒット数は緩やかに増加し、154 日目頃に 2 度目の AE 頻発期が確認された。このことから、28 日目頃に鉄筋腐食が開始し、154 日目頃にコンクリートのひび割れが開始したと推定された。

図-8(a)によると CH1 の自然電位計測値は、最初の AE 頻発期が確認された後の 35 日目頃に急激に低下し、90%以上の確率で腐食生成物が発生していると判断される -350mV を下回った。その後は、35 日目以降から実験終了まで、自然電位計測値は継続して -350mV 以下となった。

一方、図-8(b)によると CH2 の自然電位計測値は、AE 頻発期が確認された直後ではなく、56 日目頃に -350mV を下回った。その後は、56 日目以降から実験終了まで、自然電位計測値は -350mV 以下となった。

目視では、CH1 が 154 日目、CH2 が 175 日目に浸透面側で錆汁の発生を確認できた。これらの結果より、錆汁が目視で確認される前に、AE ヒット数の増加および自

表-3 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 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	NaCl
10	8	55	5	48.6	185	336	823	1019	0.210

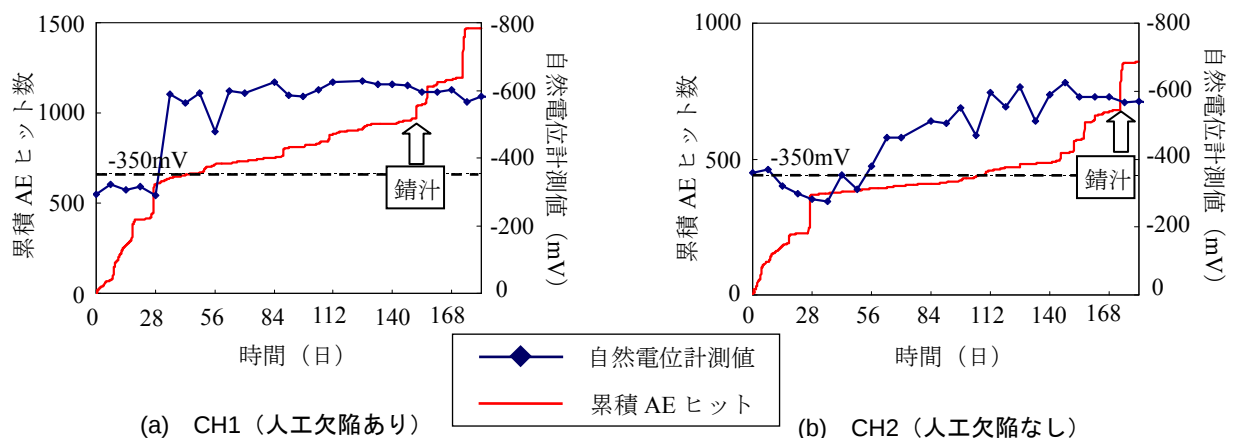


図-8 累積 AE ヒット数と自然電位計測値

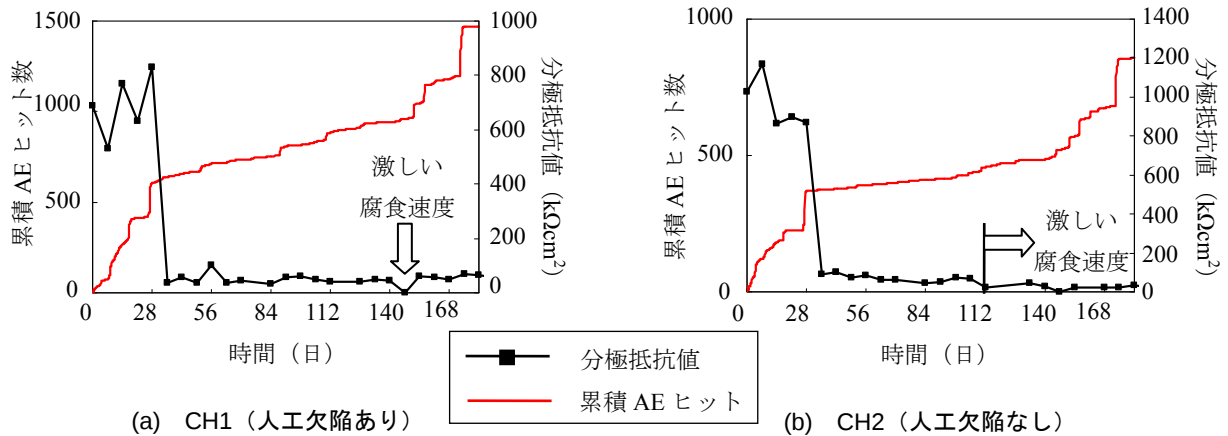


図-9 累積 AE ヒット数と分極抵抗値

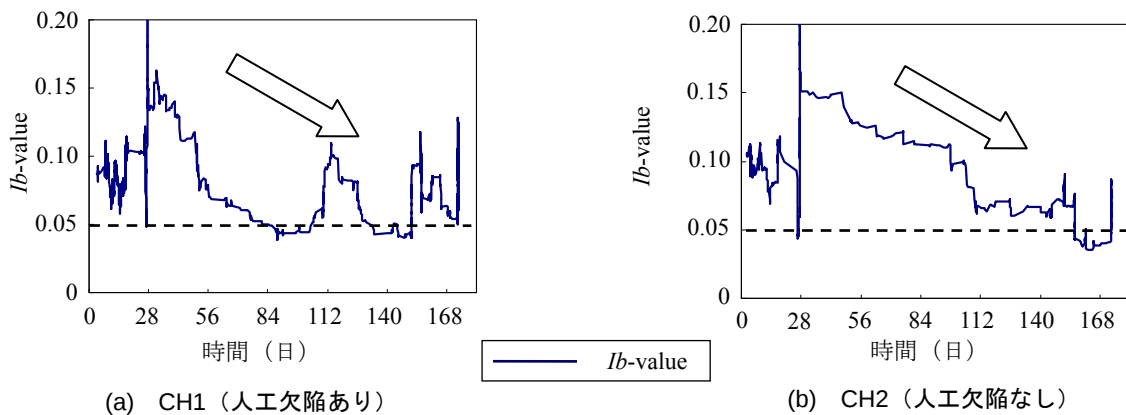


図-10 I_b -value 解析結果

然電位計測値の減少が確認されており、両者を考慮することで鉄筋腐食の発生時期を高精度で予測できる可能性が示された。

4.2 AE 発生挙動と分極抵抗値

1 時間毎の累積 AE ヒット数と分極抵抗値の関係を図-9 に示す。28 日目における CH1 の値は $831 k\Omega cm^2$ 、CH2 の値は $871 k\Omega cm^2$ であり、表-2 によれば、どちらも不動態状態であることが認められる。AE 頻発期直後の 35 日目に分極抵抗値の急激な低下が確認され、CH1 では $37.0 k\Omega cm^2$ 、CH2 では $89.4 k\Omega cm^2$ であったことから、どちらも腐食が発生し進行していると認められる。その後、分極抵抗値は変動を繰り返すが、不動態状態であると判断される $130 k\Omega cm^2$ よりも低い値のままであった。計測した分極抵抗値から、CH1 では 147 日目に、CH2 では 112 日目から実験終了まで、激しい腐食速度であると判断された。これらの結果より、35 日目から実験終了まで継続的に腐食が進行していると推定された。

4.3 I_b -value 解析

I_b -value 解析では、実験より得られた AE データから求めた AE 振幅分布図に平均値 μ と標準偏差 σ を併せて標記し、 μ と $\mu + \sigma$ が直線で近似できるように、 α_1 、および α_2 を決定した。その結果、CH1 では $\alpha_1 = 1.15$ 、 $\alpha_2 = 0.16$ と

し、CH2 では $\alpha_1 = 1.14$ 、 $\alpha_2 = 0.17$ と定めた。

解析結果の移動平均値を図-10 に示す。図-10(a)、(b)より、CH1、CH2 とともに鉄筋の腐食開始時期とされる、28 日目頃に I_b -value の急激な低下が確認された。この時期に、規模の大きな破壊現象が発生したことが確認された。

その後 154 日目まで、 I_b -value は変動を繰り返しながら緩やかに低下した。図-8 および図-9 の AE 発生挙動では、この時期に AE ヒット数の顕著な増加は確認されておらず、図-3 の Phase2 の時期であると推定できる。

また、2 度目の AE 頻発期とされる、154 日目以降にも再び I_b -value の低下が確認され、 I_b -value が 0.05 以下となる頻度が 28 日目よりも多いことが確認された。したがって、この時期の AE 現象は規模の大きな破壊現象が多く、コンクリート中の鉄筋腐食に伴う膨張圧により、ひび割れが進展していることが推測できる。また、同時期に錆汁が確認されていることから、少数の AE センサで AE パラメータ解析を行うことで、鉄筋腐食の発生時期を評価できる可能性が明らかとなった。

4.4 SEM による評価

図-8 より、実験開始から 28 日目に AE ヒット数の増加が確認されたことから、35 日目に図-7 に示す小型供

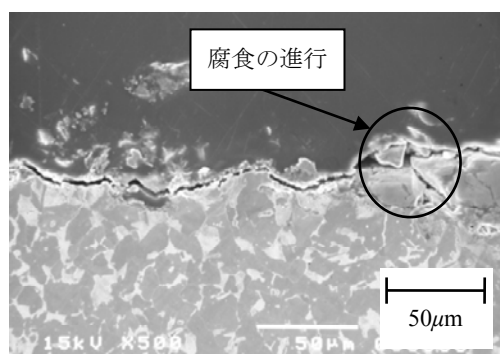


図-11 SEM 画像（鉄筋断面・浸透面側）

試体中からはとり出した鉄筋を、走査型電子顕微鏡（SEM）により観察した。浸透面側の鉄筋断面の SEM 画像を図-11 に示す。実験開始から 35 日目では、既に鉄筋表面の黒皮（酸化被膜）が溶けて剥離し、鉄筋の内部へ腐食が進行していることが確認できた。

この結果より、黒皮が剥離し腐食が進行することで、AE ヒット数が増加し、自然電位計測値が減少したと推測できる。したがって、腐食の発生時期が AE 発生挙動および電気化学的手法による結果と一致していることから、AE 法と電気化学的手法を併用することで、鉄筋腐食発生時期について高精度で早期評価できる可能性が示された。

5. 結論

本研究では、塩害による鉄筋コンクリートの腐食過程を早期に評価するため、AE 法による実環境を考慮した浸漬乾燥繰り返し実験を行った。同時に、電気化学的手法である自然電位法および分極抵抗法を適用することで、以下のことが明らかとなった。

- (1) AE 発生挙動より、少数の AE センサでも、鉄筋腐食の発生時期およびコンクリートのひび割れ開始時期が確認できた。
- (2) AE 法および電気化学的手法を適用することで、目視でコンクリート表面に錆汁を確認する前に、鉄筋腐食発生時期を高精度で予測できる可能性が示された。
- (3) Ib -value 解析結果より、2 度の Ib -value の減少が確認された時期が、AE 頻発期、錆汁の発生時期と一致していることから、 Ib -value 解析結果が塩害による鉄筋腐食の発生時期とコンクリートのひび割れ開始時期の評価に有効であることが明らかとなった。
- (4) SEM により、目視では判断できないコンクリート中の鉄筋腐食の状況が確認され、AE 発生挙動および電気化学的手法による結果と一致していることが明らかとなった。したがって、電気化学的手法に AE

法を加えることで、鉄筋腐食発生時期の早期評価が可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 大即信明ほか：塩害（1）、技報堂出版、pp.89-119、1986
- 2) 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.7-11、2006.3
- 3) 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
- 4) 武若耕司、丸屋剛、下村匠、山口明伸、武田宣典：塩害に対するコンクリート構造物の耐久性照査の現状と将来—コンクリート標準示方書への提案に向けて—、コンクリート工学、Vol.47, No.11, pp.23-32、2009.11
- 5) Ohtsu, M. and Tomoda, Y. : Phenomenological Model of Corrosion Process in Reinforced Concrete Identified by Acoustic Emission, ACI Materials Journal, Vol.105, No.2, pp.194-199, 2008
- 6) 川崎佑磨、北浦美涼、友田祐一、大津政康：鉄筋腐食ひび割れ進展の AE 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、第 10 巻、pp.261-268、2010
- 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) Kawasaki, Y. Kitaura, M. Tomoda, Y. and Ohtsu, Y. : AE Monitoring of Corrosion Process in Reinforced Concrete under Cyclic Wet and Dry Condition, STRUCTURAL FAULTS & REPAIR-2010 (CD-ROM), 2010
- 9) 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
- 10) ASTM C876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of United Reinforcing Steel in Concrete, 1999
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'05 基礎編、pp.164-167、2005
- 12) 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）、森北出版、pp.2-40、2005
- 13) 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、pp.166-181、1998