

# 論文 AE 法と電気化学ノイズ法を併用した RC 中の鉄筋腐食の早期評価に関する研究

福井 慎也\*1・康田 雄太\*2・川崎 佑磨\*3・福山 智子\*4

**要旨:** 近年, RC 構造物の鉄筋腐食が深刻化しており, RC 内部の鉄筋腐食を早期に評価することが重要となっている。そこで本研究では, 電食により鉄筋腐食を促進した RC 部材を対象に AE (アコースティック・エミッション) 法と EN (電気化学ノイズ) 法を併用したモニタリング計測を行い, 鉄筋腐食の早期評価について検討した。その結果, AE パラメータである RA 値の顕著な変化が確認された。同タイミングで EN 解析の孔食指数が-1 から 0 の間で推移しており, 局部腐食の評価を得た。鉄筋観察により局部腐食が発見されたことから, AE 法と EN 法を併用することで, 鉄筋腐食を早期評価できる可能性を示した。

**キーワード:** アコースティック・エミッション法, 孔食指数, 電気化学ノイズ法, 鉄筋腐食, RA 値

## 1. はじめに

近年, RC 構造物の劣化被害が多く報告されている<sup>1)</sup>。その原因の一つが塩害である。土木学会では鉄筋の腐食状況とコンクリート構造物の諸特性について定量的な評価を行う指針として土木学会コンクリート標準示方書「維持管理編」<sup>2)</sup>には劣化進行過程を図-1 のようにまとめている。しかし, コンクリート構造物の外観から内部の鉄筋の状態を確認することが非常に困難であり, 錆汁やひび割れが確認できるようになるまで, 腐食がかなり進行した状態になって判明することがほとんどである。そのため, コンクリート中の鉄筋腐食を早期に評価することが重要となっている。

鉄筋腐食の非破壊試験法には電気化学的手法および物理的手法がある。電気化学的手法は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, 自然電位測定では腐食を評価するための電位変動は腐食開始以降の場合が多く, 腐食開始時期の早期評価が困難である<sup>3)</sup>。一方で, EN (電気化学ノイズ) 法は鉄筋腐食開始時期の電位・電流変動を測定することで, 腐食状態の変化の検出や反応機構の推定を評価することによって, 早期に鉄筋腐食評価できる可能性が示されている<sup>4)</sup>。しかし電気化学ノイズと腐食状況 (腐食速度, 腐食形態) の対応関係が明確化されていない。

また, 物理的手法の一つに AE (アコースティック・エミッション) 法がある。本手法は, コンクリート内部の微小な破壊音を計測することでコンクリート中の鉄筋腐食開始時期に発生する鉄筋表面の黒皮剥離を検出できる可能性について報告されている<sup>5)</sup>。また, 既往研究<sup>6)</sup>では, 自然電位法と AE 法を併用することで, 鉄筋腐食発

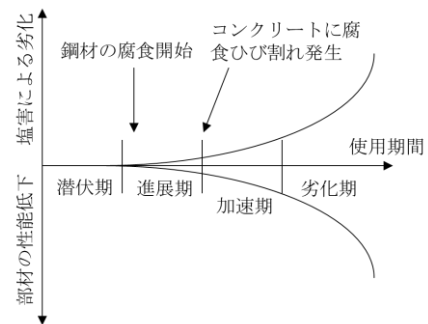


図-1 塩害による鉄筋コンクリートの劣化過程

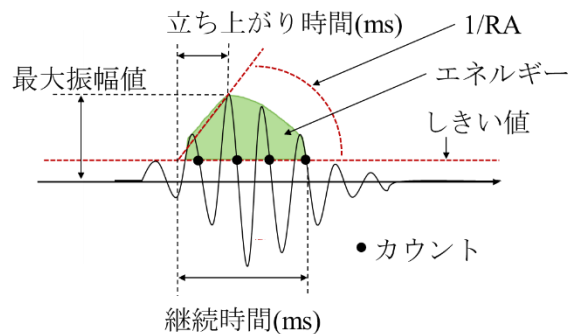


図-2 AE パラメータ

生時期について早期評価できる可能性がある<sup>7)</sup>と示唆している。しかし, 実験開始から検出されている AE 現象が鉄筋腐食による黒皮の剥離と推定しているが, その妥当性について解明されていない。

そこで本研究では, AE 法と EN 法を併用して連続モニタリングを行うことで, 鉄筋腐食過程中的の黒皮剥離に伴う弾性波および電位・電流の微小変動を検出することで鉄筋腐食の早期評価を試みた。

\*1 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (学生会員)

\*2 立命館大学 理工学研究科環境都市専攻

\*3 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博 (工) (正会員)

\*4 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科准教授 博 (工) (正会員)

## 2. 評価指標

### 2.1 AE パラメータ

鉄筋コンクリートの鉄筋腐食による劣化進行過程において、鉄筋表面の腐食生成物が膨張することでコンクリート内部にひび割れが発生する。図-2 に AE 計測により検出される AE 波形のパラメータの一例を示す。それらのパラメータを使用して、日本建材産業協会規格<sup>7)</sup> (JCMS) で定義されている以下の式から RA 値を算出できる。

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

式(1)に示すように、RA 値は最大振幅値と立ち上がり時間の比であり、波形の立ち上がり角度の逆数を示している。すなわち、RA 値は検出された弾性波の形を推定することができ、RA 値の増加は立ち上がり時間の伸びを意味しており、波形はせん断の傾向を示すと報告されている<sup>8)</sup>。この指標を用いて鉄筋腐食過程に得られる特徴的な AE 現象を評価した。

### 2.2 孔食指数

EN 解析において腐食面積の大きさに対する電極表面

表-1 孔食指数の判定基準

孔食指数	予想される腐食形態	標準偏差	二乗平均平方根
$0 \geq \log PI > -1$	局部腐食(孔食)	大	小
$-1 \geq \log PI > -2$	混合腐食	◇	◇
$-2 \geq \log PI > -3$	全面腐食	小	大

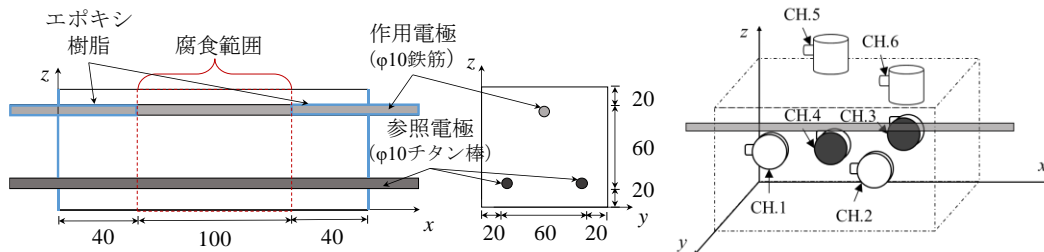


図-3 供試体概要および AE センサの配置位置

表-2 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 <sup>3</sup> )				混和剤(C×%)	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	SP 剤	AE 剤
20	8	55	4.5	46.5	165	300	846	988	2.10	0.01

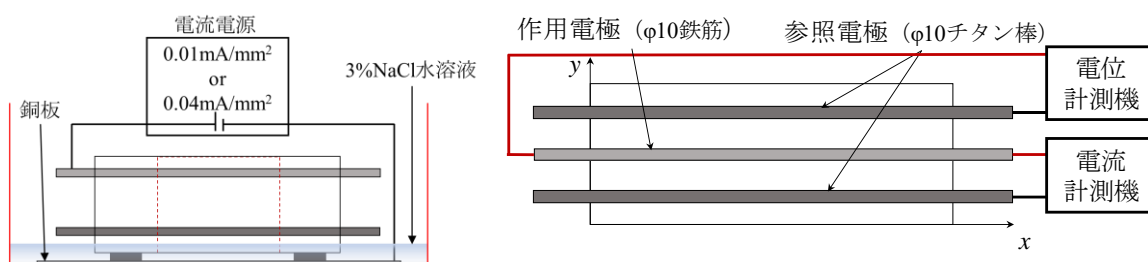


図-4 電食実験装置および EN 計測装置

での突発的な変動を算定する方法に孔食指数  $PI$  がある。孔食指数は式(2)のように標準偏差および二乗平均平方根から算出する<sup>9)</sup>。

$$PI = \sigma_1 / I_{rms} \quad (2)$$

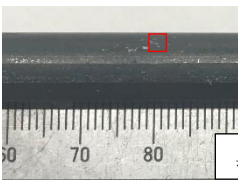
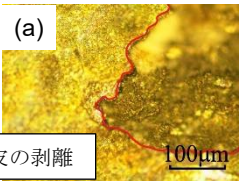
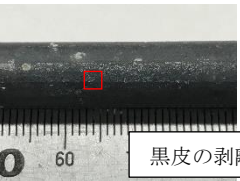
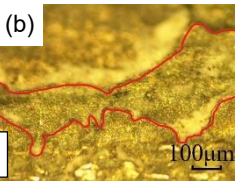
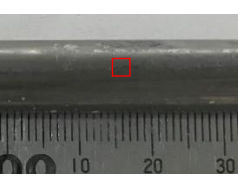
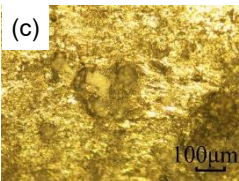
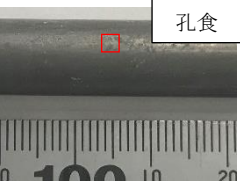
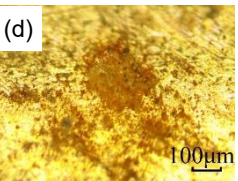
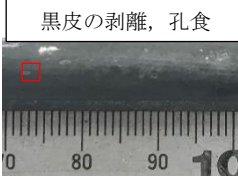
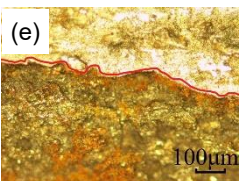

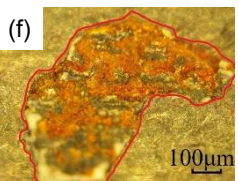
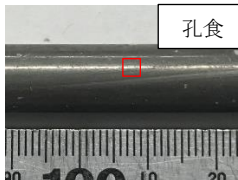
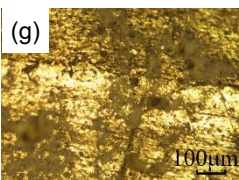
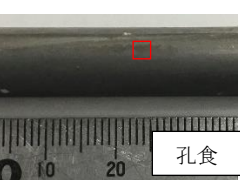
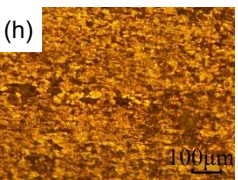
ここで、 $\sigma_1$  は電流ノイズの標準偏差、 $I_{rms}$  は電流ノイズの二乗平均平方根である。表-1 は Kelly ら<sup>9)</sup> が提唱した孔食指数  $PI$  の判定基準<sup>9)</sup> であり、孔食指数の値と予想される腐食形態の関係を示したものである。本研究では、黒皮が剥離し腐食を開始した箇所は局部腐食的挙動を示すと仮定し、 $PI$  を指標として黒皮剥離検出とその後の腐食形態の把握を試みた。標準偏差および二乗平均平方根を 10 分ごとに算定し、孔食指数  $PI$  を算出した。また、電食後の電位・電流ノイズは通電による影響で高くなり評価できないため、電食後 6 時間までのデータは除去して孔食指数  $PI$  を算出した。

## 3. 電食実験

### 3.1 実験概要

電食実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-3 に示すような 100×100×180mm の角柱である。供試体に直径 10mm の鉄筋 (作用電極) 1 本とチタン棒 (参照電極) 2 本を埋設した。かぶり厚は 20mm とした。また、鉄筋腐食開始時期の黒皮剥離の検出に関して評価するた

表-3 各供試体における鉄筋表面の状態

定電流	種類	電食後① (電食 4H, はつり用供試体)		電食後③ (電食 12H, 計測用供試体)	
		写真	顕微鏡	写真	顕微鏡
0.01 mA/mm <sup>2</sup>	黒皮有				
	黒皮無				
0.04 mA/mm <sup>2</sup>	黒皮有				
	黒皮無				

□ : 顕微鏡観察位置

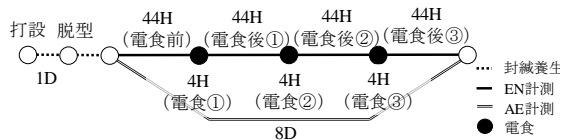


図-5 実験フロー

めに、埋設した鉄筋は、磨き丸鋼（以下、黒皮無）と黒皮付き丸鋼（以下、黒皮有）の2種類とした。いずれの鉄筋に対しても腐食対象範囲（腐食部）を100mmに設定し、それ以外の部分はエポキシ系接着剤で被覆した。た、電食実験で与える電流値の違いがAE法およびEN法で得られる結果に及ぼす影響を確認するため、それぞれの鉄筋に対して定電流0.01mA/mm<sup>2</sup>と0.04mA/mm<sup>2</sup>の2パターンで電食実験を行った。なお、すべての実験パターンにおいて、鉄筋の状態を確認するためのはつり出し用の供試体として、同様の供試体を3体ずつ作製した。コンクリートの配合を表-2に示す。全ての供試体は8日以上封緘養生を行った。電食実験は、3%NaCl水溶液の入った水槽底の銅板上に供試体を置き、供試体下面10mmを浸漬させ、図-4に示す定電流発生装置にて鉄筋を陽極、銅板を陰極として通電させた。EN計測では2本のチタン棒（参照電極）を基準とした鉄筋の電位と電

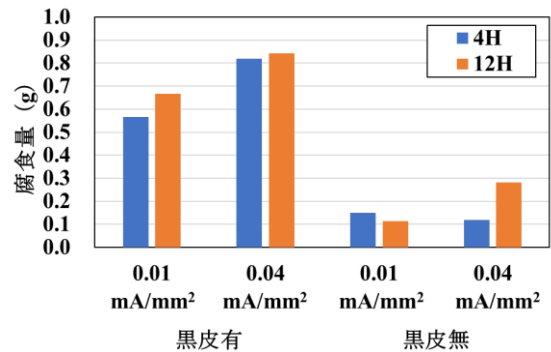


図-6 各供試体における鉄筋腐食量

流の変動をサンプリング周期0.5秒で同時測定を行った。

実験の手順を図-5に示す。電食による腐食促進では1回につき0.01 mA/mm<sup>2</sup>または0.04 mA/mm<sup>2</sup>の定電流を供試体に4時間通電させた。電食前後44時間にEN計測を実施し、AE計測は電食前後の8日間連続的に計測を行った。なお、各供試体には6個の共振周波数150kHzのAEセンサを供試体に設置した。

### 3.2 実験結果および考察

#### 3.2.1 鉄筋腐食状況の目視確認

電食後①（電食4時間後）および電食後③（電食12時間後）に鉄筋のはつり出しを行い、表-3に示すように



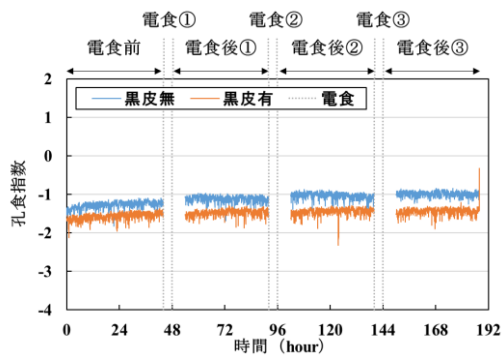


図-7 孔食指数の結果 (0.01mA/mm<sup>2</sup>)

目視および光学顕微鏡により腐食状態および黒皮剥離、孔食の有無を確認した。光学顕微鏡は赤枠箇所を 50 倍の倍率で観察を行った。その結果、黒皮有の全ケース(表-3(a), (b), (e), (f))で黒皮の剥離が確認され、表-3(d), (e), (f), (g), (h)では孔食が直接確認された。

また、鉄筋のはつり出し後、「JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」<sup>10)</sup>に基づいて腐食量を算出した。鉄筋に付着した腐食生成物を除錆するために、約 60℃の 10%クエン酸二水素アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬させ、除錆前後の質量差で腐食量を算出した。その結果を図-6 に示す。これらの結果を踏まえ、AE 法および EN 法で得られた結果の考察を行う。

### 3.2.2 EN 解析

電流ノイズの結果から、孔食指数を算出した。定電流 0.01 mA/mm<sup>2</sup> の結果を図-7 に、定電流 0.04mA/mm<sup>2</sup> の結果を図-8 に示す。

図-7 の結果から、黒皮有の孔食指数は EN ノイズの計測期間でほとんど-1 から-2 の間で推移している。これは、表-1 の判断基準から腐食形態が混合腐食であることを意味する。一方で、黒皮無の孔食指数では電食②までは黒皮有と同様に-1 から-2 の間で推移しているが、電食後②および電食後③では-1 を超えて推移していることが確認できる。これは、局部腐食(孔食)が発生している可能性を示している。光学顕微鏡の観察結果からも、表-3 (c)では孔食は確認できないが、電食後③の後に観察した(d)では孔食の存在が確認できた。

一方で、図-8 の結果では、黒皮有の孔食指数は電食前では-1 以下であるが、電食後①の初期にわずかに-1 を超え、電食回数の増加に伴い孔食指数が増加傾向にあることが確認された。これは黒皮無でも同様の傾向であり、局部腐食(孔食)が発生している可能性を示している。これらも、表-3 (e)~(h)で孔食が確認されている。黒皮無の鋼材の複数カ所に孔食が確認されており、その面積も 0.01 mA/mm<sup>2</sup> の結果と比較して広いことが表-3 (h)から確認できる。電食後②と電食後③の孔食指数の挙動は、これまでの挙動とは異なる変動が得られており、腐食に

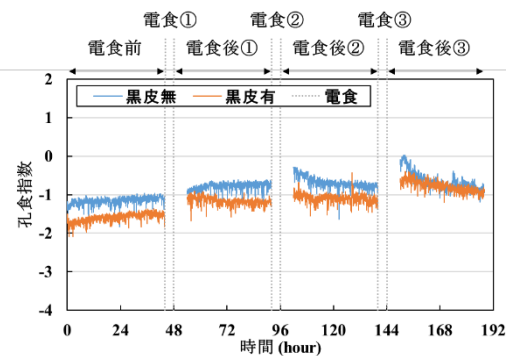


図-8 孔食指数の結果 (0.04mA/mm<sup>2</sup>)

伴う電流、電位の激しい変動が計測されている。

これらの結果から、EN 計測において孔食指数を用いることによって、孔食の有無を含む鉄筋の腐食形態を推定することが可能であり、早期に鉄筋腐食を評価できたと考えられる。

### 3.2.3 累積 AE ヒット数および EN ノイズ

各供試体における 10 分毎の 6 個の AE センサの累積 AE ヒット数の増加率および EN ノイズ(電位ノイズおよび電流ノイズ)の時間歴として、図-9 に 0.01mA/mm<sup>2</sup> の結果、図-10 に 0.04mA/mm<sup>2</sup> の結果を示す。最終的に検出された累積 AE ヒット数に対して、どのタイミングで AE 現象を多く検出したかを確認するために、最終的に得られた全 AE ヒット数を基準にして各時間で検出された AE ヒット数を除して無次元化した。

0.01mA/mm<sup>2</sup> および 0.04mA/mm<sup>2</sup> の電位・電流ノイズでは、電食直後は一時的にノイズが高くなる傾向が確認された。これは鉄筋に定電流を印加するために装置によって鉄筋の電位が制御される(この電位はコンクリートの電気抵抗によって決まる)ためであり、鉄筋腐食による影響ではないと考えられるため、電食後 6 時間の結果を除去して考察を行った。

図-9 の 0.01mA/mm<sup>2</sup> の結果を見てみると、黒皮無では電食後①→電食②→電食後②の期間で AE ヒット数の顕著な増加が確認できる。電食後③で観察した表-3 (d)では孔食が確認されており、この間に、腐食生成物が発生した可能性が示唆される。腐食生成物が成長するためには鉄筋内部に十分な酸素と水の供給が必要であり、一時的に鉄筋腐食速度は停滞することが知られている。電食③および電食後③で AE ヒット数が検出されなかったのはその要因であると考えられる。一方で、黒皮有では一時的な AE ヒット数の停滞があるものの、電食①から電食後③まで連続して AE ヒット数の増加が確認できる。電食後①および電食後③の観察では、それぞれ表-3 (a)および(b)に示すように、両者とも黒皮の剥離が確認されている。すなわち、黒皮有で検出された AE 現象は黒皮剥離の可能性が考えられる。電位・電流ノイズの顕著な変

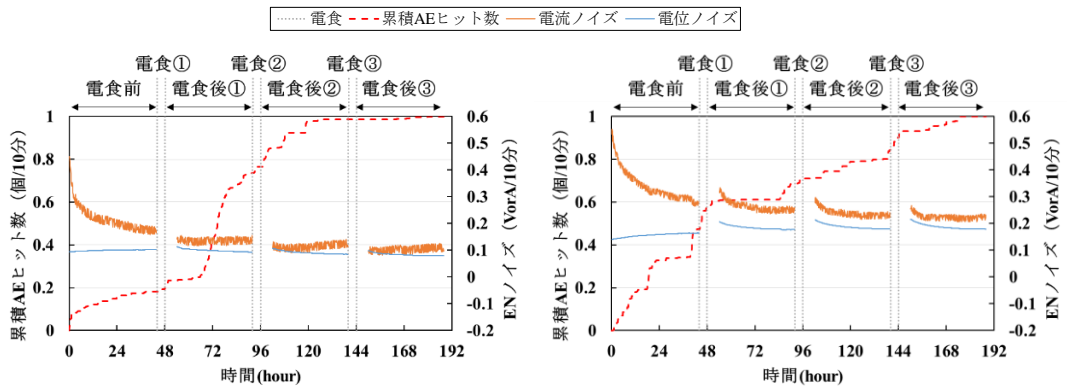


図-9 累積 AE ヒット数および EN ノイズの時刻歴 (0.01mA/mm<sup>2</sup>, 左 : 黒皮無, 右 : 黒皮有)

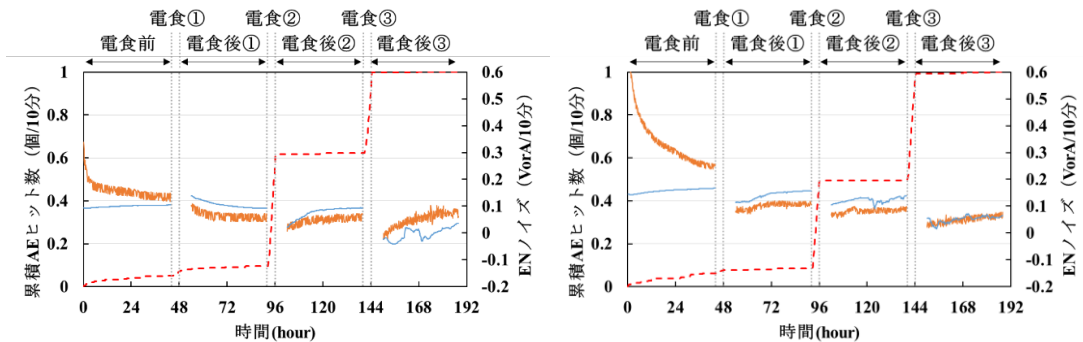


図-10 累積 AE ヒット数および EN ノイズの時刻歴 (0.04mA/mm<sup>2</sup>, 左 : 黒皮無, 右 : 黒皮有)

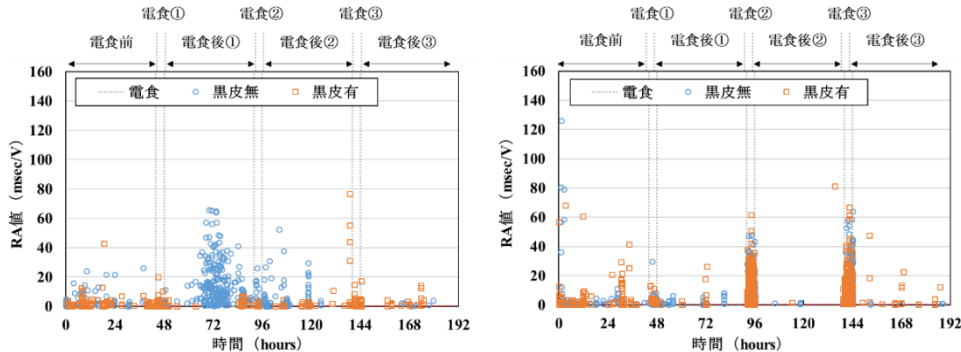


図-11 RA 値の時刻歴 (左 : 0.01mA/mm<sup>2</sup>, 右 : 0.04mA/mm<sup>2</sup>)

動は確認されていない。

図-10 の 0.04mA/mm<sup>2</sup> の電位・電流ノイズの結果では、黒皮無と黒皮有ともに、電食中の電食①、電食②、電食③で AE ヒット数の顕著な増加が確認された。0.01mA/mm<sup>2</sup> と異なり定電流量を大きくしているため、腐食速度が速く、早いタイミングで鉄筋腐食が発生および進展していると考えられる。表-3 の観察結果からの多くの孔食が確認されている。

一方、電位ノイズは低下し、激しく変動している。電位の貴卑(大小)は、試験極の腐食反応性の変動を表しており、電位の卑化は腐食反応性の増大を表す<sup>4)</sup>と報告されている。印加電流が大きいくほど腐食を促進しやすいため、電位ノイズが卑化したと考えられる。

各供試体における AE ヒット数の増加率を見ると、電食前にも多くの AE 現象が検出されている。これは、供試体の底面側から塩水を吸収させているため、塩水の吸収を波動現象として検出した可能性が高く、鉄筋腐食による影響は低いと考えられる。

### 3.2.4 RA 値の変動

図-11 に 0.01mA/mm<sup>2</sup> および 0.04mA/mm<sup>2</sup> の RA 値の時間歴の結果を示す。0.01mA/mm<sup>2</sup> の結果から、黒皮有の RA 値は電食後②までは 20msec/V 以下の低い値である。これは検出された AE 現象が引張型の傾向を示しており、黒皮剥離の影響である可能性が考えられる。その後、電食③前後で RA 値の増加が確認され、せん断型の傾向を示しており、これは腐食生成物の発生を捉えたと考えら

れる。また、黒皮無では電食後①に RA 値の増加が多く検出された。これはせん断型の傾向を示し、腐食生成物の発生による影響と考えられる。

一方で、 $0.04\text{mA}/\text{mm}^2$ の結果では、黒皮有無の両者で電食②、電食③で RA 値の増加が確認された。この変動が得られた要因として、通電量を増大させたことで、腐食生成物の発生および進展を促していることが考えられる。図-6 に示す鉄筋腐食量から、黒皮有無の両者とも  $0.01\text{mA}/\text{mm}^2$  より  $0.04\text{mA}/\text{mm}^2$ の方が、腐食量が多い結果となったことから多くの腐食生成物が発生していると推察される。いずれも表-3 の観察結果から、黒皮剥離および孔食が確認できており、AE 法により黒皮剥離現象および腐食進展を検出できる可能性が示された。

せん断型ひび割れでは、多くのエネルギーが低速で伝播されるため、エネルギーの大部分は最初の弾性波の到達よりも遅く到達するため、立上がり時間が長くなると報告されている<sup>8)</sup>。このことから、せん断ひび割れの増加によって RA 値が大きくなったと考えられる。

以上の結果から、AE パラメータの一つである RA 値を評価することで、黒皮の剥離や腐食生成物の発生あるいは進展の影響を予測できると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、AE 法および EN 法を用いて鉄筋腐食過程の早期評価の可能性について検証した。得られた結果を以下に示す。

- (1) EN 法による電流ノイズから得られる孔食指数の結果から、各ケースで孔食と評価されたタイミング以降の観察結果から、鉄筋表面に孔食が確認された。すなわち、EN 法でモニタリングすることで、微小な孔食を捉えられることを示した。
- (2) 印加電流の大小による電位・電流ノイズの波形に相違が確認された。 $0.01\text{mA}/\text{mm}^2$ は電食前と電食後の電位ノイズはほとんど変化しないが、 $0.04\text{mA}/\text{mm}^2$ では電位ノイズが低下していることが確認された。したがって、印加電流の大小、すなわち腐食速度の変化によって電位・電流ノイズの挙動が異なることが確認できた。これは、EN 法で鉄筋腐食進展も評価できる可能性を示唆していると考えられる。
- (3)  $0.01\text{mA}/\text{mm}^2$ の黒皮無の電食後①に多くの AE 現象が検出された。それと同時期の RA 値の増加が確認された。また、通電量が大きくなるほど、高い RA 値の検出数が増加していることも確認された。腐食の進展に伴うせん断型ひび割れの増加によって、RA 値は大きくなったと考えられる。このことから、RA 値の変動から黒皮剥離や腐食生成物の発生およ

び進展を評価できる可能性を示した。

- (4) AE 法と EN 法の結果から、AE 法では黒皮剥離で発生する物理現象(弾性波の発生)を検出できる可能性を、EN 法では微小な孔食で発生する電流ノイズの変動を検出できる可能性が示された。すなわち、両者を併用してモニタリングすることで、鉄筋腐食に伴う物理現象および電気化学現象を加味した上で、鉄筋腐食の早期評価が可能であることを示した。

#### 謝辞

本研究は上田記念財団の助成を受けて実施されました。また、実験に際し、立命館大学・池沢樹氏他多くの学生にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 大即信明他：塩害(1)、技報堂出版、pp.89-119、1986
- 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) 大津政康、慶済運、横田優：コンクリート中の鉄筋腐食の非破壊検査法の実用化に関する研究、コンクリート工学論文集、第15巻第3号、2004.9
- 4) 福山智子他：電気化学ノイズ法によるコンクリート構造物中の鉄筋の腐食診断、日本建築学会構造系論文集、第75巻、第657号、pp.1955-1964、2010.11
- 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) 川崎佑磨他：AE法による浸漬乾燥繰り返し実験の鉄筋コンクリート腐食過程のモニタリング、コンクリート工年次論文集、Vol.32、No.1、pp.1727-1732、2010.7
- 7) 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.108-123、2006.3
- 8) Aggelis, D.G., et al.: Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre, Construction and Building Materials, pp.4126-4131, 2011.5
- 9) Kelly, R.G., et al.: Analysis of Electrochemical Noise for Type 410 Stainless Steel in Chloride Solution, Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications, Astm Intl, pp.101-113, 1996.9
- 10) 日本コンクリート工学会：JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法、コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならび基準(案)、pp.91-94、2004.9