

AE モニタリングにおけるコンクリート中の鉄筋腐食過程の評価

Corrosion Process Identified in Reinforced Concrete by AE Monitoring

熊本大学工学部技術部 ○友田 祐一
熊本大学自然科学研究科 川崎 佑磨, 北浦 美涼
大津 政康

概 要

本研究は、コンクリート中の鉄筋腐食による劣化進行過程を早期の段階で評価するためにアコースティック・エミッション (AE) 法を適用した。実験では、鉄筋腐食の促進実験中に AE モニタリングを実施した。その結果、コンクリート中の鉄筋腐食過程について、鉄筋腐食による AE 発生時期とコンクリート中のひび割れによる AE 発生時期の二つの特徴的な AE がモニタリングできる可能性を確認した。また、AE の波形解析と電子顕微鏡 (SEM) の比較により、各時期の鉄筋腐食に伴う位置標定と鉄筋腐食状況が確認された。さらに、ひび割れ識別についても確認できる可能性が示された。

1. まえがき

近年の鉄筋コンクリート構造物は、様々な劣化が問題となっている。その一つとして、コンクリート中の鉄筋腐食による構造物の性能低下が挙げられる。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が一般的に広く用いられている。しかし、計測する構造物の置かれた環境条件等に大きく影響されることも判明している。

コンクリート標準示方書「維持管理編」¹⁾では、塩害による劣化進行過程を図 1 のように潜伏期、進展期、加速期、劣化期としてまとめている。特に、コンクリート中の鉄筋腐食過程は「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いる。このことから、二つの時期さらに詳細な潜伏期、進展期、加速期、劣化期を明確に評価できる非破壊検査法の開発は急務であり容易ではないことから、現在でも様々な研究が進められている。

そこで本研究では、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) 法を適用してコンクリート中の鉄筋腐食過程について検討した。実験は、電食実験と構造物の環境を考慮した乾燥繰り返し実験中に AE モニタリングを連続的に実施した。この AE モニタリング結果より、AE 発生挙動から「鉄筋の腐食開始」と「コンクリートの腐食ひび割れ開始」について検討した。また、AE 波形解析手法の SIGMA (Simplified Green's

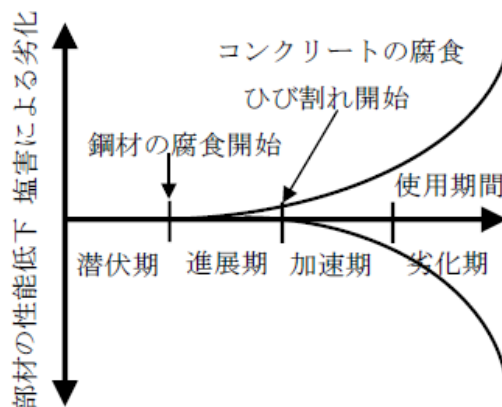


図 1 塩害による劣化進行過程

functions for Moment tensor Analysis) 解析²⁾を適用し、AE 発生源の位置標定やひび割れ識別の関係についても検討した。さらに、それぞれの時期について電子顕微鏡 (SEM) のよる鉄筋の観察を行なうことにより、コンクリート中の腐食状況の確認も行なった

2. 鉄筋腐食の非破壊検査試験法

鉄筋腐食のための既往の非破壊検査法は表 1 にまとめられている³⁾。非破壊検査法の特徴は、構造物に損傷を与えずに繰り返し検査でき、かつ構造物の状態を広範囲で把握することができる。非破壊検査法によるコンクリート中の鉄筋腐食の現状として、電気化学的手法の自然電位法や分極抵抗法が一般的に利用されている。自然電位計測値における鉄筋腐食の評価基準は表 2 に示す ASTM C-876⁴⁾が一般的である。しかし、現段階では図 1 の塩害による鉄筋腐食の劣化進行過程における各時期を定量的に評価できるまでには到っていない。また、コンクリートの中性化、含水率や塩分量などの影響を受けやすく計測値が大きく変化することも判明している⁵⁾。分極抵抗法は、鉄筋の腐食速度を表す指標であるが、我が国では分極抵抗による腐食速度の評価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の表 3 に示す分極抵抗計測値の腐食速度判定基準により判定した⁵⁾。

表 1 鉄筋腐食の非破壊検査方法

| | | |
|---------|-------|--|
| 電気化学的方法 | 自然電位法 | 自然電位の低下による腐食状態の判定 |
| | 分極抵抗法 | 腐食電力の逆数として得られる腐食速度による推定 |
| | その他 | アノード分極曲線による不動態判定、カソード分極曲線・定電位法による酸素律速の限界電流の判定等 |
| 物理的方法 | 目視観察 | ひび割れ・剥離・錆による変色等の観察 |
| | AE 法 | ひび割れの発生監視・発生位置・種類・方向等の決定 |

表 2 腐食評価基準 (mV VS CSE)

| ASTM C876-91 (米国) | |
|-------------------|---------------|
| 電位 | 腐食の確率 |
| -200 < E | 90%以上の確率で腐食なし |
| -350 < E ≤ -200 | 不確定 |
| E ≤ -350 | 90%以上の確率で腐食あり |

表 3 腐食速度判定基準 R_{ct} ($k\Omega cm^2$)

| 分極抵抗値 | 腐食の確率 |
|--------------|-------------|
| 130 より大 | 不動態状態 |
| 52 以上 130 以下 | 低から中程度の腐食速度 |
| 26 以上 52 以下 | 中から高程度の腐食速度 |
| 26 未満 | 激しい、高い腐食速度 |

3. 塩化物イオン濃度の浸透予測解析

塩害による鉄筋腐食の劣化進行過程 (図 1) に基づき鉄筋腐食の開始やコンクリートのひび割れの開始を予測するために、かぶり位置での全塩化物イオン (Cl^-) 濃度について浸透予測解析を行い検討した。コンクリート中の Cl^- の移動は拡散に基づくことから、表面 Cl^- 濃度 C_0 を一定として得られる式(1)を用いた。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $C(x, t)$: 深さ x 、時間 t における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)
 D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm²/sec)
 erf : 誤差関数

しかし、実際には表面 Cl⁻濃度を一定と見なすこと、実験的に決定することは困難とされている。そこで、硬化コンクリート中の Cl⁻濃度測定を行い、見かけの Cl⁻濃度 C_1 を式 (2) より算出し、式 (4) の C_0 に置き換えて Cl⁻浸透予測を行った。

$$C_1 = \frac{C(x,t)}{1 - erf \frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \quad (2)$$

ここで、 $C(x, t)$: 各実験における 0.5~1.5cm までの塩化物イオン濃度 (kg/m³)

本解析での拡散係数は、土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」⁶⁾より普通ポルトランドセメントを使用する回帰式として示されている、式 (6) から求めた値を適用した。

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C)^2 - 2.5 - \log(3.15 \times 10^7) \quad (3)$$

ここで、 W/C : 水セメント比

鉄筋周辺部での Cl⁻浸透を確認するために、2次元 FEM 解析を下記に示す 2次元非定常拡散方程式、式 (4) を用いて実施し、乾燥の影響は考慮していない。

$$D \left(\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} \quad (4)$$

解析では鉄筋コンクリート断面モデルを作成し、要素数 266 の各節点における Cl⁻濃度を求め、その分布図を作成した。このモデルは、実験供試体をそのまま三角形要素に分割しており、鉄筋付近は他の要素より小さな要素に分割して解析を行った。

4. AE パラメータおよび AE 波形解析

AE 計測の対象となるのは腐食生成物の発生とその膨張圧によるコンクリートひび割れの発生である。AE パラメータ分析では、AE の発生数や 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が把握できる。また、AE イベントによる 3次元の位置標定とひび割れ識別を行った。これらは、AE 発生源の位置を求め、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 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⁷⁾。本研究では、この自動読み取り手法を用いて解析を行う。なお、ここでの AE イベントとは設置した全ての AE センサにより捉えられた 1 ヒットの AE を意味する。

5. 電食実験と AE SiGMA 解析結果

5-1. 電食実験の AE モニタリング

1時間ごとの 6 個の AE センサ全ての累積 AE ヒット数と、自然電位計測の関係を図 2 に示す。実験開始後の自然電位は貴に向かっていくが、stage1 終盤にかけて急速に卑に向か

っている。その後、stage2 では、再び貴に向かうが、stage3 と stage4 では次第に卑に向かうことが確認できた。また、自然電位の値から stage3 の終盤で鉄筋の腐食評価である -350mV よりも卑の値になることが確認できた。この結果より、電食実験では AE 発生挙動と自然電位値には相関があり、両者を比較することにより腐食過程の同定に有効であることが確認できた。

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図 3 に示す。AE イベント数とは、1 つの AE 現象を 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 $30\mu\text{sec}$ とした。ここで EDT とは、最初に AE 波が検出された AE センサの到達時間と、その他全ての AE センサでの到達時間の差が $30\mu\text{sec}$ 以内の AE イベントを求める定義時間である。通電開始後 47 時間から 70 時間経過するまでに、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 時間経過するまでに 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、供試体に錆汁と小さなコンクリートひび割れが目視により確認されたことより 345 時間経過時に実験終了とした。これらの結果より、250 時間までは鉄筋腐食に伴う AE が発生し、それ以降では鉄筋腐食の膨張圧によるコンクリート中のひび割れ発生によって AE が発生したと考えられる。

5-2. 電食実験の AE SIGMA 解析結果

SIGMA 解析による 1 時間ごとの種類

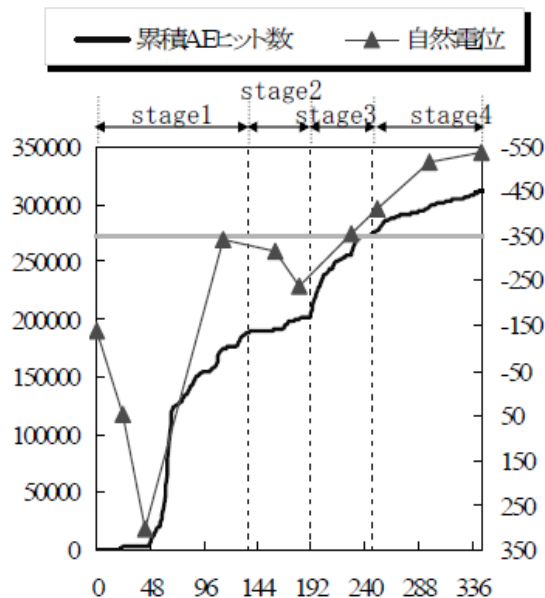


図 2 累積 AE ヒット数と自然電位の関係

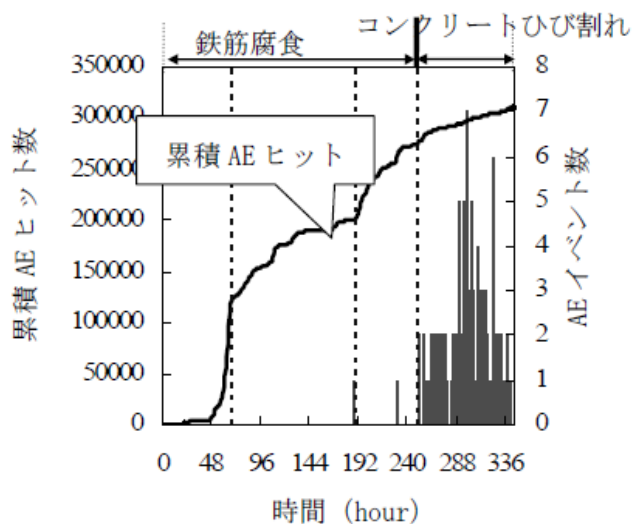


図 3 累積 AE ヒット数と AE イベント数

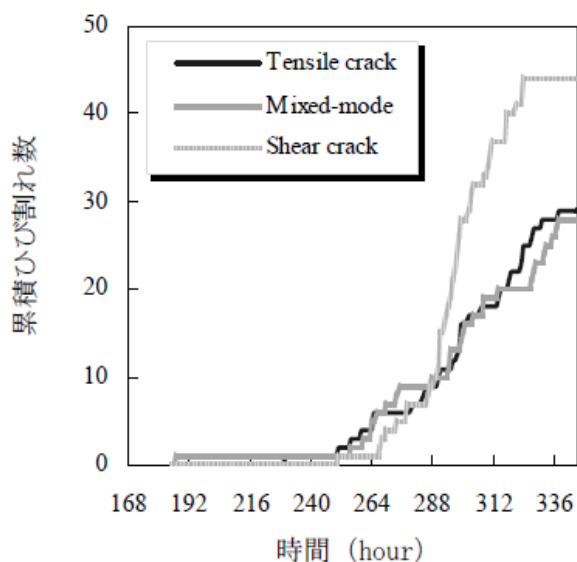


図 4 種類別の累積ひび割れ数

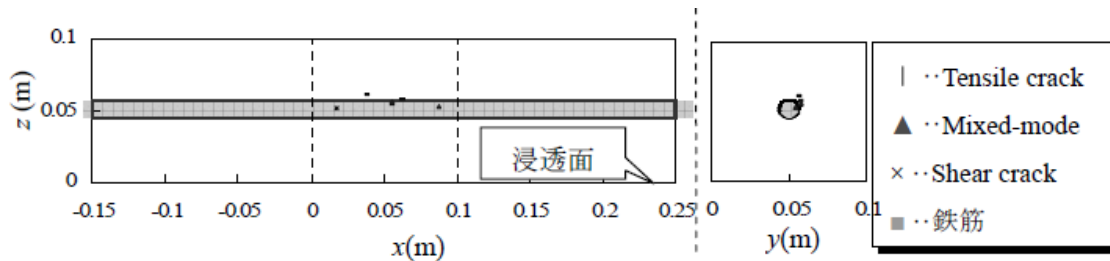


図5 SiGMA 解析結果 (250-263 時間)

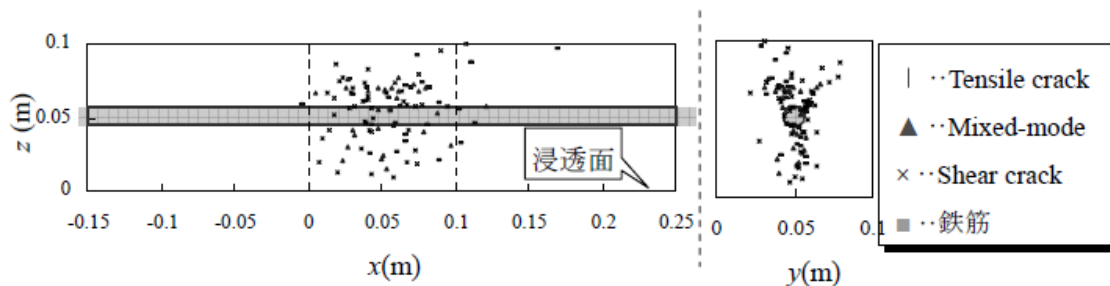


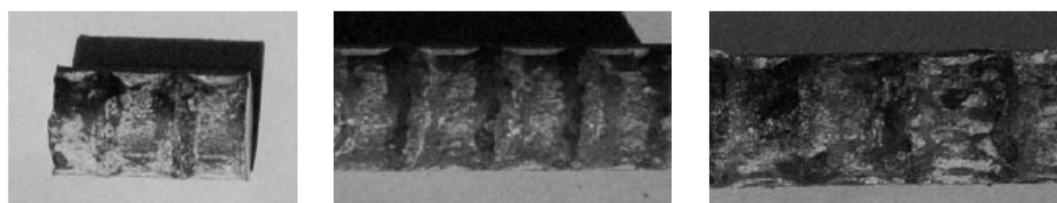
図6 SiGMA 解析結果 (250 時間以降全て)

別の累積ひび割れ結果を図4に示す。引張型と混合型ひび割れ数は同じ傾向を示しており、せん断型ひび割れが一番多く確認できた。また、AE イベント発生初期は引張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。これらより、鉄筋腐食の膨張圧による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、その後大きなひび割れが形成される際には、せん断型ひび割れが発生することが明らかとなった。

位置標定の250から263時間の結果を図5に示す。この時期は、コンクリート中にひび割れが開始したと推測され、鉄筋周辺にAE発生が位置標定できた。なお、鉄筋腐食の過程では、ほとんどAEイベントが発生していないことから、微小な規模のAEが多いため位置標定できないことが確認できた。250時間以降の全ての位置標定結果を図6に示す。ひび割れは鉄筋に沿って発生し、表面まで進展することが確認された。以上の結果より、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。

5-3. 鉄筋はつり出しと走査型電子顕微鏡による評価

stage1、stage3、stage4 終了後に供試体から鉄筋はつり出しを行い、目視により鉄筋表面の腐食を観察した。その結果、stage1 終了後の鉄筋は図7(a)に示すように目視による腐食生成物は確認できなかった。stage3 終了後の鉄筋は図7(b)に示すように目視により腐食発生が判断可能であり、さらに stage4 では図7(c)に示すように鉄筋全体に腐食が広が



(a) stage1 終了後

(b) stage3 終了後

(c) stage4 終了後

図7 各 stage 終了後の写真 (電食実験)

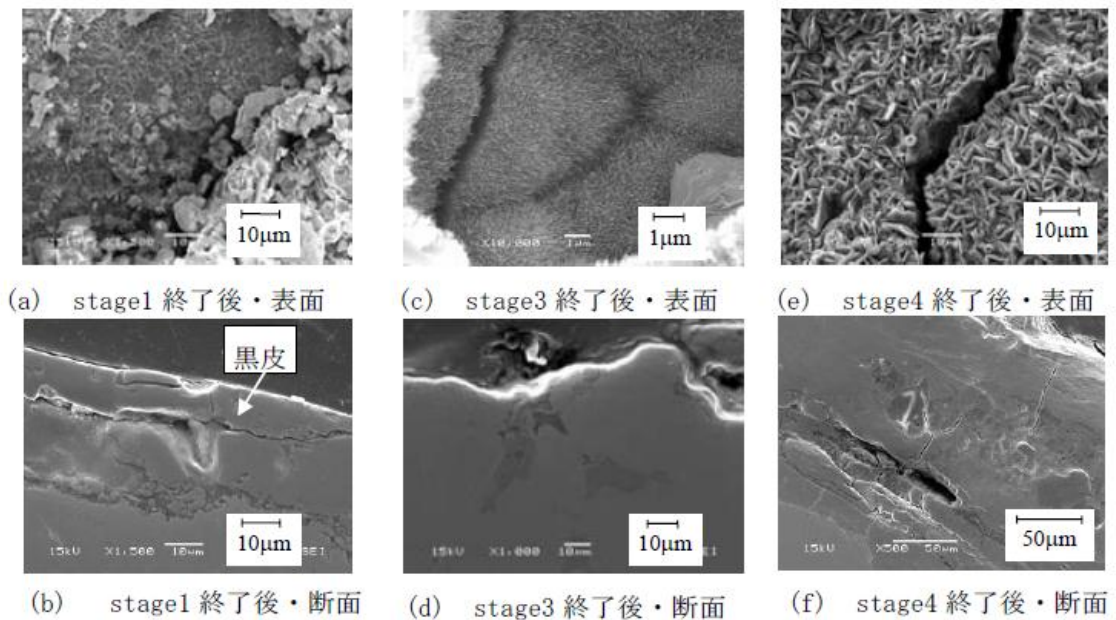


図 8 走査型電子顕微鏡の画像（電食実験）

っていることが確認できた。さらに詳細な観察を行なうため、これらの鉄筋を走査型電子顕微鏡により観察した。図 8(a)と図 8(b)は stage1 終了後、図 8(c)と図 8(d)は stage3 終了後、図 8(e)と図 8(f)は stage4 終了後の鉄筋表面と鉄筋断面の画像である。

stage1 では、鉄筋表面に通常形成されている黒皮（酸化皮膜）が剥離していることが確認されたが、鉄筋内部の腐食は確認されなかった。

また、断面の画像から黒皮が部分的に残っていることが確認できた。stage3 では表面の黒皮がほとんど剥離し、黒皮の内側の鉄筋表面に腐食が確認できた。stage4 では鉄筋内部にも腐食が広がり、鉄筋の内部方向にひび割れが進行していることが確認できた。図 8(c)と図 8(e)、図 8(d)と図 8(f)の画像スケールから stage4 での鉄筋腐食による膨張圧の大きさが確認できた。さらに、エネルギー分散型 X 線分光器により元素分析を行なった結果、stage4 では図 9 に示すように鉄筋内部から Cl^- が確認された。したがって、鉄筋内部に生じたひび割れから Cl^- が侵入したことにより不導体皮膜の破壊が促進され、腐食速度が速くなったことが確認できた。

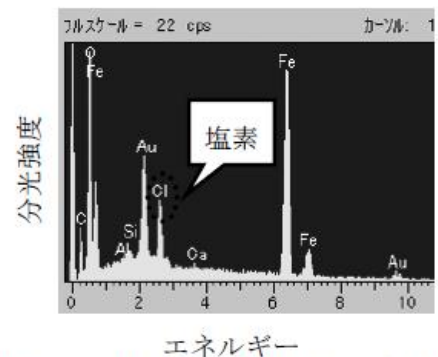


図 9 stage4 終了後の鉄筋中の元素分析

6. 乾湿繰り返し実験と AE SIGMA 解析結果

6-1. 乾湿繰り返し実験の AE モニタリング

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図 10 に示す。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、この値は、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。実験開始後 28 日目および 70 日目に AE ヒット数と 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。これらの結果は、実験開始から 126 日目までは鉄筋腐食による影響を受けた AE が発生し、126 日目以降は、コンクリートの腐食ひび割れによる影響を受けた AE が発生したと考えられる。また、図 1 の劣化進行過程と比較した場合、実験開始から 126 日目までが潜伏期および進展期、126 日目以降が加速期および劣化期に該当すると今回の実験では判断した。

RA 値と平均周波数の関係を図 11 に示す。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、鉄筋腐食による影響を受けたと考えられることから、乾燥浸漬繰り返し実験で、電食実験との一致が確認された。さらに、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多く発生している。また、126 日目以降でも RA 値の増加および平均周波数の減少が確認されており、この時間帯に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、鉄筋腐食過程では、RA 値の増加および平均周波数の減少が確認され、コンクリートの腐食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ることが明らかとなった。また、126 日目を経過した直後では、図 10 では AE イベントは確認されていない。そのため、AE パラメータ解析を行うことで、早期にコンクリートの腐食ひび割れ時期を判断できる可能性が示された。

6-2. 乾湿繰り返し実験の AE SIGMA 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 次元位置の同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。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。鉄筋腐食の時期には 6 個、コンクリートの腐食ひび割れ時期には 49 個発生した。それぞれの SIGMA のひび割れ識別の種類を図 12、位置標定結果を図 13

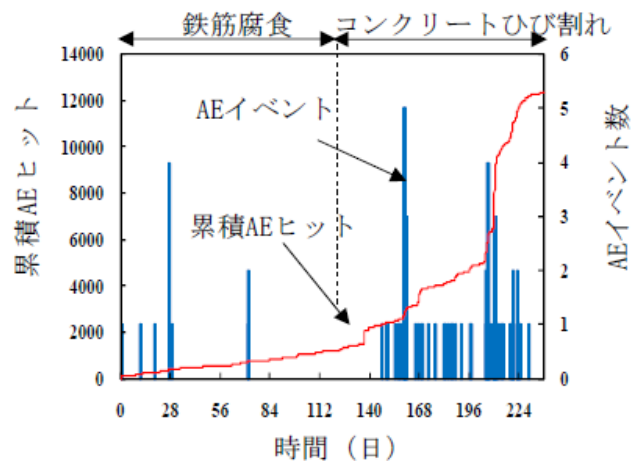


図 10 累積 AE ヒット数と AE イベント数

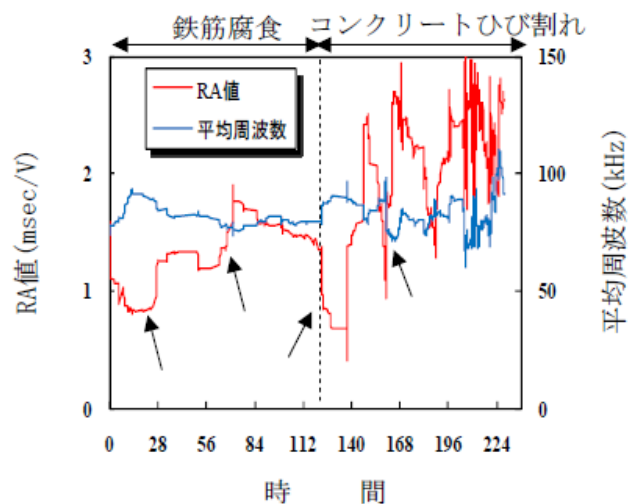
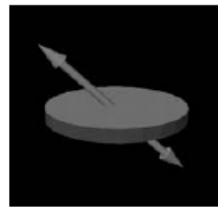


図 11 RA 値と平均周波数の移動平均値の関係



(a) 引張型ひび割れ



(b) 混合型ひび割れ



(c) せん断型ひび割れ

図12 SiGMAのひび割れ識別

に示す。鉄筋腐食の時期では、ほとんどのAEイベントが供試体上部に同定されており、AEイベント数も少ない。これは、鉄筋腐食過程では、微小な規模のAE現象が多いためと考えられる。コンクリートの腐食ひび割れ時期では、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AE源が同定された。これより、鉄筋腐食の膨張圧に伴うひび割れの進展を同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コンクリート表面に顕在化する前に予測できる可能性が確認された。



側面図

断面図

(a) 実験開始から126日



側面図

断面図

(a) 126日目以降

図13 SiGMAの位置標定解析

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」、2002年制定、2002
- 2) 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
- 3) 大津政康：コンクリート工学における非破壊検査手法の現状、コンクリート工学、Vol.31、No.12、pp.5-14、1993
- 4) ASTM C8767-91 Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- 5) 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.163-167、2005.
- 6) 土木学会：土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」、2002年制定、2002.
- 7) 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