論文 PiBEM と AE 法を適用した非破壊試験法による鉄筋コンクリート腐食 評価

和久田 倫代*1・川崎 裕太郎*2・友田 祐一*3・大津 政康*4

要旨:近年,メンテナンスフリーとして考えられてきたコンクリート構造物の劣化原因の一つとして塩害が 挙げられる。今後新たに建設される実構造物の塩害に対する維持管理には,鉄筋腐食の発生時期を早期に評 価することが不可欠である。本研究では,コンクリート構造物の塩害における環境条件を考慮して浸漬乾燥 繰返し実験を行った。塩害の評価として電気化学的手法による計測結果を用いて PiBEM を適用することで, コンクリート表面の自然電位をコンクリート内部の自然電位へと換算した。その結果,PiBEM および AE 法 の併用によりコンクリート供試体の鉄筋腐食を定量的に評価する非破壊試験法の可能性が明らかになった。 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、塩害が挙げら れ、コンクリート中への塩化物イオンの浸入により鉄筋 腐食が引き起こされ、構造物が劣化する。現在まで、鉄 筋腐食の有無は,目視,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の非破壊試験法によっ て評価されてきた。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を残すことが困 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、計測値が構造物の置かれた多種多様な 環境条件の影響を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、塩化物イオンの腐食限界濃 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困難である。し たがって、コンクリート中の鉄筋腐食過程を早期かつ確 実に評価する非破壊試験法の開発が重要である。

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)法を適用した。AE法は、コ ンクリート中の鉄筋腐食に伴い発生する AE 波の検出が 可能で、「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 発生時期を 確認できる ⁵⁾。そこで本実験では、鉄筋コンクリート供 試体を用いて、浸漬乾燥繰返し実験中に AE 法を適用し た。また、電気化学的手法である自然電位および分極抵 抗を計測し AE 法と併用した。

次に,環境条件に影響を受ける電気化学的手法の問題

点を改善するため、コンクリート表面ではなく鉄筋の表 面付近での電気化学的評価を試みた。ここでは、自然電 位法における電位分布を 3 次元境界要素法(Boundary Element Method; BEM)により解析した。これは、コ ンクリート表面で計測した自然電位値、分極抵抗値およ びコンクリート中の埋込みセンサで測定した自然電位 値から、鉄筋上の自然電位値を換算する逆解析法 (Potential inversion by Boundary Element Method;

PiBEM)である。この電位解析結果とAE法による計測 結果を比較することにより、鉄筋の腐食状態を定量的に 評価する非破壊試験法について検討した。

さらに実験結果では、供試体中での鉄筋の位置により 腐食状態に大きな違いがあることが明らかとなった。そ こで、実験終了後、鉄筋をはつり出すと共に、各鉄筋か ぶり位置での塩化物イオン濃度を測定し、塩化物イオン 浸透濃度の検証も行った。

2. 鉄筋腐食の評価方法

2.1 自然電位法⁶⁾

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

*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 自然科学研究科社会環境工学専攻
*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)

化する。この卑の電荷を計測するのが自然電位法であり, コンクリート中の鋼材の腐食診断が可能となる。また, 特に高価な計測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。

しかし,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 る環境条件や、コンクリート自体の材料特性の相違によ 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-876⁷⁷を用いた。

2.2 分極抵抗法

分極抵抗法は、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。コンクリート表面の外 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。

$$I_{corr} = K \cdot 1/R_{ct} \tag{1}$$

ここで、 I_{corr} は腐食電流密度 (A/cm²)、 R_{ct} は分極抵抗 (Ω cm²)、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 ⁸。

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,参考資料としてヨーロッパ コンクリート委員会による判定基準の表-2より判定さ れている⁸。なお,本研究では交流法を用いて計測を行 った。

2.3 AE パラメータ解析

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⁹⁰。AE 計測により検出された AE 波形のパラメータを図-1 に示す。検出された AE 信号に は、発生要因に関する情報等が含まれる。日本建材産業 協会規格 (JCMS) では、式(2)と式(3)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、 引張型とせん断型のひび割れ識別が規定されている¹⁰⁰。 既往の研究⁵⁰から、鉄筋の腐食開始時期に相当する 1 度 目の AE 頻発期では、RA 値が大きく平均周波数が小さ いせん断型ひび割れが発生し、コンクリートのひび割れ 開始時期に相当する 2 度目の AE 頻発期では、RA 値が 小さく平均周波数が大きい引張型ひび割れが発生する ことが判明している。

RA値(m sec/V) =
$$\frac{立ち上がり時間(m sec)}{$$
最大振幅値(V) (2)

2.4 塩化物イオンの浸透予測

土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」¹¹⁾の鉄筋腐食の開始時期を予測するためには、かぶり位置での塩化物イオン濃度の評価が重要である。コンクリート中の塩化物イオン濃度の移動は拡散に基づくことから、塩化物イオン濃度の拡散の予測には表面塩化物イオン濃度 *C*₀を一定として得られる式(4)を用いた。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - erf \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$
(4)

ここで,

C(x, t):深さ x, 時刻 t における塩化物イオン濃度 (kg/m³) C_0 :表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³) D:塩化物イオン濃度の見かけの拡散係数 (cm²/年) *erf*:誤差関数 を表している。

表-1 腐食評価基準 (mV vs CSE)

自然電位 (mV vs CSE)	鉄筋腐食の可能性			
-200mV < E	90%以上の確率で腐食なし			
$-350mV \le E \le -200mV$	不確定			
E<-350mV	90%以上の確率で腐食あり			

表-2 CEBによる腐食速度の評価基準

分極抵抗 <i>Rp</i> (kΩcm²)	腐食速度の判定				
130~260<	不動態状態(腐食なし)				
52~130	低~中程度の腐食速度				
26~52	中~高程度の腐食速度				
< 26	激しい,高い腐食速度				



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を図-2 に示す。供試体は 1000×570×75mm の板状で,鉄筋は SD295-D13を使用し,かぶり厚は 20mm とした。コンク リートの配合は表-3 に示すように練り混ぜ水に NaCl を 添加している。供試体は 28 日間湿潤養生後,側面を防 水塗料でコーティングして浸透面を供試体底面に限定 した。その後,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-2(a)に示す ように,供試体表面での自然電位計測および分極抵抗計 測位置を 27 箇所,内部での自然電位計測および分極抵抗計 測位置を 6 箇所に設け,7日間ごとに計測を行った。 なお,自然電位および分極抵抗計測値の結果から,鉄筋 腐食が開始されたと判断した時期に,AE 計測位置を 6 箇所選定し,図-2(a)のように AE センサをそれぞれ1個 ずつ設置して連続モニタリングを行った。

AE センサは R-15 (共振周波数 150kHz, PAC 社製) を 用いた。AE 計測装置には, DiSP (PAC 社製) を使用し, 周波数帯域は 10kHz~2MHz, ゲインを 60dB (プリアン プ 40dB+メインアンプ 20dB)として信号波形を増幅し, しきい値は 40dB (100µV, 0dB=1µV)として行った。 また,サンプリング周波数を 1MHz として信号波形を A/D 変換し,1 波形を 1024 個の振幅値のデータとして記 録した。

自然電位計測(表面)は照合電極に銀-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。コンクリート内部に埋設したミニセンサの照合 電極および対極は,ニッケル下地に金メッキを施した金 属を使用した。ミニセンサは直径13mmで,供試体表面 から深さ43mmにおいて,鉄筋表面の電位を計測した。

4. PiBEM

PiBEM において, 電位をu(x)とした際,

 $\nabla^2 u = 0$

と示されるポテンシャル場を満足する。式(5)の解は、境 界要素法(BEM)の基礎式において、

$$u(x) = \int_{S} \left\{ G(x, y) \frac{\partial u}{\partial n}(y) - \frac{\partial G}{\partial n}(x, y) \cdot u(y) \right\} dS$$
(6)

と表示される。G(x,y)は基本解である。

コンクリート表面では、自然電位はポテンシャル問題 であり、BEM 法¹²⁾では式(7)のように定式化される。

$$u(x) = \sum_{j=1}^{N} G(x, y_j) \frac{\partial u}{\partial n}(y_j) S_j - \sum_{j=1}^{1} \frac{\partial G}{\partial n}(x, y_j) u(j) S_j$$
(7)

図-3 に示すように、コンクリート表面 S_hを面積要素 S_jに分割し、自然電位計測を行う。S_h以外の面では電流 の流入出は0であると仮定して、内部点(鉄筋上の点) x_iの電極を u_iとすれば、式(7)は次のように離散化する。





(b) 内部点

図-3 数値解析モデル図

表-3 コンクリートの示方配合

(5)

G _{max}	SI	W/C	Air	s/a	単位水量(kg/m ³)				AE 減水剤	AE 助剤	
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	NaCl	(g/m^3)	(g/m^3)
10	8	55	7	45	174	317	757	1084	0.704	317	13

ここで, $u_i \ge S_j$ はそれぞれコンクリート表面での自然 電位と計測電極部の面積(既知)である。また, $\partial u/\partial x_j$ は電流,分極抵抗 I_i の間には,

$$\frac{\partial u}{\partial n_j} \propto \frac{B}{I_j} \tag{9}$$

の関係が成立する。

さらに、コンクリートの物性により、コンクリート表面の電位には、式(5)の均質体の支配方程式以外の影響を考慮する必要がある。そこで、式(8)の電位項および電流項にそれぞれ係数 C₁および C₂を代入すれば、

$$u_i = C_1 \left(\sum_{j=1}^{1} \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} u_j S_j \right) + C_2 \left(\sum_{j=1}^{1} G_{ij} \frac{1}{I_j} S_j \right)$$
(10)

と置くことができる。

本実験では,鉄筋上の2箇所(図-2参照) x₁, x₂で内 部電位計測を行っている。したがって,式(10)は,

$$u_{1} = C_{1} \left(\sum_{j=1}^{N} \frac{\partial G(x_{1}, y_{j})}{\partial n} u_{j} S_{j} \right) + C_{2} \left(\sum_{j=1}^{N} G(x_{1}, y_{j}) \frac{1}{I_{j}} S_{j} \right)$$

$$u_{2} = C_{1} \left(\sum_{j=1}^{N} \frac{\partial G(x_{2}, y_{j})}{\partial n} u_{j} S_{j} \right) + C_{2} \left(\sum_{j=1}^{N} G(x_{2}, y_{j}) \frac{1}{I_{j}} S_{j} \right)$$
(11)

という連立方程式となり, *C*₁, *C*₂は決定可能となる。その後,式(7) に *C*₁, *C*₂を代入すれば,鉄筋上の全ての点で,自然電位 *u*_iが決定できる。

5. 試験結果

5.1 自然電位計測値

28 日養生後を0日目とし,図-2(a)における計測点1, 3,12,14 の自然電位計測結果を図-4(a)および(b)に示 す。図中の破線は腐食の評価基準である・350mVを示し たものである。計測点1および14についてはコンクリ ート表面の電位を,計測点3および12についてはコン クリート表面とコンクリート内部(鉄筋表面付近)につ いての結果を示している。計測点1および3の自然電位 値は,計測点12および14の値より大幅に低い値を示し ている。このことから,鉄筋2よりも鉄筋1の方が腐食 の進展が早いことが予測された。

また,計測点 3 および 12 のコンクリート表面とコン クリート 内部の自然電位を比較すると,内部の自然電 位値は表面の値より常に低い値を示しており,腐食評価 基準を下回る時期も早いことが確認された。このことか ら,鉄筋腐食の正確な評価には,コンクリート内部での 電気的評価を行う必要性が確認された。

5.2 PiBEM

自然電位計測値(表面),分極抵抗計測値(表面)お よび自然電位計測値(内部)を入力データとして BEM を用い,全計測点における鉄筋上での自然電位値を求め た。鉄筋1の解析結果を図-5に示す。今回,表面電位を 9箇所,内部電位を2箇所計測し,81箇所の内部電位を 得た。ここでは、自然電位計測値が腐食評価基準である -350mVを下回り、AEセンサを設置した7日後の63日 目、AEヒットの急激な増加が確認された91日目、自然 電位計測終了時の105日目の結果を示す。なお、この解 析結果については、全て浸漬直後の自然電位および分極 抵抗の計測値を使用した。

鉄筋上の全ての計測点(計測点 1~9)を比較すると, 計測点 4~9の6点は105日目の値が一番低くなってお り,日数経過に伴い腐食が進行したことが確認された。

また,63日目と91日目の解析値は,計測点1から右 下がりになっていることから,実験中期に計測点1側で 鉄筋腐食が活発に進行したと予測される。

この結果より, PiBEM を行うことで,鉄筋のどの箇 所で腐食が進行しているかを評価できる可能性が示さ れた。



5.3 AE 発生挙動

42 日目の自然電位計測値を元に,AE センサ設置位置 を決定し,56 日目から AE の計測を開始した。

図-2(a)のように設置した AE センサの各累積 AE ヒット数を図-6 に示す。その結果,計測点1に設置した ch1 から最も多くの累積 AE ヒット数が検出された。

ここで, ch1の AE パラメータから算出した RA 値お よび平均周波数を図-7に示す。計測点1では, RA 値お よび平均周波数の大小関係から,84日目以降に規模の大 きな AE 現象が発生したことが推測され,それは引張型 ひび割れと識別される。

5.4 鉄筋のはつり出しによる目視観察

浸漬乾燥繰り返し実験は 112 日目に終了し,各鉄筋を はつり出して目視による鉄筋全体の腐食状況を確認し た。図-8に鉄筋1の観察結果を示す。丸で囲んでいる部 分は,目視で確認された錆の位置を示している。供試体 端部に当たる計測点1で激しい腐食が確認された。また, 破線の丸で示した計測点7および8については,錆は生 じていないものの黒皮の剥離が確認された。計測点1の 鉄筋腐食状態は,図-4(a)の自然電位計測結果および図-6 のAE発生挙動による腐食診断結果と一致していること が確認された。

5.5 塩化物浸透状態の確認

電気化学的手法,AE 法および鉄筋の目視観察によっ て、同じ供試体内の鉄筋1と鉄筋2の腐食度に大きな違 いがあることが明らかとなった。そこで、112日間の浸 漬乾燥繰り返し実験終了後、鉄筋1~3のかぶり位置で のコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定した。その 結果と図-9中の凡例を表-4に示す。

表-4 に示す実測値に基づき,各鉄筋下での塩化物イオン濃度の見かけの拡散係数を割り出すことで塩化物浸透曲線を作成した。その結果を図-9 に示す。

初期,56 日目,91 日目および112 日目の表-4 中の4 つのデータについては,図-2 に示す供試体以外に角柱供 試体(400×100×75mm)を作製し,同じ環境の下実験 を行った。しかし,供試体寸法にばらつきがあることか ら,日数が経過すると誤差が生じることが図-9 より分か る。

本研究の対象であるスラブ供試体のように比較的大型の試験体では,供試体箇所により塩化物イオンの浸透 速度が異なり,鉄筋の腐食速度に影響があることが確認 できた。

6. 結論

本研究では、実構造物を模擬した鉄筋コンクリートス ラブ供試体を対象とし、電気化学的手法、数値解析 (PiBEM)および AE 法を併用するハイブリッド非破壊



図-8 目視による鉄筋の観察結果

表-4 全塩分計測結果

	凡例	濃度(kg/m ³)
初期 (角柱供試体)	\diamond	0.18
56日目(角柱供試体)	\triangleleft	1.56
91日目(角柱供試体)		2.00
112 日目(計測点1)	\diamond	1.27
112 日目(計測点 5)	\triangle	1.52
112 日目(計測点 14)		0.77
112日目(角柱供試体)	ightarrow	1.93



試験法により塩害による鉄筋腐食を評価することに試 みた。その結果,以下のことが明らかとなった。

- (1) 自然電位計測結果から,鉄筋1と鉄筋2では計測値 に差があり,同じ供試体中であっても鉄筋腐食の進 行には,ばらつきがあることが確認された。
- (2) 自然電位計測結果において、コンクリート表面電位 よりもコンクリート内部電位の方が常に低い値を 示していることから、腐食評価の際には、コンクリ ート内部の電位を得る必要があることが明らかと なった。
- (3) PiBEM を行うことで、埋込みセンサを設置してい ない箇所における内部電位値を得ることが可能と なり、その結果、鉄筋のどの箇所で腐食が進行して いるかを評価できる可能性が示された。
- (4) AE パラメータから RA 値および平均周波数を算出 することにより、ひび割れの種類識別が可能である。 PiBEM と AE 法による結果を併用することによっ て、より正確な腐食評価が可能であることが明らか となった。
- (5) 鉄筋のはつり出しによる目視観察結果から,計測点 1の鉄筋腐食状態は,自然電位計測値および AE 発 生挙動と一致していることが確認された。このこと から, PiBEM および AE 法による診断結果が妥当 であることが示された。
- (6) 塩化物浸透状態の確認から、本研究に用いたような 比較的大きな供試体では、供試体箇所により塩化物 イオンの浸透速度が異なり、鉄筋の腐食速度に影響 を与える可能性があることが確認された。

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) 社団法人日本非破壊検査協会:新コンクリートの非 破壊試験,技報堂出版, pp.286-289, 2010
- ASTM C876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of United Reinforcing Steel in Concrete, 1999
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 土木学会:2007 年制定,コンクリート標準示方書「維 持管理編」, p.99,2001
- 12) C.A.フレビア:境界要素法入門, 培風館, 1980