

# 論文 コンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する定量的評価の考察

友田 祐一\*1・小林 廉\*2・大津 政康\*3

**要旨:** コンクリートの塩害に対する耐久性照査の基本である鉄筋腐食の開始時期を評価するために、電気泳動の実験にアコースティック・エミッション(AE)計測を適用した。実験結果を基に、塩分予測濃度とAE発生挙動の関係を検討し、示方書における鉄筋腐食の劣化進行過程に関する直接的な評価を行うことにより、塩害劣化の進行予測について定量的な検討を試みた。

**キーワード:** 塩分浸透, 鉄筋腐食, 電気泳動, アコースティック・エミッション, 耐久性照査

## 1. はじめに

コンクリート構造物の塩害劣化は、周辺の環境条件や、材料特性に大きく影響される。一方で、脱塩工法を用いた補修の開発が進んでいることから、塩害に関する定量的診断法の確立が急がれている。これには、鉄筋腐食の進行を定量的に予測することが不可欠である。最近制定された土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」<sup>1)</sup>によれば、塩害による鉄筋腐食の劣化進行過程を図-1のようにまとめている。

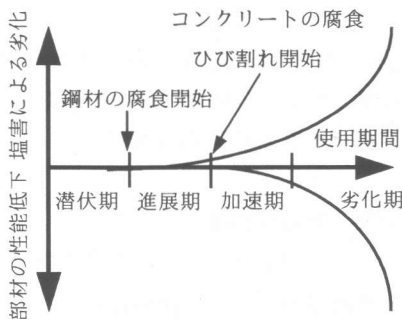


図-1 塩害による劣化進行過程

図に従って塩害を評価するには、潜伏期、進展期、加速期の正確な予測が不可欠である。しかし、実際にこれらの時期を見極めることは容

易ではない。これまでの研究で電気泳動の実験にAE計測を適用した研究<sup>2)</sup>によれば、鉄筋腐食に伴い活発にアコースティック・エミッション(AE)現象を見られることが知られている。しかし、これまでの研究は、塩害を自然電位法により鉄筋腐食の時期の評価をすることが一般的である<sup>3)</sup>。これに対して、AE計測によれば、自然電位法よりも早く鉄筋腐食を評価できる可能性が示唆されている<sup>4)</sup>。

そこで、本研究では、電気泳動にAE計測を用いて、AEの発生挙動と塩分の浸透状況を比較することにより、図-1の劣化進行過程の定量的な検討を試みる。さらに、脱塩過程における脱塩効果の評価にAE計測を適用する方法も考察する。

## 2. 解析方法

### 2.1 拡散係数

連続浸せき実験解析では、既往の研究<sup>5)</sup>に基づいて実験結果より、塩分の拡散係数 $D$ を決定した。その方法は、拡散過程をレートプロセスと考えて、

$$C = C_0(1 - e^{-Dt}) \quad (1)$$

と近似する。ある期間 $\Delta t$ での塩分増分 $\Delta C$ に対して、式(1)より式(2)を得る。

\*1 熊本大学技術専門職員 工学部技術部 (正会員)  
 \*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻  
 \*3 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

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> )				
					水 W	セメン ト C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 A
20	4.5	55	4.1	47	170	308	809	1032	0.123

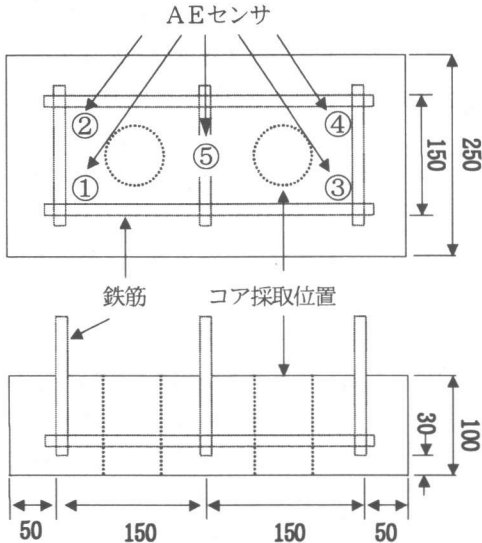


図-2 電食・脱塩実験供試体

$$\frac{dC}{dt} = D(C_0 - C) \quad (2)$$

ここで、

$C_0$ : コンクリート表面塩化物イオン濃度は、  
連続浸せき水(3%NaCl 水溶液)のCl<sup>-</sup>単  
位容積重量を表す。

$C$ : 深さ0.5cmの全塩分量 (kg/m<sup>3</sup>)

$D$ : 塩分の拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)

式(2)に28日連続浸せき実験の値を代入して  
拡散係数を決定した。

## 2. 2 塩分浸透予測

塩分浸透予測の解析には、表面塩分濃度を一定として、式(3)を用いた。

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (3)$$

ただし、実際の問題として、表面濃度を一定と見なすこと、及び実験的に決定することは困

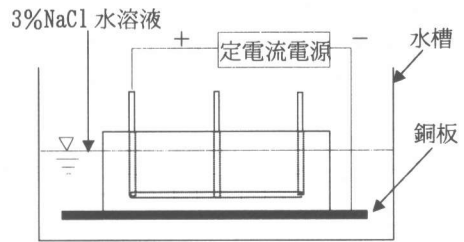


図-3 電食実験装置

難とされている<sup>1)</sup>。そこで、見掛けの表面濃度を  $C_1$  として用いることにした。この場合、表面濃度は、

$$C_1 = \frac{C(x)}{1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \quad (4)$$

ここで、 $t$ : 実験期間(日)

$C(x)$ : 各実験における0.5cm~2.5cm  
までの塩分濃度

と置き、式(4)より求めた0.5cm~2.5cm までの表面濃度を平均して各期間における連続浸せき実験の見掛けの表面濃度  $C_1$  を推定した。

## 3. 電食・脱塩実験概要

実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。連続浸せき実験の供試体は、100×100×200mmの角柱供試体を作製し、28日間標準水中養生を行い、100×100mmの一面を除きエポキシ樹脂を塗布した後、連続浸せき実験を行った。

電食・脱塩実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-2に示すように、250×400×100mmの鉄筋コンクリートを作製した。ただし、この場合には練り混ぜ水に、0.45%NaCl 水溶液を使用した。0.45%の塩分濃度は、鉄筋腐食の許容塩化物イオン量(0.6kg/m<sup>3</sup>)<sup>7)</sup>より決定した。供

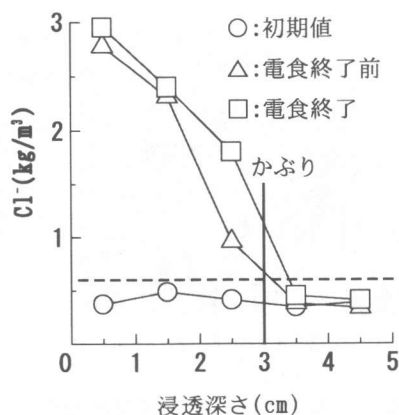


図-4 電食実験結果

試体は、28日間標準水中養生を行い底面以外にエポキシ樹脂を塗布した後、電食実験および脱塩実験を行った。

電食実験は、図-3に示す水槽に3%NaCl水溶液を満し、底の銅板上に供試体を置いて、鉄筋を陽極、銅板を陰極として100mAの定電流を240時間通電させた。また、電食実験終了後の供試体を使用して、脱塩実験を行い100mAの定電流を電食実験同様240時間通電させた。脱塩実験は、同じく図-3に示す水槽に飽和Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液を満し、鉄筋を陰極、銅板をチタンメッシュに換えて陽極とした。各実験終了後、図-2に示す位置でコアを採取して浸透面から5cmの深さまで1cm毎にコンクリート中の全塩分量と可溶性塩分量<sup>3)</sup>を測定した。なお、電食実験では鉄筋腐食の目安として、供試体表面を20点(5cm間隔)に分割して自然電位の測定を行った。この場合、分割した点の半数以上が鉄筋腐食の評価基準である-350mV<sup>3)</sup>より卑となった時を電食実験終了としている。今回の実験では、240時間後に-350mVより卑となる点が半数以上となったために、脱塩実験は同じ240時間後に実施した。自然電位法と平行して、電食、脱塩実験中に、示方書による塩害の劣化進行過程を初期の段階で把握するためにAE測定を行った。AEセンサは、図-2に示す5ヶ所に配置しており、共振周波数50kHz(プリアンプ内蔵防水型)のセンサを設置し、システムの利得20dB、周波数帯

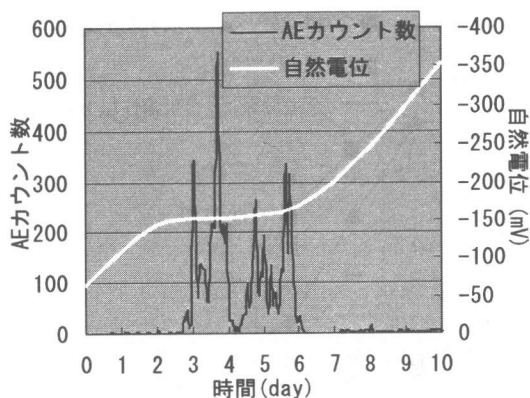


図-5 AE カウントと自然電位の比較

域10kHz~200kHzと設定してAE計測を実施した。

## 4. 実験結果

### 4. 1 電食実験結果

図-4に、練り混ぜ水に0.45%NaCl水溶液を使用した供試体の初期値、電食実験終了前、電食実験終了の実験結果を実験室における鉄筋腐食の許容塩化物イオン量(0.6kg/m<sup>3</sup>)<sup>1)</sup>とともに示す。電食実験終了前の供試体とは、自然電位を測定した際に供試体を20点に分割し、鉄筋腐食の評価基準である-350mVより卑となる点が半数になる前を電食実験終了前とし、半数以上を電食実験終了と決定した。図のようにかぶり3cmのところでは、電食実験終了供試体の全塩分量は、鉄筋腐食の規制値である0.6kg/m<sup>3</sup>を超えており、実際に鉄筋をはつり出したところ鉄筋腐食が認められた。電食終了前供試体では、かぶり3cmのところの全塩分量が0.6kg/m<sup>3</sup>付近にあり鉄筋腐食の初期段階にあることが認められた。これより自然電位法による鉄筋腐食を評価する妥当性が確認できたが、鉄筋腐食の潜伏期から進展期へ遷移する時期の評価が把握しにくいために、AE計測を適用して検討した。この電食実験におけるAE計測結果と自然電位を比較した結果を図-5に示す。AEの結果によると3日目から急激にAEが発生していることから示方書の潜伏期を過ぎて進展期に移り鉄筋腐食が開始したことが伺える。しかし、自然電位では、3日目よ

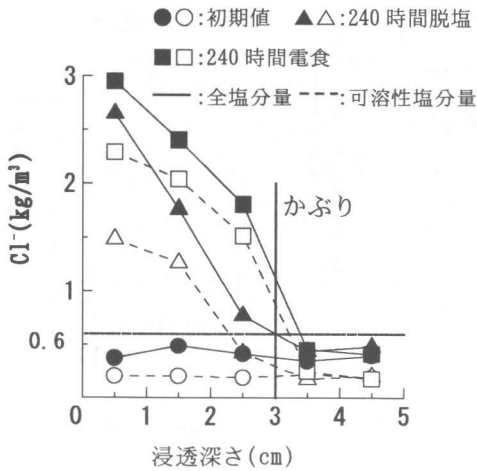


図-6 電食・脱塩実験比較結果

り電位が一定となり、AE発生が落ち着きだした時点から碑の方に向かっていっている。これより、AE計測が自然電位法より鉄筋腐食状況を初期の段階で把握できることが確認された。そして、示方書における潜伏期から進展期へ遷移する時期を確認できる可能性が明らかとなった。

#### 4. 2 脱塩実験結果

脱塩実験では、240時間電食終了実験後の供試体を使用した。電食時間と同じ240時間脱塩実験における全塩分量と可溶性塩分量を比較した結果を図-6に示す。図のように、深さ1cmのところでは、電食時には可溶性塩分量の割合が脱塩実験よりも大きく電食実験により塩分の移動が盛んに起きていることが確認できる。脱塩実験では、電食実験時より全塩分量の減少がみられるが、特に可溶性塩分量の減少が大きく、脱塩を行うことによる可溶性塩分量除去の有効性が確認できた。さらに、かぶり3cmにおける全塩分量は、規制値の0.6 kg/m<sup>3</sup>以下まで減少しており、実際に鉄筋をはつりだしたところ鉄筋腐食はほとんど確認されなかった。

脱塩時の自然電位を計測したところ、電位-850mVより卑を示した。この-850mVより卑の電位は、鉄筋が不活性状態の領域にあり、防食状態であることが認められている<sup>10)</sup>。AE計測を行

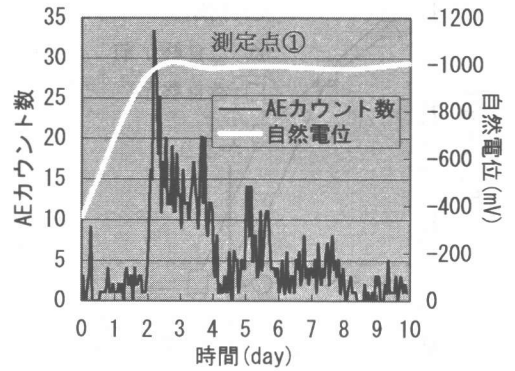


図-7 AEカウントと自然電位比較

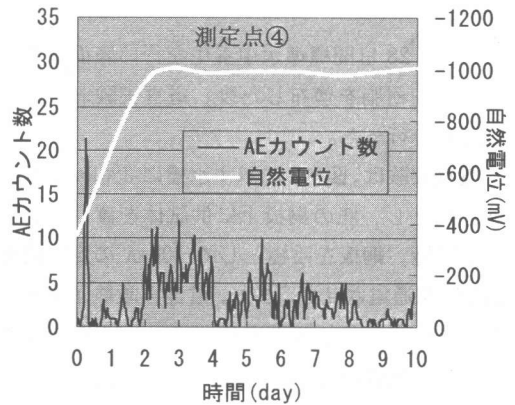


図-8 AEカウントと自然電位比較

った結果として、図-7は測定点①、図-8に測定点④の実験結果を示している。図のように、2日目までは、AEはあまり計測されていないが、それ以降で頻繁にAEが計測されている。自然電位を比較すると、電位の変化との対応は非常によく、2日目頃から脱塩効果が開始したと考えられる。8日目頃から収束しているのは、脱塩による塩分除去が終了に近づいているためだと考えられる。これより、自然電位およびAE計測を併用することにより、脱塩開始の時期および塩分除去の状況を把握できる可能性も明らかになったと考えられる。

### 5. 実験解析結果および考察

#### 5. 1 電食実験解析結果

電食実験での拡散係数を決定するために、3% NaCl水溶液で練り混ぜた供試体の150時間電食

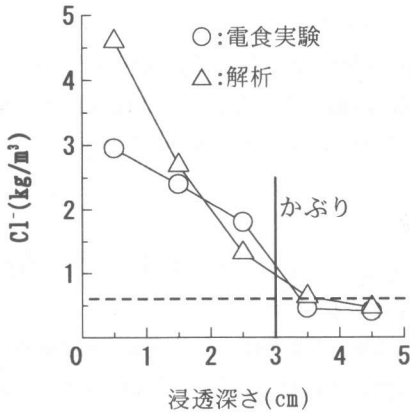


図-9 電食実験解析結果

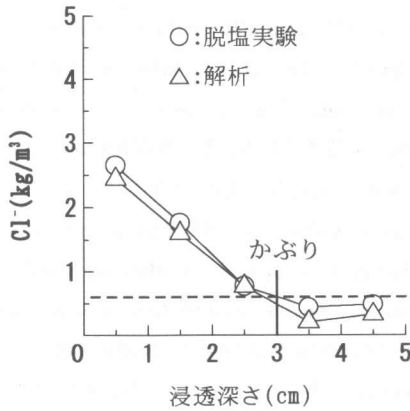


図-11 脱塩実験解析結果

実験結果と連続浸せき実験を360日まで解析した結果を比較した。その結果、電食実験の150時間が、120日連続浸せき実験の解析結果とよく一致していることが認められた<sup>5)</sup>。これより、電食実験の1時間(100mA 通電)が連続浸せき実験の約20時間に相当するとし、28日連続浸せき実験結果から式(2)によって求めた拡散係数を20倍にして式(3)より塩分浸透予測の解析を試みた。図-9に、240時間電食実験による解析結果を実験結果と比較して示す。図のように、表面付近は別として、かぶり位置での塩分浸透予測はよく一致しており、電食実験でも、拡散係数を決定できればかなりの精度で塩分浸透を予測できることがわかる。図-10には、電食実験を式(3)より算出した、かぶり(3cm)位置での塩素イオン解析値と累積AEカウント数の関係

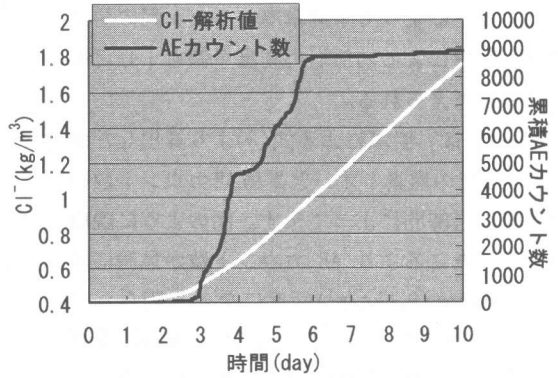


図-10 電食による3cmのCl⁻と累積AEカウント数の関係

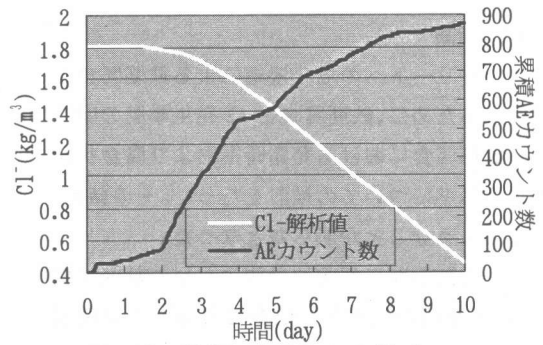


図-12 脱塩による3cmのCl⁻と累積AEカウント数の関係

を経過時間によって示す。これより、初期の塩素イオンが増加するのとほぼ同時にAEカウント数も増加している。さらには、規制値0.6 kg/m<sup>3</sup>付近になるとAEカウント数も急速に増加している。これより、示方書における予め塩化物を混入した供試体による促進試験などの鋼材腐食発錆限界濃度0.3 kg/m<sup>3</sup>~0.6 kg/m<sup>3</sup>程度<sup>7)</sup>の妥当性が確認された。また、AE測定を行うことにより示方書における鉄筋腐食の潜伏期から進展期への移行時期を定量的に確認できる可能性が明らかとなった。

## 5. 2 脱塩実験解析結果

図-11は、240時間脱塩実験の解析結果を示す。解析には電食実験と同じ表面濃度と拡散係数を用い、鉄筋位置から脱塩効果が起きると予測して電食実験の各深さにおける塩分濃度から

減じることによって予測濃度とした。図の結果より、脱塩による内部塩化物量予測も十分可能であると考えられる。

図-12は、脱塩による式(3)より算出したかぶり3cmでの塩素イオンと累積AEカウント数の関係を経過時間によって示す。図のように脱塩が始まったところよりAEカウント数が急激に増加し、規制値(0.6kg/m<sup>3</sup>)付近になると明らかにAEの発生が収まってきている。この結果、AE測定を行うことにより脱塩による補修にも有用な塩化物量予測が可能であると思われる。

## 6. 結論

コンクリートへの塩分浸透による鉄筋腐食を評価するために、鉄筋腐食とAE発生挙動の関係から鉄筋腐食における発錆時期および腐食状況の評価基準についての検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- (1) AE計測が自然電位計測より早く鉄筋腐食状況を初期の段階で把握できることが確認され、示方書における潜伏期から進展期への遷移する時期を確認できる可能性が明らかとなった。
- (2) 脱塩実験により全塩分量および可溶性塩分量除去の有効性が確認され、自然電位およびAE計測を併用することにより、脱塩効果の時期および塩分除去の状況を把握できる可能性が示された。
- (3) 電食実験の場合、連続浸せき実験に基づいて、拡散係数を換算することで、塩分浸透を予測できることが明らかとなった。AE測定を行うことにより鉄筋腐食の発生時期を決定できる可能性が認められた。さらに、示方書による鋼材腐食発錆限界濃度の予め塩化物を混入した供試体における発錆限界の塩素イオン量0.3kg/m<sup>3</sup>~0.6kg/m<sup>3</sup>の妥当性が確認された。
- (4) AE測定と塩分浸透予測を比較することにより鉄筋腐食の示方書における潜伏期から進展期への移行時期を定量的に確認できる

可能性が示された。

- (5) 脱塩実験により鉄筋腐食の停止が確認され、AE計測により脱塩による鉄筋腐食の補修に有用な塩化物量予測の手法が示された。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」, 2001年制定
- 2) 村上祐治, 山下英俊, 喜多達夫, 大津政康：鉄筋腐食した部材の力学的挙動とAE特性, 第8回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.183-188, 1991.11
- 3) Sanchun, Y. Kejin, W. W. Jason Weiss. and Surendra, P.S.: Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of reinforced concrete, ACI MATERIALS JOURNAL, Vol.97, No.6, pp.637-644, Nov./Dec. 2000
- 4) A. Moczko, A. Pszonka and P. Stroeven: Acoustic Emission as a useful tool for reflecting cracking behavior of concrete composites, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.805-812, Sep. 1995
- 5) 友田祐一, 鎌田憲治, 大津政康：コンクリートの塩分浸透機構と予測に関する考察, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.192-193, 1999.9
- 6) 佐伯竜彦, 植木聡, 嶋毅：コンクリート表面における塩化物イオンの濃度に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp.985-990, 1999
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」耐久性照査型, 平成11年版
- 8) 船戸巳和男：硬化コンクリート中に含まれる塩分分析法, 日本セメント(株), 中央研究所共同実験資料, 1984
- 9) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三：鉄筋腐食の診断, 森北出版, 1993
- 10) コンクリート構造物の電気化学的補修工法設計・施工マニュアル, コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会, 1998.10