

## 論文 AE 法によるコンクリート中の鉄筋腐食過程の定量的モニタリングに関する考察

友田 祐一<sup>\*1</sup>・田中 正俊<sup>\*2</sup>・志水 寿光<sup>\*3</sup>・大津 政康<sup>\*4</sup>

**要旨**：塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化が近年、深刻な社会問題となっている。そのために、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、鉄筋腐食の発錆時期を正確に評価できるモニタリング技術の開発は急務と考えられる。そこで、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せき乾燥繰り返し実験を行った。実験中には、アコースティック・エミッション(AE)法と自然電位法による計測を行い、鉄筋腐食の評価について検討した。また、塩分浸透予測と AE 発生挙動を比較することにより、鉄筋腐食の発錆時期およびコンクリートの劣化進行過程の定量的モニタリングの可能性について検討を試みた。

**キーワード**：鉄筋腐食，塩分浸透予測，アコースティック・エミッション，モニタリング

### 1. はじめに

塩害の鉄筋腐食による劣化は、鉄筋コンクリート構造物の劣化事例の代表として、近年、深刻な社会問題となっている。これらの問題に対応するために、2001年制定・コンクリート標準示方書「維持管理編」<sup>1)</sup>において、コンクリート劣化に伴う様々な耐久性照査法が規定されており定量的な照査が提示されている。しかし、各種の早期検出検査法が開発中であるが、今だ、定量的な診断法は確立されていないのが現状である。

コンクリート構造物の塩害による劣化は、配合、施工法、環境条件等に依存しコンクリート内部において鉄筋の腐食進行速度が大きく異なる。しかし、塩害を定量的に評価するには鉄筋腐食の時期を早期の段階で確実かつ定量的に把握することが不可欠となる。

これらのことから、モニタリング技法としてアコースティック・エミッション(AE)法の適用を考察した。AE法とは、材料の破壊過程を評価する有効な検査手法である。これまでの研究

成果<sup>2)</sup>として、塩化物イオン(以下、Cl<sup>-</sup>と記載)浸透の促進実験である電食実験にAE法を適用することにより、早期の段階で鉄筋腐食を発見でき、コンクリート劣化の進行過程をモニタリングできる可能性が明らかとなっている。

そこで、本研究では塩害における環境条件を考慮した浸せき乾燥繰り返し実験にコンクリート中のCl<sup>-</sup>浸透による鉄筋腐食の過程を検討するため、AE法と自然電位法による計測を行った。この実験結果に基づいて、Cl<sup>-</sup>浸透の予測解析を行い、AE発生挙動の連続的な監視とCl<sup>-</sup>浸透状況を比較することにより、鉄筋腐食の進行過程を定量的にモニタリングする可能性について検討した。

また、現在の塩害に関するCl<sup>-</sup>の鉄筋腐食限界量は全塩分(以下、全Cl<sup>-</sup>)量を基準として定められている。しかし、実際の鉄筋腐食に直接影響するのは、可溶性塩分(以下、可溶性Cl<sup>-</sup>)量が考えられることから、この可溶性Cl<sup>-</sup>量による鉄筋腐食限界量の定量的な規制値についても検討を行った。

\*1 熊本大学 工学部技術部 (正会員)

\*2 富士ピー・エス

\*3 熊本大学 大学院自然科学研究科

\*4 熊本大学 自然科学研究科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

組骨材の 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	AE 剤 A
10	9.1	55	6.5	43.1	178	323	725	1145	0.129

## 2. 塩分浸透予測

### 2.1 拡散係数

拡散係数の決定には、非定常浸透理論における CI の浸透過程を用いた 2002 年制定・土木学会・コンクリート標準示方書「施工編」<sup>3)</sup> に示されている式(1)の回帰式よりコンクリート配合に対応した CI の拡散係数  $D$  を求めた。また、独立行政法人港湾空港技術研究所<sup>4)</sup> による CI 拡散予測プログラムからも拡散係数  $D$  を求めた。

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + (W/C) - 2.5 \quad (1)$$

ここに、 $D$  (cm<sup>2</sup>/sec) : 拡散係数,

$W/C$  : 水セメント比

なお、今回の浸せき乾燥繰り返し実験は、室温 20±5℃、湿度 70%程度と同室内において実施しているために、以下の解析では乾燥の影響は考慮していない。

### 2.2 示方書による解析

塩分浸透予測の解析は、コンクリートの表面 CI 量 (kg/m<sup>3</sup>)  $C_0$  を一定とする式(2)を用いた。

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

ここに、

$C$  : 浸透面からの距離  $x$  (cm), 実験期間  $t$  (sec) における CI 量 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  : コンクリートの表面 CI 量 (kg/m<sup>3</sup>)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

この場合、表面 CI 量  $C_0$  は式(3)より求めた。

$$C_0 = \frac{C_{(x)}}{1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}} \quad (3)$$

ここに、

$C_{(x)}$  : 各実験における浸透面からの距離

0.5cm~1.5cm までの CI 量 (kg/m<sup>3</sup>)

さらに、式(3)より求めた浸透面からの距離

0.5cm~1.5cm までの表面 CI 量  $C_0$  を平均して見

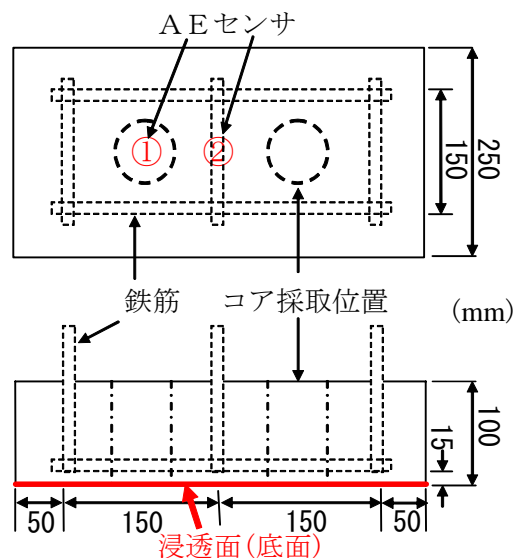


図-1 実験供試体

掛けの表面 CI 量  $C_1$  を推定した。

### 2.3 FEMによる解析

2次元 FEM 解析については、鉄筋コンクリート断面モデルを作成し、式(2)と同じ条件で拡散方程式を解くことにより要素数 266 の各節点における全 CI 量を求めた。

## 3. 実験概要

実験に用いた鉄筋コンクリートの配合を表-1 に示す。供試体は、図-1 に示すように 250×400×100mm の板状とし、鉄筋は SD295 の D16 を使用し、かぶりは 15mm とした。また、示方書<sup>3)</sup> による促進試験の鋼材腐食限界全 CI (0.3kg/m<sup>3</sup>~0.6kg/m<sup>3</sup>) 量を考慮して、供試体中に混入する NaCl を細骨材に置き換え、CI 換算を行った。その結果、28 日間標準水中養生後の初期全 CI 量は 0.125kg/m<sup>3</sup> となった。

供試体は、28 日間標準水中養生後、底面以外にエポキシ樹脂を塗布し CI の浸透を底面だけに限定した。その後、3%NaCl 水溶液の入った水槽に供試体を 7 日間浸せき 7 日間乾燥させる繰り返し実験を約 6 ヶ月間行った。

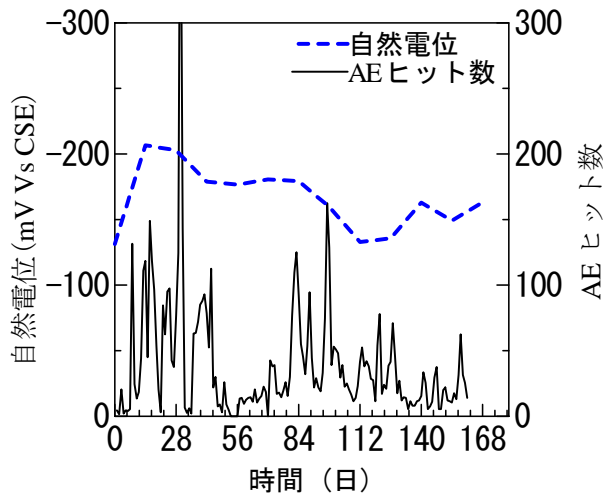


図-2 自然電位と AE ヒット数

実験終了後の供試体は、図-1 に示す位置でコアを採取し、浸透面から 5cm の深さまで 1cm 毎に電位差滴定法により、硬化コンクリート中の全 Cl<sup>-</sup>量と可溶性 Cl<sup>-</sup>量を計測した。

浸せき乾燥繰り返し実験中は、鉄筋腐食の目安として自然電位計測を行い、20 点(5cm 間隔)に分割した供試体表面を湿潤状態とし、7 日間毎に銅-硫酸銅電極(CSE)により行った。この場合、分割した点の半数以上が-350mV よりマイナスとなった時を最終実験終了とし現在も実験を継続している。また、自然電位計測と平行して、AE 法により塩害による鉄筋腐食を初期の段階で把握するため、図-1 に示す 2 ヶ所の位置に AE センサを設置し、Locan-AE システム(PAC 社製)で自然電位計測の時間以外は、連続的に計測を行った。この場合のしきい値は 40dB、AE センサは、共振周波数 150kHz の特性を持つ R-15 を使用して実施した。

#### 4. 実験結果

既往の研究成果<sup>2)</sup>として電食実験中に AE 計測を行った結果より、かぶり位置での全 Cl<sup>-</sup>量が示方書<sup>3)</sup>による鋼材腐食限界全 Cl<sup>-</sup>(0.3kg/m<sup>3</sup>~0.6kg/m<sup>3</sup>)量に達する時期に、AE 発生が顕著になる第一次期と実環境での暴露実験における鉄筋腐食の規制値全 Cl<sup>-</sup>(1.2kg/m<sup>3</sup>~2.4 kg/m<sup>3</sup>)量に達する第二次期が確認されている。これらの成果を基に、自然電位値と AE 発生挙動とから各

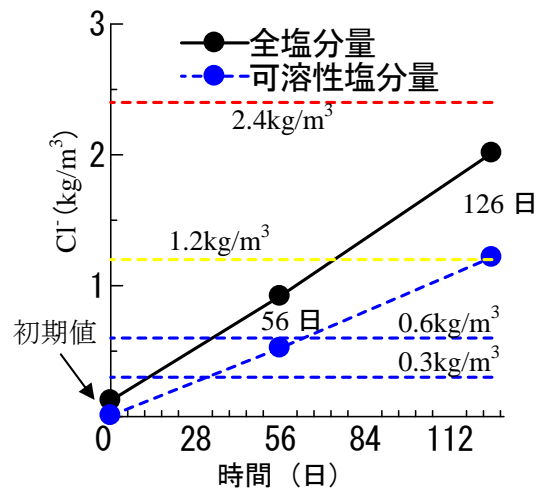


図-3 かぶり位置での Cl<sup>-</sup>量実験値

実験終了の時期を決定した。

その結果、今回の実験では、第一次期 56 日目、第二次期 126 日目を各終了時期とした。

図-2 は、自然電位と全ての AE ヒット数を比較した 168 日目までの結果を示す。図-3 には、各時期までのかぶり位置におけるコンクリート中の全、可溶性 Cl<sup>-</sup>量実験値を示方書<sup>3)</sup>の鋼材腐食限界全 Cl<sup>-</sup>量とともに示す。図-2 より AE 発生が顕著に現れる時期は 28 日目付近で、AE 発生が収束する時期は 56 日目付近であった。これらの時期は示方書<sup>3)</sup>に示された、促進試験における鋼材腐食限界全 Cl<sup>-</sup>(0.3~0.6 kg/m<sup>3</sup>)量に全 Cl<sup>-</sup>量と可溶性 Cl<sup>-</sup>量が達していることがわかる。28 日目付近での全 Cl<sup>-</sup>量は 0.6 kg/m<sup>3</sup> 付近にあり可溶性 Cl<sup>-</sup>量は 0.3 kg/m<sup>3</sup> 付近にある。また、56 日目付近では、このときのかぶり位置での Cl<sup>-</sup>量は図-3 のように全 Cl<sup>-</sup>量が 0.92 kg/m<sup>3</sup>、可溶性 Cl<sup>-</sup>量は 0.52kg/m<sup>3</sup>であった。したがって、AE 発生が顕著な第一次期から収束する時期において鉄筋腐食が開始されたと考えられる。ただし、この時点で実際に、鉄筋をはつり出したところ、鉄筋腐食は認められなかった。第二次期 126 日目は、AE 発生の顕著な第二時期を過ぎていることが図-2 より確認され、AE 発生の顕著な 100 日目付近で自然電位が一番高い値を示している。この時期は、既往の研究成果<sup>2)</sup>より鉄筋腐食の速度が速くなることが確認されている。全 Cl<sup>-</sup>量は、図-3 のように鋼材腐食限界全 Cl<sup>-</sup>(1.2 kg/m<sup>3</sup>)

量を大きく越えている。また、可溶性 Cl 量も 1.2 kg/m<sup>3</sup> に近い値を示している。実際に 126 日目の鉄筋をはつり出したところ鉄筋腐食が目視において認められた。これは、この時期から鉄筋の腐食速度が速くなり、錆が目視でも確認できる程に進んだものと考えられる。

これらの結果より、既往の研究成果<sup>2)</sup>である電食実験の結果と同様な結果が浸せき乾燥繰り返し実験においても確認された。また、可溶性 Cl 量では、鉄筋腐食が開始すると考えられる第一次期が 0.6 kg/m<sup>3</sup> 付近、鉄筋腐食の速度が速くなる時期の第二次期が 1.2 kg/m<sup>3</sup> 付近になることから示方書<sup>3)</sup>の鉄筋腐食限界全 Cl 量の 1.2 kg/m<sup>3</sup> の妥当性が考えられる。

これより、AE 法と自然電位法を適用することにより鉄筋腐食の時期を早期の段階でモニタリングできる可能性が明らかとなった。さらに、実構造物コンクリートの塩害における監視と劣化予測に適用できる可能性が確認できた。

## 5. 解析結果

### 5.1 AE パラメータ解析

#### (1) RA 値と平均周波数

AE パラメータ解析は、AE の発生数や図-4 に示す 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。例えば、コンクリート劣化が生じた場合における破壊の種類により、引張とせん断破壊では、AE の立ち上り時間および周波数分布に違いが生じる。そこで、立ち上り時間は、しきい値の設定に影響されることを考慮し、最大振幅値により立ち上り時間を除した RA 値(立ち上り時間/最大振幅値)を用いて評価した。さらに、周波数分布の相違を考慮し、AE の周波数特性値として解析に用いられている継続時間によりカウント数を除した平均周波数(カウント数/継続時間)の検討も行った。

なお、今回の実験では、浸せき時と乾燥時でこれらのパラメータに変動が生じるため、14 日毎に平均して評価を行った。

#### (2) b 値

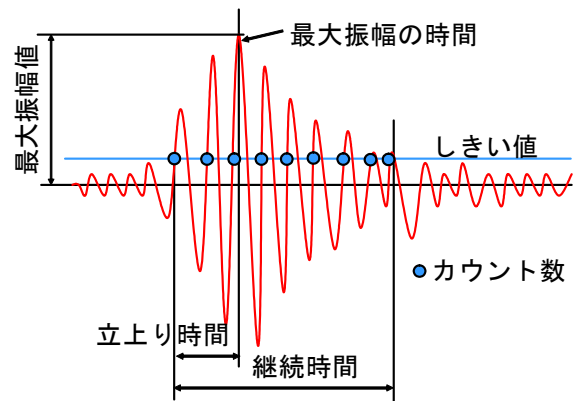


図-4 AEパラメータ

地震学では Gutenberg-Richter が、地震の規模(マグニチュード)を震央から 100km の箇所に設置された標準地震計が記録した紙上の、地震の最大振幅値をマイクロン単位で読み取り、その常用対数として式(4)のように定義した<sup>5)</sup>。

$$M = \log A \quad (4)$$

ここに、 $M$  : マグニチュード

$A$  : 一現象の最大振幅値

この  $M$  と、それより小規模な地震の累積頻度  $N$  の間に、式(5)のような関係が成り立つ。

$$\log N = a - bM \quad (5)$$

図-5 には、式(5)を両対数表示として、それぞれの時期において式(5)の傾きである  $b$  値を算出した例を示す。 $b$  値は、AE の振幅分布から得られる情報として、材料の変質や劣化を対象とし、材料や変形機構だけに依存するものである。例えば、塑性変形を含めた微小ひび割れに伴う AE では一般に小さい振幅分布が多く  $b$  値の値は大きくなる。一方、マクロなひび割れ発生に対

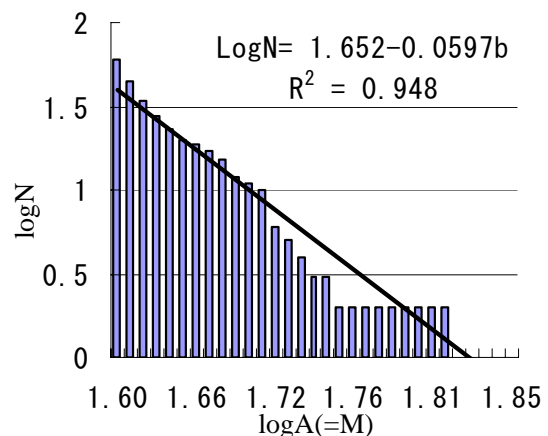


図-5 AE 振幅分布

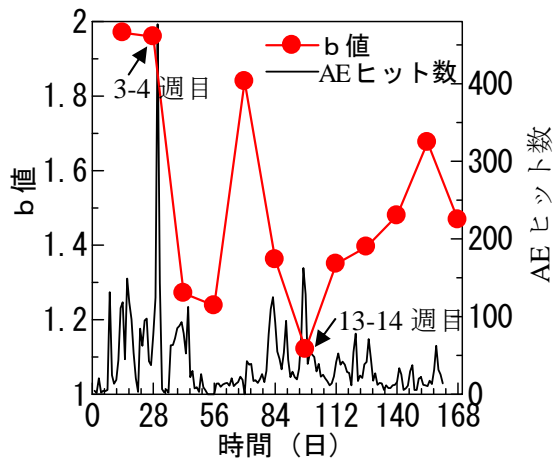


図-6 b 値と AE ヒット数の関係

する b 値は小さい値を示す。なお、b 値は式(6)より電圧変換のため 20 倍して評価を行った。

$$A = 20 \log V_p \quad (6)$$

ここに、A：一現象の最大振幅値 (dB)

$V_p$ ：信号のピーク値 ( $\mu V$ )

### (3) AE 解析結果

図-6 に、電圧変換を考慮した b 値の解析結果を 14 日毎に平均して示す。図-7、図-8 には、14 日間全ての AE ヒット数による RA 値と平均周波数を用いたひび割れ識別<sup>6)</sup>を示す。図-6 より第一次期である 28 日目頃に AE 発生挙動および b 値に急激な変化が見られる。これは、全 Cl 量が  $0.3 \text{ kg/m}^3 \sim 0.6 \text{ kg/m}^3$  の時期であり、図-7 の RA 値と平均周波数よりコンクリート中のせん断ひび割れの卓越した発生が推測され、b 値よりその規模が非常に小さいことも分かる。次に、100 日目にも b 値の急激な変化が見られ、図-8 の RA 値と平均周波数よりせん断ひび割れから引張ひび割れに移行しており、b 値よりひび割れの規模が大きいことが確認された。今回の実験では、AE 発生挙動と自然電位が一番高い値を示した時期を第二次期とした。この時点では、鉄筋腐食の規制値である全 Cl 量が  $1.2 \text{ kg/m}^3$  を大きく越えていることから鉄筋腐食の速度が速くなり、コンクリート中に引張ひび割れが発生したと考えられる。

## 5.2 Cl<sup>-</sup> 浸透予測結果

### (1) かぶり位置における全 Cl<sup>-</sup> 量浸透予測

浸透予測に用いた拡散係数および表面 Cl 量は、

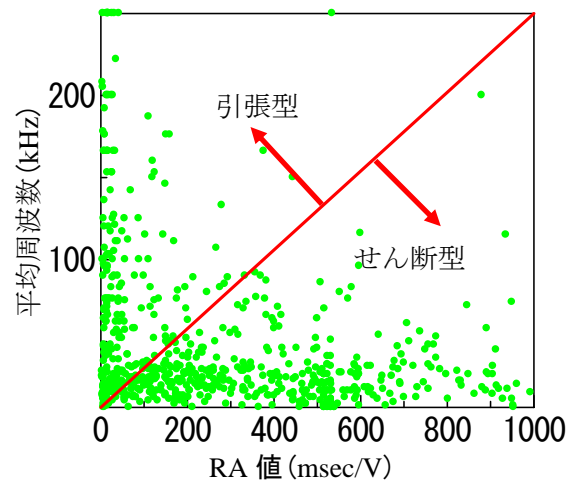


図-7 3-4 週目のひび割れ識別

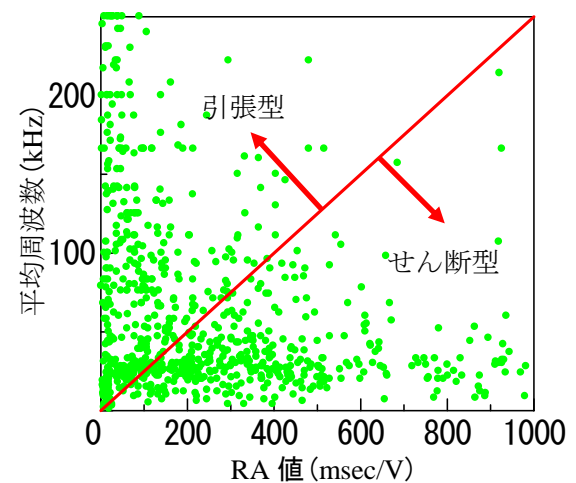


図-8 13-14 週目のひび割れ識別

示方書の式(1)より求めた  $6.05 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、各時期の全 Cl 量実験値から式(3)より求めた表面 Cl 量  $C_1$  を用いて示方書の式(2)と FEM 解析を行った。さらに、港湾空港技術研究所の Cl 拡散予測プログラムにより解析を行った。図-9 に、各時期におけるかぶり位置の全 Cl 量解析結果と全 Cl 量実験値を比較して示す。56 日の結果は、実験値とそれぞれの解析結果は、ほぼ同程度の値を示しているが、126 日の解析においてはいずれの結果も安全側に予測した。特に、FEM 解析値が実験値よりも高い値を示した。これは既往の研究成果<sup>7)</sup>により二次元 FEM 解析で確認された鉄筋付近に Cl が集中する影響が確認されている。

### (2) かぶり位置の可溶性 Cl<sup>-</sup> 量浸透予測

浸透予測に用いた拡散係数は、示方書の式(1)より求めた  $6.05 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、各時期の可溶性 Cl 量実験値から式(3)より求めた表面 Cl 量  $C_1$  を用



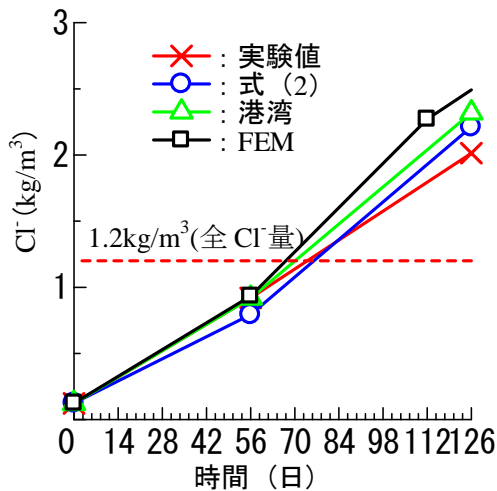


図-9 かぶり位置における解析手法別の全塩分量比較

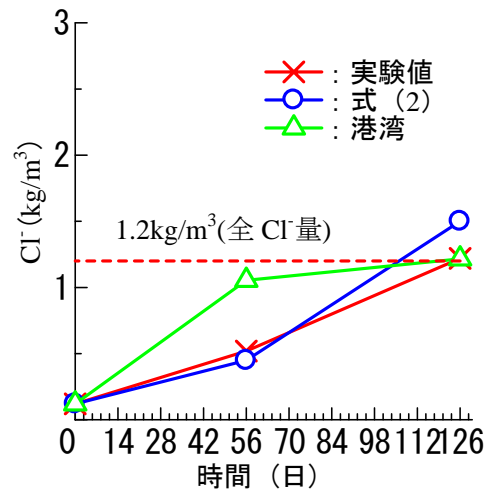


図-10 かぶり位置における解析手法別の可溶性塩分量比較

いて示方書の式(2)と港湾空港技術研究所の Cl 拡散予測プログラムによる解析を図-10に示す。

その結果、港湾の56日の結果を除けば、可溶性 Cl 量実験値とそれぞれの解析結果は、ほぼ同程度の値を示し、いずれも126日で  $1.2 \text{ kg/m}^3$  に達している。これより、可溶性 Cl 量により Cl の浸透予測ができる可能性が明らかとなった。

## 6. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の塩害による鉄筋腐食の発錆時期および劣化の進行過程を定量的にモニタリング技術の開発について検討を試みた。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- (1) 繰り返し実験に AE 法と自然電位法を適用することにより鉄筋腐食の時期を早期の段階でモニタリングできる可能性が明らかとなった。また、実構造物コンクリートの塩害における監視と劣化予測に適用できる可能性が確認された。
- (2) 示方書に示された、鉄筋腐食の全 Cl 量規制値である  $1.2 \text{ kg/m}^3$  を越える時期より鉄筋腐食の速度が速くなり、AE パラメータよりせん断ひび割れ(鉄筋とコンクリートのずれ)から引張ひび割れ(コンクリートのひび割れ)に移行する時期の特定が明らかとなった。
- (3) 式(1)の拡散係数における示方書と FEM 解析および港湾空港技術研究所による解析値は、

長期の全 Cl 量の浸透予測をできる確認がされた。また、可溶性 Cl 量により Cl の浸透予測ができる可能性が明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」，2001年制定，2001
- 2) 友田祐一，小林廉，大津政康：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.859-864，2001.7
- 3) 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
- 4) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その2），pp.167-168，2000.12
- 5) 大津政康：コンクリート材料におけるアコースティック・エミッション特性とその発生機構に関する基礎的研究，京都大学学位論文，pp.47-61，1982
- 6) 社団法人日本建材産業協会：建産協規格集・コンクリートの非破壊検査方法，2003年制定，pp.47-64，2003.3
- 7) 友田祐一，小林廉，田中正俊，大津政康：AE法による鉄筋腐食モニタリングに関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.771-776，2003.7