論文 電食実験によるコンクリート中の鉄筋腐食に関する考察

森 香奈子*1·木嶋 政智*2·友田 祐一*3·大津 政康*4

要旨:近年,鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食による被害が数多く報告され,維持管理の必要性から鉄筋 腐食によるコンクリートの劣化進行過程を早期に評価する非破壊検査技術の開発が求められている。その基礎 的な検討として本研究では,電食による鉄筋腐食時のコンクリート中の劣化進行過程をアコースティック・ エミッション(AE)法により観察した。その結果,劣化進行過程について,3 つの AE 発生時期が明らかと なり,その際の鉄筋の内部情報を走査型電子顕微鏡により明らかにした。

キーワード:鉄筋腐食,劣化進行過程,アコースティック・エミッション,走査型電子顕微鏡

1. はじめに

コンクリート構造物は、これまでメンテナンスフリー と考えられてきたが、近年では様々な劣化被害が報告さ れるようになった。そのためにコンクリート構造物の維 持管理の必要性から、早期に劣化を評価することが重要 となっている。コンクリート構造物の劣化被害の重要な 原因として、塩害がある。現在までのところ、鉄筋コン クリート構造物の表面にひび割れや錆汁が目視で確認 されることによってコンクリート内部の鉄筋腐食が明 らかになることが大半を占めており、コンクリート中の 劣化進行過程を早期に評価する非破壊検査法の開発が 急務と考えられている。

土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」¹⁾ によれば、塩害による劣化進行過程は図-1のように、 鋼材の腐食開始およびコンクリートの腐食ひび割れ開 始を遷移時期として、潜伏期・進展期・加速期を定めて いる。そして、塩化物イオン量の規制値を定めているが、 この値は構造物の設置環境条件や構造腐食許容量など の条件によって異なることから²⁾、塩化物イオン量のみ から鉄筋腐食の有無を確実に判断することは困難と考 えられている。

コンクリート中の鉄筋腐食の評価に一般的に利用さ れているのは、電気化学的手法の自然電位法である。し かし、自然電位法の計測値は環境条件の影響を多く受け るため単独での利用には適さないことが報告されてい る³⁾。一方、アコースティック・エミッション(以下 AE と表記)法を適用すれば、コンクリート中の鉄筋腐食に 伴う AE 波を検出でき、その過程で2つの活発な AE 発 生時期が確認できることが報告されている⁴⁾。そして、 特徴的な AE 発生の後に鉄筋のはつり出しを行って、走 査型電子顕微鏡(SEM)観察により、早期の鋼材腐食の

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科 (正会員)
*2 熊本大学大学院 自然科学研究科
*3 熊本大学 工学部技術部 技術専門職員 博(工) (正会員)
*4 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 工博 (正会員)



発生が確認されている。

この成果を踏まえて、本研究では、促進実験として知 られる電食実験に AE 法を適用する基礎的研究を実施し た。AE 発生挙動と鉄筋発錆の状態およびコンクリート の膨張ひび割れの状況を比較することで、コンクリート 中の劣化進行過程を考察した。さらに鉄筋を走査型電子 顕微鏡により観察することにより、目視では判断できな い腐食状況の確認を試みた。

2. 鉄筋腐食過程

塩害によるコンクリート中の鉄筋腐食は図-2 のよう に、塩化物イオンにより鉄筋表面の不動態皮膜が破壊さ れることによって開始する⁵⁾。この場合の鉄筋表面での アノード反応とカソード反応は、

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$
 (1)

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$
(2)

であり, さらに反応が進むと,

 $\operatorname{Fe}^{2+} + 2\operatorname{OH}^{-} \to \operatorname{Fe}(\operatorname{OH})_2$ (3)

$$2\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3$$
 (4)

$$2Fe(OH)_2 \rightarrow 2FeO + 2H_2O \tag{5}$$

$$3Fe(OH)_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 3H_2O \tag{6}$$

と, さらに酸化鉄に変わる場合もある^の。

Melchers らの報告によると,鉄筋腐食過程は $\mathbf{2}-3$ に 示すとおり4つの時期に分けて評価できることが明らか になっている⁷⁾。第1時期には鉄筋表面に薄い錆の膜が 形成され,第2時期には薄い錆の膜が全体に広がり溶存 酸素がなくなっていくことで腐食速度が遅く進展する。 第3時期では再び腐食速度が速くなり鉄筋の内部にも錆 が形成される。そして,第4時期にはほぼ一定の速度で 鉄筋の腐食が進展する。このように, $\mathbf{2}-1$ と異なり 2 つの明確な進展期により鉄筋の腐食過程は評価されて いる。既報⁴⁾では,第1および第3の2つの時期がAE 発生挙動から明確に判別できることを明らかにしてい る。

ところで,Yuan らの報告によると,浸漬乾燥繰返し実 験と電食実験では鉄筋腐食過程が異なることが報告さ れている⁸。浸漬乾燥繰返し実験下では鉄筋の塩化物イ オン浸透面側のみが腐食するのに対して,電食実験下で は鉄筋腐食が全体に広がるとされている。そこで,この ような電食過程での AE 発生挙動について基礎的考察を 行った。

3. AE 法 ⁹⁾

AE 発生で対象となるのはコンクリート中の鉄筋腐食 生成物の発生と、その膨張圧によるコンクリートのひび 割れである。AE 計測によれば、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 どの特徴を把握できる。立ち上がり時間はしきい値の設 定に影響されることを考慮し、RA 値(立ち上がり時間 /最大振幅値)と AE の周波数特性値として解析に用い られている平均周波数(カウント数/継続時間)を解析 パラメータとして適用した。図-5 の RA 値と平均周波 数の関係によりひび割れ識別が可能であり¹⁰⁾、RA 値が 大きく平均周波数が小さいならばせん断型ひび割れ、RA 値が小さく平均周波数が大きいならば引張型ひび割れ と分類される。本分類法を腐食過程で検出される AE 法 に適用し、ひび割れの識別を行った。



4. 実験概要

鉄筋コンクリート供試体は図-6 に示すように 100× 100×400mmの角柱で,鉄筋はSD295-D13を使用し,か ぶりは45mmとした。また、塩化物イオン量を測定する ためのコア採取,鉄筋のはつり出しのために,同様の供 試体を別に 2 個作製した。コンクリートの配合は表-2 に示す。全ての供試体は 28 日間標準水中養生後, 側面 にエポキシ樹脂を塗布し、塩分の浸透を底面に限定した。 さらに, 露出した鉄筋にもエポキシ樹脂を塗布して電食 実験を行った。そして、供試体表面にひび割れが確認で きたところで実験終了とした。電食実験装置は図-7に 示す通り,水槽の底の銅板上に供試体を載せ,鉄筋に陽 極, 銅板に陰極を接続して 40mA の定電流を通電した。 電食実験中には、図-8のように AE センサを 6 個設置 し、自然電位計測時以外は連続的に AE 計測を行った。 なお, AE 計測装置には, DiSP (PAC 社製) を使用し, 周波数帯域は 10kHz~2MHz, ゲインは 60dB (プリアン プ 40dB+メインアンプ 20dB),しきい値は 40dB として 計測を行った。AE センサには、R15(共振周波数 150kHz) を使用した。

外部電源から切断後、ほぼ1日おきに自然電位計測器 により浸透面側から電位計測を行った。計測には,携帯 型腐食診断器 SRI-CM-II (四国総合研究所製)を使用し た。計測位置は図-9に示す3箇所とし,供試体表面を 湿潤状態に保って計測を行った。参照電極は銀一塩化銀 電極を使用して,計測値は飽和銅一硫酸銅電極(C.S.E.) の値に変換し,3箇所の平均値を求めた。

5. 実験結果

5.1 AE 計測による評価

図-10に1時間ごとの6CH全ての累積AEヒット数と AEイベント数を示す。AEイベントとは、6個のAEセンサの内5個以上のAEセンサによって1個のAEヒットが計測された事象のことである。実験開始後、47時間から92時間経過するまでに、最初のAE頻発期が確認された。その後、189時間から214時間経過するまでに2 回目、229時間経過後に3回目のAE頻発期が確認された。324時間経過し、図-11のように供試体のかぶりにひび割れと錆汁の目視による確認後、実験終了とした。 以降、47時間から92時間を第一時期、189時間から214時間を第二時期、229時間から324時間を第二時期、229時間から324時間を第三時期とす



表-2 コンクリートの配合

骨材の最	スランプ	水セメン	空気量	細骨材率	単位量 (kg/m ³)				
大寸法		下比			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	Α
20	4.5	55	6.5	41.8	180	327	704	1170	0.098

る。

図-12に、1時間ごとの累積 AE ヒット数と自然電位 計測の結果を示す。実験開始直後の自然電位はプラスに 向かっているが、第一時期には急速にマイナスに向かっ ていることが確認できた。その後、再び緩やかにプラス に向かっているが、第三時期には-350mV よりもマイナ スの値になった。このように自然電位と AE 発生挙動は 相関があり、両者を加味すれば、腐食過程の同定に有効 であると考えられる。

累積 AE ヒット数の発生挙動は Melchers ら鉄筋腐食過 程の報告とよく一致しており, AE 計測で確認された第 一時期が図-3の1の時期に,第二時期が図-3の3の 時期に該当すると考えられた。したがって, AE の発生 挙動から,最初に頻発した第一時期では,鉄筋表面の酸 化皮膜が破壊され,第二時期では鉄筋表面に形成された 腐食生成物が酸化皮膜の内側全体に生成され,第三時期 では鉄筋内部に鋼食ひび割れが入り,錆の膨張圧により コンクリート内部に発生したひび割れが、表面にまで進 行することによって AE が発生すると推測された。

5.2 走査型電子顕微鏡による評価

第一時期,第二時期,第三時期終了後に供試体から鉄 筋をはつり出し,鉄筋表面の腐食の様子を目視により確 認した。その結果,第一時期では錆は確認できず,第二 時期では薄い錆の膜が確認でき,第三期では鉄筋腐食は 明確に確認できた。その後,はつり出した鉄筋を走査型 電子顕微鏡(日本電子製 JSM-5600)により観察し,エネ ルギー分散型 X 線分光器(oxford 製 LINK-ISIS 付属)を 用いて構成元素の分析を行った。図-13(a)と図-13(b) は第一時期終了後,図-14(a)と図-14(b)は第二時期終 了後,図-15(a)と図-15(b)は実験終了後の鉄筋表面と 鉄筋断面の画像である。

第一時期では,鉄筋表面に通常形成されている黒皮 (酸化皮膜)が溶けて剥離しているのが確認された。な お,鉄筋内部の腐食は見られなかった。第二時期では, 表面の黒皮がほとんど剥離し、図-14(a)のように、黒 皮の下にある鉄筋表面の錆が確認できた。第三時期では 鉄筋内部に腐食が広がり、大きなひび割れが生じている ことが確認でき、図-15(b)から鉄筋の内部のひび割れ が鉄筋中心方向に発生していることがはっきりと確認 できた。また,図-15(a)の画像の倍率は 1,500 倍であり, 図-14(a) の画像が 10,000 倍であることからも第三時 期での鉄筋腐食による膨張圧の大きさが確認できる。す なわち, 第一時期では鉄筋表面の黒皮が破壊され, 第二 時期では鉄筋表面全体の黒皮がなくなったことによっ て鉄筋内部に錆が生成され、第三時期では鉄筋内部にひ び割れが発生することにより腐食が速くなることが確 認された。また、鉄筋表面からの画像を比較することよ





図-11 実験終了時の供試体写真





図-13(a) 第一時期・表面 SEM 画像



図-14(a) 第二時期・表面 SEM 画像



図-15(a) 第三時期・表面 SEM 画像





図-13(b) 第一時期・断面 SEM 画像 図-14(b) 第二時期・断面 SEM 画像 図-15(b) 第三時期・断面 SEM 画像

って,第一時期と第二時期では浸透面側とその反対側の 腐食の程度に差が見られたが,第三時期になると鉄筋表 面の腐食は全体に一様であった。この結果は,Yuanらの 報告と一致しており,電食実験では鉄筋表面全体に腐食 が発生することが確認できた。

図-16 に第二時期での鉄筋断面の組織画像を示す。画 像の白の部分はパーライト組織(フェライトとセメンタ イトが交互に並んだ組織)である。これより,鉄筋内部 の組織に変化はなかった。

図-17 にエネルギー分散型 X 線分光器による元素分析の結果を示す。第三時期では鉄筋内部から塩素が確認され,腐食速度が速くなることが確認できた。

これらの結果から, AE 発生の第一時期は図-1の劣化 進行過程の潜伏期から進展期の遷移時期, 第二時期は進 展期から加速期の遷移時期, 第三時期は加速期または劣 化期にあたり, コンクリート表面の錆汁から目視で鉄筋 腐食が確認でき, AE 計測により進行過程の 3 つの時期 が認められた。

5.3 AE パラメータ解析

各時期のひび割れ識別結果を図-18~図-20に示す。 図-18と図-20から,第一時期と第三時期には引張型 ひび割れの優勢な発生が確認できたが,図-19より第二 時期は第一時期と比較して明らかにせん断型ひび割れ の増加が確認できた。



図-16 第二時期・断面 SEM 組織画像







6. 結論

塩害による鉄筋コンクリートの劣化進行過程を評価 するために、電食実験中に AE 法による計測を行った結 果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 電食実験では,鉄筋コンクリートの劣化進行に伴う
 3つの AE 発生時期の存在が明らかとなった。
- (2) 走査型電子顕微鏡の観察により,鉄筋表面の酸化皮 膜が破壊され鉄筋腐食が進行し,塩素の進入により 腐食速度が速くなることが確認でき,第三時期では 鉄筋表面全体に腐食していたことから,Yuan らの 報告と一致することが明らかとなった。
- (3) AE 頻発第一時期と第三時期は引張り型ひび割れが 発生し,第二時期はせん断型ひび割れの発生が増加 することが解明できた。

参考文献

- 土木学会:2001年制定コンクリート標準示方書「維 持管理編」,2001
- 2) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書「施 工編」, 2002

- 3) 大即信明: 塩害(II), 技報堂出版, pp.120-121, 1991
- 4) 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,2006.3
- 5) 大即信明: 塩害(I), 技報堂出版, 31p, 1987
- 6) 世利修美:金属材料の腐食と防食の基礎,成山堂書
 店,2006
- Melchers, R. E. and Li, C. Q.: Phenomenological Modeling of Reinforcement Corrosion in Marine Environments, ACI Materials Journal, Vol.103, No.1, pp.25-32, Jan./Feb.2006
- Yuan, Y., Ji, Y., and Shah, S. P.: Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.104, No.1, pp.344-347, May./June.2007
- 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), pp.1-2, 2005
- 日本建材産業協会:2003年制定建産協規格集・コン クリートの非破壊検査法,pp.47-64,2003