

論文

[1140] 鉄筋腐食したコンクリートの力学的特性と AE 特性

正会員○鈴木 篤 (間組技術研究所)

正会員 村上 祐治 (間組技術研究所)

正会員 山下 英俊 (間組技術研究所)

正会員 大津 政康 (熊本大学土木環境工学科)

1. まえがき

塩害に関する研究は、塩化物の拡散・浸透、鉄筋腐食メカニズム、ならびにこれらをふまえたコンクリート構造物の寿命予測などが行われており、劣化診断手法の確立に向けてさまざまな研究が行われている。従来、コンクリート構造物の劣化診断は、外観調査によるひびわれ量および鉄筋腐食量などの調査が行われ、これらの結果より鉄筋コンクリートの部材としての保有耐力が予測される。しかし、鉄筋の腐食によるコンクリートの劣化は、かなり進行してから発見されることが多く、維持管理のためにも早期に劣化を見いだす方法が望まれる。この種の劣化診断法に関する研究の一つとして、アコースティック・エミッション (AE) 法を用いて劣化の進行を検出する方法が報告されているが、実用上での適用法等が課題として残されている。[1], [2], [3]

本研究は、鉄筋の腐食によるコンクリート部材の劣化を AE 法により早期に非破壊的に検出し、さらに劣化した部材の力学的挙動を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。骨材は堅硬なもので、細骨材には大井川産の川砂を、粗骨材には秩父産の碎石を用いた。混和剤はレジン系の AE 剤とした。

コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法を 20mm, 水セメント比は 50 および 65% とし、空気量は 5% とした。また、スランプは 8cm とし、単位水量および細骨材率は同一のワーカビリティがえられるように試験的に定めた。以下、水セメント比が 50 および 65% の梁の供試体を NA50 および NA65 とする。

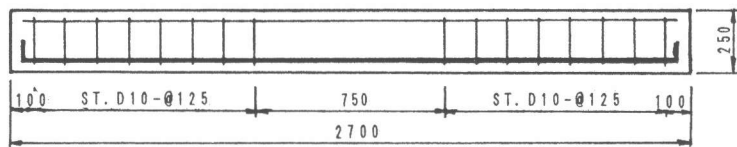


図-1 供試体の配筋

2. 2 供試体

実験に用いた供試体は、 $15 \times 25 \times 270$ cm の鉄筋コンクリート梁で、かぶり厚さは 4 cm とし、鉄筋は SD30 の D16 および SD35 の D19 を用いた。配筋は図-1 に示し、鉄筋比は水セメント比 50 および 65% でそれぞれ 3.64 および 3.08% とした。主鉄筋には、NA50 に D19 を 4 本、NA65 に D16 を 2 本および D19 を 2 本用いた。

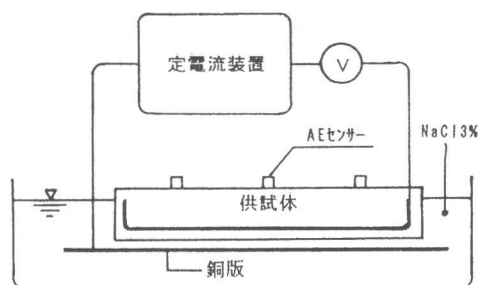


図-2 電食実験概要

2. 3 実験方法

1) 電食実験：電食実験は、供試体をNaCl3%溶液中に約350時間電食させ、予め共振周波数60kHzのAEセンサーを各供試体に取り付けた。電流密度は、定電流装置を用いて鉄筋の表面に対して $0.50\text{mA}/\text{cm}^2$ となるように制御した。(図-2)

2) 載荷試験：

電食実験を終了した供試体を図-3に示すように3等分2点載荷を行った。載荷方法は図-4に示すように3段階に分けて実施した。載荷に際しては、あらかじめAEセンサーを取り付けた。また比較のために、電食を行っていない供試体についても載荷試験を行った。

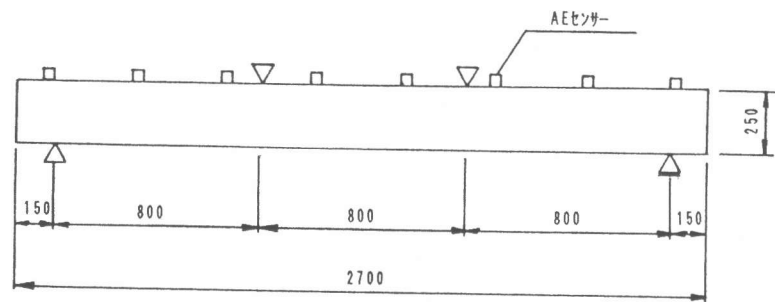


図-3 載荷試験方法

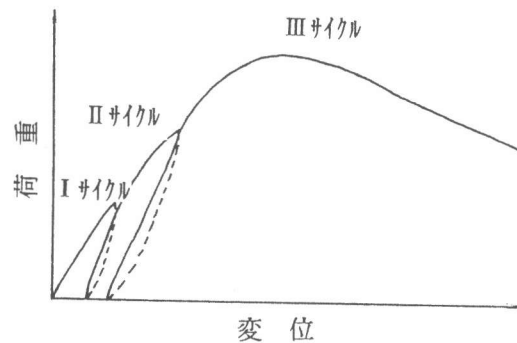


図-4 荷重履歴

3. 実験結果および考察

3. 1 電食実験

1) 電食実験によるひびわれ状況； 通電終了後の供試体の劣化状況を図-5に示す。

NA65の梁の下面には、鉄筋軸方向にの腐食膨張圧によって発生した $0.08\sim0.20\text{mm}$ のひびわれが発生した。一方、供試体の側面には、主鉄筋およびスターラップが配置されている位置以外の組立鉄筋の軸方向に $0.04\sim0.25\text{mm}$ のひびわれが認められた。また、側面に発生した縦ひびわれ幅は、スターラップを有するせん断区間では $0.04\sim0.10\text{mm}$ 、一方、スターラップの存在しない等曲げモーメント区間では

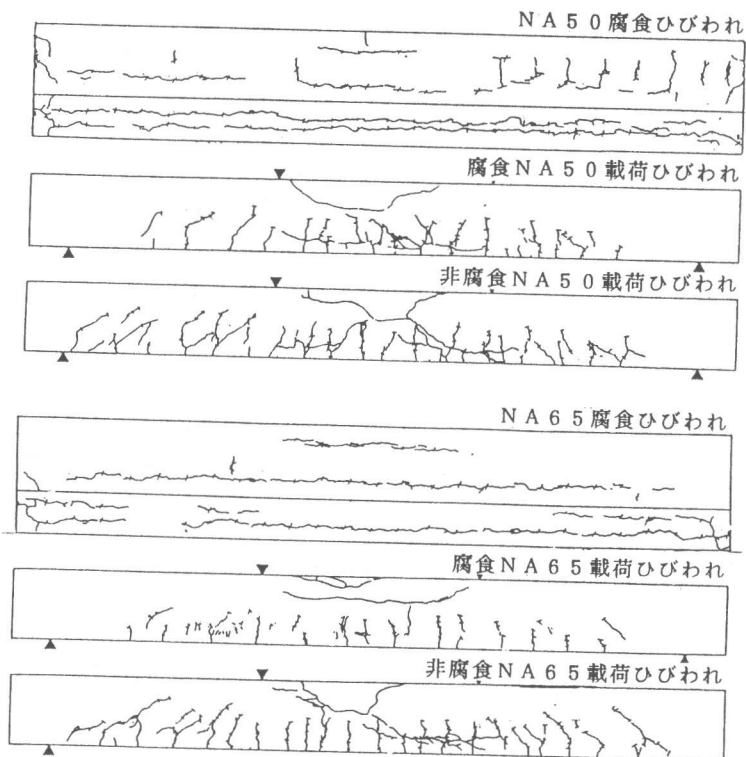


図-5 供試体のひびわれ状況

0.20～0.25mmと2倍程度以上大きくなっている。すなわち、縦ひびわれ幅の拡大に及ぼすスターラップの影響は、その存在が縦ひびわれの拡大を相当に拘束していることが認められた。[4]

一方、NA50の梁のひびわれ状況は、NA65の場合と同様な状況が認められたが、一部スターラップが配置されている部分にもひびわれが認められた。また、いずれのひびわれからも錆汁の滲出があり、NA65の場合においてスターラップが配置されている部分には錆汁のにじみ出しが確認された。

また、鉄筋の腐食による膨張圧によって生ずる縦ひびわれは、梁の下面ばかりでなく側面へ連なるように進展したことが示唆された。[5]

2) 電食実験におけるA E発生特性
電食実験中の電流、電圧、電気量およびA Eカウントの累計の経時変化を図-6に示す。

これによれば、電流は一定量で流れ、時間の経過とともに電圧が減少している。A Eカウント数は電気量の増加に対応して増加している。一般に、電流の通過によって生じる分解生成物量は電解質を通過した電気量に比例する。[6] すなわち、電気量が増加すると、A Eカウント数も増加しており、これは、腐食が進展している状況を示しているものであると考えられる。

A Eカウント数の経時変化は、50時間程度まではA Eが頻発し急激な増加を示しているが、それ以降は緩やかな増加になり定常状態に近づく。一方、電圧はA Eが頻発した後に緩やかに減少している。

魚本らによれば、縦ひびわれが発生する前においてA Eが数多く発生するのは、表面にひびわれが出る前に内部で多くの微少なひびわれが発生するためであり、縦ひびわれ発生後に電位差が低下するのは鉄筋と銅板との抵抗が減少することを意味しており、ひびわれが発生したことを示しているという報告と同様な結果であると思われる。[1]

この電食実験中に発生するA Eは、鉄筋の腐食による腐食生成物の蓄積、および腐食生成物に

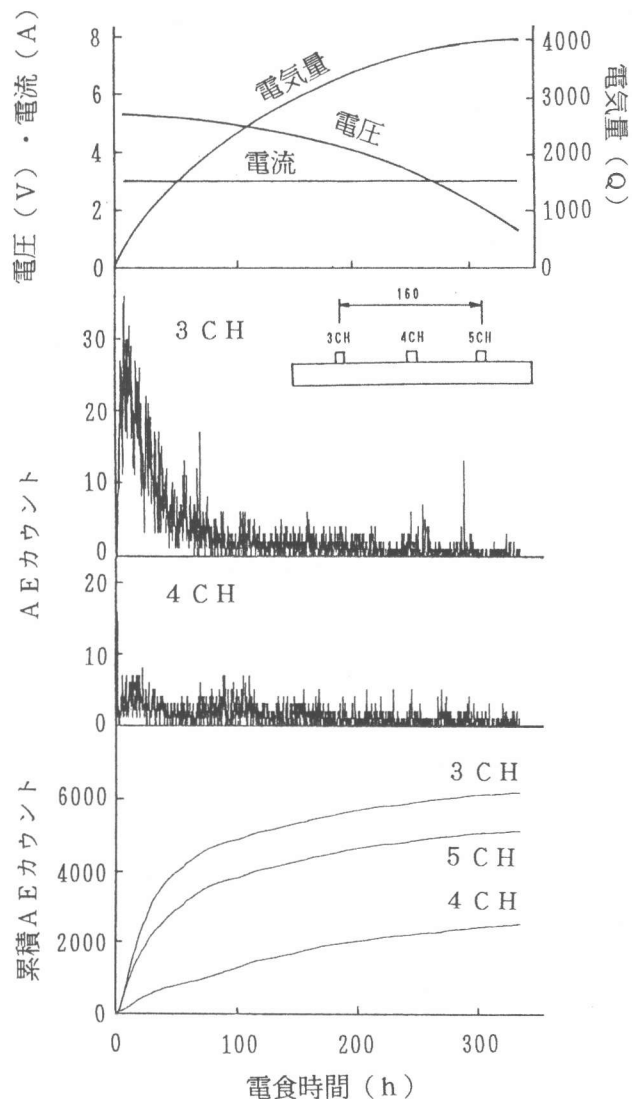


図-6 電食実験中のA E発生状況
(NA65)

よって発生する膨張圧でコンクリート部分にひびわれが生じたことによるものと考えられる。

また、Wengらによれば、AEの発生は、ひびわれによる要因の他に、鉄筋の腐食によるガズの発生と関連しているという報告があるが、本実験ではそれを確認するには至らなかった。[2]

AEセンサーに収録された3, 4および5チャンネルのAEカウン数は、3および5チャンネルでは同程度の値となっているが、4チャンネルにおいては、3および5チャンネルに対して半分程度の値となっている。これは、3, 5チャンネル付近には、スターラップの鉄筋が配置されていることから考えれば、これにも腐食が進行しAEが生じたためと考えられる。このことについて詳しく検討するために、梁のスパン中央区間160cmを対象にして、スパン方向にリニアなAE震源地探査を測定した結果を図-7に示す。これによれば、AEの発生は中央部付近から

少なく、スターラップが配置されている領域付近から多く発生しているが、スターラップの軸方向のひびわれは認められないが、錆汁の浮き出しから考えると微細なひびわれ、および腐食生成物の蓄積が内部では進行していたのではないかと考えられる。一方、NA50の場合のAE震源地数は、NA65と比較して少なく、一様に分布している様である。しかし、スターラップ付近の表面にひびわれが発生しているにも関わらずAEが少なく一様に分布しているのは、水セメント比が小さいNA50では腐食による膨張圧が拘束され、内部でのひびわれがあまり進展しないうちにさらに鉄筋の腐食が進行し、ある膨張圧を越えた段階でひびわれが一気に表面まで達したのではないと思われる。

3. 2 載荷試験

1) 載荷試験における破壊性状に及ぼす鉄筋腐食の影響

電食終了後の供試体を図-4に示すような荷重履歴で載荷試験を行った結果、発生したひびわれを図-5に示す。これによれば、鉄筋腐食による耐力の低下はあまり認められなかった。武若らの報告によれば、複鉄筋でスターラップを有する梁については、鉄筋のすべりに対する抵抗性が腐食によって幾分増加し必ずしも耐力低下が認められないとしており[4]、本実験による結果も同様な要因によるものであると思われる。

載荷によるひびわれは、初期段階において腐食ひびわれで発生した縦ひびわれ部分からひびわれが発生するものが多く認められ、電食実験によって発生した縦ひびわれを介して不連続になっているひびわれが一部見られた。

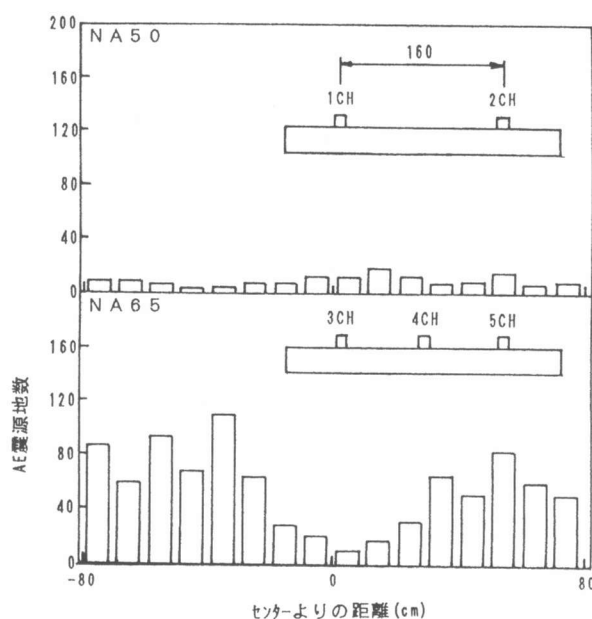


図-7 AE震源地探査

荷重によって側面に発生したひびわれ長さを梁の側面の表面積で除したひびわれ線密度は、腐食した梁の場合0.064 (NA50), 0.057 (NA65) cm/cm², および非腐食梁の場合0.084 (NA50), 0.086 (NA65) cm/cm²であり、非腐食梁の荷重ひびわれの進展は、初期段階からひびわれが発生し、ひびわれ間隔も密に発生している。

一方、腐食した梁の荷重ひびわれは、非腐食の荷重ひびわれの進展と比較してひびわれ量は少なく、ひびわれ間隔は長く、破壊に至っている。

2) 荷重試験におけるA E発生特性に及ぼす鉄筋腐食の影響

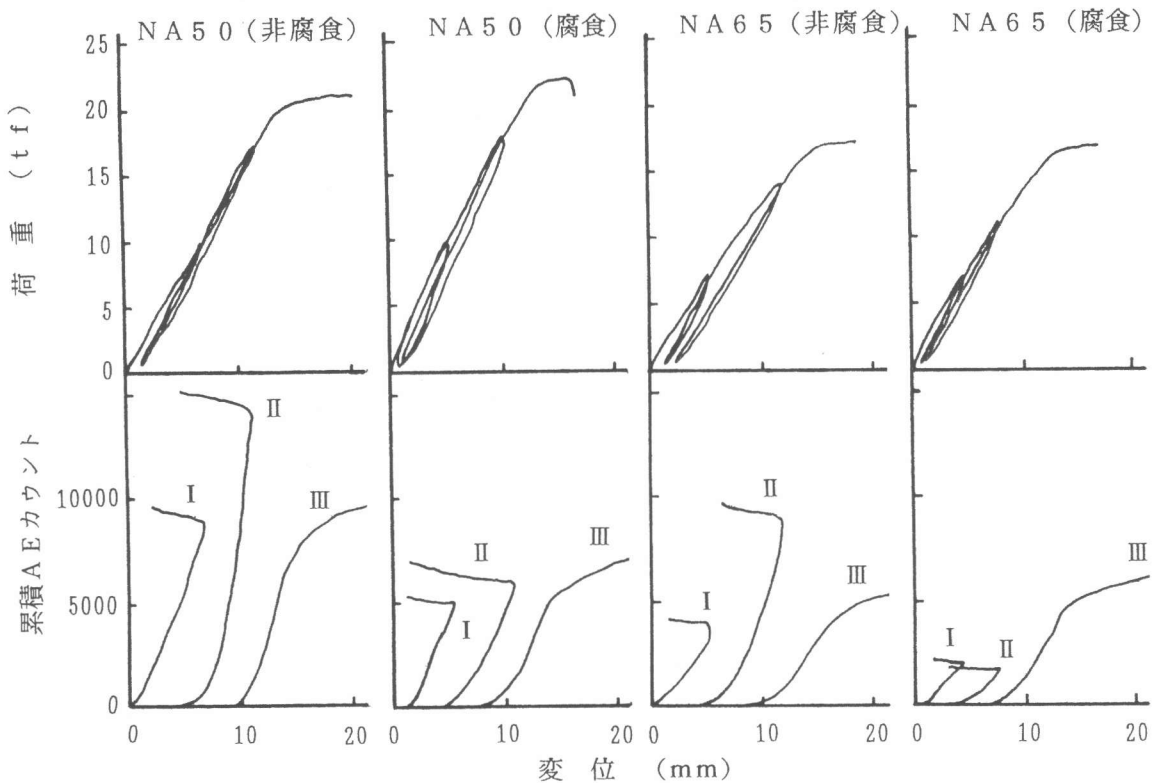


図-8 荷重試験におけるA E発生特性

非腐食梁および腐食した梁に破壊までに2回の先行荷重履歴を与えた場合のスパン中央部分で測定した変位と曲げ荷重関係および変位とA Eカウント数との関係を図-8に示す。

これによれば、非腐食梁の場合のA E発生挙動は、Iサイクルまでの荷重履歴では荷重直後からA Eが頻発する。しかし、IIおよびIIIサイクルのA Eは、IおよびIIサイクルの先行荷重を越えるまではほとんど発生せず、さらに除荷の過程にはA Eはほとんど発生しないという現象、すなわちカイザー効果と思われる現象が認められた。[7]

一方、腐食した梁の荷重履歴に対するA E発生は、非腐食の梁の場合と概ね同様であることが示された。しかし、非腐食梁部材のI、IIおよびIIIサイクルのA Eを合計したカウント数は、腐食した部材の場合と比較して5倍程度と極めて多く発生していることが示された。また、非腐食の梁および腐食した梁にIサイクル目の先行荷重を与えた場合、A Eの発生は非腐食の梁の場合に

は荷重が与えられた直後から頻発するのに対し、腐食した梁では荷重がNA50の場合約3.0tfおよびNA65の場合約2.0tfを越えるまでほとんど発生していないことが認められた。このことは、カイザー効果を逆に用いることによって説明できると思われる。すなわち、腐食した梁は電食に際し進展したひびわれを含んでいるものと推察され、一方、非腐食梁は当然のことながら健全で耐力に影響を及ぼすような欠陥は含んでいなかったと考えられ、腐食によって発生した劣化相当する応力が与えられるまでA Eが発生しないと考えれば、A Eの計測は、劣化度の診断に有効な手段であると思われる。

4. むすび

実験の範囲内で次のことがいえると考えられる。

- 1) 電食によって供試体側面に発生した縦ひびわれは、スターラップを有するせん断区間のひびわれ幅と比較して、スターラップの存在しない等曲げモーメント区間の方が大きく、スターラップが縦ひびわれの拡大を相当に拘束していることが認められた。
- 2) 電食実験におけるA Eの発生は、スターラップによって拘束されている部分の方が多く発生する。
- 3) 載荷によって発生したひびわれは、非腐食梁と比較して腐食した場合の方が少なく、破壊までに生じたA Eカウント数も腐食した梁の場合の方が少ない。
- 4) 載荷実験におけるA Eの発生は、非腐食の梁の場合には荷重が与えられた直後からA Eが頻発するのに対し、腐食した梁では荷重がある値を越えるまでほとんどA Eが発生しないというカイザー効果が認められた。

以上要するに、A E法は、鉄筋腐食によるコンクリート部材の劣化を早期に見出し、劣化の進行および状態を検出するための有効な手段の一つであると考えられる。しかし、塩害を受けた既存構造物に対する劣化診断にA E法を用いるには、評価手法等の問題があり、また自然状態における腐食の進行状態把握および促進試験との相関性等、今後現場適用に向けてこれらを解決することが課題であると思われる。

【参考文献】

- [1]魚本健人；”鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化機構に関する研究”，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp173～176，1984
- [2]Ming S. Weng et al；”Application of Acoustic Emission to Detection of Reinforcing Steel Corrosion in Concrete”，Corrosion-NACE，Vol.38，No.1，pp9～14，1982
- [3]S. E. Dunn et al；”Acoustic Emission Characterization of Corrosion Induced Damaged in Reinforced Concrete”，Corrosion-NACE，Vol.40，No.7，pp339～343，1984
- [4]武若耕司ほか；”コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的な挙動に及ぼす影響”，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp177～180，1984
- [5]橋 吉宏ほか；”鉄筋腐食によって損傷を受けたRCばりの挙動に関する考察”，土木学会論文集，第402号，V-10，pp106～114，1989.2
- [6]関 博；”鉄筋の腐食による膨張ひびわれ発生機構”，セメント・コンクリート，No.458，pp20～27，1985
- [7]大津政康ほか；”アコースティック・エミッションの理論と特性”，森北出版，pp32～42，1988