

AE法による塩害により腐食劣化したRC部材の 鉄筋付着性能の評価へ向けた基礎的研究

権納拓央¹・川崎佑磨²・伊津野和行³

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

²正会員 工博 立命館大学助教 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

³フェロー会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

1. はじめに

多くの鉄筋コンクリート（RC）構造物が供用 50 年以上を迎えようとしており、RC 構造物の長寿寿命化、ライフサイクルコストの低減を考慮すると、構造物の損傷を適格に把握し、迅速な補修・補強を行うことが求められている。ここで、RC 構造物の塩害による早期劣化が問題となっており、既往の研究では RC 構造物の性能低下において、コンクリートと鉄筋の付着不良が大きく影響することが報告されている¹⁾。また、コンクリート標準示方書²⁾により、塩害劣化の指標の一つとして RC における鋼材腐食発生限界塩化物イオン（Cl⁻）濃度が規定されているが、規定以上の Cl⁻が浸透している場合においても性能に影響するほどの鋼材腐食が生じていない場合があり、塩害による鋼材腐食と、それによる RC 構造物の性能低下の関係が明らかになっていないのが現状である。

そこで本研究では、塩害により劣化した RC 部材の内部破壊性状をモニタリングするため、繰返し載荷試験中にアコースティック・エミッション（AE）法を適用した。そして、検出された AE のパラメータ挙動、SiGMA 解析を用いた位置標定やひび割れ種類の評価などの解析を通じて内部破壊過程の評価を試みた。

2. AE 法の概要

AE とは「固体が変形あるいは破壊する際に、それまで蓄えていたひずみエネルギーが解放されて弾性波が生じる現象、またはそのようにして発生する弾性波動」³⁾と定義されている。AE 法はこの原理を利用して、AE 発生頻度や AE 波形パラメータなどにより固体内部の損傷度を評価するものである。本研究では破壊規模および性状の相違を評価するため、AE エネルギーおよび AE 平均周波数の比較を行った。

また、発生した弾性波を複数の AE センサで受信することにより、各センサの到達時間差から AE 発生源の位置標定が可能である。本研究では供試体内部の破壊過程を評価するために AE 発生源の位置標定を行った。

さらに SiGMA 解析では AE 波の到達時間と AE 波の初動振幅値を用いてモーメントテンソル成分を決定することにより、ひび割れの識別が可能となる⁴⁾。ひび割れは、引張型（Tensile crack）、せん断型（Shear crack）、混合型（Mixed crack）の 3 種類に識別可能であり、これらはせん断寄与率によって決定されている。

本研究では、供試体に発生する引張型とせん断型ひび割れによる AE 事象の発生過程を明確にするた

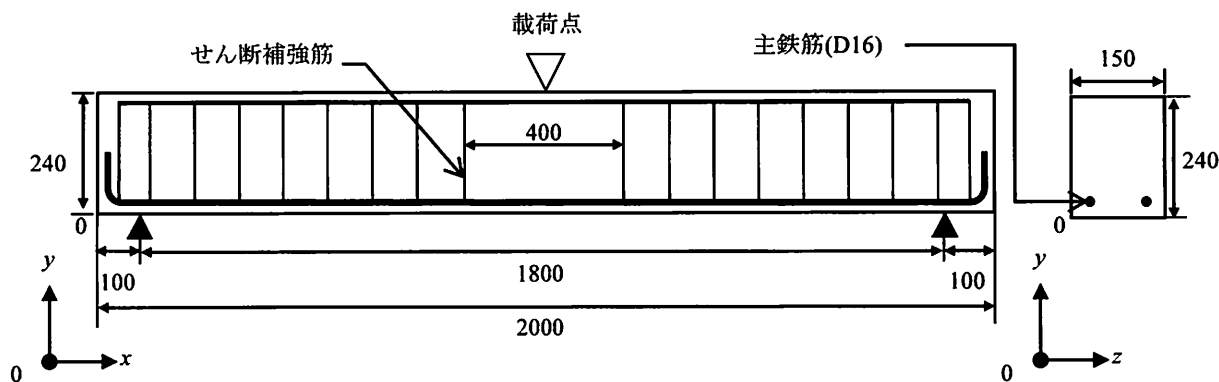


図-1 供試体概要

表-1 単調曲げ載荷試験結果

供試体名	配合時 Cl濃度 (kg/m ³)	試験後 Cl濃度 (kg/m ³)	降伏 変位 (mm)
A	0	0.09	4.2
B	2.6	3.31	6.9
C	5.0	5.38	4.8

め、混合型ひび割れを考慮せず、引張型およびせん断型の挙動で考察を行った。

3. 実験概要

(1) 供試体概要

供試体の概要図を図-1 に示す。本研究では幅150mm、高さ240mm、長さ2000mmのRC部材を作製した。曲げスパン360mm、かぶり深さは20mmとした。鉄筋は主鉄筋はD16を2本、スターラップおよび組み立て筋はφ9mmを使用した。各主鉄筋中央部にはひずみゲージを貼付した。また、塩害劣化を促進させるために、供試体BおよびCは配合時のCl濃度が、それぞれ2.6と5.0kg/m³となるようにNaClを練混ぜ水に混入した。打設後1ヶ月後には塩害劣化をさらに促進させるため、供試体下面の曲げスパン範囲に3%NaCl水溶液を塗布し乾燥させる作業を、載荷実施日まで行った。塗布と乾燥は1日毎で繰返した。

供試体数は各Cl濃度で2体ずつ作製した。この2

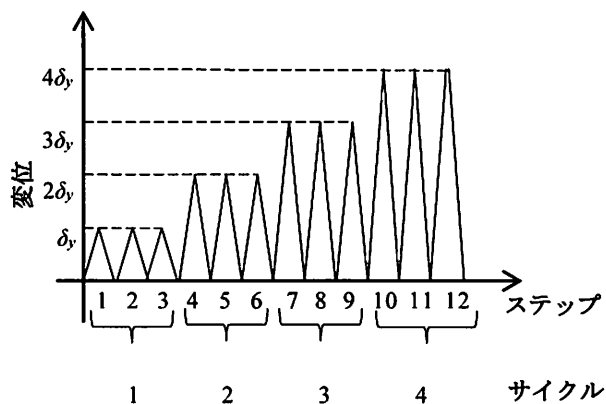


図-2 載荷パターン

体の内、1体は単調曲げ載荷による試験を行い、鉄筋が降伏したときの供試体中央部の変位を測定した。残る1体は単調曲げ載荷試験で得られた降伏変位 δ_y を基に、繰返し曲げ載荷試験を行った。

曲げ載荷試験終了後に供試体の曲げスパン内からコアを1本採取し、Cl濃度の測定を行った結果、供試体A、BおよびCのCl濃度は、表-1に示すようにそれぞれ0.09、3.31、5.38kg/m³となった。

ここで、本研究では、供試体Aを健全な供試体と仮定し、供試体BおよびCを塩害劣化した供試体として力学的特性およびAE発生挙動の比較を行った。

(2) 繰返し曲げ載荷試験

載荷パターンを図-2に示す。表-1に示すように、単調曲げ載荷試験で得られた降伏変位 δ_y は供試体Aが4.2mm、Bが6.9mm、Cが4.8mmであった。

そして、 δ_y を3波、 $2\delta_y$ を3波、 $3\delta_y$ を3波、 $4\delta_y$ を3波となるように変位制御で繰返し曲げ載荷を行っ

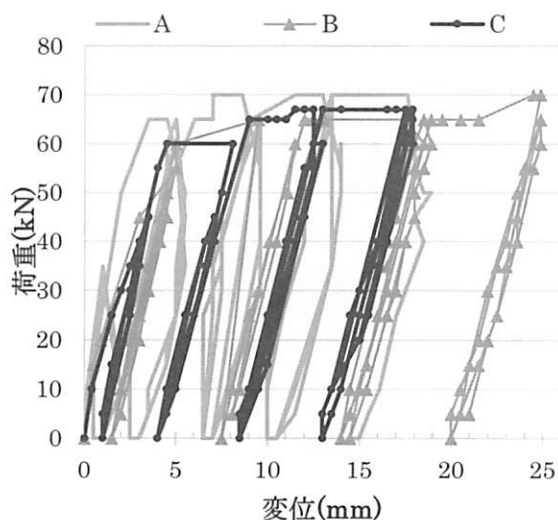


図-3 荷重－変位履歴曲線

表-2 繰返し曲げ載荷試験結果

供試体名	降伏 変位 (mm)	降伏 荷重 (kN)	最大 荷重 (kN)	一次 剛性 (kN/mm)
A	4.45	65.6	72.7	14.7
B	6.85	60.2	69.9	8.8
C	5.30	62.4	67.4	11.8

た．本研究では，供試体に δ_y から $4\delta_y$ まで合計 12 波を与え，除荷した時点で試験を終了した．なお， δ_y の 1 波目をステップ 1， δ_y の 2 波目をステップ 2 と表現し， δ_y のステップを総称してサイクル 1， $2\delta_y$ のステップを総称してサイクル 2 と表記している．

4. 実験結果

繰返し曲げ載荷試験で得られたデータを表-2 および図-3，図-4 に示す．塩害劣化した供試体 B および C では，供試体下面の曲げスパン内外において，載荷前に腐食ひび割れおよび錆汁が目視で確認できた．ここで，健全な供試体 A と塩害劣化した供試体 B および C を比較すると，最大荷重および一次剛性が低下することが確認された．また，供試体 B と供試体 C を比較すると，供試体 B の方が降伏変位，一次剛性が低下することが確認された．これは李ら⁵⁾によって，鉄筋が腐食すると，鉄筋の降伏点が低下することが報告されており，鉄筋自体の劣化による

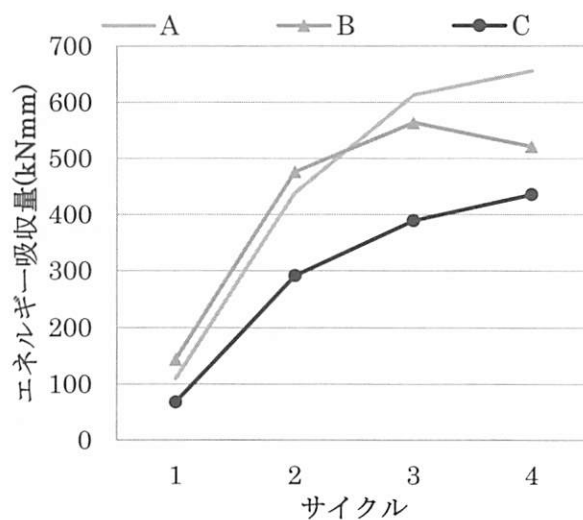


図-4 エネルギー吸収量

影響が考えられる．

また，各供試体のエネルギー吸収量を算出した結果，塩害劣化した供試体 B および C では，健全な供試体 A に比べエネルギー吸収量が低下していることが確認された．ここで，海水を練混ぜ水として用いた場合，コンクリートの初期強度が若干増加すると報告されている⁶⁾．すなわち，RC 部材の塩害劣化による各性能の低下においては，Cl⁻によるコンクリートの特性の変化はあまり影響せず，鉄筋腐食が大きく影響していると考えられる．よって鉄筋腐食によるコンクリートと鉄筋の付着性能の低下が供試体の一次剛性およびエネルギー吸収量に大きく影響する結果になったと推測される．

そこで次章では鉄筋腐食による性能低下に関して，AE 法を用いて供試体内部から発生する AE 現象の評価を行った．

5. AE 測定結果

(1) AE エネルギー

各供試体の AE エネルギーと鉄筋ひずみの関係を図-5 から図-7 に示す．健全な供試体 A において鉄筋の降伏後，ひずみが大幅に低下していることが確認された．これ以降の鉄筋ひずみの大幅な増加が確認できなかったことから，鉄筋降伏後において，コ

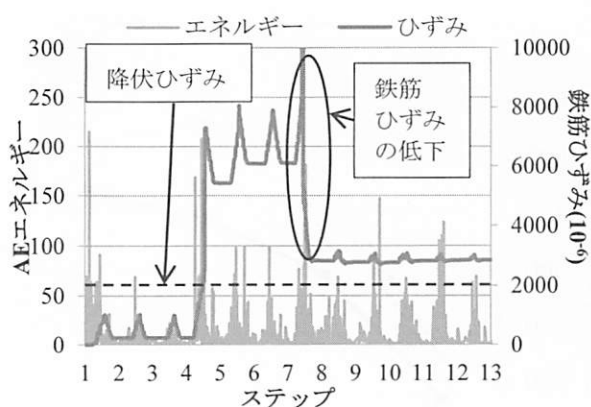


図-5 AE エネルギーと鉄筋ひずみ (A)

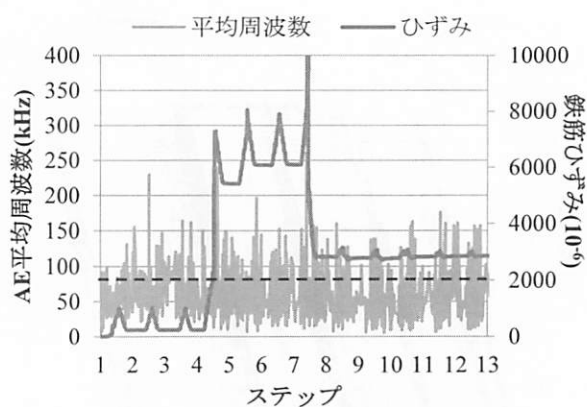


図-8 AE 平均周波数と鉄筋ひずみ (A)

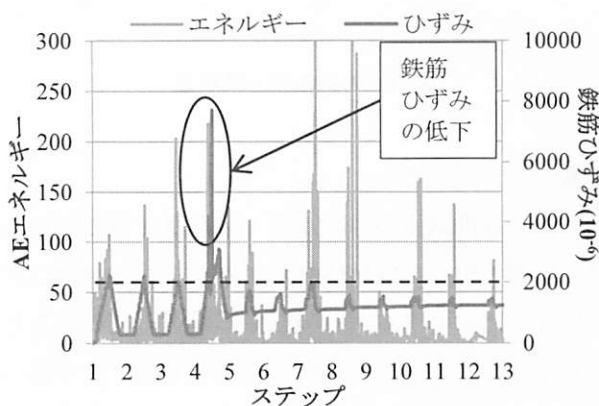


図-6 AE エネルギーと鉄筋ひずみ (B)

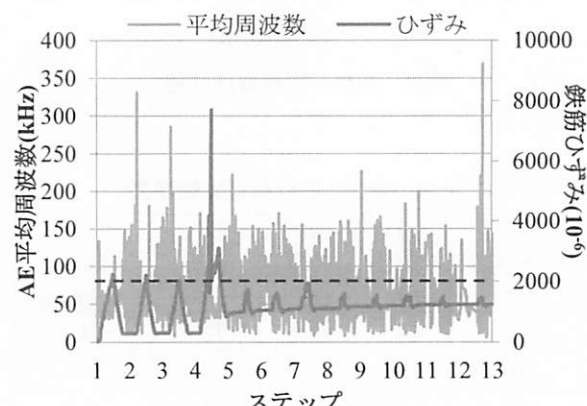


図-9 AE 平均周波数と鉄筋ひずみ (B)

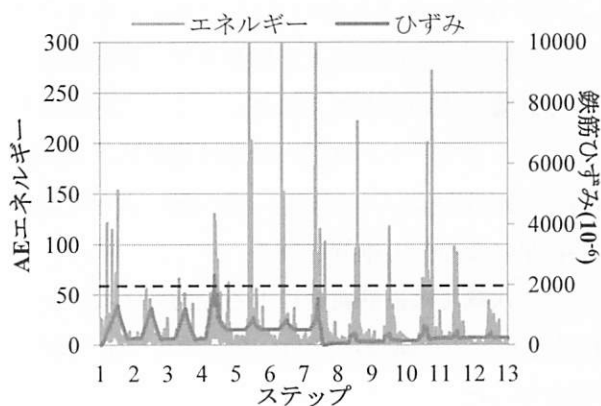


図-7 AE エネルギーと鉄筋ひずみ (C)

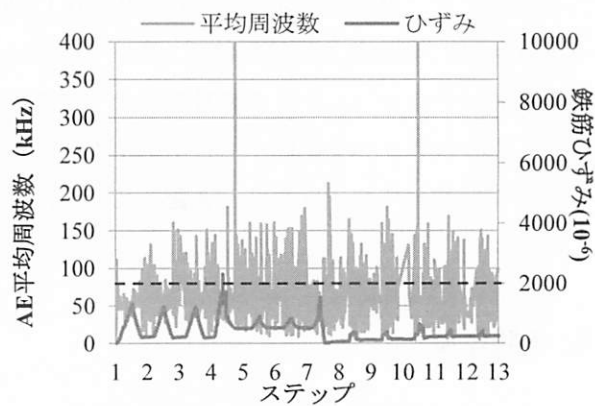


図-10 AE 平均周波数と鉄筋ひずみ (C)

ンクリートと鉄筋の付着力が低下したと考えられる。供試体 B および C においても、鉄筋の降伏を境に鉄筋ひずみが低下する現象が確認されたが、供試体 C においては鉄筋ひずみの増減が顕著に確認できなかった。これは、鉄筋腐食によって発生したコンクリートの腐食ひび割れの影響により、载荷初期からコンクリートと鉄筋の付着性能が低下していたことが原因であると考えられる。

また、鉄筋ひずみの増加に伴い AE エネルギーも

増加することが確認された。また、健全な供試体 A よりも塩害劣化した供試体 B および C の方が、鉄筋ひずみの増加に伴い AE エネルギーの値が高くなることが確認された。この原因として、塩害劣化した供試体内部の腐食ひび割れが载荷に伴い進展、滑動したことが考えられる。

(2) AE 平均周波数

次に、AE 平均周波数と鉄筋ひずみの関係を図-8

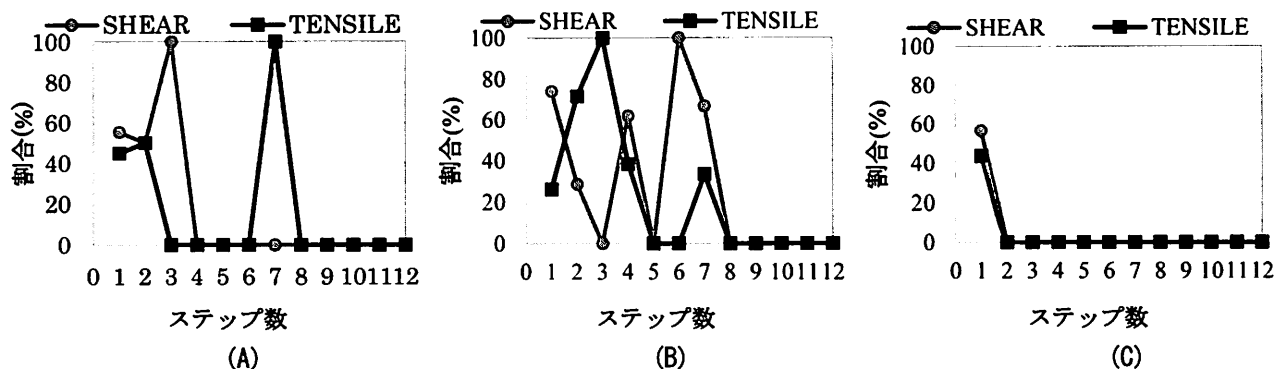


図-11 ステップ毎のひび割れ種別

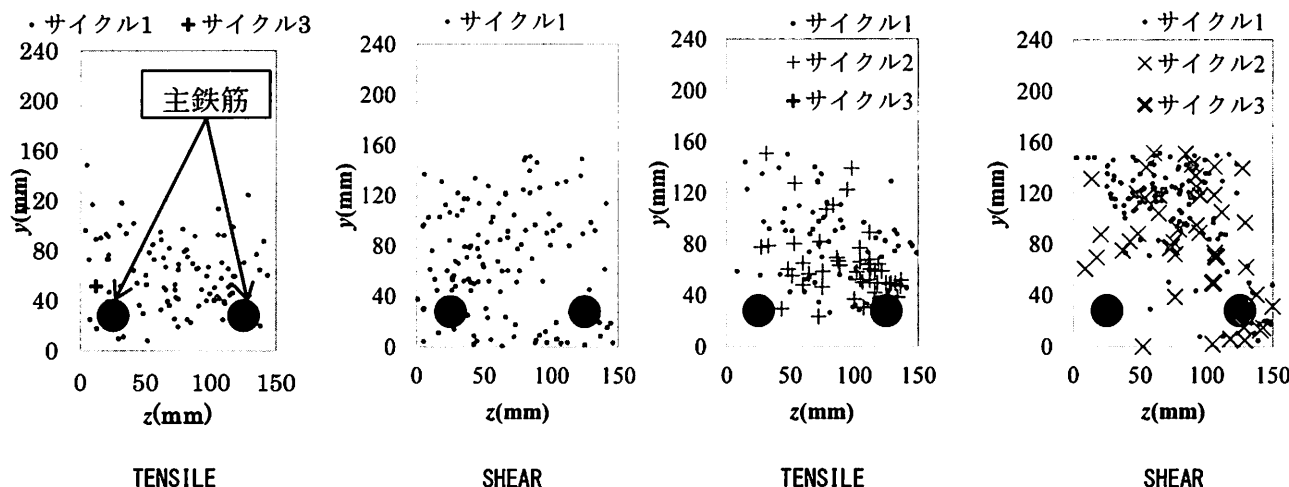


図-12 AE 位置標定結果 (A)

図-13 AE 位置標定結果 (B)

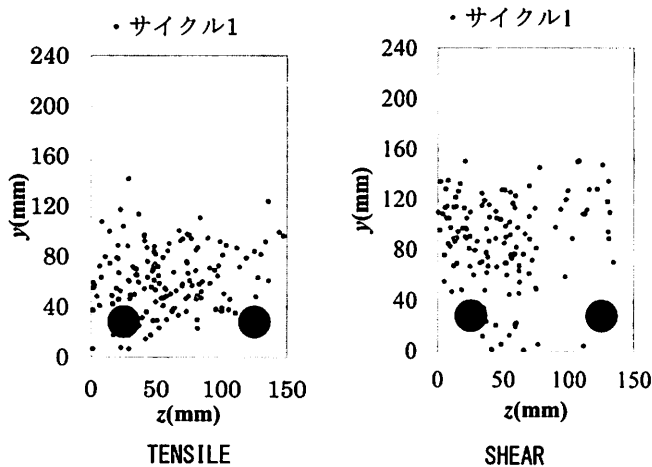


図-14 AE 位置標定結果 (C)

から図-10 に示す。AE 平均周波数の時間的推移で比較を行うと、各供試体において顕著な変化が見られず、鉄筋ひずみの変化と AE 平均周波数に関係が見られなかった。原因として、載荷による新規ひび割れならびに腐食ひび割れの進展、また、ひび割れ面の滑動など、様々な現象が同時に発生し、AE 平

均周波数に影響していることが考えられる。

ここで、供試体内部の破壊の進展を考察するため、SiGMA 解析を行った。各ステップにおけるせん断型と引張型のひび割れ種別の割合を図-11 に示す。供試体 C ではステップ 1 以降は位置標定されなかった。この原因は、腐食ひび割れが弾性波の伝播を阻害し、AE イベントの検出に必要な AE を計測できなかったと考えられる。健全な供試体 A のステップ 7 において引張型のひび割れが卓越しており、また、同時に、図-5 においてもステップ 7 における時間帯に鉄筋ひずみの大幅な低下が確認された。これについては鉄筋の付着力が低下し、鉄筋が受けていた引張応力をコンクリートが受け、引張型のひび割れが生じたことが原因として考えられる。また、塩害劣化した供試体 B においても、引張型のひび割れが卓越しているステップ 3 において鉄筋の降伏が確認された。このように鉄筋降伏時には引張型のひび割れ

が多く発生する傾向が見られた。

各供試体の y-z 断面における位置標定結果を図-12 から図-14 に示す。塩害劣化した供試体において、せん断型のひび割れが、供試体 y-z 断面中央付近に集中していることが確認された。この原因として腐食ひび割れ面の滑動現象が考えられる。また、供試体 A と B において、鉄筋ひずみが低下したサイクル 3 で鉄筋付近に AE 源が検出された。よって、鉄筋の付着性能の低下に従ってせん断および引張型のひび割れが発生することが確認された。

既往の研究⁷⁾では鉄筋の腐食モニタリングの際、鉄筋の膨張圧によるコンクリートのひび割れが発生していると予想される時期に引張型のひび割れが発生し、その後せん断型のひび割れが発生すると報告されている。本実験結果においてこの報告を考慮すると、塩害劣化した供試体 B および C において、初期載荷により腐食ひび割れが繋がるようにせん断型のひび割れが発生し、その後、鉄筋の付着不良に起因する引張型のひび割れが発生すると考えられる。また、健全な供試体 A では載荷により鉄筋付近のコンクリートの破壊により引張型のひび割れが発生し、鉄筋の付着不良を引き起こすことが考えられる。したがって、SiGMA 解析による位置標定結果およびひび割れの識別において、RC 部材の付着性能に影響された異なる AE 現象を検出できたと考えられる。

6. 結論

塩害劣化した RC 部材に対し、繰返し曲げ載荷試験を行い、同時に RC 部材内部から発生した AE を測定した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 健全な供試体に比べ、塩害劣化した供試体の最大荷重、初期剛性およびエネルギー吸収量の低下が確認された。鉄筋腐食による影響であると考えられる。
- (2) AE 法により供試体内部の破壊進展状況の確認

を行うと、塩害劣化した供試体の AE エネルギーが健全な供試体と比較して高いことが確認され、鉄筋ひずみの増減との相関性が考えられる。また、供試体間で AE 平均周波数に変化が見られなかったことについては、腐食ひび割れの進展やひび割れ面の滑動現象による可能性が考えられる。

- (3) SiGMA 解析を用いてひび割れ種別の判別を行うと、鉄筋が降伏するとき、引張型のひび割れが多く発生することが確認された。また位置標定結果において、鉄筋の付着性能に関連した AE 現象を検出できたと考えられる。

参考文献

- 1) 董衛, 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木修一, 堤知明: 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力ならびに破壊性状に及ぼす定着性能の影響に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.13-26, 2011.
- 2) (社)土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編] p.175, 2013.
- 3) 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.80-110, 2005.
- 4) (社)日本非破壊検査協会: 非破壊検査シリーズ, アコースティック・エミッション試験 I, 2008.
- 5) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文: 鉄筋の腐食がその力学的性能の低下に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.877-882, 1995.
- 6) 伽場重正, 川村満紀, 山田裕定, 高桑二郎: 練り混ぜ水に海水を使用したコンクリートの諸性質について, 材料, 第 42 巻, 第 260 号, pp.425-431, 1975.
- 7) 川崎佑磨, 友田祐一, 大津政康: AE 法による浸漬乾燥繰返し実験の鉄筋コンクリート腐食過程のモニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1727-1732, 2010.