

## 論文 海洋環境下において劣化した鉄筋コンクリート梁の AE 特性

秋山哲治\*1・三上 晃\*2・横田 弘\*3・濱田秀則\*4

**要旨：**非破壊検査の一手法である AE 法を鉄筋コンクリート構造物の劣化判定に使用するための基礎資料を得ることを目的に、実際に海洋環境下に 23 年間暴露した鉄筋コンクリート (RC) 梁の曲げ載荷試験を行い、AE 挙動ならびにレートプロセス解析値と劣化程度の関係について考察した。その結果、試験体の劣化程度に関わらず、鉄筋降伏以前では、カイザー効果が見られることが確認できた。また、レートプロセス解析により塩害を受けたコンクリート部材の潜在的な劣化を把握できる可能性があることが確認できた。

**キーワード：**塩害, RC 梁, AE 法, レートプロセス解析, カイザー効果

## 1. まえがき

港湾コンクリート構造物は、塩害を受けやすい環境下に置かれており、長期間供用されているものでは、劣化や損傷が見られることが多い。社会資本としての港湾構造物を必要な期間健全な状態で効率的に利用しなければならないことは言うまでもない。1960 年代の高度成長期に整備された多くの港湾構造物が耐用年数を迎つつある状況において、劣化状況等の構造物の現状を正しく認識し、残存機能を適切に評価することが不可欠である。このためには、港湾構造物の維持管理の体系化を図ることが求められる。港湾構造物は、厳しい海洋環境下にあり、必ずしも維持管理が十分に行えるわけではない。これまで、主に目視による点検検査で構造物の劣化度を判定し、必要な対策を施してきた。しかし、外観検査では客観性に劣るほか、内部で潜在的に進行している劣化を早期に発見することは難しい。

このようなことから、本研究では、塩害を受けたコンクリート部材の潜在的な劣化を判定する方法として AE 法による非破壊検査に着目し、AE 法の劣化判定への適用性および AE 法によ

る劣化判定のための基礎資料を得ることを目的としている。本論文では、実際の海洋環境下において劣化の進行した RC 梁の曲げ載荷により発生する AE の特性ならびにレートプロセス解析<sup>1)</sup>と劣化程度の関係に着目して考察した。

## 2. 試験の概要

## 2. 1 試験の目的

実際の海洋環境下に長期間暴露した RC 梁および PC 梁試験体の劣化の進行状況および耐力等の残存機能に関する研究を継続的に実施している。本論文で述べる試験は、この研究の一環として実施したもので、暴露開始から 23 年間が経過した RC 梁試験体を対象としている。試験体は、暴露地点より回収して、目視による劣化状況の把握を行った後、曲げ載荷試験を行い、耐力や変形特性、破壊状況を調べると同時に、AE 発生状況を計測した。載荷試験終了後は、コンクリート中の鉄筋の腐食状況や塩化物浸透量などの劣化に関する諸性状を調べた。なお、本論文で述べる以外の試験結果は、すでに一部を報告<sup>2)</sup>しているほか、現在詳細な解析を行っている。

\*1 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室研修生 (若築建設, 正会員)

\*2 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室研究官

\*3 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長 工博 (正会員)

\*4 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室長 工博 (正会員)

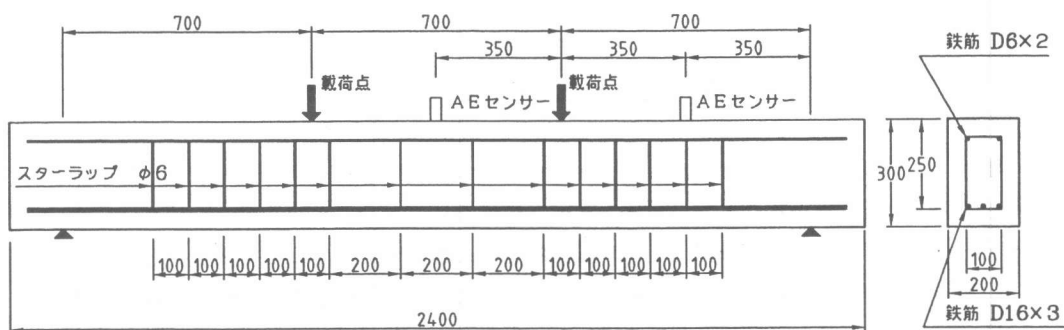


図-1 RC梁試験体の断面形状および配筋図

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	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	減水剤
20	12±2	4±1	68.0	47.0	204	300	793	964	1.20

## 2.2 試験体の概要

図-1に梁試験体の断面形状と配筋状況を示す。梁の寸法は、長さ 2400mm、幅 200mm、高さ 300mm で、主鉄筋は SD295-D16 を 3 本、スターラップは SD295-D6 を同図に示す間隔で配置している。主鉄筋の降伏強度は 363N/mm<sup>2</sup> である。使用したコンクリートの示方配合を表-1に示す。用いたセメントは普通ポルトランドセメントである。なお、耐久性向上のためのコーティングや混和材などは用いていない。

## 2.3 暴露条件

暴露場所は酒田港の港内である。酒田港は年平均気温が 11.9℃であり、冬季は零度以下となる日が多く、特に 12~3 月の期間コンクリートは凍結融解作用を受けていると思われる。また、強風の日も多く、海水の飛沫も多い。しかし、暴露箇所は港内であるため、波浪に起因する外力はほとんどないものと推察される。

梁試験体は、製作後約 2 ヶ月目よりケーソン式防波堤前面の感潮部で暴露を開始した。すなわち、海水の干満作用により、乾湿繰り返し作用を受ける。

## 2.4 試験方法

試験体は、まず暴露地点から回収した後サンドブラストによりコンクリート表面の付着物を除去し、劣化状況の目視観察を行った。その後、図-1に示すように支点間隔を 2100mm とした 3 等分点荷重により曲げ試験を行い、同時に AE 計測を行った。荷重方法は、最大ひび割れ幅の値が 0.25mm になるまで単調に増加させた。その後は、この時点での変位を基本として変位制御により、繰り返し荷重を行った。また、曲げ試験終了後に、内部鉄筋の観察、塩化物含有量などの劣化の定量化を目的とした試験も行っている<sup>2)</sup>。

## 2.5 AE の測定方法

AE 測定は、140kHz 共振型の AE センサーを、図-1に示すように、梁試験体圧縮縁の曲げスパン中央およびせん断スパン中央の合計 2ヶ所に取り付け、曲げ荷重試験の荷重時に行った。計測に際しては、増幅率を 60dB、しきい値を 400mV に設定した。また、ノイズを除去するために、支点および荷重点と試験体の間にテフロンシートを挿入した。

### 3. 載荷試験結果と考察

#### 3.1 試験体の外観および鉄筋腐食状況

本試験で対象とした試験体4体のうち、劣化程度の大きかった1体の梁について、載荷試験前に実施した目視による梁表面の観察結果および載荷試験終了後に取り出して観察した鉄筋の腐食状況を図-2に示す。同図で、上段は梁の外観状況、下段は腐食程度が Grade-4（断面減少を伴う錆）と判断された箇所のみを示している。なお、ここで示した Grade-4 の腐食以外にも鉄筋のほぼ全面に及ぶ腐食が生じていた。目視観察では、鉄筋の錆汁、剥き出した骨材などが認められた。また、梁の表面には直径が3~10mmの気泡のような穴が点在していたほか、最大幅が約2mmのひび割れも発生していた。つまり、広範なかぶりコンクリートの剥落といった激しい劣化は認められず、目視観察から判断される劣化は、港湾構造物を対象に提案されている劣化度判定表<sup>3)</sup>に基づく、劣化度が「Ⅲ」と判断された。また、劣化が小さかった試験体は、同様の判定表により、劣化度が「Ⅰ」と判断された。

内部鉄筋の腐食状況については、目視観察による明確なひび割れが確認できた箇所では、断面欠損を伴う鉄筋の腐食が確認できた。しかし、目視観察によって劣化がほとんど認められなかった試験体においても、鉄筋の腐食が進行していたことが認められた<sup>2)</sup>。なお、4.以降の考察においては、内部鉄筋の腐食面積の多いもの（劣化大）と少ないもの（劣化小）の代表的な試験体2体について考察を行った。

#### 3.2 ひび割れ形成と破壊形態

図-3に終局荷重時における梁側面でのひび割れの発生状況を示す。載荷開始後、まず純曲げ区間にひび割れが発生し、徐々にひび割れの進展あるいは本数の増加が見られた。終局荷重に至るまで、曲げによるひび割れが支配的で、最終的にコンクリートの圧縮破壊により終局状態に至った。

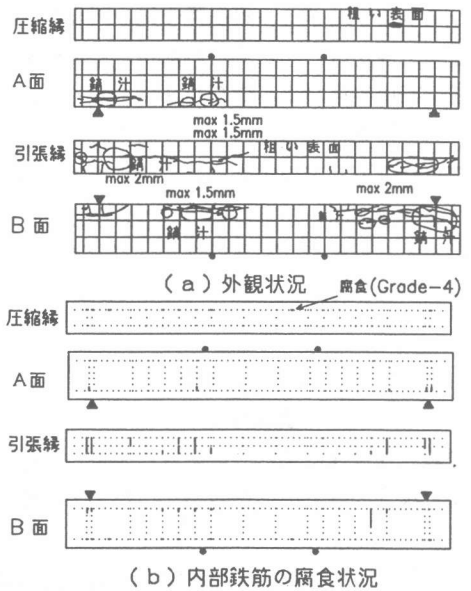


図-2 梁の外観状況および鉄筋腐食状況

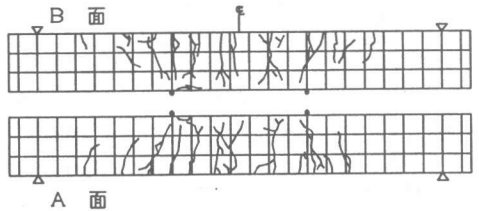


図-3 終局荷重時のひび割れ発生状況

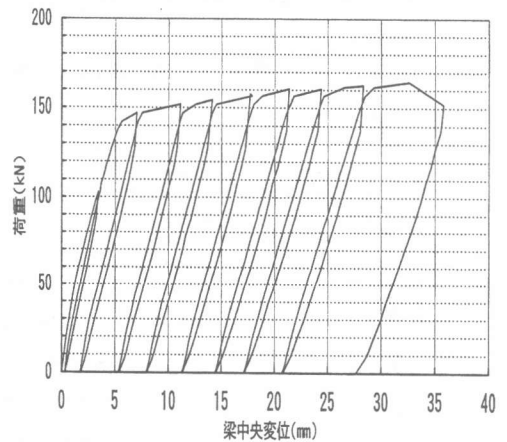


図-4 荷重と梁中央変位の関係

#### 3.3 耐荷性状

図-4に荷重と梁中央変位の関係を示す。荷

重と変位の関係は、鉄筋が降伏状態に達したと思われる3サイクル目以降では、終局時まで荷重の上昇がほとんど見られなかった。通常、鉄筋は降伏後もひずみ硬化性状を有するため、耐荷力の増加が見られるが、今回の試験ではこの現象をほとんど確認することができなかった。この理由は明らかではないが、鉄筋とコンクリートの付着劣化が生じていたことがその一つであると考えられる。

#### 4. AE の試験結果と考察

##### 4. 1 AE の発生挙動

図-5 に曲げスパンにおける荷重と AE の累積イベント数との関係を示す。ここでいうサイ

クルとは、繰り返し曲げ試験における1回の荷重から除荷までを意味する。まず、1サイクル目に着目すると、劣化大では、荷重約20kNよりAEが頻発しはじめているのに対し、劣化小では、荷重約50kNまでほとんど発生しないことが認められた。この結果は、鈴木ら<sup>4)</sup>による電食試験により腐食させた試験体と電食を行わない試験体に1サイクル目の先行荷重を与えた場合、非腐食試験体においては、荷重が与えられた直後からAEが頻発するのに対し、腐食した試験体ではある程度の荷重を越えるまでほとんど発生しないとする結果と異なる傾向を示した。これについては、暴露条件の相違による劣化の進行過程の差によるものと考えられるが、

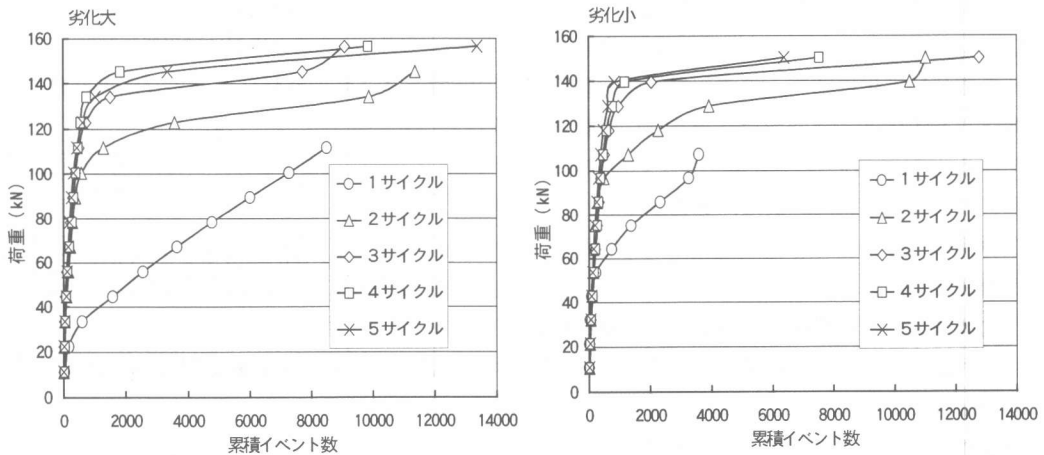


図-5 曲げスパンにおける荷重と累積イベント数の関係

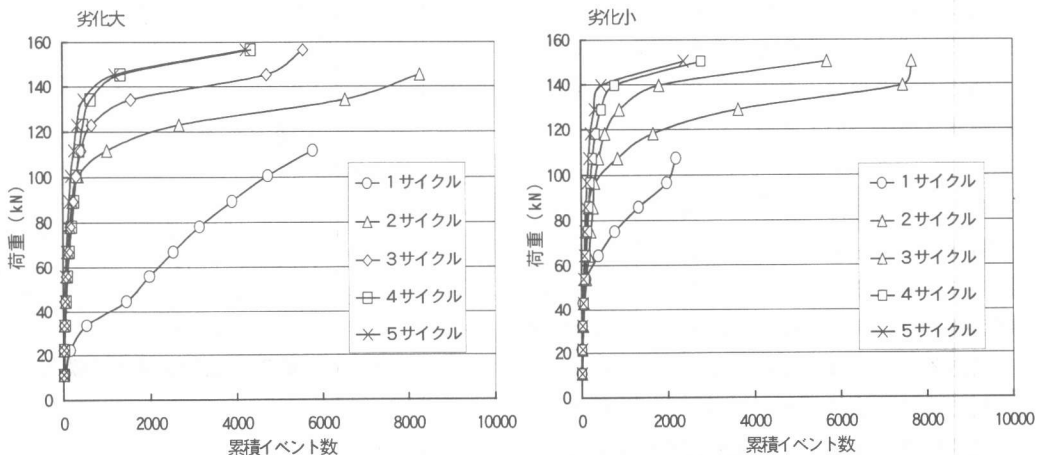


図-6 せん断スパンにおける荷重と累積イベント数の関係

今後、詳細な検討が必要である。

また、2 サイクル目では、劣化の大小に関わらず、先行荷重を越えるまで AE がほとんど発生しないという、カイザー効果<sup>5)</sup>が認められた。しかし、鉄筋が降伏したと思われる3 サイクル目以降、このカイザー効果は不明瞭となった。これは、梁試験体の鉄筋の降伏等による理由で、内部状態が不安定になったことによるものと考えられる。

図-6 にせん断スパンにおける荷重と AE の累積イベント数の関係について示す。曲げスパンでの結果と比べて、AE の累積イベント数は約 60%と少なくなっていた。これは、梁試験体では、曲げによるひび割れが支配的だったことから、せん断スパンに設けられたセンサーに到達するまでの距離が長かったことや AE 発生源とセンサー間のひび割れの存在等により、AE 波が減衰したことによるものと思われる。これ以外の、サイクル毎の挙動については、曲げスパンにおけるものと同様傾向を示した。

#### 4. 2 レートプロセス解析による考察

図-7 にコンクリートの一軸圧縮試験で用いられるレートプロセス解析<sup>1)</sup>の手法を今回の曲げ試験に適用して得られた解析値と実験値の関係を示す。レートプロセス解析では、荷重レベルの増加に対する、AE 発生数の増加を、発生確率  $f(V)$  として式 (1) で与え、 $f(V)$  を荷重レベルの関数として式 (2) のように仮定している。

$$dN = f(V) N dV \quad (1)$$

ここで、 $V$ : 最大荷重に対する荷重レベル(%)

$N$ : AE 発生総数

$$f(V) = a/V + b \quad (2)$$

ここで、 $a, b$ : 定数

なお、式 (2) を式 (1) に代入し、積分することで式 (3) を得る。求められた  $a$  値が正であれば低荷重レベルで AE 発生確率が高く、負

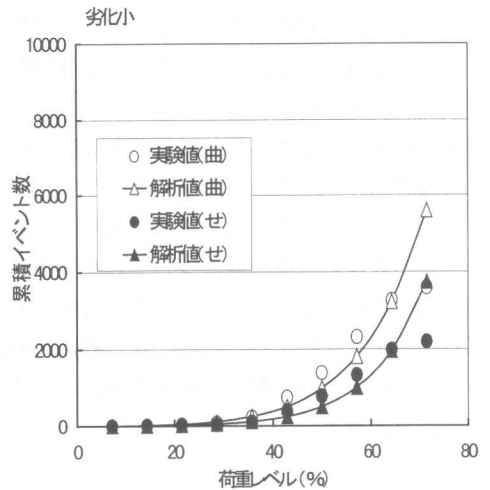
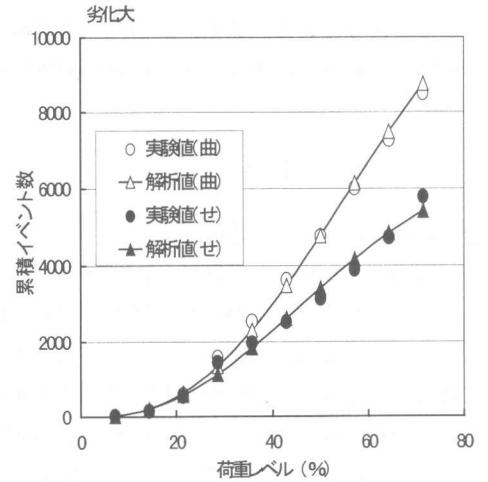


図-7 レートプロセス解析値と実験値の関係

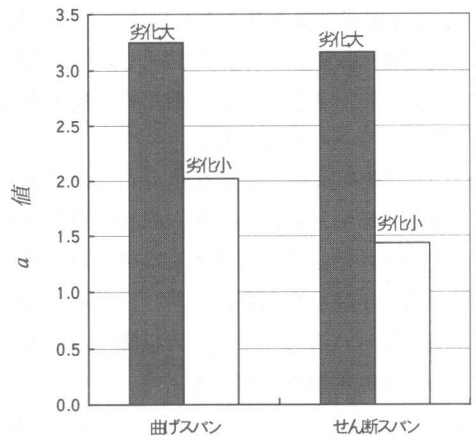


図-8  $a$  値と劣化程度との相関

であれば破壊近傍において AE 発生確率が高いことを表している。また、 $a$  値は、その値が大きいほど載荷初期より AE が活発に発生することを示している。

$$N = CV^n \exp(bV) \quad (3)$$

ここで、 $C$ ：積分定数

同図は、1 サイクル目の AE 挙動について検討した結果を示しているが、劣化大のものは劣化小のものとは比べ直線的であった。これは、鉄筋とコンクリート間の付着劣化によるせん断型ひび割れの発生により、AE の発生挙動が定常的であったことによるものと考えられる。

また、各計測位置におけるレートプロセス解析により得られた  $a$  値と劣化程度との相関を図-8 に示す。図から分かるように、レートプロセス解析により得られた  $a$  値が大きい、すなわち低荷重レベルより AE が発生したものは、内部鉄筋の腐食が多く見られた。また、 $a$  値が小さいものは、内部鉄筋についても腐食が少なかった。このことは、レートプロセス解析で得られる  $a$  値を比較することにより、構造物の潜在的な劣化進行の有無を判断するための一助となると思われる。

#### 4. まとめ

本研究の結果を以下のとおり取りまとめる。

- (1) 曲げ載荷試験 1 サイクル目では、劣化大で、荷重約 20kN より AE が頻発しはじめているのに対し、劣化小では、荷重約 50kN までほとんど発生しなかった。
- (2) 曲げ載荷試験 2 サイクル目においては、劣化のあるなしに関わらず、先行荷重を越えるまで AE がほとんど発生しないというカイザー効果が認められた。しかし、鉄筋が降伏したと思われる 3 サイクル目以降、このカイザー効果は不明瞭となった。
- (3) せん断スパン内の AE の累積イベント数は、曲げによるひび割れが支配的だったことから、曲げスパン内の AE 累積イベント数の約 60%

と少なくなっていた。

- (4) レートプロセス解析より得られた  $a$  値が大きいものは、内部鉄筋の腐食が多く見られた。また、 $a$  値が小さいものは、内部鉄筋についても腐食が少なかった。

謝辞：本研究は特別研究「港湾基盤施設の機能変化とライフエクステンションに関する研究」の一環として実施したものである。本暴露試験の計画は、元港湾技術研究所材料研究室長の関博早稲田大学教授および大即信明東京工業大学教授によるものである。現地暴露試験の実施には、運輸省酒田港湾工事事務所のご協力を得たことに感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 大津政康・森永浩通：AE 法によるコア供試体の劣化度判定法に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.43，pp.394～399，1989
- 2) 秋山哲治ほか：20 年以上に亘り海洋環境暴露試験を行った RC 梁および PC 梁の耐荷性状，コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集，pp.35～42，1998.10
- 3) 沿岸開発技術研究センター：港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書－劣化防止・補修マニュアル（案）－，pp.118～120，1987.9
- 4) 鈴木篤ほか：鉄筋腐食したコンクリートの力学特性と AE 特性，コンクリート工学年次論文報告，Vol.14，No.1，pp.815～820，1992
- 5) 丹羽義次監修・大津政康著：アコースティック・エミッションの特性と理論，森北出版，1988