

論文 曲げ疲労を受ける RC 部材の応答スペクトルと AE 特性

坂田康徳*¹・大津政康*²

要旨：橋梁上部工の維持管理や震災を受けた構造物の診断を行うための非破壊検査法の開発が望まれている。本研究は、超音波や弾性波などの諸性質を利用して、繰り返し荷重や震災を受けたコンクリート構造物の劣化度評価を行うための方法の開発を目的として、超音波スペクトロスコーピー法と AE 法を用いて、繰り返し曲げ疲労を受ける鉄筋コンクリート梁の劣化度評価を行うための基礎的研究を行ったものである。本研究の結果 AE 特性や応答スペクトルを用いて繰り返し曲げ疲労を受ける鉄筋コンクリート梁の劣化度評価がほぼ可能であることが明らかになった。

キーワード：超音波スペクトロスコーピー, AE, 疲労, 劣化度評価

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性保持に関する構造物の維持管理の問題は、コンクリート工学における重要なテーマの一つである。コンクリート構造物の劣化要因は種々考えられるが、特に近年の交通量の急激な増加に伴う橋梁上部工の疲労劣化や震災を受けた構造物のように大変形、低サイクル疲労を受けた構造物の疲労劣化は、重大事故に繋がりがかねない危険性をはらんでいる。このような事故を未然に防ぐには、疲労を受けた構造物の疲労の程度と残存寿命の予測が重要かつ不可欠と考えられる。

コンクリート構造物の維持管理に絡む構造物の非破壊評価法には、従来より種々の方法が考えられ、実施、検討されてきた。特に構造物中の各種欠陥や部材厚を評価するために、弾性波や超音波、電磁波や赤外線、X線やγ線などを利用した方法が開発され、実用化されている。また、電気的方法を用いて鉄筋の発錆やその分布状況を評価する方法も行われている。一方、鉄筋コンクリート構造物の疲労劣化に関する研究は、AE法等を用いて一部検討されているが未だ研究段階にあり、若干の改良の余地も残されている。

本研究は、繰り返し曲げ疲労や大変形、低サイクル疲労を受けた鉄筋コンクリート (RC) 構造物の疲労劣化度を超音波や弾性波を用いて評価する方法を開発することを目的としたものである。ここでは、超音波スペクトロスコーピー法と AE 法を用いて、繰り返し曲げ疲労を受ける RC 部材の劣化度評価の可能性を検討した。その結果、応答スペクトルや AE 特性を用いて繰り返し曲げ疲労を受ける RC 部材の劣化度評価がある程度可能であることが明らかになった。

2. コンクリート構造物の疲労劣化と非破壊評価

繰り返し曲げ疲労を受ける梁部材や大変形・低サイクル疲労を受けた RC 構造物の疲労劣化は、曲げやせん断、圧縮、引張り、ねじりなどの応力が単独または複合的に繰り返し作用する複雑な応力下にあって、ひび割れや鉄筋とコンクリートの付着離れが進行して、材料的あるいは構造的に劣化し、次第に耐荷力が低下して行くものと考えられる。それ故、このような構造物の疲労劣

* 1 九州東海大学 工学部土木工学科、博士 (学術) (正会員)

* 2 熊本大学 工学部環境システム工学科、工博 (正会員)

化過程は、構造物の主要部材の材料的、構造的劣化度を種々の方法で評価することが重要である。

この場合、コンクリートの劣化度を評価する方法として超音波や弾性波を利用した幾つかの方法が考えられる。AE法¹⁾は、荷重作用下の材料内部で生じる微小な破壊音を取り出して、その発生頻度や発生位置などから材料の破壊過程や構造物の安全性などを評価する方法であり、超音波スペクトロスコピー法²⁾はコンクリートの劣化度や内部欠陥を評価する方法である。音速法はひび割れ深さや内部欠陥、部材厚測定などに用いられている。さらに、打撃応答法や振動法³⁾は構造物全体としての剛性評価や構造的欠陥の評価に用いられている。これらの方法は、いずれもコンクリート構造物中の欠陥や材料の劣化度を評価する上で効果的な方法であり、個々の評価対象に対してかなり有効である。しかしながら、繰り返し荷重を受けるRC構造物の劣化は複雑であるため、個々の評価法単独で構造物全体の劣化度を精度良く評価することは困難であると考えられる。それ故、このような劣化現象は、幾つかの方法を組み合わせた総合的な非破壊評価法の開発が必要であると考えられる。

本研究は、このような繰り返し荷重を受けるRC構造物の疲労に伴う劣化度評価を行うための総合的な非破壊評価法の開発を目的としたものである。本報告は、その手始めとして、AE法と超音波スペクトロスコピー法を組み合わせた方法⁴⁾を用いて、繰り返し曲げ疲労を受けるRC部材の劣化度評価の可能性を実験的に検討したものである。

3. 実験概要

実験に使用した供試体は、幅15cm、高さ20cm、長さ120cmの鉄筋コンクリート梁であり、その中に主鉄筋としてD13mm異形鉄筋(SD295)を2本配置し、また、スターラップとして直径4mmの番線を2本1組で10cm間隔に配置したものである。梁の疲労試験は、単純梁の状態で中央軸対称の2点荷重の繰り返し曲げ試験とし、その際の荷重の繰り返し速度は3Hzとした。また、繰り返し荷重の上限値は梁の静的破壊荷重の75, 80, 85(%)、その下限値は6%とした。梁の製作に使用したコンクリートは粗骨材最大寸法25mm,スランプ12cm,水セメント比60%,標準養生材齢28日圧縮強度26.5MPaのAEコンクリートである。図-1は、この繰り返し曲げ疲労試験で使用した供試体の形状寸法と荷重の載荷位置、およびAEセンサの配置状況を示している。図-1中の(a),(b),(c)は、AE計測と応答スペクトル計測のためのAEセンサ配置位置を示している。

AE法では、供試体軸方向に配置した1対(2個)の広帯域AEセンサ(共振周波数1MHz)を用いて、供試体軸方向の1次元AE位置評定を行うと共に、所定繰り返し回数後の単位時間(1分間)当たりのAEカウント数を計測した。そしてこの単位時間当たりのAE波の振幅分布の変化状況を調査した。このAE計測で

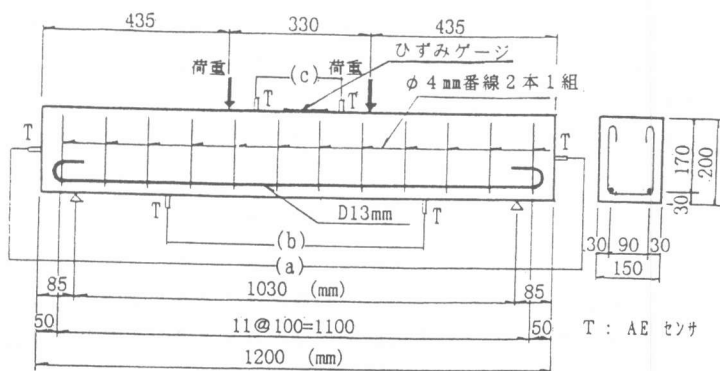


図-1 供試体形状寸法およびセンサ配置状況

は、疲労試験機からの雑音を除去するために敷居値 81 dB で計測した。また、超音波スペクトロスコピー法では、梁の圧縮部と引張り部にそれぞれ 1 対ずつ（計 4 個）の AE センサを配置して所定繰返し回数後の周波数領域 1 ~ 20 kHz 間と 1 ~ 400 kHz 間の応答スペクトルを測定し、これを基に超音波エネルギーを求めた。この際、標点位置には 20 × 20 × 2 (mm) の磨き鉄板をアラルタイトで貼り付けた後、これにビニルテープを介して瞬間接着剤で AE センサを固定して取り付けた。応答スペクトルは所定繰返し回数後に荷重を除荷した後、発信電圧および受信波増幅率を一定にして測定した。また梁圧縮部にはひずみゲージを貼り付け、各所定回数繰返し後の残留ひずみを測定した。なお、ここでいう所定繰返し回数とは千、5千、1万、5万、10万、50万、100万、150万、200万、250万の各繰返し回数を指している。表-1は、本疲労試験における各梁供試体の破壊時の荷重繰返し回数と外見的な破壊形態を示している。

表-1 梁供試体の破壊時の荷重繰返し回数と破壊形態

供試体記号	破壊時の荷重繰返し回数	梁の破壊形態
P85-1	105,259	セン断破壊
P85-2	469,347	曲げ破壊
P85-3	2,066,490	セン断破壊
P80-1	132,708	セン断破壊
P75-1	(250万回以上)	(破壊せず)
P75-2	(250万回以上)	(破壊せず)
P75-3	1,032,708	セン断破壊

4. 結果および考察

図-2は繰返し回数千回後の単位時間当たりの AE カウント数に対する、各所定繰返し回数後の相対 AE カウント数の変化状況を示している。若干のバラツキはあるが、相対的に荷重レベルが高いものほど疲労に伴う AE 発生数が多くなり、少ない繰返し回数で破壊に至ること、荷重レベルが低くて長い間荷重繰返しに耐えているものほど相対 AE カウント数が小さくて横這いまたは若干低下の状態推移することが判る。これは、荷重レベルが大きいくほど部材の劣化が速く進行し、破壊に至ることを示しているものと考えられる。

図-3は、単位時間当たりの AE 計測結果を基に求めた供試体の部材軸方向の 1 次元 AE 位置評定と供試体のひび割れ分布状況を比較した一例である。この図において、梁のひび割れ位置周辺で比較的多くの AE が発生しているようにも見えるが、ひび割れ位置以外の場所にもかなりの AE が発生していることが判る。これは、梁に生じる目に見える支配的なひび割れが荷重繰返し開始直後にほとんど発生し、その後は疲労度の増加に伴って徐々に進行するため、支配的なひび割れの進行に伴う AE 発生頻度が少ないこと、鉄筋とコンクリ

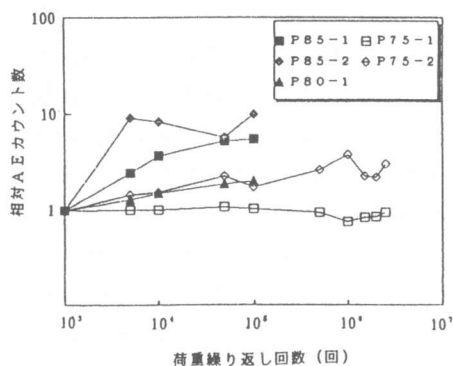


図-2 単位時間当たりの相対 AE カウント数の変化状況

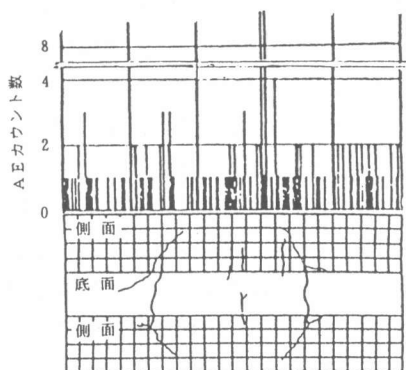


図-3 供試体軸方向の AE 発生源位置評定と供試体に発生したひび割れ位置

ートの付着面における摩擦や、コンクリート圧縮部における微小ひび割れの発生、あるいは支配的なひび割れの発生に基づいてAE波が迂回するため、AE位置評定に誤差を生じることなどによるものと考えられる。なお、このAE位置評定では2つのセンサで信号を受信して評定するため、センサ取り付け時の微妙な相違等に基づく両センサ間の感度の差が生じるため、AEカウント数に比べて位置評定数が相対的に少くなっているものと考えられる。

図-4(a),(b),(c)は、荷重繰り返し回数の増加に伴う単位時間当たりのAEから得られたAE波の振幅分布の変化状況を示している。(a),(b)は荷重繰り返し回数約10万回で破壊したケースであり、(c)は約250万回付近まで耐えたケースである。(a)は荷重繰り返しの増加に伴って振幅の小さいものから大きいものまで一様に発生数が増加しているのに比べて(b)は繰り返し回数の増加に伴って大きな振幅を有するAEが次第に増加する様子が判る。このような荷重繰り返し回数の増加に伴うAE振幅分布の相違は、荷重繰り返しに伴う梁の破壊形態の相違によるものと考えられる。すなわち、梁の破壊形態には曲げ破壊やせん断破壊、ねじり破壊などがあるが、これらの内のいずれかが単独または複合的に進行するため、このような相違が生じるものと考えられるが、詳細については未だ不明である。(c)は長い間の荷重繰り返しに耐えた場合であり、荷重繰り返し回数の増加にかかわらず、ほとんど同様の振幅分布で終始していることが判る。これは荷重レベルが低いため、荷重繰り返しに対する疲労度があまり進まないためと考えられる。

図-5は、各所定繰り返し回数後の梁圧縮部の残留ひずみを示している。若干のバラツキはあるが、相対的に荷重レベルの高いものほど大きな残留ひずみで推移し、ま

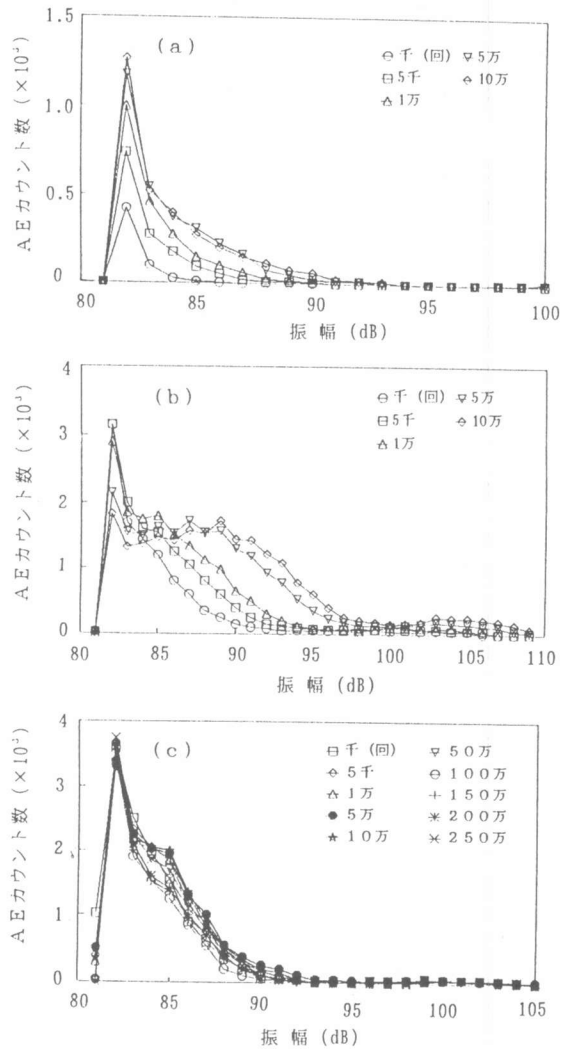


図-4 荷重繰り返し回数の増加に伴うAE波振幅分布の変化状況

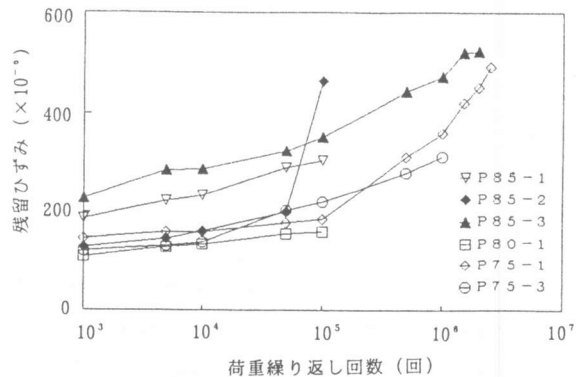


図-5 疲労過程における残留ひずみの変化状況

た、その増加率も大きいのに比べて、荷重レベルの低いものは残留ひずみも小さく、初期においては横這いまたは若干増加で推移するが、繰り返し回数が増加するに従って次第に残留ひずみが大きくなり、破壊時近傍ではかなり大きな残留ひずみとなっていることが判る。また、破壊が近づくと急激に残留ひずみが大きくなるものや、破壊時周辺で測定できないまま終わったものも見られる。これより、さらに詳細な観測をすれば、梁の破壊が近づくとつれて残留ひずみは大きくなるものと考えられる。なおこの場合、高い荷重レベルでありながら、長い間繰り返し荷重に耐えているものもあるが、これは静的な曲げ破壊耐力の推定誤差によるものと考えられる。

図-6は、梁圧縮部の荷重繰り返しの増加に伴う周波数領域1~400 kHz間の応答スペクトルの変化状況の一例である。荷重繰り返しの増加に伴って応答スペクトル振幅が次第に低下している様子が判る。これは、荷重繰り返しの増加に伴って梁の圧縮部に微小ひび割れが増加するため、超音波が伝播し難くなるためと考えられる。このような傾向は梁引張り部においても見られるが、これは、梁引張り部における曲げひび割れの増加や鉄筋とコンクリートの付着離れの影響ではないかと考えられる。

図-7は、荷重繰り返しの増加に伴う梁圧縮部の周波数領域1~400 kHz間の応答スペクトルを、センサを含む計測器の感度特性で補正して求めた相対エネルギーの変化状況を示している。この場合の相対エネルギーは、荷重載荷前の値を基に求めたものであるため、載荷の初期(千回付近)において一部に急激なエネルギーの低下が見られるのが判る。若干のバラツキはあるものの、相対的に荷重レベルが高いものほど直線的にエネルギーが低下して破壊に至るのに比べて、荷重レベルの低いものは千回付

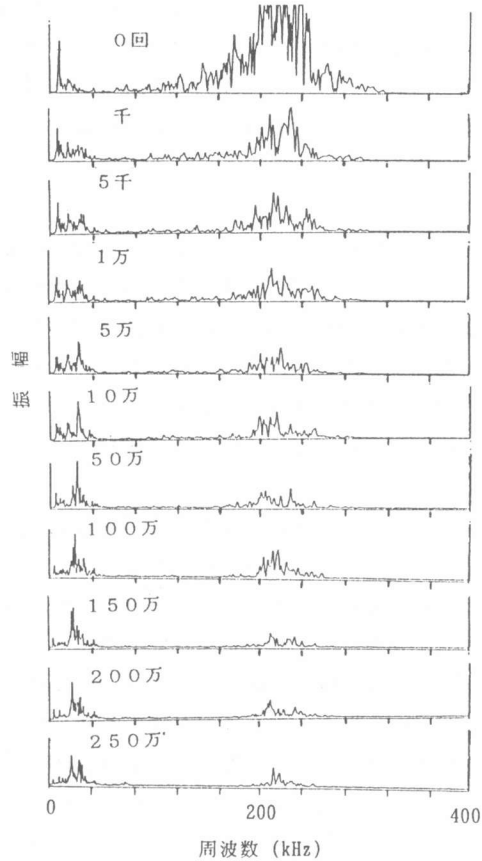


図-6 荷重繰り返し回数の増加に伴う梁圧縮部の周波数領域0~400kHz間の応答スペクトルの変化状況

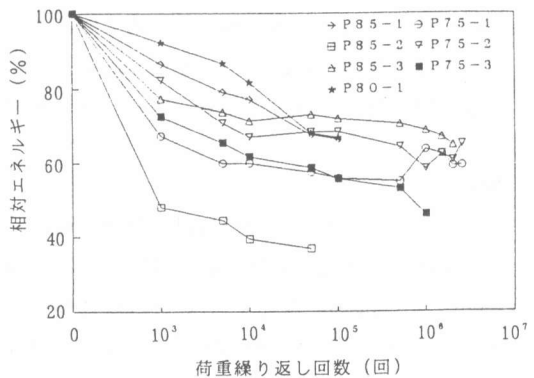


図-7 荷重繰り返しの増加に伴う梁圧縮部の周波数領域0~400kHz間の相対エネルギーの変化状況

近では低下しているが、その後は横這いまたは緩い下降曲線で推移し、長い間繰り返し荷重に耐えている様子が判る。そして破壊が近づくとつれて再び低下する様子が見られる。この破壊近傍の様子については今回の測定間隔が50万回毎としたため、間隔が荒くて十分な結果が得られなかったが、より綿密な測定を行うことにより、さらに詳しい様子が分かるものと考えられる。

5. 結論

以上、A E特性と応答スペクを用いて繰り返し曲げ疲労を受けるRC梁の劣化度評価を試みたが、その結果について要約すると次のような結論が得られる。

- 1) 荷重繰り返し回数の増加に伴う単位時間当たりの相対A E発生数は、載荷荷重レベルが高いほど急速に大きくなり、載荷レベルが低いものは横這いで推移する傾向がある。
- 2) 単位時間当たりのA E計測で求められる梁の部材方向の一次元A E位置評定結果と、梁の支配的なひびわれ位置との相対的な位置関係は少ない。これは、支配的なひび割れが荷重繰り返し直後にほとんど生じること、鉄筋とコンクリートの摩擦やコンクリート内部における微小ひびれ割発生、支配的なひび割れによるA E発生源の位置評定誤差などによるものと考えられる。
- 3) 単位時間当たりのA E波の振幅分布には、載荷レベルが高い場合、梁の疲労が進むに従って一様に振幅分布が増加するものや、高い振幅のA Eが次第に増加するものがある。また、載荷荷重レベルが低くて疲労が進まないものは、A E波の振幅分布の変化が少なくなる傾向がある。
- 4) コンクリート圧縮部の残留ひずみは、はりの疲労度に従って大きくなる傾向があり、破壊が近づくと急激に大きくなるものと考えられる。
- 5) 梁圧縮の応答スペクトル振幅は、梁の曲げ疲労度の増加と共に低下する傾向がある。また、これより得られる超音波エネルギーは、梁の曲げ疲労度の増加に伴って次第に低下する。この場合、荷重レベルが高くて急激に疲労する梁の相対エネルギーは、荷重繰り返し回数の増加に伴って急激に低下する。これに比べて、長期間耐えている梁の相対エネルギーは、荷重繰り返しの初期において低下するが、その後は横這いまたは若干低下の傾向で推移し、破壊が近づくとつれて再び低下に転じる傾向が見られる。
- 6) 梁の繰り返し曲げ疲労過程における単位時間当たりのA Eカウント数と超音波エネルギーは、共に荷重レベルに依存して変化することが判った。そこで、これらの関係を詳細に調査し、検討を重ねることにより、個々の方法で評価するよりも精度良く梁の曲げ疲労度を評価できるものと考えられる。それ故、A E法と超音波スペクトロスコピー法を組み合わせることで、繰り返し曲げ疲労を受けるRC梁の劣化度評価がある程度可能であると考えられる。

[参考文献]

- 1) M. Ohtsu: Rate Process Analysis of Acoustic Emission Activity in Core Test of Concrete, Proceedings of JSCE, No. 442/V-16, pp. 211-218, 1992
- 2) Sakata Y. and M. Ohtsu: Crack Evaluation in Concrete Members Based on Ultrasonic Spectroscopy, ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 6, pp. 686-698, Nov.-Dec. 1995
- 3) 宮本文穂, 森川秀典, 山本昌孝: コンクリート橋の振動特性変化に基づく損傷評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 319-324, 1990
- 4) 坂田康徳, 大津政康: 応答スペクトルとA EによるRC部材の疲労劣化度評価法に関する基礎研究, 九州東海大学紀要工学部, 第22号, pp. 79-86, 1995