

## [1091] AE法による鉄筋コンクリート梁の一次元破壊進展位置標定に関する研究

正会員 ○ 山本貞明 (東京大学大学院)

正会員 魚本健人 (東京大学生産技術研究所)

### 1. はじめに

近年、国道のPC橋や、新幹線の高架橋などの重要なコンクリート構造物の早期劣化が大きな社会問題となっている。コンクリート構造物の劣化原因には多くのことが考えられるが、道路橋や鉄道橋の場合には、設計当初の予想をはるかに上回る交通量や車両の大型化が原因の一つであると考えられる。これらのコンクリート構造物を使用していくためには、適切な維持・補修を実施していかなければならないが、その場合コンクリート構造物の劣化が進行しているのか否か、また、どこで劣化が進行しているのかを的確に把握することは、その構造物の寿命を知る上でも、また適切な補修時期および補修内容を決める上でも非常に重要である。そこで、対象としている構造物の使用を一時的にも中断することなく、非破壊的に検査し、正確に劣化位置及び劣化進展状況を把握することのできる検査手法の確立が望まれている。

非破壊検査法には種々のものが考えられるが、そのうちアコースティック・エミッション(AE)法は材料内部の変化あるいは破壊にともなって放出されるひずみエネルギーの一部である弾性波を検出するという検査法であることから、構造物の時々刻々の動的挙動を容易に得ることができ、構造物全体の検査を行うことができるという利点を有している。そのため、構造物を常時あるいは定期的に監視することによって構造物の劣化箇所およびその進展状況を把握する計測方法としてAE法は現在最も有力な方法の一つであると考えられる。

本研究では、AEモニタリング法によってコンクリート構造物の破壊進展位置を標定することを目的として、鉄筋コンクリート梁の静的載荷時における破壊進展位置標定方法について実験的な検討を行った。従来のAE位置標定においてはAE事象による位置標定が行われているが、この従来の方法では、AE事象個々の重み付けが考慮されていない。そこで本研究では、AE事象個々に重み付けをしたAEエネルギー(振幅の2乗を持続時間で積分したもの)による位置標定を行い、従来行われているAE事象による位置標定と比較した。尚、位置標定は供試体である鉄筋コンクリート梁の形状が細長いことと、その長手方向に対する位置が重要であることから一次元位置標定を行った。

### 2. AE位置標定原理

AE位置標定の原理は、あらかじめ変換子間距離と伝播速度を決めておき、2つの変換子へのAE波の到達時間差からAE発生位置を標定するものである。二次元、三次元の位置標定の場合にも同様な原理で時間差一定の双曲線の交点として求めることができる。

位置標定を行う際の技術的問題点は、AEの発生、伝播、検出、処理の全ての過程において存在するが、コンクリートは金属に比べ減衰の大きい不均質な材料であるため、AE波のコンクリート中の伝播に関する問題が最も大きいと考えられる。

そこで位置標定を行うに先立ち、コンクリート中の鉄筋の弾性波伝播特性をコンクリートおよび鉄筋そのものの弾性波伝播特性と比較し、位置標定を行う際、鉄筋コンクリート梁中の鉄筋に変換子を接着する利点があるか検討し、コンクリートの弾性波伝播特性の結果に基づき鉄筋コン

クリート梁の一次元位置標定を行った。

### 3. 実験概要

実験に使用した供試体は図-1の寸法の鉄筋コンクリート梁である。供試体に用いたコンクリートはW/Cが50%、細骨材率が48%、スランプが5.5cm、空気量が1.9%のものであり、材令10週で圧縮強度 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ のものである。異形鉄筋はD10(SD35)を使用した。

#### <弾性波伝播特性>

コンクリート中の鉄筋、コンクリート、鉄筋そのものを媒体としたときの各々の弾性波伝播特性を周波数解析によって検討した。使用した供試体は図-1の鉄筋コンクリート梁と長さ1.16mの鉄筋：D10(SD35)である。変換子は共振周波数140kHzのPZT圧電型を使用した。各々の媒体の断面に変換子を接着し、一方の変換子から疑似AE波を発信した時の受信信号をF.F.T.法によって周波数解析した。AE計測システムのブロック図を図-2(a)に示す。

図-1に示す鉄筋コンクリートおよび鉄筋をコンクリートカッターで長さ145mm, 290mm, 580mmに切断したものをを用い、50kHz, 150kHz, 250kHzの正弦波の連続波を媒体を変えて発信したときの受信振幅の伝播距離による変化を測定した。変換子は共振周波数60kHzのPZT圧電型加速度ピック・アップを使用した。

#### <一次元位置標定>

荷重方法は $a/d$ が2.6の2点荷重とし、変換子接着位置は、弾性波伝播特性の実験結果を考慮してコンクリート面とし、ひび割れの発生および伸展に伴う減衰の検討結果<sup>2)</sup>より図-1に示す位置に接着した。変換子は共振周波数60kHzのPZT圧電型加速度ピック・アップを使用し、プリ・アンプで40dB増幅した後、データ・チェンバーで検出信号を $1\text{V}=100\text{dB}$ に相当する信号にLOG化した。しきい値は65dB、不感時間は3msecとした。AE計測システムのブロック図を図-2(b)に示す。

研究に用いたAE計測装置では、AE波到達時刻測定方法として受信信号の包絡線検波がしきい値を横切ったときをAE波の到達時刻とする方法(イベント・タイミング法)と、受信信号の振幅のピーク時をAE波の到達時刻とする方法(ピーク・タイミング法)の2種類があるが、疑似AE波を使つての位置標

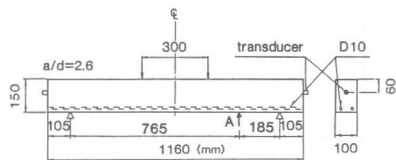
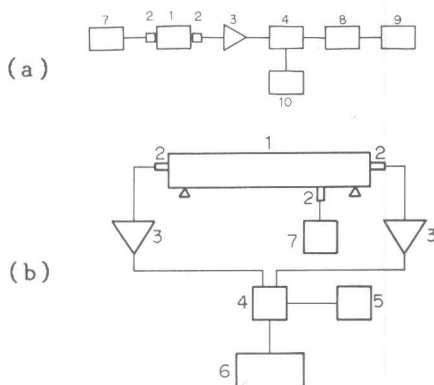


図-1 供試体(鉄筋コンクリート)寸法、荷重位置、変換子接着位置



- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| 1 供試体           | 2 AE変換子        |
| 3 プリ・アンプ        | 4 データ・チェンバー    |
| 5 エネルギー・プロセッサ   | 6 パーソナル・コンピュータ |
| 7 AEバルサ         | 8 ウェーブ・メモリ     |
| 9 デジタル・データ・レコーダ | 10 オシロスコープ     |

図-2 AE計測システム・ブロック図

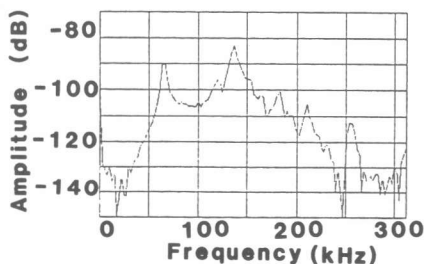


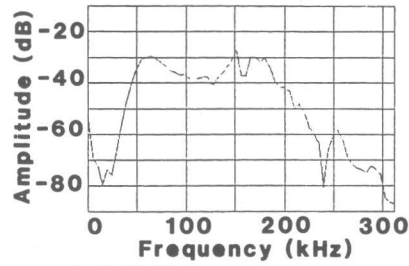
図-3 変換子どうしを直接接着し、疑似AE波を発信した時のフーリエ・スペクトル

定精度の面から検討した結果、イベント・タイミング法を使用した。<sup>2)</sup> その際荷重レベルの増加にともない、ひび割れの発生および伸展に伴う振幅の減衰のために見かけ上伝播速度が低下する<sup>2)</sup> ことから、各荷重レベルで荷重を保持したまま図-1 の点 A から疑似 AE 波を発信して、逆に 2 つの変換子への到達時間差から図-1 の点 A を正確に標定するように伝播速度を求め、その伝播速度を次の荷重レベルまでの位置標定に使用した。また、載荷点および支点と供試体の間には、こすれによる AE の発生を防ぐために各々厚さ 1mm のテフロンシートを 2 枚づつ挿入した。

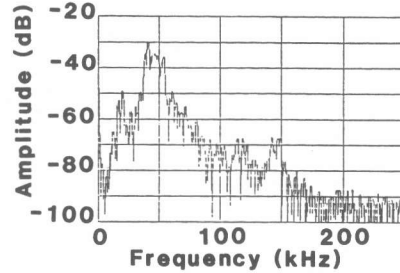
#### 4. 弾性波伝播特性

##### 4. 1 周波数応答特性

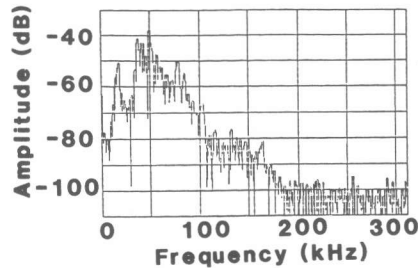
図-3 は変換子どうしを直接接着した時、図-4 は各々媒体を鉄筋そのもの、コンクリート、コンクリート中の鉄筋とした時の受信信号のフーリエ変換によるフーリエ・スペクトルである。図-3 と比較すると鉄筋そのもの場合は、低周波成分から高周波成分まで減衰なく伝播していることがわかる。一方、コンクリートおよびコンクリート中の鉄筋の場合は 100kHz 以上の周波数成分が減衰してしまい 100kHz 以下の周波数成分の波を受信していることがわかる。



(a) 鉄筋

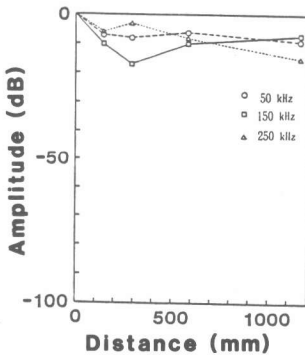


(b) コンクリート

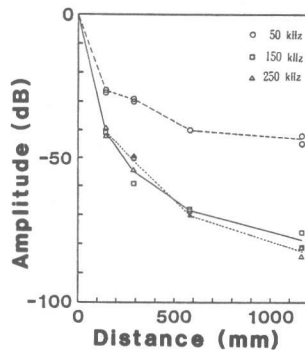


(c) コンクリート中の鉄筋

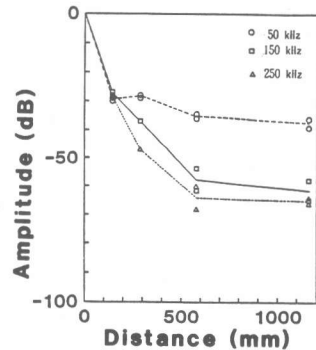
図-4 疑似 AE 波が各媒体を伝播した時のフーリエ・スペクトル



(a) 鉄筋



(b) コンクリート



(c) コンクリート中の鉄筋

図-5 媒体および周波数の違いによる伝播距離と受信振幅の関係

#### 4. 2 周波数と伝播距離による振幅の減衰

図-5 は各々の媒体において周波数を変えたときの伝播距離と受信振幅の関係である。変換子どうしを直接接着した時の受信振幅を 0dB, 伝播距離を 0m にとってある。鉄筋そのものの場合、どの周波数の波においても減衰が少なく 1m 当り約 10dB 以内である。コンクリートの場合、減衰は大きく特に 50kHz の波に比べ 150kHz, 250kHz の減衰が大きい。コンクリート中の鉄筋の場合もコンクリートの場合と同様の結果であった。

これらの実験結果から、コンクリート中の鉄筋の弾性波伝播特性は鉄筋そのものの伝播特性とは異なり、むしろコンクリートの伝播特性とほとんど同じであることから、位置標定の際に鉄筋コンクリート梁中の鉄筋に変換子を接着する利点が見い出せなかった。

#### 4. 3 コンクリートの弾性波伝播特性

コンクリートの弾性波伝播特性を伝播距離による減衰とひび割れの発生および伸展に伴う減衰の面から検討した。図-6 は入力電圧一定の疑似AE波を伝播距離を変えて発信したときの受信振幅を計測した結果である。変換子距離 145mm の時を基準に伝播距離を 0m, 受信振幅を 0dB とした。伝播距離による減衰は 1m につき約 20dB であることがわかる。図-7 は位置標定に用いる鉄筋コンクリート梁、載荷方法、変換子接着位置によって、入力電圧一定の疑似AE波を供試体の一方の変換子から発信したとき、他方の変換子で各荷重レベル毎に荷重を保持したまま受信振幅を計測した結果である。横軸は破壊荷重を 100% としたときの荷重レベルを、縦軸は荷重 0ton における受信振幅を 0dB にとってある。ひび割れの発生および伸展に伴う減衰は荷重レベル 50% につき約 7 dB であることがわかる。これらの結果から、コンクリート中をAE波が伝播する際の減衰により一次元位置標定は中央から端部にいくに従って標定し難くなり、その傾向は、ひび割れの影響によって荷重レベルが増すにつれて強くなると予想される。

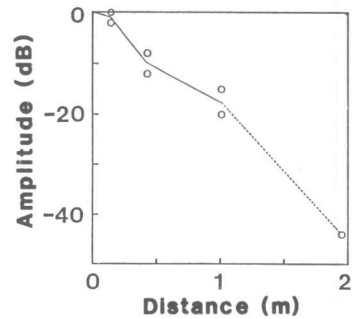


図-6 伝播距離と受信振幅の関係

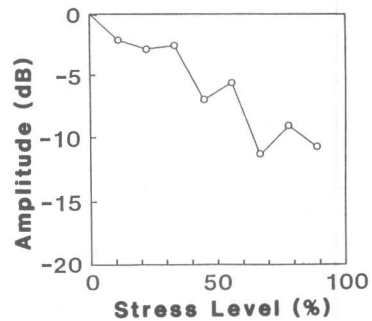


図-7 荷重レベルと受信振幅の関係

#### 5. AE事象およびAEエネルギーによる一次元破壊進展位置標定

AEエネルギーによる一次元位置標定方法は、片側の変換子で受信したAEエネルギーを標定位置にプロットする方法であるため、伝播距離によるAEエネルギーの減衰を考慮する必要がある。図-8 は伝播距離とAEエネルギー比の関係であり、縦軸は伝播距離 145mm におけるAEエネルギーを 1.0 としたAEエネルギー比である。そこでAEエネルギーによる一次元位置標定では、測定結果は図-8 の回帰直線で補正を行った。

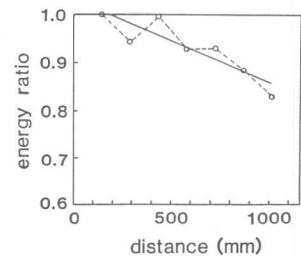


図-8 伝播距離とAEエネルギー比の関係

図-9 は各々 3.0~4.6ton におけるAE事象およびAEエ

エネルギーによる一次元位置標定結果と供試体のひび割れ状況である。尚、この図に示した供試体は 4.8ton で破壊した。図の横軸は供試体位置である。標定は供試体位置中央付近および左側で多くの標定がされている。中央の標定は供試体のひび割れ状況における曲げ領域のひび割れに、左側の標定はせん断領域の斜めひび割れに対応している。

供試体のひび割れ状況から、ひび割れ幅、ひび割れ長さ共にせん断領域における斜めひび割れの方が大きく、破壊進展度の面ではせん断領域における斜めひび割れの方が大きいと考えられる。しかしながら、AE 事象による位置標定では左側よりも中央の方が多くの標定をしている。これは前述のコンクリート弾性波伝播特性の結果から、伝播距離およびひび割れによる減衰のために中央より左側の方が標定され難いこと、AE 事象個々の重み付けがなされていないことによると考えられる。一方、AE エネルギーによる位置標定結果では、中央および左側の標定量が同じ程度となっている。これは AE 事象個々の重み付けがなされているためであると考えられる。これらの結果から破壊進展度を判定する場合、AE 事象による位置標定よりも AE 事象個々の重み付けを行った AE エネルギーによる位置標定の方が有効であると考えられる。

図-9 に示した結果を更に荷重を細かく区切ってみたものが図-10 および図-11 である。いずれも AE エネルギーによる一次元位置標定であり、図-10 は荷重 4.0~4.4 ton、図-11 は荷重 4.4~4.6 ton における一次元位置標定結果である。図-10 においては供試体位置左側で多くの標定がされており、せん断領域におけるひび割れの発生および伸展

crack distribution

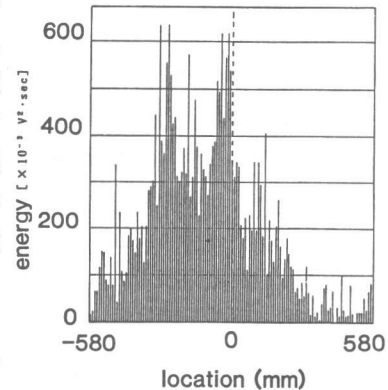
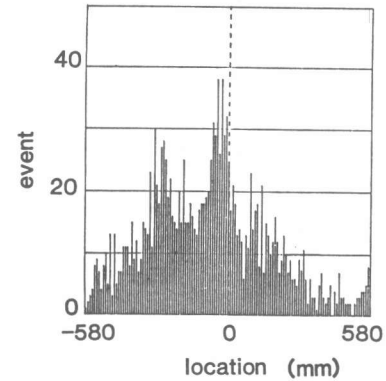
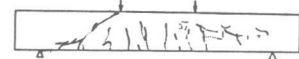


図-9 AE 事象および AE エネルギーによる一次元位置標定と供試体のひび割れ状況 (荷重 3.0~4.6 ton)

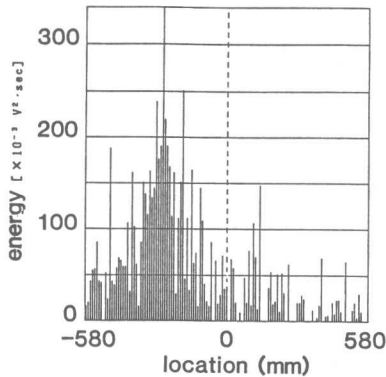


図-10 AE エネルギーによる一次元位置標定 (荷重 4.0~4.4 ton)

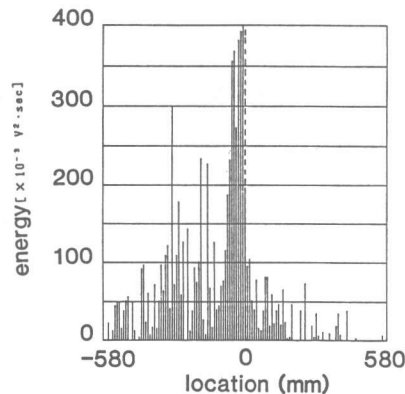


図-11 AE エネルギーによる一次元位置標定 (荷重 4.4~4.6 ton)

が活発であったと考えられる。また、図-11 においては供試体位置左側での標定は少なく中央付近で多くの標定がされており、せん断領域におけるひび割れの発生および伸展は止まり、曲げ領域におけるひび割れの発生および伸展が活発であったと考えられる。目視による観察からはこの供試体はせん断領域の斜めひび割れによって最終的に破壊に至ったものと思われたが、これらの結果からこの供試体はせん断領域におけるひび割れの発生および伸展の後に、曲げ領域におけるひび割れの発生および伸展が起こり、破壊に至ったものと考えられる。

## 6. 結論

本研究で得られた結論を示すと以下のようになる

1. AE法による一次元位置標定によって、時々刻々、鉄筋コンクリート梁の破壊進展位置を捉えることができ、目視による観察では判断できない供試体の破壊性状を知ることができる。
2. 破壊進展度を判定する目的では、従来行われているAE事象による位置標定よりも、AE事象個々の重み付けを行ったAEエネルギーによる位置標定の方が有効であると考えられる。
3. コンクリート中の鉄筋の弾性波伝播特性は、鉄筋そのものの弾性波伝播特性よりもコンクリートの弾性波伝播特性に近い事から、位置標定を行う際、コンクリート中の鉄筋に変換子を接着する利点が見い出せない。
4. コンクリート材料の弾性波伝播特性として、伝播距離およびひび割れによるAE波の減衰が大きく、100kHz以上の周波数成分の波は伝播し難い事から、大型コンクリート構造物への適用を行う場合には、減衰を極力少なくするような変換子の改善や、フィルターの使用による低周波数帯での受信などが今後の課題であると考えられる。

(付記) 本研究費の一部は昭和61年度文部省科学研究費「一般研究C」によったものであることを付記する。

## 参考文献

- [1] 尾上守夫ほか：アコースティック・エミッションの基礎と応用，コロナ社
- [2] 山本貞明：AE法による鉄筋コンクリート梁の一次元破壊進展位置標定に関する研究，東京大学修士論文 1987
- [3] 大津政康：コンクリート材料におけるアコースティック・エミッション特性とその発生機構に関する基礎的研究，京都大学学位論文 1982
- [4] H. R. Hardy, F. W. Leighton: METALS AND LOCKS, AE Physics and Technology in Common and in Contrast, Proceedings 1st. Conf. on Acoustic Emission, Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, 1977