

研究展望

REVIEW

研究展望

コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション (AE) 研究の歴史と現状

HISTORY AND DEVELOPMENTS OF ACOUSTIC EMISSION IN CONCRETE ENGINEERING

大津政康

Masayasu OHTSU

正会員 工博 熊本大学教授 工学部
(〒860 熊本市黒髪 2-39-1)

Key Words : acoustic emission, nondestructive testing, diagnostics, maintenance

1. はしがき

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission; AE) 法は、圧力容器の欠陥検査法として 1960 年代になってアメリカで注目されるようになり、現在に至る研究活動が知られている。特に、国際会議として(社)日本非破壊検査協会が 2 年毎に開催し既に 11 回を数える AE 国際シンポジウム¹⁾は、現在、世界で最も権威のある会議とされている。これは、対象となる分野の広がりによって、全ての分野にまたがる研究発表の場が少なくなってきたことも影響しているようである。ただし、土木工学の分野に限って言えば、世界中で日本だけが国内コンファレンスを定期的開催し、昨年に第 5 回を迎えている²⁾。このように世界的にもよく知られている土木工学における活発な AE の研究活動の一翼を担っているのがコンクリート工学の分野である。そこで、この方面でのこれまでの歴史的な発展と現状について概説する。

2. AE 研究の歴史

AE の歴史については、既に種々の文献で紹介されており³⁾、創始者としてドイツの Kaiser とアメリカの Obert が著名である。金属分野でミュンヘン工科大の Kaiser は、1950 年に金属破壊時の非可聴音を初めて検出した。その後、この計測技術は、Schofied によって AE と名づけられた。同様な計測法は鉦山の落盤予知にも用いられ、その創始は Obert の 1938 年の報告にさかのぼることが認められている。

ごく最近になり、AE についての文献整理を行っている Drouillard⁴⁾は、木材の AE を調査中に図-1 に表題を示す論文を文献リストで発見した。これは、著者自身(大津)が彼にコピーを依頼され探し出したものであ

第 6 巻

25

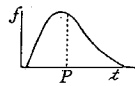
破壊の進行に関する一実験 (豫報)

地震学教室 岸上 冬彦

此處に記述するものは昭和 8 年 11 月 21 日に地震研究所談話會に於て同じ表題で話したものである。

1.

此の実験を初める動機は昭和 5 年の 2 月から 6 月に亘つての伊豆の伊東町附近にあつた地震群の頻度分布を調べたことであつた。時間(t)を横軸に、地震の頻度(f)を縦軸にとつた頻度分布圖を畫いて見ると地震群の全體としては第 1 圖の様な形になつて山の少し低くなつた所で最も強いものが起つてゐるが、此の中にある多數の地震が短い時間には如何なる分布を以て起るかを見る目的で、三崎の臨海實験所



第 1 圖

図-1 世界最初の AE 実験報告の第一頁⁵⁾

る⁵⁾。ここに見られるとおり昭和 8 年(1933 年)に報告されたもので、世界最初の AE は日本の東大で研究されていたことが明らかになった。内容としては、地震の発生を材料の破壊過程との類似により解明するため、木材の曲げ試験中に引張縁部に挿入したレコード針で検出された非可聴音を記録したことが述べられている。これまでに知られている Kaiser, Obert などの報告とは異なり、主破壊に先行する非可聴音を検出しようとする概念とそのための計測技術が明確に提示されている。そのため、世界的にも AE 研究の創始として認知されつつある。

現在につながるコンクリート工学の分野での AE 研究は、金属分野と岩石分野から導入されたと思なされている。歴史的に創始として認められているのは、Rusch⁶⁾, L' Hermite⁷⁾, Robinson⁸⁾ 等の研究である。いずれも主破壊前に発生する微小破壊が、加速度計などを用いて波動現象として検出されると報告している。著名な図-2⁷⁾は、圧縮破壊過程の非弾性領域(ポアソン比の増加開始)

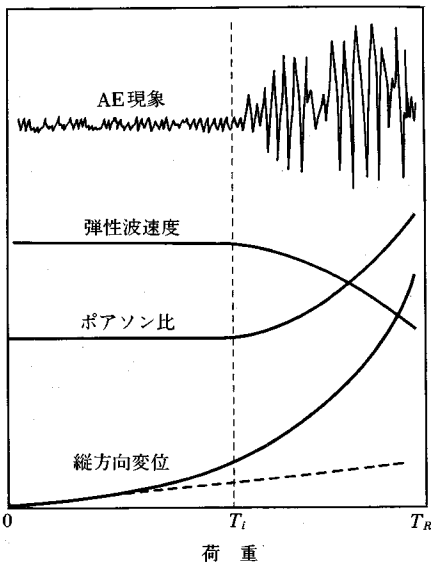


図-2 圧縮破壊過程での非弾性挙動⁷⁾

付近から、AE が発生し弾性波伝播速度も遅くなるという結果をまとめたものである。同じ時期の研究として、「コンクリートものがたり」⁹⁾ に述べられている北大の横道先生の話は、我が国におけるコンクリートの AE の創始的な研究に関連している。

コンクリートの AE 研究が実用化に向けて注目されるようになり始めたのは 1970 年代の後半から 80 年代の始めであり^{10)~13)}、基本的には金属分野で開発された機器仕様のコンクリート材料への適用にあたっての改良、変更などが模索された時期と考えられる。この時期の成果が、次節で述べるコンクリート材料の AE 計測技術として確立され、現在の活発な研究動向に結びつけられたと言える。

Drouillard が 1986 年に報告したコンクリートの AE¹⁴⁾ の文献調査では、それまでに海外で知られていた AE の論文数はわずかに 76 に過ぎなかった。それが、コンクリート工学協会の非破壊試験法委員会の報告¹⁵⁾ では 1980 から 1991 の間で海外 8 編、国内 116 編となっており、特に国内で活発に研究が進められている様子がかがえる。それらの成果を中心に、計測技術と研究動向として以下に解説する。

3. AE 計測の実際

(1) 計測の基礎

図-3 に示すように、ひび割れなどの材料内部のエネルギー解放現象によって弾性波が発生する。その弾性波 (AE 波) は、物体内を伝播し物体表面に設置した AE センサ (トランスデューサ、変換子) により電気信号へと変換され検出される。したがって、AE 波動の取扱いは本質的に弾性波動論に基づいて行わねばならない。こ

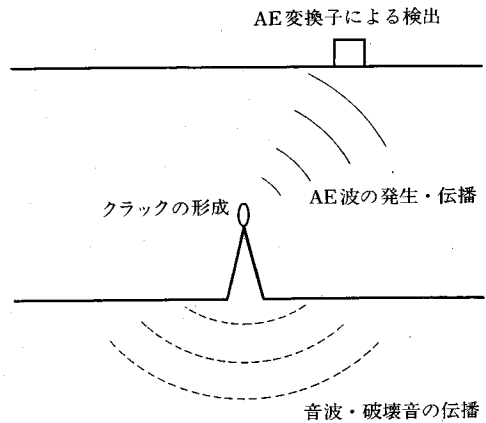


図-3 AE の発生・伝播・検出

れについて著者等は、コンクリートへの導入の初期に、AE 波形記録が理論的に再現できることを明らかにしている¹⁶⁾。しかし、他の分野では AE 波形解析は単なる信号処理と扱われていることが多く、この点は現在見直しが進みつつある。

AE 波動は、弾性体中に動的な作用があれば必ず発生する縦波 (P 波) と横波 (S 波) を基本的に含んでいる。実際には、表面波である Rayleigh 波、さらにはその他の回折波、反射波などが含まれ大変に複雑なものである。コンクリート材料中の伝播過程では、この回折、反射の影響はかなり大きいと考えられている。さらに、一般に波形の後半部は AE センサ自身の共振波形である。

検出経路あるいは計測環境によっては、初動の P 波が非常に小さな振幅となっていることがあり、計測システムのノイズ (雑音) レベルに紛れて検出できないことがある。その場合には、AE 波の初動は P 波ではなく、S 波あるいは他の波動成分となる。ひび割れ発生時の AE 源位置標定を行うには、あらかじめ速度の決定が必要であり、初動成分が何であるかは特に注意を要する点である。

金属材料では、突発型と連続型と呼ばれる 2 種類の AE 波形が存在するとされることもある。しかし、現在では、1 つの AE 現象によって発生した AE 波の振幅が時間的に減衰し、雑音レベルまで小さくなる前に、次の AE 波が発生・記録されるかどうか依存しているだけと考えられている。つまり、1 つの AE 波の継続時間と連続的に発生する AE 波の時間間隔の関係から生じる見かけの現象とされている。例えば、金属材料のように減衰が小さく 1 波形の継続時間が長くなるものでは、塑性変形時などには連続型の AE 波が見られる。一方、コンクリート材料では減衰が大きいため突発的に観測される。

(2) AE 計測システム

AE センサで変換され電気信号となった後は、図-4

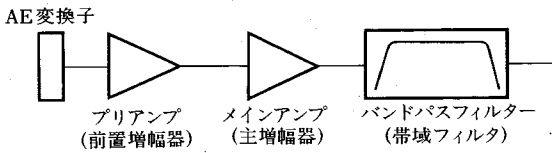


図-4 AE計測システム

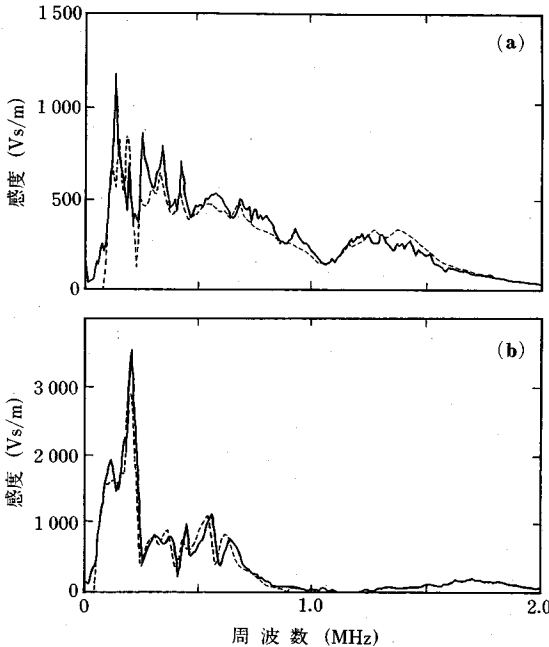


図-5 AEセンサの周波数応答の例³⁾

のように増幅器、フィルタを経て検出される。AEセンサとして一般に使用されている圧電素子を用いた変換子は、 10^{-9} mm程度の波動振幅を 10^{-6} V程度の電圧に変換すると言われている。センサに求められるものは感度と周波数特性である。理想的には、図-5のようにセンサの完全な周波数応答曲線の得られていることが望ましい³⁾。しかし、センサごとにこのような感度曲線が与えられているとは限らない。また、周波数分析を行う場合を除いては、この結果も目安としての意味しかない。何故ならば、材料とセンサの接触条件によっても特性は変化するからである。

図-5は(a)広帯域型センサと(b)共振型センサとの周波数応答の例を示したものである。これより、広い周波数帯域を対象とすれば全体の感度は低くなり、周波数をしばれば感度は良くなるという市販のAEセンサの特徴がよくわかる。一般に共振型と呼ばれているセンサでは、図(b)の最大ピークに相当する周波数を共振周波数として扱っている。しかし、実際にはそれ以外の周波数に対しても応答感度のあることがよくわかる。また、広帯域型は平坦な応答を示すと言われているが、この場合も細かく見れば応答特性は複雑である。結局、

計測されたAE波は物体表面での弾性波をそのまま検出したものではなく、センサの周波数特性によりフィルタをかけられて検出されていることを知るべきである。計測にあたっては、感度を一番に考えるのか、広い周波数帯域に着目するのかなどについて検討すべきである。

AEセンサを直接に物体表面に取りつけることができない場合にはウェーブガイドが使用される。この場合には、ウェーブガイドを伝播した波動の検出であり、発生源での波動情報はほとんど失われている。

増幅器の構成では、AE信号を歪ませず、かつ、雑音電圧の影響を受けにくくするためにAEセンサの近くにプリアンプを設置し、その後にメインアンプを使用する。最近では、プリアンプ内蔵型のAEセンサも開発されている。

増幅器(アンプ)による増幅率はゲインと言われ、dB単位で次のように表される。

$$dB = 20 \log_{10} (\text{出力電圧} / \text{入力電圧}) \dots\dots\dots (1)$$

コンクリート材料のAE計測ではプリアンプとメインアンプを合計して、60 dBから100 dB程度増幅していることが多い。これは式(1)より、それぞれ1000倍および100000倍に増幅していることに相当する。

計測目的あるいは対象によって計測周波数帯が明らかでない場合を除けば、計測対象の周波数帯は広い方が望ましい。しかし、計測機器の周辺には多くの雑音発生源が存在するのが普通であり、その除去は計測にあたって重大な問題となる。かなりの雑音は接地を取ることでより除くことができるが、一般的な方法はフィルタの使用である。コンクリート材料では数kHzから数100kHzの帯域のバンドパスフィルタがよく用いられている。

周波数帯に関して、AEはacoustic(音響)という名称をもっているが、実際にはMHzに及ぶ超音波領域(20kHz以上)の周波数帯域を使用している。創始期の計測では数kHzの加速度計で検出可能な周波数領域を用いていたが、用途の拡大に伴ってMHz帯域へ装置の周波数帯域は広げられてきている。コンクリート材料は完全弾性体ではないため、弾性波はその伝播過程で波動エネルギーを失っていく。エネルギー E をもつ波動が一波長の距離を伝播する間に失うエネルギーを δE とすれば、材料の距離減衰特性値 Q は、次のように定義される。

$$Q = 2\pi E / \delta E \dots\dots\dots (2)$$

Q 値は、式よりわかるように距離減衰の小さな材料ほど大きくなる量で、金属材料では1000以上である。完全弾性体ならば、 $\delta E = 0$ で Q 値は無限大となる。材料内のAE波の伝播過程における周波数 f の成分の振幅の変化率を $U(f)$ とすれば、 Q を用いて伝播距離 d と周波数の関係は、次のように表せる³⁾。

$$U(f) = \exp(-\pi f d / v Q) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 v は波動の伝播速度である。コンクリートでは

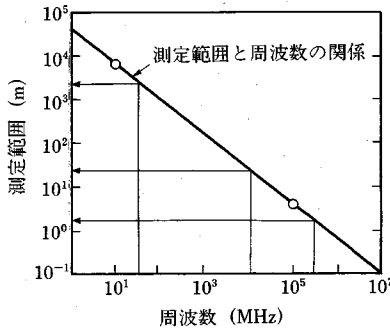


図-6 AE 計測の対象周波数と測定範囲¹⁷⁾

Q 値が 10 程度であることが知られている。 v を P 波として 4000 m/s と仮定すると、 $Q=12$ に対して $f=100$ kHz の成分振幅 $U(f)$ は、 $d=1$ m の場合 $\exp(-0.65)$ となり、 1 m の距離を伝播中に約 1/2 程度の振幅に減衰することがわかる。式 (3) に見られるように高周波数成分ほど大きな距離減衰を生じることが、この減衰則の特徴である。したがって、金属材料を対象として市販されている MHz 付近のような高周波数成分を検出する計測装置は、コンクリート材料では試験室での小さな供試体での計測を除けば必要でない。

このような考察は、1 個の AE センサで検出可能な監視領域の決定に関係する。広い領域を 1 個のセンサで計測する場合には、計測周波数帯域は下げる必要がある。また、多点での計測を行う場合のセンサの配置間隔も、この周波数特性を考慮すべきである。図-6 は、コンクリート材料での計測周波数と測定範囲との関係を示した一つの例である¹⁷⁾。これを参照すれば、数 10 m もの範囲を AE センサで監視しようとするれば、1 kHz 程度までの周波数帯が対象となることがわかる。しかし、コンクリート材料では、微小ひび割れ発生の主成分は高周波数成分が卓越すると考えられている。この結果、数 10 m もの領域を 1 個のセンサで監視するならば、微小な段階ではごく近傍での AE 現象を除けば検出できず、かなり大きなひび割れ現象のみが検出できるにすぎない。

基本的な計測装置については、(社)日本非破壊検査協会で性能表示を定めている¹⁸⁾。そこで規定された計測機器名は、プリアンプ、メインアンプあるいはディスクリミネータである。ディスクリミネータとは、メインアンプとフィルタを備えたもので、種々のアナログ的な信号処理を行うための機器である。

(3) AE 信号特性と処理

AE 波、物体内のエネルギー解放現象により放出される過渡的な波動エネルギーを検出したものである。したがって、オシロスコープなどでの波形観測では瞬時に通り過ぎる波として見られるだけである。結果的に、評価パラメータとして取り扱うには、何等かの処理が必要と

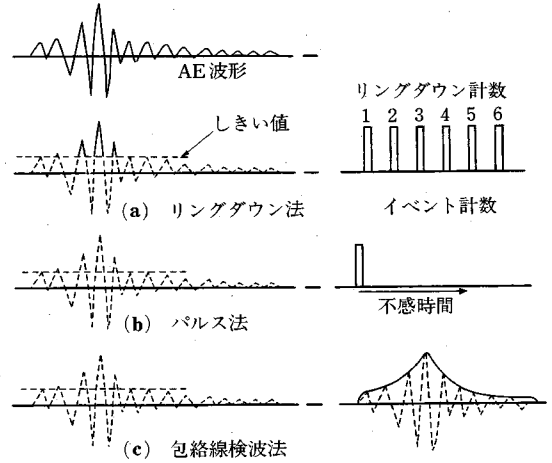


図-7 AE 発生頻度の計数法

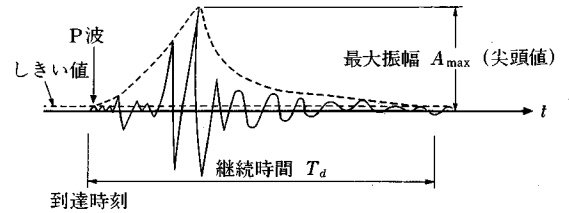


図-8 AE 波形と波形パラメータ

なる。簡単なアナログ処理パラメータはディスクリミネータで抽出できる。デジタル処理には高速波形記憶装置が必要であるが、それらも含めてほとんどが計測システムとして市販されている。

a) アナログ処理パラメータ

1) 発生頻度 ひび割れの発生に伴って離散的に発生する AE を個数として計数するもので、一般にはカウントと呼ばれる。発生総数をトータルカウント、ある時間間隔での発生頻度をカウントレートと名づけている。計数法には、リングダウン (ringdown) 計数と事象 (イベント, event) 計数とが考案されている。図-7 のように AE 波形に対してしきい値を設定し、それを越える全ての回数を計数するのをリングダウン計数法と言う。これは、金属材料での連続型の AE を計数するために使用されてきた。コンクリート材料では、発生した AE 波を個々に計数するイベント計数が、一般的であり、これには図のように「しきい値」を越えるとパルスが発生し不感時間 (dead time) を設けてリングダウン計数しないようにする方式と包絡線検波を行ってその検波信号の個数を計数する方式とがある。コンクリート材料では、減衰特性などにより 1 つの波の継続時間は数 ms 程度であると知られており、この値が不感時間に用いられている。

AE 頻度は、発生するひび割れの事象数という物理的

にはかなり明確な意味をもっている。しかし、実際に計測される環境では、伝播中の減衰によりしきい値以下まで振幅が小さくなり計数できないものなどもある。また、材料・部材によって破壊過程でのひび割れ発生状況は異なる。したがって、数としてあまり固執せず、発生挙動に着目すべきである。

2) 最大振幅と振幅分布 AE 波の最大振幅(尖頭値)とは図-8のような波形記録の継続時間中における振幅の最大値として決定される。AE 波は高速の過渡的波動であるため、一般には包絡線検波されたものの最大値として認められる。これ自身が発生したひび割れなどの AE 発生源での規模に関係していると考えられているが、伝播経路を考慮すれば必ずしもそうはならない。例えば、センサから遠くの大きな現象とセンサ近くの小さな現象のどちらが大きな最大振幅をもつかについては不明なことが多い。また、一般に AE 波の最大振幅の波動成分は P 波、S 波ではなく、Rayleigh 波とかセンサの共振である。このことは、発生源の情報に関係していると言えなくはないが、直接的には発生源の情報を伝えてはいないことになる。

個々の AE 波形の最大振幅に物理的意味が乏しいため、どのような振幅の現象がどのように発生するかという振幅の分布がパラメータとして扱われることが多い。これに関して地震の分野では、古くから Gutenberg-Richter 式と呼ばれる統計則が知られている。これをマグニチュードではなく、地震の累積頻度 N とその最大振幅 a の関係で記述すると、

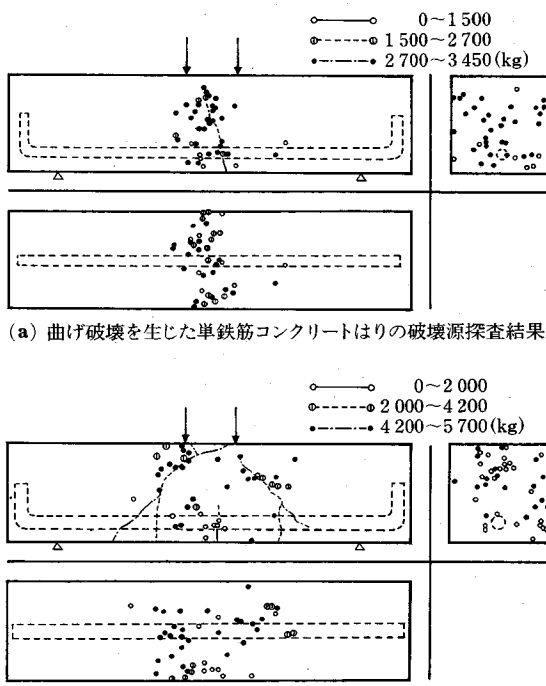
$$\log_{10} N = \alpha - b \log_{10} a \dots\dots\dots (4)$$

となる。この式は、大きな規模の地震は少なく、小さな規模の地震は多く発生することを示したものである。破壊過程で大きな AE 現象が多く発生するほど式中の b 値は小さくなるので、この変動から破壊過程の評価を行う研究も行われている¹²⁾。

3) 実効値電圧 RMS (root mean square) 電圧とも呼ばれ、図-8の波形の振幅値の2乗を継続時間に関して積分し2乗平均を取ったもので、波形のもつ相対的なパワーに関係した量である。AE の計測機器によっては、これに重みづけして AE エネルギーとしているものもある。

b) デジタル処理

1) AE 源位置標定(破壊源探査) 多チャンネル計測での到達時間差を用いると、発生源から AE センサへの距離に応じて P 波の到達時間差が得られる。これより破壊源の空間的な位置を決定することができる^{19), 20)}。P 波初動の決定は波形を記録して確認するのが最も確実である。実際には煩雑であるため、しきい値を設けた自動読み取りなども用いられる。破壊源の決定はセンサの位置と到達時間差に関する方程式を解けばよ



(a) 曲げ破壊を生じた単鉄筋コンクリート梁の破壊源探査結果

(b) せん断破壊を生じた単鉄筋コンクリート梁の破壊源探査結果

図-9 鉄筋コンクリート梁曲げ試験での AE 源位置標定

く、ソフトウェアも開発されている。図-9は、鉄筋コンクリート梁供試体の曲げ試験で決定された AE 源の位置標定の例である³⁾。載荷によりひび割れ発生位置が梁上部へと進展すること、曲げスパン破壊とせん断スパン破壊では発生位置の分布が明らかに異なるなど、破壊進行過程の追跡に有効な手法であることがわかる。

2) 周波数分析 波動のもつ周波数成分を解析する手法は、フーリエ変換として知られている。これは、時間領域の関数から周波数領域で各周波数に対応する調和波の振幅を求めることである。波形を時系列のデジタル量として記録することができれば、高速フーリエ変換(FFT)法により、簡単に周波数分析結果のスペクトルを求めることができる。

周波数分析については、分析対象となる周波数の上限を考慮に入れていれば、装置的に問題はない。しかし、計測にあたって考慮すべきなのは、センサの特性である。図-5のようにセンサの周波数応答は平坦ではない、そのためスペクトルを求めてもセンサの特性を求めているにすぎないことが少なくない。また、スペクトルは一つ一つに差があり、個々について分析された結果の検討を行わなければ、正しい評価とはならないことに留意すべきである³⁾。ただ、発生機構の分類には有効と考えられている²¹⁾。

3) モーメントテンソル解析 AE 波動の弾性波動理論に基づいた研究は、AE 源から放射される波動の振

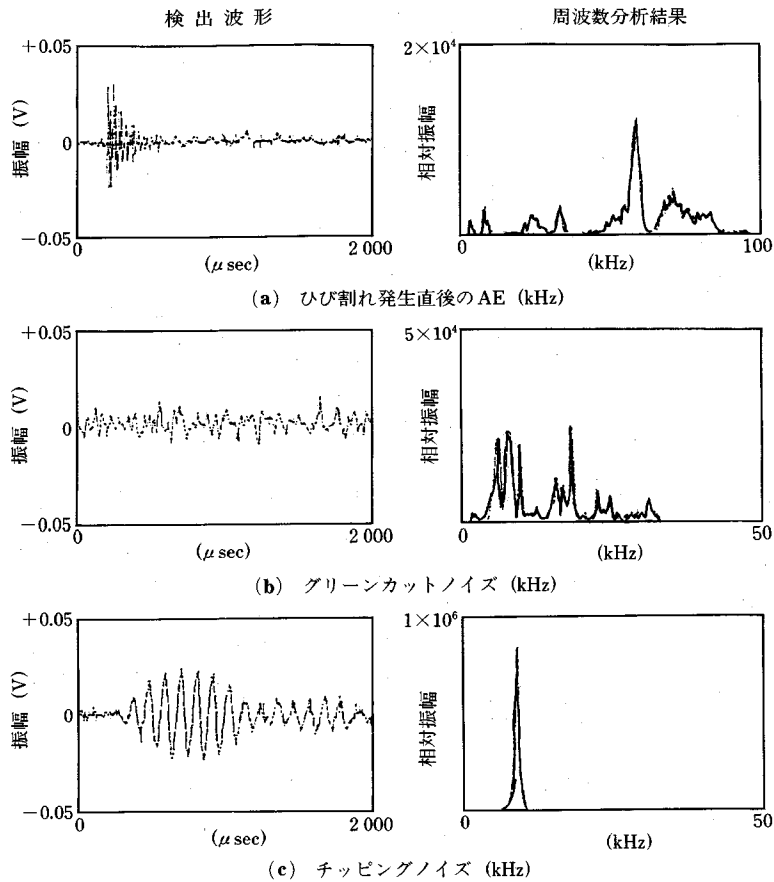


図-11 コンクリート施工中の AE 波形と周波数分析²⁷⁾

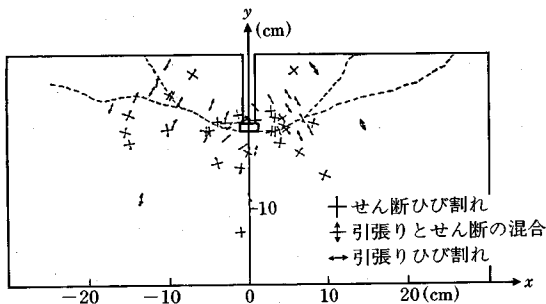


図-10 アンカーボルト引き抜き試験でのモーメントテンソル解析結果

幅パターン²²⁾、逆問題²³⁾へと進み、AE 波形からモーメントテンソルと名づけられた発生源の幾何学的な情報を求めれば、AE 源の位置のみでなくひび割れの種類、ひび割れの運動方向が決定できることを明らかにしている^{24), 25)}。図-10 は、その例であり²⁵⁾、アンカーボルトの引き抜き試験で検出された AE 源の位置にひび割れを引張り型とせん断型に分類し、その運動方向まで示している。引張りひび割れは矢印で開口方向を示しており、破線の最終破壊面にほとんどの AE 源が直角に開口し

ていることがわかる。また、せん断ひび割れは+印で示す面の方向が破壊面にほぼ平行となっている。このようにモーメントテンソル解析を行えば、微小ひび割れの発生機構について詳細な情報が得られる。解析ソフトは既に開発されており、2次元では4チャンネル、3次元では6チャンネル以上のデジタル化可能な波形記憶装置が必要である²⁶⁾。

4. AE 研究の現状

AE が近年になりコンクリート工学の分野で広く注目されるようになってきた事実は、コンクリート構造物の維持管理に関する関心の高まりと関連している。耐久性について診断技法の確立が求められ、各種の非破壊検査法が開発・改良されつつある。AE 法もそのような中で注目されるようになってきている。さらに、労働力の減少に伴う建設現場での合理化施工の推進も新たな要因となっている。維持管理の面からは、長期経過した構造物の劣化度の判定あるいはひび割れの発生を早期に検出可能な検査方法が、合理化施工では内部欠陥の発生を監視しながら施工中の工程管理が求められており、AE のそのよ

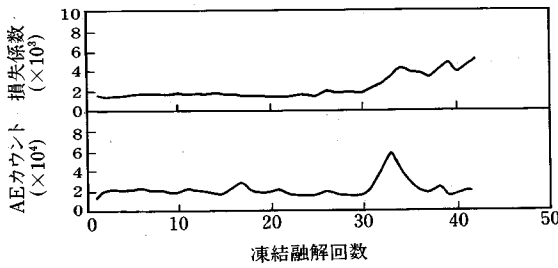


図-12 凍結融解作用下での AE 計測³¹⁾

うな適用が求められていると考えられる。そこで、これまでの膨大な研究例については、文献⁵⁾にゆずり、最近の研究動向についてのみ述べることにする。

(1) マスコンクリートの温度ひび割れ

コンクリートの硬化過程で発生するセメントの水和熱は、硬化の初期に温度ひび割れを伴う。そこで、マスコンクリート打設の際に、施工中の型枠あるいは鉄筋に取り付けた AE センサにより、温度ひび割れの発生を検出し施工不良の早期発見に役立てようと言う研究が進められている²⁷⁾。

実用化にあたっては、施工中の建設現場で発生する雑音と温度ひび割れによる AE 波との分離が大きな問題で、図-11 のように周波数スペクトルを用いれば分離出来ることが分かっている。したがって、フィルタの工夫により実用化可能と考えられる。

(2) 材料開発への応用

コンクリート材料の製造過程への適用も研究されつつある。まだ、研究例は少ないが、アルミナセメント²⁸⁾、アスベストセメント²⁹⁾ など特殊なセメント固化体の性能評価とか、オートクレーブ養生の工程管理³⁰⁾ などが報告されている。

(3) 凍結融解作用による劣化

凍結融解作用による劣化過程での AE 現象を検出した例を図-12 に示す³¹⁾。凍結融解過程の繰り返しによる内部ひび割れの累積に相当する損失係数(損失エネルギーの弾性エネルギーに対する比)の増大に対応して AE カウントが明瞭に増大していることが観測される。これより凍害によるコンクリートの劣化過程のモニターに AE 計測が可能であることが認められる。この他に、AE 源の位置標定を適用し、凍害によるひび割れ発生過程を追跡した結果も知られている³²⁾。

(4) 硬化コンクリートへの適用

材料の破壊過程における AE 発生挙動には、カイザー効果と呼ばれる非可逆現象が知られている。繰り返し載荷を受ける場合に、再負荷の際に履歴荷重を越えるまで AE の発生が見られないと言う現象である。岩石ではこれを初期地圧測定に用いることが提案され、現在も検討されている³³⁾。コンクリートでもこれを適用して履歴荷

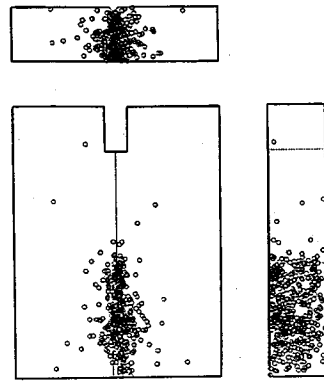


図-13 CT 試験片での AE 発生源位置標定⁴⁰⁾

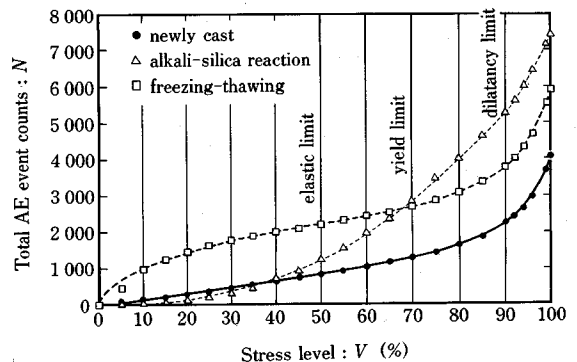


図-14 劣化コンクリートにおける一軸圧縮下での AE 発生挙動⁴¹⁾

重を調べようとする研究が行われているが^{34), 35)}、まだ実用化はされていない。

コンクリートの強度特性と AE の関係については、水中コンクリートの継ぎ目の評価に引張応力下での AE 発生特性を適用した例³⁶⁾、水中疲労での計測例³⁷⁾ なども見られる。

コンクリートのひび割れに関連した最新の研究として破壊力学が注目されている。AE の破壊力学への適用は金属材料分野を中心に幅広く研究されている。コンクリート分野でも実験的な計測法として注目され^{38), 39)}、図-13 のように破壊進行領域の AE 源の位置標定を行った例なども報告されている⁴⁰⁾。

コンクリート構造物の維持管理ではコンクリートコアを採取して、力学特性を調査することが行われるが、その際に AE 発生数を計数し、荷重下の発生挙動からコンクリートの劣化度を評価しようとする試みがある。劣化の著しいコンクリートのコア供試体と健全なコア供試体での圧縮試験中における AE 発生挙動を比較すると、健全なものは低い応力レベルではほとんど AE は発生しないのに対して、劣化したものは載荷の初期から AE が頻発することが認められている。例えば、アルカリ骨材反応により膨張した供試体と凍結融解作用で劣化した

表一 ひび割れ発生とカイザー効果の発現⁴³⁾

せん断ひび割れの進展	カイザー効果が存在しない
0.15~0.2 mm 以下の曲げひび割れの進展	カイザー効果が存在する
0.15~0.2 mm 以上の曲げひび割れの進展	カイザー効果が存在しない

表二 カイザー効果の発現とひび割れの種類⁴⁴⁾

載荷過程	引張型	混合型	せん断型	合計	
I	loading	3	5	7	15
	unloading	8	5	10	23
II	loading-1	15	8	14	37
	hold	3	4	4	11
	loading-2	13	6	23	42

供試体の圧縮下における AE 発生を比較したものを、図-14 に示す⁴¹⁾。このような劣化による AE 発生挙動の差異を定量的に評価するため確率過程理論を用いて解析する方法が提案されている⁴²⁾。

(5) 鉄筋コンクリート部材

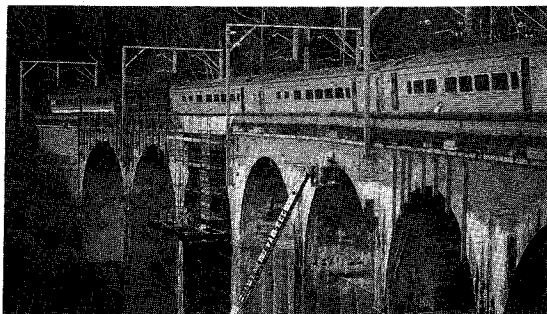
鉄筋コンクリート構造物は、鉄筋補強の存在により、表面ひび割れの存在が直ちに問題とされることはあまりなかった。しかし、近年になり維持管理の面でひび割れの存在が種々の問題を生じており、ひび割れ状況と構造部材の耐用性の関係は早急に明らかにすべき問題とされている。

AE 計測は、ひび割れの進展を監視する測定法であるため、耐用性などの既存のひび割れの評価については適用にあたって考慮が必要である。この点に関してカイザー効果を利用した研究例がある。カイザー効果の存在は、材料の先行負荷に対する安定性と深く関係することが研究成果として知られている。そこで、鉄筋コンクリート部材でのひび割れ発生状況とカイザー効果の発現状況の関係を調査した例を表一に示す⁴³⁾。これより、せん断ひび割れや開口幅 0.15 mm 以上の大きな曲げひび割れが発生した場合にはカイザー効果が存在せず、AE の発生荷重に先行負荷の情報は認められないことがわかる。カイザー効果の消失は、ひび割れの存在により部材が内部的に不安定となって、劣化が問題となる程度まで進行していることに対応している。この表中のひび割れ幅はかぶりなども考慮に入れることができれば、将来的に使用限界状態でのひび割れ規準として検討の余地のある実用的な成果と考えられる。

これに関連して、モーメントテンソル解析により鉄筋の両引き付着試験での AE 現象に適用して破壊機構とカイザー効果の関係を解明した例が報告されている⁴⁴⁾。表二のように I 回目、II 回目の載荷に対して、II 回目にはカイザー効果が成立しなくなっており、これは I 回



写真一 AE 計測用車



写真二 実橋での AE 計測

目のせん断クラックの発生に原因があると結論付けている。

現実に、実在の鉄筋コンクリート部材で最も問題となる劣化は、鉄筋の腐食である。これによる AE 発生を研究した例も報告されている⁴⁵⁾。

(6) コンクリート構造物

AE 研究で将来的に重要と考えられているのが、実構造物の健全性の評価への適用である。しかし、供用中のコンクリート構造物での AE 計測となると現実には容易なことではない。写真一、二は、オーストラリアで現場での AE 計測を専門に実施している AE 計測車と計測中の様子を示したものである。国内では、ほとんど研究例は報告されていないが、数少ない中で実在の橋梁で車の走行時の橋桁に取り付けたセンサで検出された AE の事例を図-15 に示す⁴⁶⁾。鋼桁とプレストレストコンクリート桁の部分それぞれで AE が検出されている。これは大型車の走行時に計測されたものであり、普通乗用車では検出ほとんど AE は発生しなかったと報告されている。このような計測を定期的を実施することが出来れば、劣化度の進行に貴重な情報を与えると期待されている。

図-16 は、箱型ラーメン隅角部の破壊試験でモーメントテンソル解析を行った例を示す⁴⁷⁾。AE 発生源は、引張形 (矢印、開口方向は矢印の方向) とせん断形 (+印で示され、それぞれの方向はクラック面と運動方向に対応) とに分類され、表面で観測されたひび割れと共に

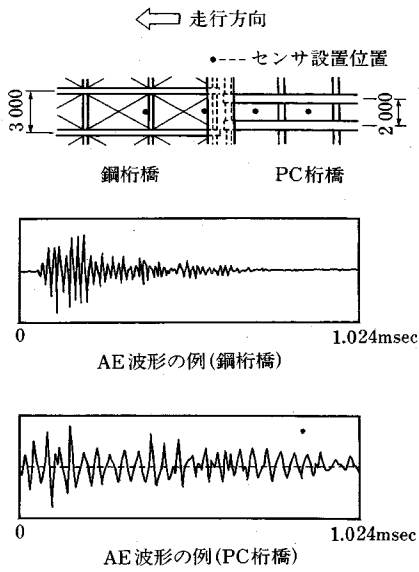


図-15 実橋での交通荷重時の AE 波形⁴⁶⁾

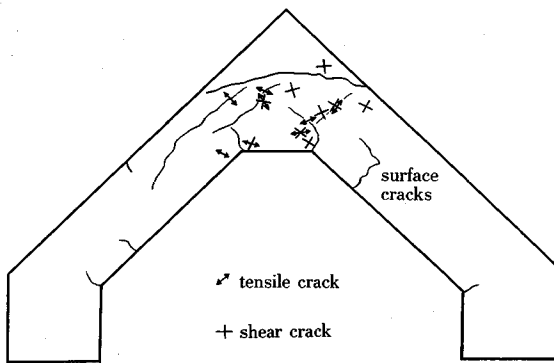


図-16 鉄筋コンクリートカルバート隅角部の開口時に検出された AE 波形のモーメントテンソル解析結果⁴⁷⁾

結果が示されている。AE 発生位置，クラックの種類，運動方向の全てが表面ひび割れと非常によく一致しており，鉄筋コンクリート構造内で発生するひび割れの機構同定に有効であることがよくわかる。この他に，送電用鉄塔基礎の定着引き抜き試験でのモーメントテンソル解析の結果なども報告されている⁴⁸⁾。

屋外での AE 計測では様々な雑音が障害となり，さらに，既存の表面ひび割れが問題となることも予想される。この点について，検討し AE 波形の立ち上がり時間と継続時間の 2 つのパラメータを用いて雑音を除去し，さらに，鉛筆の芯圧折による較正データを用いて RC 擁壁での AE 発生位置の 2 次元位置標定を図-17 のように補正する方法も発表されている⁴⁹⁾。このような補正により，生データでは定かでなかったが，AE 源が確かに表面ひび割れに沿って発生していることが認められ，斜面内部からの土圧の変動が予想される結果となっ

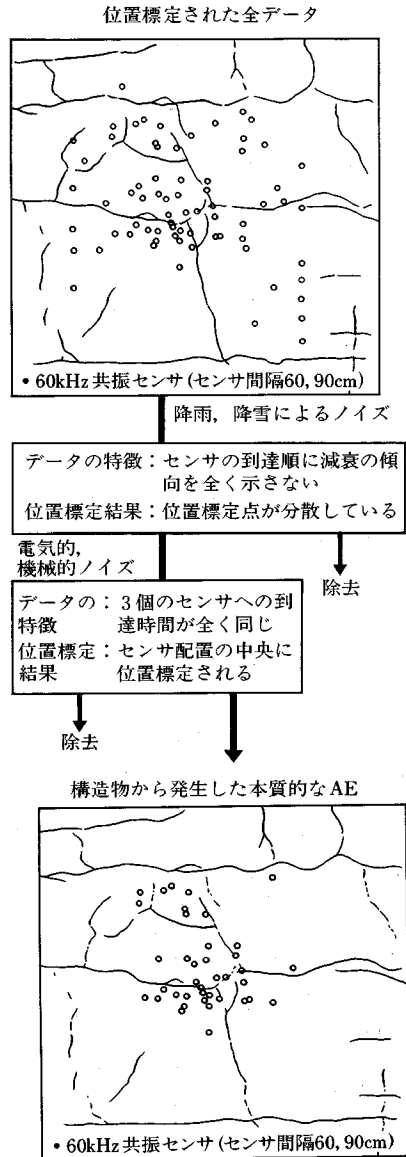


図-17 現場計測 2 次元 AE 位置標定のノイズ除去と位置補正⁴⁹⁾

ている。

(7) グラウト工事

この他にコンクリート関連の工事への応用として，グラウト注入工事への適用がある。グラウト工では高压で粘性材を注入するため，かえって岩盤に割れ目を生成したり，不連続面に沿って流れてしまったりすることがあり，注入範囲の同定あるいは注入による二次的な破壊の監視が重要となっている。このため図-18 のような AE 計測システムの適用が検討されている⁵⁰⁾。

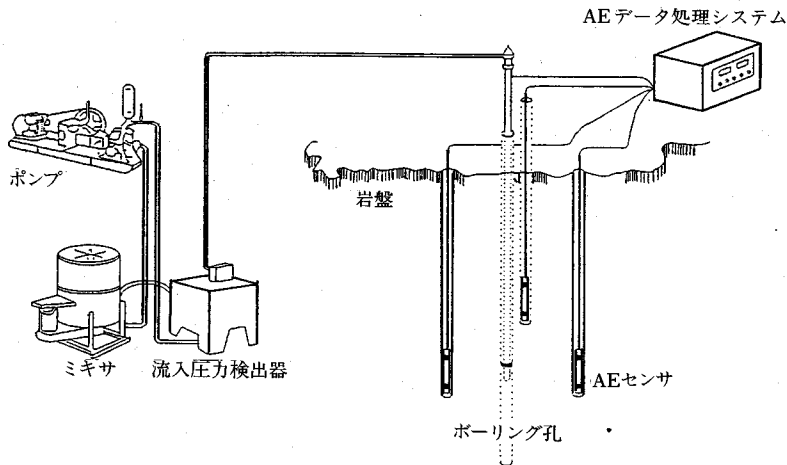


図-18 グラウト工の AE 監視システム

5. あとがき

土木工学分野への AE 計測の適用は、ここで解説したコンクリート分野の他に老朽鋼橋の増加に伴った実在橋梁での AE 監視、岩盤工事への応用など幅広く検討されるようになってきている。

そのように実用化に向けて研究成果はかなりの方面で得られており、手法の標準化への動きも含めて実用化へのステップは確実に進展しつつあると考えられる。土木の対象分野の広範囲な点を考慮すれば、さらに新たな計測対象が出現することも十分に期待される。特に、工程管理の適用には今後の展開が大きいと予想されている。

参考文献

- 1) T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu eds. : Progress in Acoustic Emission VI, 日本非破壊検査協会, 1992年10月.
- 2) 第5回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, (社) 資源・素材学会, 1993年7月.
- 3) 丹羽義次監修, 大津政康: 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.
- 4) T. F. Drouillard : Acoustic Emission-A Bibliography with abstracts, Plenum Press. New York, 1979.
- 5) 岸上彦彦: 破壊の進行に関する一実験, 地震, Vol. 6, pp. 25~31, 1934.
- 6) H. Rusch : Physical Problems in the Testing of Concrete, Zement Kalk-Gips (Wiesbaden), Vol.12, No.1, pp.1~9, 1959.
- 7) R. G. L'Hermite : Volume Change of Concrete, Proc. 4th Intl. Symp. Chemistry of Cement, V-3, NBS Monograph 43, pp.659~694, 1960.
- 8) G. S. Robinson : Methods of Detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete, Proc. Int. Conf. on the Structure of Concrete and Its Behavior under Load Cement and Concrete Association, London, pp.131~145, 1965.
- 9) 山田順治: コンクリートものがたり, 文一総合出版, 1986.
- 10) W. M. McCabe, R. M. Koerner and A. E. Lord, Jr. : Acoustic Emission Behavior of Concrete Laboratory Specimens, ACI Journal, Vol.13, No.3, pp.367~371, 1976.
- 11) D. G. Fertis : Concrete Material Response by Acoustic Spectral Analysis. J. Struc. Div., Proc. ASCE, No.102 (ST2), pp.387~400, 1976.
- 12) 丹羽義次・小林昭一・大津政康: コンクリート構造物のアコースティック・エミッション特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.261, pp.101~112, 1977.
- 13) 谷川恭雄・山田和夫・桐山伸一: コンクリートのアコースティック・エミッションの周波数特性, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.129~132, 1980.
- 14) T. F. Drouillard : AE Literature-Concrete, J. Acous. Emis., Vol.5, No.2, pp.103~109, 1986.
- 15) コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書, (社) 日本コンクリート工学協会, 1992.
- 16) 丹羽義次・小林昭一・大津政康: アコースティック・エミッションの発生機構に関する考察, 土木学会論文報告集, No.314, pp.125~136, 1981.
- 17) 魚本健人・加藤潔・広野進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.
- 18) 日本非破壊検査協会規格: アコースティック・エミッション試験装置の性能表示方法, NDIS 2109-79, 1979.
- 19) 丹羽義次・小林昭一・大津政康: アコースティック・エミッションによる破壊源探査, 土木学会論文報告集, No. 276, pp. 135~147, 1978.
- 20) 川上泰司・魚本健人: AE法による二次元破壊進展位置標定を用いたコンクリート割裂試験の破壊挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No. 2, pp. 385~390, 1988.
- 21) J. M. Bertelot, M. B. Souda and J. L. Robert : Frequency Analysis of Acoustic Emission Signals in Concrete, Journal of AE, Vol. 11, No. 1, pp.11~18, 1993.
- 22) 大津政康: アコースティック・エミッション波の放射

- 形式に関する考察, 材料, Vol. 32, No. 356, pp. 577~583, 1983.
- 23) 大津政康: アコースティック・エミッションの波形解析理論とモーメントテンソル解に関する考察, 材料, Vol. 36, No. 408, pp. 1025~1031, 1987.
- 24) M. Ohtsu: Source Inversion of Acoustic Emission Waveform, 土木学会論文集, No. 398, pp. 71~79, 1988.
- 25) M. Ohtsu, M. Shigeishi, H. Iwase and W. Koyanagi: Determination of Crack Location, Type and Orientation in Concrete Structure by Acoustic Emission, Magazine of Concrete Research, Vol. 43, No. 155, pp. 127~134, 1991.
- 26) 大津政康・重石光弘・湯山茂徳・岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol. 42, No. 10, pp. 570~575, 1993.
- 27) AE によるマスコンクリートの温度ひびわれ検知現場実験報告書, 佐藤工業株式会社中央技術研究所, 1991 年 12 月.
- 28) M. Arrington and B. M. Evans: AE Testing of High Alumina Cement Concrete, NDT International, Vol. 10, No. 2, pp. 81~87, 1977.
- 29) S. A. S. Akers and G. G. Garrett: AE Monitoring of Flexural Failure in Asbestos Cement Composite, Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 5, No. 2, pp. 97~103, 1983.
- 30) S. Teramura, K. Tsukiyama and H. Takahashi: The Detection of the Fracture of Autoclaved Aerated Concrete during Autoclave Curing Process by Acoustic Emission, J. Acous. Emis., Vol. 6, No. 4, pp. 261~266, 1987.
- 31) 村上祐治・山下英俊・喜多達夫・吉川弘道: コンクリートの凍結融解時の変形挙動と AE 特性, 第 4 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, 日本非破壊検査協会, pp. 47~51, 1991.
- 32) 嶋田久俊・堺 孝司: モルタルの凍害評価手法としての AE 計測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 13, No. 1, pp. 467~472, 1991.
- 33) 金川 忠・林 正夫・仲佐博裕: 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み, 土木学会論文報告集, No. 258, pp. 63~75, 1977.
- 34) 佐藤 成・魚本健人: AE 法によるコンクリートの最大履歴応力推定手法に関する研究, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 397~400, 1986.
- 35) 小玉克己・仲宗根茂: コンクリートの曲げ疲労特性, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 565~568, 1986.
- 36) 京極孝子・村上祐治・宮野一也・喜多達夫: AE 計測によるコンクリート打継ぎ特性の評価, 第 4 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, pp. 70~74, 1991.
- 37) 六車 熙・渡辺史夫: 水中でのコンクリート圧縮疲労と AE 計測, セメント技術年報, Vol. 39, pp. 332~335, 1985.
- 38) S. Mindes: Acoustic Emission and Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete, Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 3, pp. 173~179, 1982.
- 39) S. Teramura and H. Takahashi: Evaluation of Fracture Toughness on Autoclaved Calcium Silicate/Woodfiber Laminates, Progress in Acoustic Emission IV, pp. 748~756, 1988.
- 40) 野村希晶・三橋博三・新関 茂: コンクリートの破壊エネルギーと引張軟化特性に及ぼす粗骨材粒径の影響, コンクリート工学論文集, Vol. 2, No. 1, pp. 57~66, 1991.
- 41) 油野邦弘・井上芳樹・大津政康: 確率過程論を用いた AE 発生挙動解析による劣化コンクリート供試体の評価, 第 9 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 115~120, 1993.
- 42) M. Ohtsu: Rate Process Analysis of Acoustic Emission Activity in Core Test of Concrete, 土木学会論文集, No. 442, pp. 211~218, 1992.
- 43) 長滝重義・岡本享久・綾田隆史・湯山茂徳: AE 法による鉄筋コンクリート部材のひびわれ進展状況の把握, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 139~144, 1991.
- 44) 湯山茂徳・岡本享久・重石光弘・大津政康: 各種コンクリート供試体に対するモーメント・テンソル解析の適用例, 第 9 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 121~129, 1993.
- 45) 村上祐治・山下英俊・喜多達夫・大津政康: 鉄筋腐食した部材の力学的挙動と AE 特性, 第 8 回 AE 総合コンファレンス論文集, 日本非破壊検査協会, pp. 183~188, 1991.
- 46) 作田孝行・橘 吉宏・前田研一・梶川康男: AE 法の RC 床版劣化度検査法への適用に関する基礎実験, 土木工学における AE 研究発表会, 日本非破壊検査協会, pp. 68~73, 1988.
- 47) 大津政康・重石光弘・湯山茂徳・岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol. 42, No. 10, pp. 570~575, 1993.
- 48) 村上祐治・清水 保・神山英幸・松島 学・湯山茂徳: 送電用鉄塔基礎の定着引抜き実験に関する変形挙動と AE 特性 (その 1, その 2), 第 9 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 137~150, 1993.
- 49) 松山公年・藤原鉄朗・石橋晃陸・福地伸一・大津政康: 野外鉄筋コンクリート擁壁における AE 法の適用, 第 9 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 131~136, 1993.
- 50) 上田貴夫・鈴木 志朗・三木自行・大津政康・重石光弘・湯山茂徳: 岩盤グラウト注入に伴う AE 発生特性とその波形解析, 第 4 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集, 資源・素材学会, pp. 91~96, 1991.

(1994. 2. 21 受付)