

# 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

## STUDIES OF ACOUSTIC EMISSIONS IN CONCRETE STRUCTURES

丹羽 義次\*・小林 昭一\*\*・大津 政康\*\*\*

By Yoshiji NIWA, Shoichi KOBAYASHI and Masayasu OTSU

### 1. はじめに

材料とか構造物が破壊をする際には、いかに微小な破壊であってもその系内から瞬間的に弾性エネルギーが解放され、過渡的な弾性波（応力波）が発生する。このような応力波はアコースティック・エミッション（Acoustic Emission, 以後 AE と略す）と総称されている。

破壊過程において生じるこのような現象（AE 現象）については、地震、鉱山、金属などの分野で従来から研究されており、各分野によって、Microseismic activity, Elastic shock, Rock noise, Seismoacoustic activity, Subaudible noise など種々の言葉でよばれてきたが、現在では、ほぼアコースティック・エミッションという術語に統一されているようである。

近年、金属を対象とした分野で、この AE 現象を検出し、それを材料研究、あるいは構造物の潜在欠陥および供用時の破壊のモニターに利用する技術の開発が試みられており、それらは総称して AE 法とよばれている。この方法は、従来の既存欠陥の有無を調べる非破壊検査法に対して、何らかの応力の加わった状態で適用する、いわば動的な非破壊検査法として注目をあびつつある。

この方法は、コンクリートとか岩盤を対象とする分野でも適用可能と考えられる。しかし、この方面の研究は少なく、その成果も乏しい。それゆえ、早急に種々の土木材料および構造物における AE の発生特性を調査し、データを集積することが望まれる。

われわれはこのような意図のもとに、主としてコンクリート構造物における AE の発生特性の研究を進めており、本論文は、そのうちの基礎的な部分の紹介を試みたものである。今回は紙数の関係で、材料および構造物の

破壊過程で発生する AE の特性、特に、最も重要と思われる発生頻度特性と振幅の規模別頻度分布特性に限って検討した。なお、非破壊試験という別の側面から重要である破壊源探査については、その方法ならびに結果に関して現在検討中であり、引き続いて発表する予定である。

### 2. AE の諸特性と従来の研究

AE 現象は、最も簡単には、Fig. 1 のような装置で検出される。供試体内で生じた応力波は、系内を伝播し、境界でピックアップにより電気信号に変換され、増幅された後、検出される。なお、フィルターは雑音の除去ならびに必要な周波数帯を得るために必要である。

こうして検出された波は、P 波、S 波、表面波、多重反射などの成分からなり、数 Hz ～数 MHz におよぶ広い周波数帯を持っていると考えられている。

岩質材料から発生する

AE は、一般に減衰が早く、一現象の継続時間は高々数 msec であることが確かめられている。このため市販の AE 計測装置によっても突発的に発生する AE 現象として観測することができる。

この AE 現象を特徴づけるパラメーターとしては、まず、単位時間当りの AE の発生頻度が考えられる。次に個々の AE の波形の特徴、すなわち振幅、周波数、エネルギーなどが考えられる。また、このようなパラメーターのほかに、AE 発生源を知ることも必要である。破壊源の位置は、同一現象をいくつかの箇所から検出記録することにより、正確に求めることができる。

このような AE の諸特性に関しては、数多くの研究

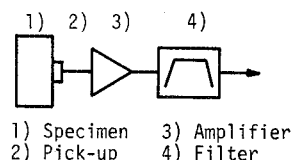


Fig. 1 Fundamental System for Monitoring Acoustic Emission

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室  
\*\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室  
\*\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

が行われており、それらを分類して示せば次のようである。

- (1) AE の発生機構 (Source Mechanism) に関する研究<sup>1), 2)</sup>
- (2) 材料の破壊過程と AE の発生頻度 (Count rate, Activity) に関する研究<sup>3)~8)</sup>
- (3) 繰り返し荷重下での材料と AE の発生頻度に関する研究<sup>9)~11)</sup>
- (4) AE の振幅とその頻度 (Magnitude-Frequency Relation) に関する研究<sup>3), 7), 12), 13)</sup>
- (5) AE のエネルギー (Acoustic Emission Energy) に関する研究<sup>5), 14), 15)</sup>
- (6) AE の周波数分析 (Frequency Spectrum) に関する研究<sup>16), 17)</sup>
- (7) AE による破壊源探査 (Source Location, Flaw Location) に関する研究<sup>18), 19)</sup>
- (8) AE の応用に関する研究

これらの研究により、AE の種々のパラメーターは、材料ならびに構造物の不安定性 (破壊) の程度および形態に対応して特徴づけられることが示された。

コンクリートに関する Rüsh<sup>9)</sup>, Robinson<sup>9)</sup>, 横道<sup>7)</sup>, Koerner<sup>8)</sup> らの研究を始めとして、岩質材料の破壊過程での AE 頻度の発生挙動、体積ひずみ・クリープひずみとの相関性、カイザー効果 (再負荷の際、最大履歴応力に至るまで AE の発生がほとんどないという非可逆現象) などが、ほぼ明らかにされている。

なお、金属関係が中心であるが、AE の最近の動向に関しては、参考文献 20), 21) を参照されたい。

このような AE の応用計測においてはいまなお未解決の問題が多く、検出装置の感度、S/N 比、周波数応答などを目的に応じて検討しなければならないことはもちろん、対象物の寸法、形状、材料の均一度、ぜい性度、異方性、強度、履歴、材料内部の応力波の減衰特性などについても配慮が必要である。また、一般には微小信号を検出することになるので雑音の除去が重大な問題となることも多い。

このように AE 現象の計測は、対象物ならびに計測装置との関連において捕えられなければならない、個々の場合に応じて最も適した方法を見出すことが必要である。

このためには、対象物の全般的な特性を知ると同時に、AE に関してできるだけ詳細なデータを集積することが必須である。このようなデータに基づいて、はじめて最も適した試験法が確立されようし、また、対象物の破壊過程の解明、健全度の診断、欠陥箇所の指摘なども可能となるのであろう。現段階では、対象物の特性を示す AE 特性をどれだけ適確に求めるかが鍵であらう。

### 3. AE の発生頻度に関する研究

#### (1) 概 説

すでに述べたように、岩質材料供試体の破壊過程における AE の発生頻度の特性は、ほぼ解明されている。岩質材料を用いた構造物に関しても、AE 発生頻度特性は、最も重要なパラメーターと考えられる。しかしながら、構造物の破壊過程における AE 発生頻度の特性に関するデータはまだ皆無といってよい。

本節では、まず (i) 鉄筋コンクリートばりにおけるカイザー効果について考察し、次いで (ii) 鉄筋コンクリートばりの破壊過程における AE 発生頻度の特性を調べ、最後に (iii) 実際の構造物への応用という立場から、屋外でのモデル構造物の破壊試験過程での AE 発生頻度の特性について検討を行った。

#### (2) 実験概要

##### a) 実験装置

本実験において使用した AE 装置のブロックダイアグラムを Fig. 2 に示す。この図でディスクリミネーター (弁別器) とは、フィルターと増幅器を備えた機器で AE の発生事象の頻度を計数するように、ある閾値 (ディスクリレベル) を越える入力があるたびにカウンター (計数器) へパルス出力を行い、その後、適当な不感時間のゲート設定を設けたものである。ピックアップとして

は PZT-5 圧電素子 ( $\phi 8 \times 2$  mm のもの) を供試体表面に直接アラルダイトで接着した。

実験では主として Fig. 2 (a) のシステムを使用し、50 dB~60 dB 増幅し、100 kHz~1 MHz の周波数帯で、ディスクリレベル 60 mV~300 mV を越えるものを検出した。なお、SRC 供試体の実験では、Fig. 2 (b) に示すように、ピックアップとして加速度計 (B & K 社製、4344) を用いたシステムも併用した。この装置は、Fig. 2 (a) のシステムより低い周波数帯の AE を検出するシステムであり、応答周波数帯は、1 kHz~20 kHz である。

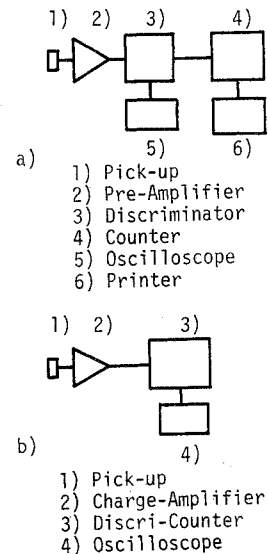


Fig. 2 System Block Diagram for Acoustic Emission Measurement

b) 供試体

供試体は大別して次の3群に分けられる。まず第1群は、主としてカイザー効果を調べる目的で作製されたもので、水：セメント：砂：骨材=0.44：1：1.99：1.51のコンクリートばり(C)、同配合で鉄筋(D10)1本を用いた鉄筋コンクリートばり(RC)、水：セメント：砂=0.6：1：2の鉄筋モルタルばり(RM)および、鉄筋(D13)2本を用いた、水：セメント：砂：骨材=0.5：1：3.61：5.75の鉄筋コンクリートばり(NRC)、鋼繊維を2容積パーセント混入した、水：セメント：砂：骨材=0.42：1：4.37：4.37の鉄筋コンクリートばり(FRC)の5種類である。以下これらを記号でRCなどとよぶことにする。これらの供試体の概要は、Table 1に示す。表中のdは、はり上面からの鉄筋深さを示すものであり、NRC、FRCには、φ6mmの伸線をスターラップとして20cmピッチで使用した。

Table 1 Size of model specimens

	Size (cm)	Steel
RC	10×10×40 (d=8)	D10
RM	10×10×40 (d=8)	D10
C	10×10×40	—
NRC	10×20×170 (d=17)	2D13
FRC	10×20×170 (d=17)	2D13

第2群は、主として破壊過程でのAE頻度特性を調べる目的に供されたもので、水：セメント：砂：骨材=0.54：1：2.06：3.08の普通コンクリート、水：セメント：砂：骨材=0.28：1：0.78：1.86の高強度コンクリートおよび水：セメント：砂：骨材=0.48：1：2.14：2.38の鋼繊維補強コンクリートを用いた3種類の鉄筋コンクリートばりである。これらは、それぞれN、H、Fシリーズとして概要はTable 2に掲げてある。表中の(a/d)は、せん断スパン比である。なお、供試体の断面は、幅×高さ=10×20cm、鉄筋深さd=17cmとし、スターラップにはφ6mmの伸線を使用した。

第3群の供試体としては、概略図をFig. 3に示すよ

Table 2 Reinforced Concrete Beams

	No.	Size (a/d) (cm)	Steel	Sturrrup (pitch/cm)	Fiber (%)
H	1	160 (3.0)	2D13	8	—
	2	160 (3.0)	2D19	4	—
N	1	120 (1.5)	2D10	10	—
	2	140 (2.5)	2D10	10	—
	3	140 (2.5)	2D16	6	—
	4	160 (3.0)	2D10	10	—
	5	160 (3.0)	2D13	8	—
F	1	120 (2.0)	2D13	—	0.2
	2	120 (2.0)	2D16	—	0.2
	3	120 (2.0)	2D16	15	0.2
	4	120 (2.0)	2D16	—	0.5
	5	120 (2.0)	2D13	—	0.8

うなSRC高架橋脚の縮小模型であり、実験は特にSRC部材が純ねじりを受けた際の破壊過程に注目して行われた。この際、比較のために水平打ち継ぎ目のないSRC

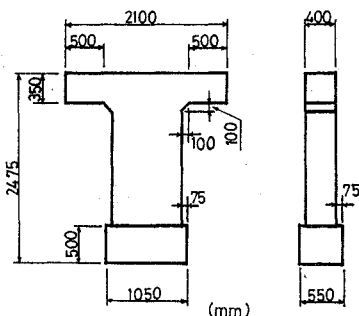


Fig. 3 Sketch of SRC Specimen

供試体(B)、打ち継ぎ目のあるSRC供試体(C)、および継ぎ目部分をH型鋼によって補強したRC供試体(D)の3種類が準備された。C供試体では、図の底面より1m、D供試体では1.3mの断面に打ち継ぎ目がある。なお、供試体のコンクリートは、水：セメント：砂：骨材=0.56：1：2.34：3.31設計強度240kg/cm<sup>2</sup>、鉄骨鉄筋比A<sub>ss</sub>/A<sub>st</sub>≒2.0、鋼材コンクリート比はA<sub>s</sub>/A<sub>c</sub>≒2.0%である。

これら3群の供試体の養生は、C、RC、RMについては水中養生を行い、他の供試体については、気中養生を行った。

c) 実験方法

室内実験では、2点载荷の曲げ試験を行った。RC、RM、C供試体については、スパン30cm(载荷間隔10cm)、NRC、FRC供試体については、スパン120cm(载荷間隔20cm)、H、N、F供試体ではTable 2に示したa/dによる対称载荷によった。またピックアップは、はりの中央部もしくは端部に定着した。

屋外実験では、はり出し部両端のフレームに設置したジャッキにより供試体に偶力を作用させて、純ねじりモーメントを加えた。また、ピックアップは、概略図をFig. 4に示すように、継ぎ目付近の両側面に1個ずつ所定箇所に装着し、片側には、加速度計も装着した。

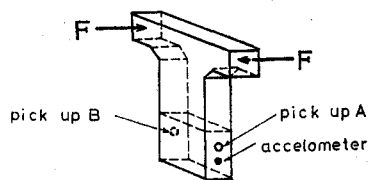


Fig. 4 Transducer Array on SRC Specimen

(3) 実験結果とその考察

a) 鉄筋コンクリートはりのカイザー効果に関する実験

RCとC供試体の実験結果をFig. 5に示す。横軸には時間軸を、縦軸には荷重と20秒ごとのAE発生数(カウント・レート)を示した。なお、これは負荷-除荷の1サイクルに対して、ほぼ20点でAE発生頻度を計測

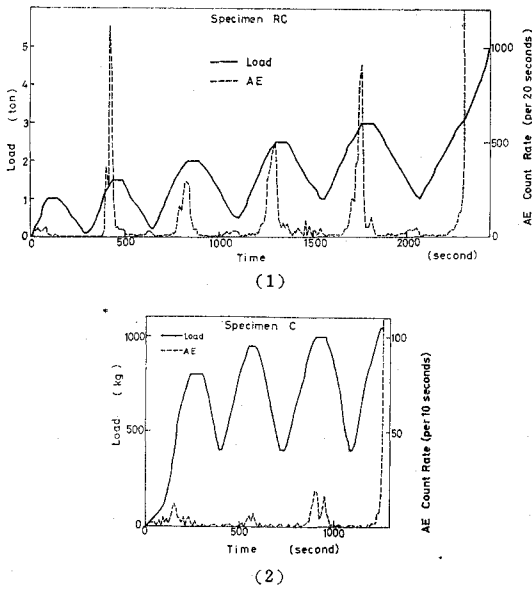


Fig. 5 Acoustic Emission Count Rate During Cyclic Loading Test

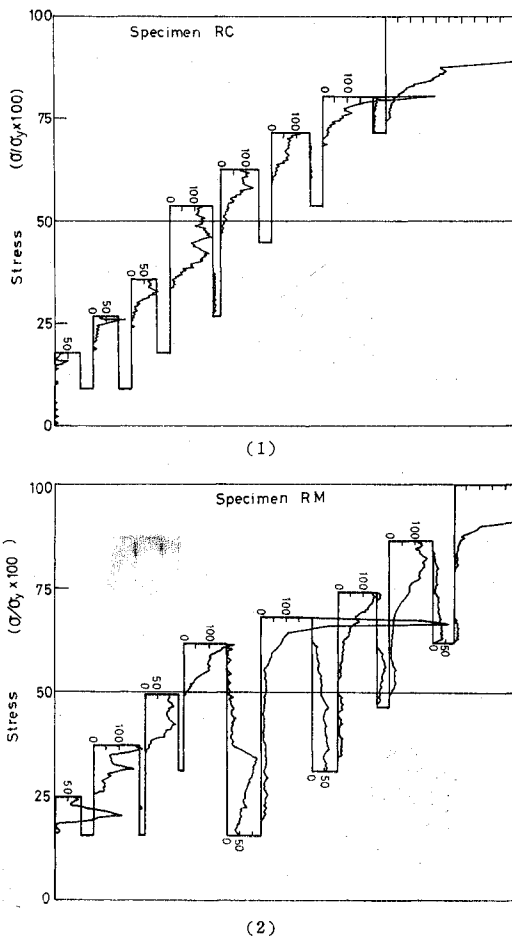


Fig. 6 Relation between Loading Cycle and Acoustic Emission Count Rate

したことになっている。破壊過程を推定するには、この程度で十分であると判断される。実線で示された漸増繰り返し荷重に対して、C 供試体は、AE の発生頻度は少なく、繰り返し荷重によるカイザー効果は不明瞭である。RC 供試体では、最大履歴荷重を越えるごとに AE が頻発するのに反し、それ以前および除荷の途中では、ほとんど発生しないことがわかる。すなわち、この供試体は、顕著なカイザー効果を示している。RC と RM 供試体に関して、この結果を荷重サイクルごとにプロットしてみると Fig. 6 のようになる。縦軸は荷重、横軸は発生頻度、実線は荷重サイクルを表わしている。RC 供試体では、終局点付近まで明瞭なカイザー効果が現われるが、RM 供試体では、終局荷重の 60% 以上の荷重履歴を受けた後は、カイザー効果は不明瞭になっている。さらにこの領域では、除荷時にも AE が頻発する傾向が見られる。これは、モルタルの均一性と関係していると考えられる。すなわち、均質度が高ければ、同じ荷重レベルでそれだけ破壊を生じうる箇所が増大し、それだけ多くのき裂が存在することになり、そのうちあるものは複雑な相互干渉を生じ、荷重載荷初期の状態とは次第に異なったシステム（不安定な破壊状態）に移行することにより、カイザー効果が弱くなると考えられる。このことは、逆に言えば、C と RC 供試体を比較すると、後者の方が複雑な応力状態にあり、また RM と RC 供試体とでは、やはり後者の方が材料不均質度高いことによって、高い局所的な応力ないしひずみ状態が生じ、全体としてみれば比較的安定な破壊状態であり、比較的卓越した大きなクラックが発生しやすく、AE の大部分はこれが伝播することにより生じるので、明瞭なカイザー効果が現われると解釈されよう。

いずれにしても、岩質材料の系曲げ破壊においては、材料的に不均質なほどカイザー効果が顕著であることは注目すべきであろう。

次に、FRC、NRC 供試体の実験結果を Fig. 7 に示す。この実験では、ピックアップを供試体中央部と端部の 2 箇所に装着して、2 点から AE の検出を行った。Fig. 7 より明らかなように、この実験でもカイザー効果があることが確かめられた。また、AE 頻度が距離によって著しく減少すること (AE 発生源は、はりの中央部と考えられる)、この減少の割合は、両供試体ともほぼ同程度であることが認められた。

このようなカイザー効果の現われ方は、一般的に言えば、破壊におけるクラック伝播の過程で、最大履歴荷重に対して系内が、どの程度安定であるかということと密接に関連し、逆にカイザー効果はその指標となり得ると考えられる。

b) 鉄筋コンクリートはりの破壊過程における AE 頻

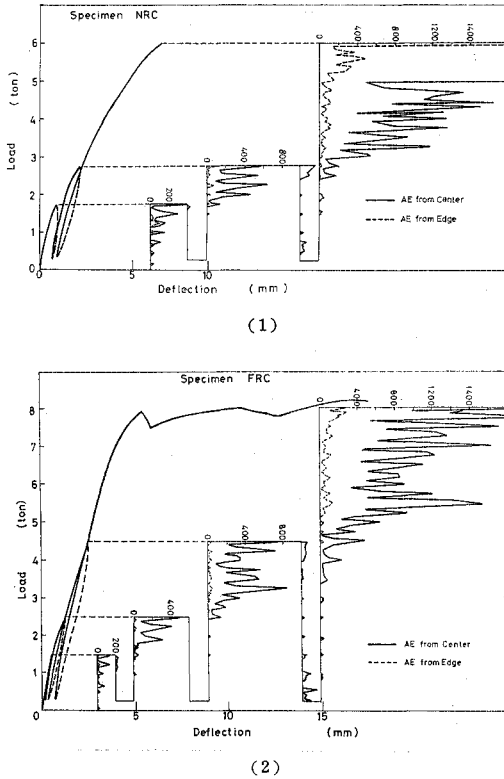


Fig. 7 Load-deflection Curve and Acoustic Emission Count Rate during Cyclic Loading Test

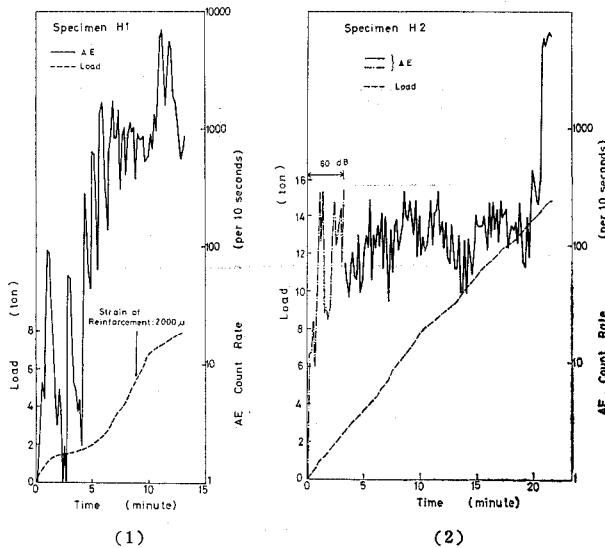


Fig. 8 Load and Acoustic Emission Count Rate during Test

度に関する実験

H1, H2 供試体の結果を Fig. 8 に示す。横軸には時間軸を、縦軸には荷重および 10 秒ごとの AE 発生頻度(カウント・レート)数をとって示した。また H2 供試体における荷重初期の AE 発生頻度の破線の部分は、

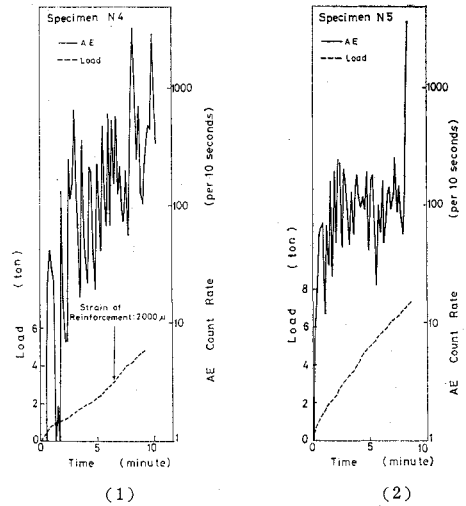


Fig. 9 Load and Acoustic Emission Count Rate during Test

内部ひびわれの発生時期を調べるために 10 dB 高く増幅した記録である。H1, H2 供試体は、ともに曲げ破壊を生じたが、H1 供試体では、AE の発生頻度数は、可視クラック検出のために荷重速度を遅くした 1.3 t 付近を除いて、漸増しているのに対して、H2 供試体では、AE の発生はほぼ定常状態を保った後、終局荷重近くになって突然に増大していることがわかる。この 2 つの供試体の主な相異は、主鉄筋の径であり、計測結果からして鉄筋が降伏しはじめれば、AE は漸増的に発生するのに対し、鉄筋の強度が大きく、それが降伏するまでにコンクリートが破壊されれば、その破壊点付近で AE は急激に頻発することが認められた。

次に、N4, N5 供試体の結果を Fig. 9 に示す。この 2 つの供試体の破壊過程での AE の発生特性は、H シリーズ供試体とよく似ているので、ほぼ同様の破壊機構が推測される。実際に、N4 供試体では、鉄筋降伏後

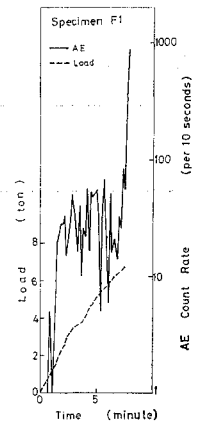


Fig. 10 Load and Acoustic Emission Count Rate during Test

曲げ破壊を生じ、一方 N5 供試体では、鉄筋降伏前に大きなせん断ひびわれを生じて耐力を失った。なお、同様な結果は N1, N2, N3 供試体についても確かめられた。

最後に、F1 供試体の結果を Fig. 10 に示す。F シ

リーズ供試体は、せん断に対する補強が弱いために、すべてせん断破壊を生じた。この図の結果は、H2, N5 供試体と見事に一致している。このように、H, N, F のシリーズの各供試体における AE 頻度の挙動は、材料の相違にもかかわらず、破壊形態により、ほぼ定性的に 2 つの型に分類され、これには鉄筋の強度が影響することが認められた。このことは、逆に、AE の発生頻度特性から破壊の機構を推定することの可能性を示したものと解釈される。

c) モデル構造物の破壊過程における AE 頻度に関する実験

Fig. 11 (a) に、ダイヤルゲージによって測定した D 供試体の変形モードを示す。縦軸は供試体の垂直位置を示し、横軸は変形量を示す。対応した AE 観測結果を Fig. 11 (b) に示す。横軸には時間を、縦軸には荷重と 10 秒ごとの AE 発生頻度数をとった。また、図中の荷重 0 t の部分は、載荷が 2 サイクルにわたって行われ、その間の休止時間を表わしている。

この供試体の可視ひびわれの発生荷重は、2.0 t であった。しかし、AE は載荷の初期から発生しており、それ以下で微小ひびわれが発生していたと思われる。再負

荷についてはカイザー効果が見られる、AE は荷重が 3.0 t 付近から頻発しており、これは、打ち継ぎ目で変形が不連続となった荷重 (3.0~4.0 t) とよく対応している。また、最終荷重 4.5 t からの除荷に際しても、AE が頻発していることに注意されたい。このような大きな変形のねじり破壊では、除荷に伴って変形が回復し、それにつれて、ひびわれ面での相対的なすべりが生じ、AE が発生することを示している。なお、ピックアップ A および B による AE 頻度の差は、破壊が微視的には、対称に生じなかったことを示唆している。

Fig. 12 に C 供試体の結果を示す。この供試体のひびわれ発生荷重は、5.5 t であったが、AE はその付近で一度頻発しており、また、D 供試体と同様に、大きな変形の生じた 9~10 t 付近で、AE は非常に頻発している。この AE の発生挙動を詳しく見れば、9.0 t 付近で急激に頻発した後、一度落ちつき、12 t 付近から漸増して最終荷重に至ることがわかる。これはこの供試体の破壊機構に、このような特性のあることを示唆している。

次に、B 供試体の結果を Fig. 13 に示す。AE は、荷重の初期において、ほとんど発生せず、8 t あたりから発生しはじめ、9 t 付近で頻発し、その後の挙動は C

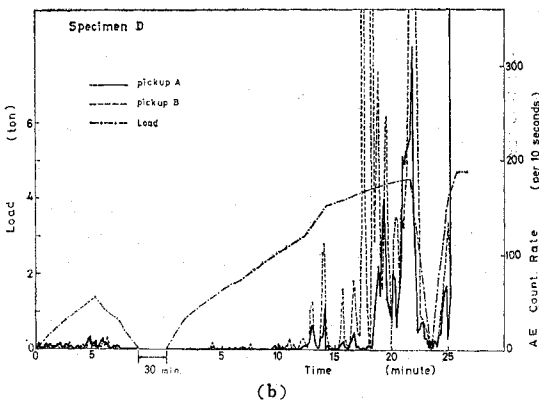
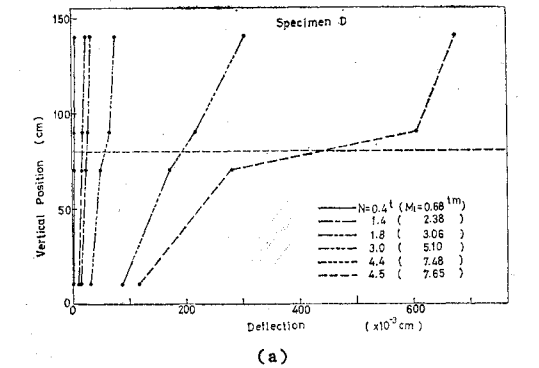


Fig. 11 (a) Lateral Deflection Versus Height of SRC Model  
(b) Load and Acoustic Emission Count Rate during Test

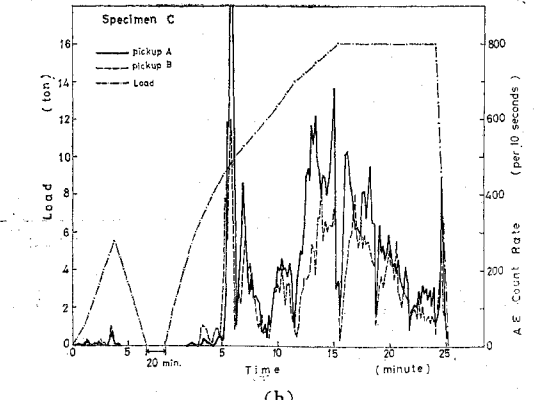
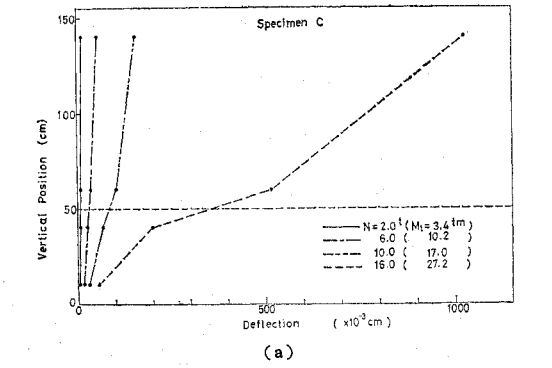


Fig. 12 (a) Lateral Deflection Versus Height of SRC Model  
(b) Load and Acoustic Emission Count Rate during Test

供試体と類似している。

最後に、加速度計システムから得た C, D 両供試体の 1 分ごとの AE 発生頻度数の測定結果を Fig. 14 に示

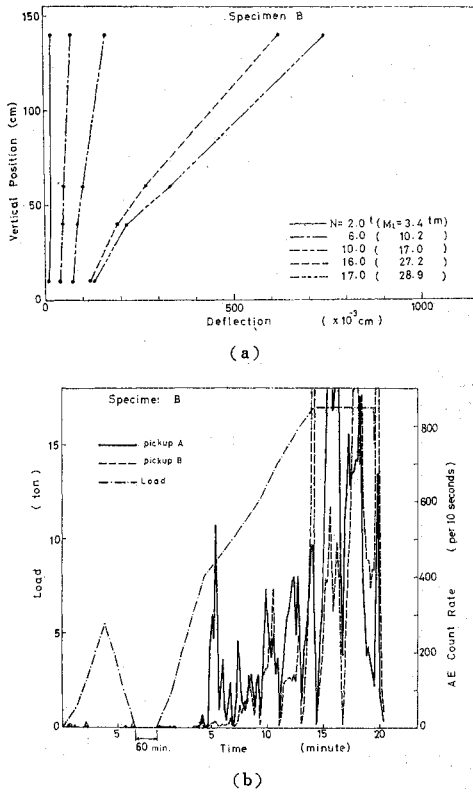


Fig. 13 (a) Lateral Deflection Versus Height of SRC Model  
(b) Load and Acoustic Emission Count Rate during Test

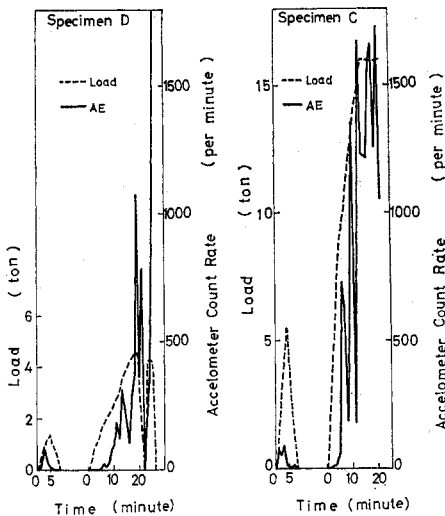


Fig. 14 Load and Acoustic Emission Rate Counted by Accelerometer System (Fig. 2 (b))

す。この結果は、Fig. 11, 12 と異なり、AE 頻度は初期から終局に至るまで漸増しており、Fig. 12 に見られるような大変形時の急激な頻発は見られない。この二つのシステムから得た結果を比較して、大変形開始前では高周波成分が卓越して発生していると結論される。このことから、この供試体の破壊過程では、まず系内に微小クラックが生じ（これに伴う高周波の AE が頻発）、その後、このクラックは、成長し連結されて、比較的大きなひびわれを形成し、その後は、ひびわれ面でのすべり (AE が漸増しながら発生) が生じたと推定される。

また D, B 供試体における再载荷のサイクルで、一回目をかなり越える荷重段階に至るまで AE がほとんど発生しなかったという事実は、a) でのカイザー効果の実験からも示されたように、その系内の安定状態を外部から、何らかの形で破らない限り、AE が発生しないということを示している。

なお、この実験によって屋外での AE 測定は、さまざまな空気中の雑音に妨害されることがわかった。現実には、このような雑音が原因で、同シリーズの実験の一部、A 供試体については、信頼できるデータが得られなかった。

AE 法を現地で適用する場合には、雑音の除去は特に重要であり、たとえば、適当なフィルターを用いるとか、接地を十分に行うとか、などして S/N 比を改良することが必要であろう。

#### 4. AE の規模別頻度分布に関する研究

##### (1) 概 説

材料の破壊過程で発生する AE の最大振幅 (規模) と発生頻度の関係は、大略 Fig. 15 となることが知られている。また、この関係は、累積頻度および振幅の両対数について表わせば Fig. 16 となる。

一方、地震学では、これらに対応した式として

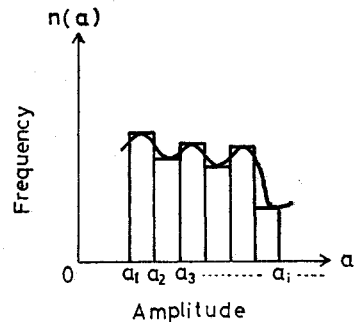


Fig. 15 Relation between Acoustic Emission Amplitude and Frequency

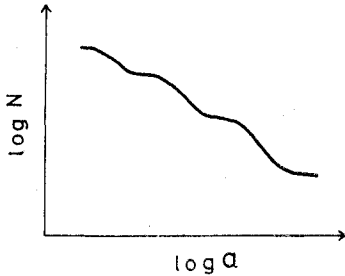


Fig. 16 log N-log A Relation

$$n(a) = ka^{-m} da \text{ (石本-飯田式)} \dots\dots\dots(1)$$

および

$$\log N = \alpha - b \log a \text{ (Gutenberg-Richter 式)} \dots\dots\dots(2)$$

が成立するといわれている。これらのうち、 $k, m$  および  $\alpha, b$  は定数とされている。これらが定数であるということは、式 (1) は、規模が大きくなるにつれて発生頻度は指数的に減少することを示し、また、式 (2) は、 $\log N$  と  $\log a$  とは直線関係にあることを意味している。このことは、小規模地震の発生頻度を調べれば大地震の発生頻度が推定できることを意味すると解釈されている。また、式 (1) および (2) における  $m$  値、 $b$  値の本震前後での変動も地震予知で話題となっている。

材料の破壊に関しても地震と同様に、このような関係が成立するであろうか。成立するとすれば定数の値は、あるいはその意味はどうであろうか。もし成立しないとすれば、どのように修正されるであろうか。

材料の破壊を考えるうえで、この間を検討することはきわめて重要である。何となれば、上記と類似の関係が得られれば、微小破壊の段階で大規模な破壊の規模あるいは発生頻度が推定されるだろうから。

しかし、材料の破壊の過程で発生する AE 波を考えてみると、その振幅はそこに生じている破壊の規模に固有のものであり、それぞれの振幅の頻度は、材質および破壊のモードにより決定されると考えられる。したがって、単純に、式 (1) のように大きな現象の頻度ほど指数的に減少するとは考え難く、実際には、Fig. 15 に示すように、いくつものピークのある分布曲線になると思われる。また、 $\log N - \log a$  の関係も、単に直線とはならず、材質および破壊のモードに固有な幾つかの変曲点を持つ曲線と考えられる。

このような想定の下に、規模別頻度分布の物理的意味を検討する目的で、地震学にならって、実験的に得られるマグニチュード  $M_e$  を次のように定義する。

$$M_e = \log a \dots\dots\dots(3)$$

一方、 $\log N - M_e$  関係を見ると、Fig. 16 のように広義の減少関数であるので、いまこの曲線の微係数を  $-b$

( $M_e$ ) ( $b$  は定数でなく、 $M_e$  の関数と考える) とすれば、

$$d(\log N)/dM_e = -b(M_e) \dots\dots\dots(4)$$

と表わされる (ただし  $b \geq 0$ )。

この式は、レート・プロセス理論<sup>22)</sup>の式に相似な式であり、 $b$  の値は、レートに相当していることがわかる。このレートは、レート・プロセスの議論では、物性論、材料組織学などと関連した量であるとされているが、このことも上述の想定の妥当性を示している。

このような AE の規模別頻度分布の特性は、地震との関連から茂木<sup>23), 12)</sup>, Scholz<sup>13)</sup>らによって研究された。特に茂木は、式 (2) の直線近似からのずれについて詳細な検討を加え、材質の不均質性と関連づけて、この特性を論じている。また近年、大塚の基石モデル<sup>23)</sup>とよばれる地震のシミュレーション解析からも  $\log N - M$  曲線の特性が論じられている。

以下では、実際に、各種の載荷法、材料について実験を行い、この規模別頻度分布について検討を行った。

(2) 実験概要

a) 実験装置

実験に用いた装置のブロック・ダイアグラムを Fig. 17 に示す。パルスハイト・アナライザ(波高分析器)は、AE の振幅を 6 段階に分割し、そのおのおのの振幅間の頻度を計数する機器である。この計測システムでは 50 dB 増幅し、100~300 kHz 周波数帯の AE を検出した。

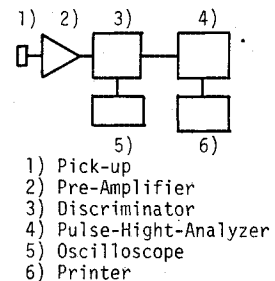


Fig. 17 System Block Diagram used to Obtain Acoustic Emission Magnitude-Frequency Relation

b) 供試体

実験を行った供試体は、はり中央部に開角 60°, 1 辺 1 cm の切り欠きを持つはり (N)、それと同寸法の切り欠きのないはり (B)、圧縮用の円柱供試体 (C)、同じく同寸法でテフロンシートとシリコングリースにより端面拘束を減じた圧縮用供試体 (T) のそれぞれ 4 種類について、水：セメント：砂：骨材=0.39：1：2.0：2.5 の富配合コンクリート (CR)、水：セメント：砂：骨材=0.5：1：3：4.0 の貧配合コンクリート (CP)、水：セメント：砂=0.4：1：1 のモルタル (M) の 3 種の材料を用いて作製した。また養生は、すべて水中で行った。これらの供試体の概要は Table 3 に示す。

以下では、上に述べた記号を組合せて用いて供試体を区別することにする。たとえば、NCR とは、富配合コ



Table 3 Size of Test Specimens

Loading	Series	Size (cm)
Notch	N	4.8×10.0×39.0
Bending	B	4.8×10.0×39.0
Compression 1	C	10φ×20
Compression 2	T	10φ×20

ンクリートの切り欠きはりという意味である。

(3) 実験結果および考察

検出された各振幅の頻度は、前述したように、供試体個々の破壊過程に固有の特性を表わしていると考えられるので、この現象がレート・プロセスに相当していること、および大塚らの結果と対応させるために、初期から各荷重段階までで得られる Fig. 16 の分布の縦軸を総頻度に対する確率に変換して、規模別頻度分布を作成した。

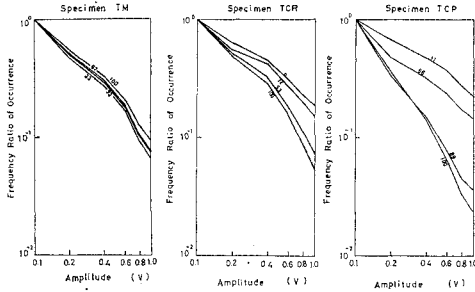


Fig. 18 Frequency Ratio of Occurrence Versus Acoustic Emission Amplitude (Magnitude-frequency Relation)

T シリーズ 供試体の 規模別頻度分布曲線を Fig. 18 に示す。曲線につけた数字は、破壊荷重に対する荷重状態の百分率であり、それぞれの曲線は、初期からその荷重段階までで得られた規模別頻度分布を表わしている。

この図から、分布曲線が上に凸となる性質をもつことがわかる。また M 供試体では、ほとんどこの曲線が変化しないのに対して、CP, CR 供試体では終局荷重に近づくにつれて、曲線は下方へ移動している。この傾向は、コンクリートが貧配合なるほど、終局に近づくにつれて小規模の破壊現象が総頻度に対して卓越することを示している。

次に、B シリーズ 供試体での結果を Fig. 19 に示す。この曲線も上に凸となる性質を有しているが、M, CR, CP 供試体とも T シリーズ 供試体とは異なって、終局荷重に近づくにつれて、大きく上方へ移動している。つまり、このような載荷（曲げ）による破壊過程では、終局荷重近くでは、大規模な破壊現象が頻発することがわかる。Fig. 20 には、C シリーズ 供試体の結果を示した。この図からも、曲線は同様に上に凸となる性質を示

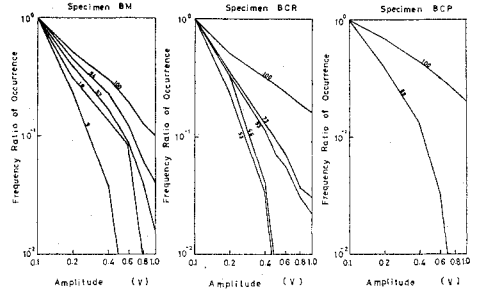


Fig. 19 Frequency Ratio of Occurrence Versus Acoustic Emission Amplitude (Magnitude-frequency Relation)

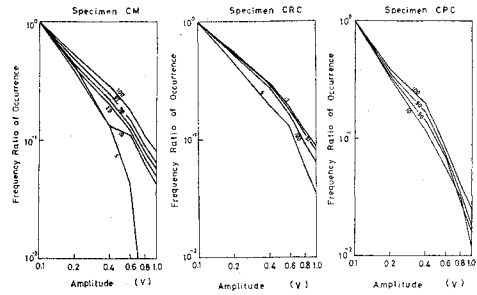


Fig. 20 Frequency Ratio of Occurrence Versus Acoustic Emission Amplitude (Magnitude-frequency Relation)

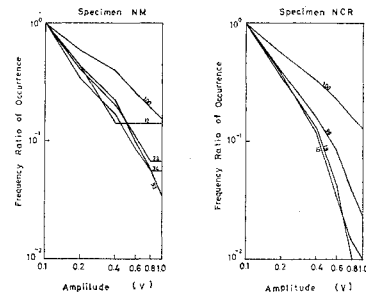


Fig. 21 Frequency Ratio of occurrence versus Acoustic Emission Amplitude (Magnitude-frequency Relation)

しているが、M 供試体の初期を除いて、この曲線は、どれもほとんど変化しないことがわかる。これは T シリーズ 供試体の結果と比較してみると、圧縮試験における供試体の端面拘束の有無が、クラックの形成ならびに成長過程に大きな影響を及ぼすことを示している。

次に、N シリーズ 供試体の結果を Fig. 21 に示す。M 供試体の初期における水平な部分は、計測の設定範囲の上限 1.0 V より大きな現象が発生したが、この水平な部分に相当する規模の現象が存在しなかったことを表わしている。これは、ここに設定した測定範囲に問題があったともいえるが、また、この現象を単に式 (1) で表

わすことの困難さも示している。この分布曲線の変動は、Bシリーズ供試体と同様に、終局において急激に上方へ移動しており、切り欠きはりでは、終局において急激に大規模の破壊現象が発生することを示している。

以上の各種の実験から、規模別頻度分布曲線は、すべて上に凸となる特性を有することが明らかになった。このことは、大塚らのシミュレーションの結果とも一致している。また、これは規模別頻度分布が式(1)にのる現象として、ほぼ直線で近似できると考えることには無理があることを示している。したがって、これを直線と考えたときの勾配、つまり式(2)の  $b$  の値の物理的意味はなくなってしまうであろう。しかしながら、ここでは破壊過程での、この分布曲線の変動特性を把握することが必要であるので、この頻度分布における平均のマグニチュード  $\bar{M}_e$  を導入して検討してみる。

これは、各荷重段階での実験的なマグニチュード  $M_e$  の平均値であり、現象を一つの地震だと考えたときの平均的な規模に相当する量である。また、レート・プロセスでの議論より、この逆数が、 $b$  値に相当していると考えればよい。なお、マグニチュードを選んだ理由は、振幅の対数値として、その物理的な意味がはっきりしているからである。

Fig. 22 は、 $\bar{M}_e$  を各荷重段階に対してプロットしたものである。図から、曲げ、ノッチ試験では終局荷重付近で急激に大規模な破壊現象が発生するのに対して、圧縮では、その規模がほとんど変化しないこと、また、終局時の平均マグニチュード  $\bar{M}_e$  が CP, CR, M 供試体の順に均質度高くなるほど、大きくなっていることがわかる。

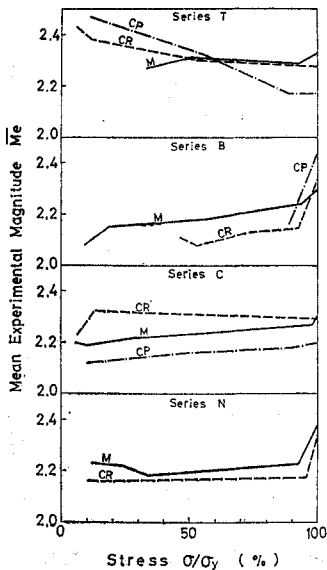


Fig. 22 Mean Experimental Magnitude  $\bar{M}_e$  as a Function of Normalized Stress

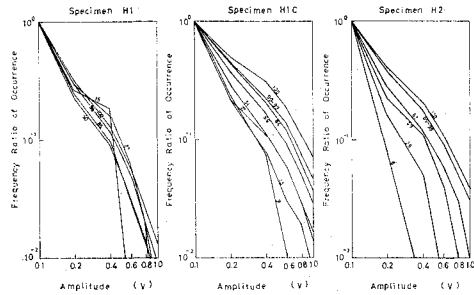


Fig. 23 Frequency Ratio of Occurrence Versus Acoustic Emission Amplitude (Magnitude-frequency Relation)

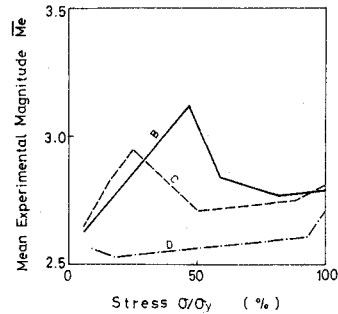


Fig. 24 Mean Experimental Magnitude  $\bar{M}_e$  as a Function of Normalized Stress

このように表現すれば、Fig. 18~21 に示した規模別頻度分布曲線の変動の様子がさらに明瞭に示されていると思われる。

以上のような考え方で、各破壊過程に固有な挙動を平均マグニチュード  $\bar{M}_e$  をパラメーターとして捕えることができたので、前節で述べた鉄筋コンクリートはりの測定結果についても、同様な整理を試みた。これらの結果も、この規模別頻度分布曲線が上に凸となる特性をもつことを支持しているが、このような大型の供試体においては、ピックアップの定着位置によっても、あるいは、その材料内の減衰によって、曲線の形状が異なることが認められた。この例を Fig. 23 に示す。このシリーズの試験では、供試体端部から AE を検出していたが、H1 供試体だけは、中央部からも検出した (結果を H1C として示した)。このように、H1 と H1C とでは、曲線の形状も、その変動状態も大きく異なっている。

また、例として、前述したモデル構造物の平均マグニチュード  $\bar{M}_e$  の変化図を Fig. 24 に示した。この図の B, C 供試体の  $\bar{M}_e$  の最大値は、打ち継ぎ目付近で大変形を生じた荷重に対応している。したがって、これから判断する限り、この供試体の破壊過程における固有な特性も、平均マグニチュード  $\bar{M}_e$  を指標として推察することができるといえよう。

## 6. 結 論

本研究では、従来の岩質材料の種々の応力状態における AE の発生特性に関する研究成果を踏まえ、構造物への AE の適用性を検討するための基礎資料として、鉄筋コンクリート構造物の破壊に伴う AE の発生頻度、振幅の規模別頻度分布について実験的な検討を試みた。

これより得られた結論は、以下のようである。

(1) 鉄筋コンクリート構造物においてもカイザー効果はあらわれる。しかしながら、この現象は、最大履歴応力の検定としてだけでなく、構造物内で過去の履歴によって生じた微小破壊が、その後の系内の応力の再分配などによって安定化しているかどうかの指標として、非破壊検査などに応用できると考えられる。

(2) 鉄筋コンクリートはりの破壊過程における AE 頻度の発生特性には、鉄筋の強度が影響する。鉄筋強度が大きければ、微小ひびわれ発生後、AE は、ほぼ定常的に発生し、はりの終局耐力消失寸前に急激に頻発する。鉄筋強度が小さければ、鉄筋の降伏とともに AE は、破壊に至るまで漸増的に発生する。なお、AE は内部ひびわれ検出の道具としても十分利用できることも確かめられた。

(3) 屋外試験結果から、AE を構造物の稼動時のモニターリングとして使用することの有効性が確かめられた。また、加速度計システムによる計測結果との比較から、破壊過程で発生する AE の周波数分析を行うことの妥当性が示唆された。なお、AE 法を屋外の現場計測に適用する場合には、雑音の分離および除去が重大な問題となることが指摘された。

(4) AE の規模別頻度分布曲線は、上に凸な特性を有し、材質および載荷法により、破壊に至る各過程で変動することが認められた。このような分布に対しては、平均マグニチュード  $\bar{M}_0$  を導入して評価することを提案した。

(5)  $\bar{M}_0$  は、破壊形態および破壊過程に敏感であり、クラックの成長過程の相違も明瞭に表わすようである。 $\bar{M}_0$  は、はりの曲げ試験、ノッチばりの曲げ試験では、終局破壊直前に急激に大きくなり、圧縮のような多くのクラックが成長し、連結され破壊に至る過程ではほとんど変化しないことが判明した。

(6) 鉄筋コンクリート構造物の破壊過程における規模別頻度分布曲線も、やはり上に凸となる特性を有している。また、この際の  $\bar{M}_0$  は、その構造物の破壊形態に固有の挙動を示すが、ピックアップの位置ならびに材料の減衰特性などの影響をうけるので、検出点における評価パラメーターと解さなければならない。

## 7. あとがき

今回の実験によって、AE の発生頻度の記録ならびにその技術は、ほぼ実用段階にまで達していると考えられる。また、規模別頻度分布についても、その定性的な特性は十分とらえることができたと思われる。

AE 法は、コンクリート構造物に対しても、非破壊試験法として、供用時のモニターリングとして、あるいはまた構造物の耐力ないし健全度の推定のために十分利用できる方法である。今後、各方面での活用が期待される。

なお、屋外試験は、間組大阪工場で行われた阪神高速度道路公団森ノ宮工区下部工事 SRC モデル構造実験に際して AE 計測のご便宜を計っていただいたものである。ここに記して関係各位に感謝の意を表わしたい。

### 参 考 文 献

- 1) Liptai, R.G. : An Investigation of Acoustic Emission Phenomenon, Ph. D. Thesis, Michigan State Univ. (1963).
- 2) Knill, J.L., J.A. Franklin, and A.W. Malone, : A Study of Acoustic Emission from Stressed Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, pp. 87~121 (1967).
- 3) Mogi, K. : Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and its Relations to Earthquake phenomena, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 40, pp. 125~173, (1962).
- 4) Sholz, C.H. : Microfracturing and Inelastic Deformation of Rock in Compression, J. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 1417~1432, (1968).
- 5) Hardy, H.R., Jr., R.Y. Kim, R. Stefano, and Wang, Y.J. : Creep and Microseismic Activity in Geologic Materials, Proc. 11th Sympo., Rock Mech. (1970).
- 6) Robinson, G.S. : The fracture Mechanism of Concrete with Particular Reference to Biaxial Compressive Strength, Ph. D. Thesis, London Univ. (1964).
- 7) 横道英雄・池田郁雄・松岡健一 : コンクリートにひびわれが生ずるときの弾性波の伝達現象について、セメントコンクリート 212, pp. 2~6, (1964).
- 8) McCabe, W.M., R.M. Koerner, and A.E. Lord, Jr. : Acoustic Emission behavior of Concrete Laboratory Specimens, ACI Jour., July, pp. 367~371, (1976).
- 9) Rühsh, H. : Physical Problems in the Testing of Concrete, Zemkaik-Gipse 12, pp. 1~9, (1959).
- 10) Goodman, R.E. : Subaudible Noise during Compression of Rock, Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 74, pp. 487~490, (1963).
- 11) 小松賢一 : 岩質材料の破壊に伴う Acoustic Emission の発生特性に関する 実験的研究, 京都大学工学部修士論文 (1975).
- 12) Mogi, K. : Magnitude-frequency Relation for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and some Related Problems in Earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 40, pp. 831~853, (1962).
- 13) Scholz, C.H. : The frequency-magnitude Relation of Microfracturing in Rock and its Relation to Earthquake, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 8, pp. 399~415,

- (1968).
- 14) Beattie, A.G. : Energy Analysis in Acoustic Emission, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
  - 15) Wu, F.T. and L. Thomsen : Microfracturing and Deformation of Westerly Granite under Creep Condition, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 12, pp. 167~173, (1974).
  - 16) Chugh, Y.P., H.R. Hardy Jr. and R. Stefanko : An Investigation of the Frequency Spectra of Microseismic Activity in Rock under Tension, Proc., 10th Sympo. Rock Mech. (1968).
  - 17) Schofield, B.H. : Acoustic Emission under Applied Stress, ASTIA Document AD 155674, WADC Technical Report, pp. 58~194, (1958).
  - 18) Mogi, K. : Source Location of Elastic Shocks in Fracturing Process in rocks, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 46, pp. 1103~1125, (1968).
  - 19) Scholz, C.H. : Experimental study of the fracturing Process in Brittle Rock, J. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 1447~1454, (1968).
  - 20) Acoustic Emission, ASTM STP 505, American Society for Testing and Materials, (1972).
  - 21) Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, ASTM STP 571, American Society for Testing and Materials, (1975).
  - 22) 横堀武夫 : 材料強度学, 技報堂 (1955).
  - 23) Otsuka, M. : Zisin 2, Vol. 24, pp. 215~337, (1971).  
(1976.10.8・受付)
-