コンクリート中を伝ばするアコースティック・エミッションの減衰特性†

山 田 和 夫* 小 阪 義 夫**

Damping Characteristics of Acoustic Emission Propagating through Concrete

by

Kazuo YAMADA* and Yoshio KOSAKA**

The damping characteristics of acoustic emission propagating through concrete were examined experimentally in order to establish the method of acoustic emission source wave analysis. The items chosen in the investigation were the effect of holding technique of sensor (Experiment-I), the effects of shape and size of specimen (Experiment-II), the effect of degree of heterogeneity of material (Experiment-III), and the effect of the degree of accumulative damage of specimen (Experiment-IV), respectively.

The main results obtained in the present study are summarized as follows:

(1) The frequency characteristics of acoustic emission picked up by the sensor were remarkably affected by its holding technique and the passing time after the sensor was held to the specimen, independently of the frequency characteristics of sensor or the degree of source acoustic emission.

(2) The acoustic emission propagating through concrete diminished with increasing the length and the sectional area of specimen. The damping of the frequency components higher than 200 kHz and 100 kHz became more significant with increasing the propagating distance of acoustic emission and the sectional area of specimen, respectively.

(3) Cement paste and mortar had the similar frequency characteristics of acoustic emission in the frequency range lower than 300 kHz. In mortar, however, the frequency components higher than 300 kHz diminished more than those of cement paste. On the other hand, the acoustic emission propagating through concrete diminished more remarkably in the whole frequency range than that of cement paste or mortar.

(4) The frequency components of acoustic emission in the range of 100~200 kHz were prominent in undamaged concrete. But the frequency components in this range diminished gradually with the progress of accumulative damage of concrete by loading, and the low frequency components became prominent and the power of acoustic emission propagating through concrete decreased.

キー・ワード: コンクリート, アコースティック・エミッション, 減衰特性, 源波形, 周波数特性

1 緒 言

コンクリートの破壊機構解明のための各種実験手法とその成果はすでに多くの研究者により報告されている¹⁾²⁾。しかし、これらの実験手法には、いずれも一長一短があり、まだ万全のものではなく、調査目的によって適宜選択しているのが現状である。これらの手法の一つに、固体内部の微小破壊に伴って発生する応力波、すなわち Acoustic Emission (以下、AE と略記する) を計測して材料の微視的破壊機構を明らかにしようとする AE 法と呼ばれる手法があるが、コンクリート工学の分野でも内部破壊機構を解明するための有力な手段として多くの注目を集めている^{3)4)~8)}。

筆者らも、かねてよりコンクリートの微視的破壊機

構を解明するために AE 法を適用し、静的載荷時の AE 挙動や繰返し載荷時のカイザー効果ならびに AE の周波数特性など、コンクリート内部で発生する AE の基礎的特性を調べるとともに、AE 法による破壊源探査を試み、コンクリートの微視的破壊過程の追跡を行うなど、AE 法の妥当性や可能性を確かめるための一連の検討を行ってきた。その結果、検出された AE は、計測システムやセンサーの特性、コンクリート中を伝ばする時の減衰特性など、多くの要因の影響を受けるため、まずはコンクリート中を伝ばする AE の減衰特性の詳細を正確に把握する必要があることを確かめた。

本研究では、コンクリート内部で発生する AE、す

† 原稿受理 昭和61年9月25日 Received Sep. 25, 1986

* 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

** 正 会 員 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

なわち源 AE の実態を正しく把握するための第 1 段階として、まずコンクリート中を伝ばする AE の減衰特性に及ぼす各種要因の影響を明らかにすることとした。

2 実験方法

2.1 実験の概要

上記の目的に応じて Table I に示す 4 シリーズの実験を行った。

Table I. Outline of experiments.

(a) Experiment-I			
Holding method of sensor	Holder	Grease	
A-method	Use	Soft	
B-method		Hard	
C-method	Not use	—	
(b) Experiment-II			
Notation of specimen	Width (cm)	Length (cm)	
L- 5	10	5	
L-10		10	
L-15		15	
L-20		20	
A- 7.5	7.5	10	
A-10	10		
A-15	15		
S- 7.5	7.5	7.5	
S-10	10	10	
S-15	15	15	
(c) Experiment-III			
Material	Diameter (cm)	Length (cm)	Specific gravity
Cement paste	10	18	2.15
Mortar			2.21
Concrete			2.35
(d) Experiment-IV			
Type	Method of loading		
Type-A	Cyclic loading under incremental strain		
Type-B	Cyclic loading under constant stress		

2.1.1 実験—I (コンクリート中を伝ばする AE の減衰特性に及ぼすセンサーの装着方法の影響を調べるための実験) 10×10×10 cm のコンクリート立方試験体を使用し、軟度の異なる 2 種類のグリース (1 種 3 号および 1 種 4 号) をセンサーと試験体との接触面に塗布した場合 (ただし、これらの場合はいずれも接着力が小さいため、センサーはホルダーによって試験体に固定した) ならびにセンサーを瞬間接着剤で試験体の表面に直接接着した場合の合計 3 種類の装着方法 (以上の各装着法を以下、それぞれ A 装着法、B 装着法および C 装着法と呼ぶ) を実験要因として取り上

げて、AE の減衰特性とセンサー装着後の経過時間との関係を調べた。

2.1.2 実験—II (コンクリート中を伝ばする AE の減衰特性に及ぼす試験体の形状・寸法の影響を調べるための実験) 実験要因は、試験体の長さ ($L=5, 10, 15$ および 20 cm の 4 種類、ただし断面はすべて 10×10 cm の正方形)、試験体の断面寸法 ($A=7.5 \times 7.5, 10 \times 10$ および 15×15 cm の 3 種類の正方形、ただし試験体の長さはすべて 10 cm) ならびに試験体の大きさ ($S=7.5 \times 7.5 \times 7.5, 10 \times 10 \times 10$ および $15 \times 15 \times 15$ cm の 3 種類の立方体) とした。これらの試験体を以下、それぞれ L-シリーズ、A-シリーズおよび S-シリーズと呼ぶ。

2.1.3 実験—III (AE の減衰特性に及ぼす試験体の非均質度の影響を調べるための実験) 実験には、 $\phi 10 \times 18$ cm 円柱試験体 (コンクリートは縦打ちとし、試験体端面の影響を除去するために、材令約 40 日目に $\phi 10 \times 20$ cm 試験体の両端面をそれぞれ 1 cm カットした) を使用し、均質度の異なる 3 種類の素材 (セメントペースト、モルタルおよびコンクリート) を用いて、AE の伝ば特性を調べた。

2.1.4 実験—IV (コンクリート中を伝ばする AE の減衰特性に及ぼすコンクリートの損傷度の影響を調べるための実験) 実験には、 $10 \times 10 \times 20$ cm の横打ち角柱試験体を使用し、漸増繰返し載荷および定荷重繰返し載荷時の AE の伝ば特性と載荷履歴との関係を調べた。

2.2 試験体の製作および養生方法

使用材料として、普通ポルトランドセメント、川砂 (天竜川産、最大寸法 = 5 mm、比重 = 2.60 、吸水率 = 1.83%) および川砂利 (天竜川産、最大寸法 = 15 mm、比重 = 2.65 、吸水率 = 0.75%) を用いた。実験に用いたセメントペースト、モルタルおよびコンクリートの調合は、いずれも十分にワーカブルとなるように、試し練りによって決定した。それぞれの調合表を Table II に示す。混練には、可傾式ミキサー (最大容量 100 l) を使用し、全材料を一挙にミキサー内に投入し、約 5 分間混練した。試験体の製作には鋼製型わくを使用し、打設に際しては、棒状バイブレータを用いて十

Table II. Mix proportions.

Material	W/C (%)	Unit content (kg/m ³)			
		Water	Cement	Sand	Gravel
Cement paste	30	486	1 620	—	—
Mortar	60	295	492	1 427	—
Concrete	60	200	333	713	1 060

分締固めを行った。試験体は、すべて材令2日目に脱型した後、実験時まで温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $75 \pm 5\%$ の養生室内で空中養生を行った。試験材令は、いずれも約8週である。

2・3 計測およびデータ処理方法

コンクリート中を伝ばするAEの減衰特性を明らかにするために、パルサーによって発生させた疑似AE（立上がりおよび立下がり時間が30 ns以下の単発パルス）を使用した。適用したAE計測システムおよび各測定機器の設定値を、それぞれFig.1およびTable IIIに示す。本計測システムでは、パルサーを用いて発生させた疑似AEは、発信用センサー（共振周波数：実験-IおよびIVでは約150 kHz、実験-IIおよびIIIでは約500 kHz（ただし、200～800 kHzの範囲は比較的フラットな周波数特性を有する））を介して試験体に入力し、受信用センサー（AE-905S、共振周波数：約1 MHz（ただし、本実験で採用したフィルター・バンド幅（10 k～300 kHz）の周波数帯域では比較的フラットな周波数特性を有する））によって検出した。検出した疑似AEは、一旦トランジェントメモリ（サンプリング間隔：1 μsec 、サンプリング個数：1024個/1データ）に記憶させた後、デジタルデータレコーダに転送した。AE波形の周波数解析は、デジタルデータレコーダに記録されたデータを、さらに大型計算機（FACOM M-382）に転送して行った。なお、周波数解析には、FFT法を使用し、AE波形のパワースペクトルを求めた。

Fig. 1. Block diagram of AE measuring system.

Table III. Selected values of AE apparatus.

No.	Amplification degree (dB)			Frequency range (kHz)	Sampling time ($\times 10^{-6}\text{s}$)
	Pre-amp.	Main-amp.	Total		
I, III, IV	20	40	60	10-300	1
II	20	30	50		

3 実験結果とその考察

3・1 AEの減衰特性に及ぼすセンサー装着方法の影響（実験-I）

Fig.2は、実験-Iによって得られたコンクリート中を伝ばした疑似AEの最大振幅とセンサー装着後の経過時間との関係を示したものである。図にみられる

Fig. 2. Relationship between maximum amplitude of AE wave and time required (Experiment-I).

ように、軟質のグリースを用いたA装着法の場合には、疑似AEの最大振幅は時間の経過とともに次第に減少するが、硬質のグリースを用いたB装着法および瞬間接着剤でセンサーを直接試験体に装着したC装着法の場合には、センサー装着直後を除けば、疑似AEの最大振幅は、接着後約10分以降はほぼ安定している。

Fig.3は、AEのパワースペクトルのセンサー装着後の変遷を示したものである。ただし、図中のパワースペクトルは、AEの周波数解析結果を50 kHzごとに分割して平均し、さらにその常用対数値で表してある。BおよびC装着法を用いた場合には、Fig.3 (b)および(c)に示すように、センサー装着直後の段階では、100 kHz以上の周波数成分が若干小さくなっているが、それ以後の時間領域になると、各周波数成分は時間の経過にかかわらずほとんど変化しない。これに対して、A装着法を用いた場合には、Fig.3 (a)からわかるように、50～100 kHzの周波数成分が時間の経過と共に徐々に減衰する傾向を示す。

Fig.4は、センサー装着後2時間経過した時点でのAEのパワースペクトルに及ぼすセンサーの装着方法の影響を示したものである。A装着法を用いた場合には、50～150 kHzおよび250～350 kHzの周波数成分が、またB装着法を用いた場合には、250～350 kHzの周波数成分が、C装着法を用いた場合に比べて減衰する傾向にあることがわかる。

以上のことから、センサーの装着方法としては、C装着法、すなわちセンサーを接着剤で直接試験体に装着する方法が最適であると考えられる。したがって、実験-II～実験-IVでは、センサーの装着方法として、C装着法を採用することとした。

3・2 AEの減衰特性に及ぼす試験体の形状・寸法の影響（実験-II）

Fig.5は、コンクリート中を伝ばした疑似AEの最大振幅と試験体各部の寸法との関係を示したものである。図によれば、AEの最大振幅は試験体の長さおよび断面寸法が大きくなるほど減少する。また、試験体

Fig. 3. Power spectra of AE wave (Experiment-I).

Fig. 4. Effect of holding method of sensor on power spectra of AE wave (Experiment-I).

寸法の増大に伴う AE の最大振幅の減少の割合は、試験体の寸法が大きくなるほど徐々に低下することがわかる。

Fig. 6 (a)~(c)は、実験-II によって得られた疑似 AE

Fig. 5. Relationship between maximum amplitude of AE wave and size of specimen (Experiment-II).

Fig. 6. Power spectra of AE wave (Experiment-II).

のパワースペクトルをL, AおよびSの各シリーズごとに示したものである。まず, AE のパワースペクトルに及ぼす伝ば距離(L)の影響を示した Fig. 6 (a)によれば, 試験体の長さ, すなわち, この場合は伝ば距離(L)が大きくなるとともに, AE の減衰が顕著となり, 特に200 kHz 以上の高周波数成分の減衰が大きい。AE の伝ば距離の増大に伴うこの周波数領域におけるAEの減衰量は, 周波数が大きくなるほど増大する傾向にある。Fig. 6 (b)は, AE のパワースペクトルに及ぼす試験体の断面寸法(A)の影響を示したものである。断面寸法が7.5×7.5 cm のA7.5試験体と10×10 cm のA10試験体の周波数特性は, 全周波数帯域にわたって類似しており, この程度の断面寸法の範囲ではAEの減衰の違いはほとんど認められない。これに対して, 断面寸法が15×15 cm のA15試験体になると, A7.5およびA10試験体と比較して100 kHz以上の周波数領域のAEが著しく減衰する。この周波数領域でのAEの減衰量は周波数にかかわらずほぼ一定である。この傾向は, 上述のAEの減衰特性に及ぼす伝ば距離の影響とは若干相違している。Fig. 6 (c)は, AEの減衰特性に及ぼす試験体寸法(S)の影響を調べた結果である。試験体の断面寸法(A)のみならず, AEの減衰に及ぼす伝ば距離(L)の影響も付加されるため, AEの減衰に及ぼす試験体寸法の影響は, Fig. 6 (b)に示したA-シリーズの場合よりもさらに顕著である。

以上のように, AEの伝ば・減衰特性は, 単にAEの伝ば距離に影響されるだけでなく, 試験体の断面寸法にも影響を受けるため, AEの源波形解析を行う際には, この点を考慮する必要がある。

3.3 AEの減衰特性に及ぼす試験体の非均質性の影響(実験-III)

Fig. 7は, 同一形状・寸法のセメントペースト, モルタルおよびコンクリート中を伝ばした疑似AEの最大振幅を示したものである。調合が異なるので一概には言えないが, AEの最大振幅は試験体が非均質であるものほど減少する傾向のあることが認められる。非均質なコンクリート中を伝ばしたAEの最大振幅は, 比較的均質なセメントペースト中を伝ばしたその約1/4となっている。

Fig. 8は, 実験-IIIによって得られたAEの周波数特性に及ぼす試験体の材質の影響を示したものである。図によれば, モルタルの場合は300 kHz以上の高周波数成分がセメントペーストに比べて若干少なくなっているが, 300 kHz以下の周波数領域では, セメントペーストとモルタルは, ほぼ類似した周波数特性を示している。これに対して, コンクリートは, セメントペーストやモルタルと比較してかなり顕著なAEの減

Fig. 7. Relationship between maximum amplitude of AE wave and type of material (Experiment-III).

Fig. 8. Power spectra of AE wave (Experiment-III).

衰が認められ, その減衰量は, 周波数が大きくなるに従って増大する傾向にある。

ところで, モルタルあるいはコンクリートは, 骨材(細骨材あるいは粗骨材)とこれを包む母材(セメントペーストあるいはモルタル)とから成る複合材料であるが, 構成素材の力学特性が相互に異なるため, それらの界面でAE波は反射・屈折し, AE波の伝ば効率は母材中を伝ばする場合と比較して一般に低下する。このとき, AE波の減衰の程度は, 波長と材料の非均質性によって相違し, 一般には波長が短い(周波数が大きい)ほど, また骨材粒径が大きくて材料の非均質性が大きいほど著しくなる。これらのことから, 最大寸法が5 mm程度以下の細骨材の場合は, 骨材粒径がAEの波長(周波数が100 kHzで伝ば速度が4 km/sのとき, 波長は40 mmとなる)に比べてかなり小さいため, 骨材の存在がAEの減衰特性にそれほど顕著な影響を与えないが, 最大寸法が5 mm以上の粗骨材になると, 骨材粒径とAEの波長はそれほどの差がなくなるため, 骨材の存在がAEの減衰特性に著しく影響を及ぼすものと考えられる。

3.4 AEの減衰特性に及ぼす載荷履歴の影響(実験-IV)

3.4.1 漸増繰返し載荷時 Fig. 9 (a)および(b)は,

漸増繰返し載荷実験で得られた疑似 AE のうち、それぞれ各サイクルごとの荷重が 0 および除荷開始点のパワースペクトルを示したものである。図によれば、載荷前の段階では、100~200 kHz の AE が卓越しているが、載荷に伴ってコンクリート内部の損傷が進行すると、特にこの周波数領域の AE の減衰が顕著となるとともに、AE のパワーが全周波数領域にわたって低下し、次第に低周波数領域の AE が卓越した周波数特性へと変化して行くことがわかる。

(a) Lower reverse point

(b) Upper reverse point

Fig. 9. Power spectra of AE wave for concrete subjected to cyclic loading with incremental strain (Experiment-IV).

Fig. 10 は、試験体の縦ひずみ度 (ϵ) が 1000 μ (相対応力度 ≈ 0.83 , 応力上昇域に相当) および 2000 μ (最大耐力点に相当) まで載荷した時の AE のパワースペクトルとそれらの点から除荷して試験体をフリーな状態にした時の AE のパワースペクトルとを比較したものである。AE の減衰は、一般に除荷した場合の方が著しくなっている。これは、試験体が試験機で拘束されることによって、試験体の共振特性が変化し、その結果として AE 波の伝ば特性も変化するためと考えられる。

Fig. 10. Effect of stress on power spectra of AE wave (Experiment-IV).

3.4.2 定荷重繰返し載荷時 Fig. 11 は、定荷重繰返し載荷実験で、上限応力度を 250 kgf/cm² (相対応力度 ≈ 0.86) に設定した場合の第 1 サイクルおよび第 10 サイクル目における下限 (0 kgf/cm²) および上限設定荷重時の疑似 AE のパワースペクトルを示したものである。この荷重範囲での繰返しでは、上限設

(a) Lower reverse point

(b) Upper reverse point

Fig. 11. Power spectra of AE wave for concrete subjected to cyclic loading with constant stress (Experiment-IV).

定荷重時のひずみ度の増分および除荷時の残留ひずみ度の増分は、それぞれ 300μ および 200μ と比較的小さく、試験体はそれほどのダメージを受けていないものと考えられるが、図から明らかなように、繰返し回数の増加に伴う試験体の微視的な損傷の進行によって、 $100\sim 200$ kHz の AE の減衰が相対的に著しくなり、漸増載荷時の場合と同様に、低周波数領域の AE が卓越した周波数特性となる。

以上のように、AE の減衰特性は、コンクリートの累積損傷の程度によって著しく相違するため、載荷中に発生した AE の源波形解析を行う際には、時々刻々と変化するコンクリートの内部構造に対応した AE の減衰特性を把握しておく必要があるものと考えられる。

4 結 論

本研究では、コンクリート内部で発生する AE の源波形解析方法を確立するための第 1 ステップとして、まずコンクリート内部で発生する AE の伝ば・減衰特性を疑似 AE を用いて実験的に調べた。実験結果を要約すると、およそ次のようになる。

(1) 源 AE が同じであっても、検出された AE の周波数特性は、受信センサーの装着方法およびセンサー装着後の経過時間によってかなり相違する。正確な源波形解析を行うためには、センサーの周波数特性のみならず、センサーの装着方法に係わる検出波形の周波数特性の変化も考慮する必要がある。

(2) コンクリート中を伝ばする AE は、伝ば距離 (L) ならびに試験体の断面寸法 (A) が大きくなるほど減衰が著しい。試験体寸法の増大に伴う AE の減衰傾向は試験体寸法が小さい範囲で特に顕著である。

(3) コンクリート中の AE は、伝ば距離が長くなるに従って 200 kHz 以上の高周波数成分の減衰が著しくなる。

(4) 検出された AE の周波数特性は、試験体の断面寸法が 10×10 cm 程度以下の範囲では、試験体の断面面積の影響をほとんど受けないが、断面寸法が 15×15 cm になると、 100 kHz 以上の周波数成分の減衰が著しくなる。

(5) セメントペーストとモルタルは、 300 kHz 以下の周波数領域では、類似の周波数特性を示すが、モルタルの場合は 300 kHz 以上の高周波数領域での成分がセメントペーストよりも若干少なくなる。これに対して、コンクリートは、セメントペーストやモルタルに比べてかなり顕著な AE の減衰が認められ、一般に周波数が大きくなるほど減衰が著しくなる。

(6) コンクリート中を伝ばする疑似 AE の周波数特性は、載荷前の段階では $100\sim 200$ kHz の周波数成分が卓越しているが、載荷によりコンクリート内部の損傷が進行するに従い、この周波数領域の AE が著しく減衰するとともに、AE のパワーが全周波数領域にわたって次第に低下する。

最後に、本研究の実施に際して有益なるご助言を賜りました三重大学谷川恭雄教授、ならびに実験およびデータ整理に際してご助力を得た土田崇仁君（名古屋大学大学院生、現在 伊藤建築設計事務所）および安龍男君（三重大学大学院生）に対して謝意を表します。なお、実験データの整理には、名古屋大学大型計算機センターの FACOM M-382 を使用し、また、本研究費の一部は、昭和61年度文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)）によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 小阪義夫, 谷川恭雄, 材料, **14**, 368 (1975).
- 2) 和泉正哲, 三橋博三, 東北大学建築学報, **16** (1975).
- 3) 小林昭一, 大津政康, コンクリート工学, **16**, 7, 9 (1978).
- 4) Y. Tanigawa, K. Yamada and S. Kiriya, Trans. of JCI, **2**, 155 (1980).
- 5) Y. Tanigawa, K. Yamada and S. Kiriya, Proc. of JCMR, **24**, 241 (1981).
- 6) 谷川恭雄, 山田和夫, 桐山伸一, セメント技術年報, **35**, 405 (1981).
- 7) Y. Tanigawa, K. Yamada and S. Kiriya, Second Australian Conf. of Engineering Materials (1982).
- 8) 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫, 日本建築学会構造系論文報告集, **358**, 22 (1985).