アコースティック・エミッションの波形を利用した コンクリートの軟化領域の推定法

A METHOD OF DETERMINING SOFTENING ZONE IN CONCRETE USING ACOUSTIC EMISSION WAVEFORMS

篠原保二*, 安部武雄**, 古村福次郎***

Yasuji SHINOHARA, Takeo ABE and Fukujiro FURUMURA

An acoustic emission (AE) testing is useful for detecting the damage within cementitious materials in real time. Based on the time differences between detections of an AE event at different transducers, its source can be located. Sources of AE activity were studied for plain-mortar, concrete and model-concrete specimens loaded in three-point bend. To locate AE sources precisely, the arrival time was determined from the first motion of the waveform and the spectral analysis was carried out based on the maximum entropy method. The results show that AE events from the tip in the softening zone have higher frequency components (250-450kHz) besides the frequency components in the range of 100-200kHz which all AE events have. By picking the AE events with higher frequency components, it is possible to evaluate the extent of the damage in concrete-like materials more clearly.

Keywords: concrete, acoustic emission, AE source, softening zone, spectral analysis, maximum entropy method

コンクリート, アコースティック・エミッション, AE 源,
軟化領域, スペクトル解析, 最大エントロピー法

1. はじめに

固体材料が変形もしくは破壊する際には、内部に蓄積されたエネルギーが急激に解放されるため、その一部は過渡的な弾性波となって伝播する。その弾性波がアコースティック・エミッション (Acoustic Emission、以後 AE と略す) である。

AE は、試験体内部のダメージの状況を、リアルタイムで測定できる方法として有望視されており、多数の研究が報告されている¹⁾⁻⁵⁾。AE 信号は、主に次のように解析されている。

- 1) 外力による内部のダメージの様子を知るために、AE 発生頻度を計測する。
- 2) 限界エネルギー解放率を決定するために、AE エネルギーを使用する。
- 3) 異なる荷重段階で生じるダメージのメカニズムの相違を区別するために、AE 信号の周波数成分、振幅、立ち上がり時間を使用する。

- 4) 複数の AE センサーに到達する同一 AE 信号の時間差から、AE 発生源を標定し、クラックの進展や軟化領域の大きさを検討する。
- 5) AE の波形解析により、マイクロクラックの大きさ、方向、タイプを識別する。

上記 4), 5) の解析法は、コンクリート内部の破壊メカニズムを知る上で有力な方法である。しかしながら、複数の AE センサーに到達する同一 AE 信号の時間差から、AE 発生源を標定する場合、その標定位置は、実際に観察されるひび割れを中心に、かなりランダムに分布する。その原因として、AE 信号の到達時間をしきい値を超えた時間とした場合、真の到達時間より遅れることが考えられる。例えば、図-1 において AE 波形の周波数を 200kHz とすると、 Δt は約 $5 \mu s$ となり、AE の伝播速度を 4000m/s とすると、約 20mm の標定誤差を生じる。

本研究では、AE 発生源の位置標定精度を高めるために、図-1 に示すような各 AE 波形の初期微動開始時間より真

* 東京工業大学工業材料研究所 助教授・工博

** 東京工業大学工業材料研究所 助教授・工博

*** 東京工業大学工業材料研究所 教授・工博

Assoc. Prof., The Research Laboratory of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., The Research Laboratory of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., The Research Laboratory of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

の AE 到達時間を決定し、さらに、AE 波形のスペクトル解析を行い、そのスペクトルパターンを比較することによって、ダメージに起因したと考えられる AE 信号を識別し、軟化領域の進展および大きさを推定する。

また、先の報告⁶⁾では、軟化領域における応力伝達機構は、クラック先端前方の不連続なマイクロクラック、あるいはクラック先端後方の蛇行したクラック間における摩擦および粗骨材によるブリッジングに起因することが明らかになり、その力学的特性を伝達応力と仮想ひび割れ幅の関係でモデル化した。しかしながら粗骨材によるクラック拘束とは実際にどんなものなのか、あるいはどのように引張応力を伝達できるのかということに関しては研究例が少ない^{3), 7)}。それ故、粗骨材のクラック拘束のメカニズムを解明するための一助として、円柱状の疑似粗骨材を含む簡単なモデルコンクリート試験体を用いて、クラック進展に及ぼす骨材の影響について検討する。本報は、文献⁸⁾に、実験と考察を追加し、まとめたものである。

図-1 しきい値と AE 信号到達時間の関係

2. データ処理方法

2.1 計測装置

AE の計測装置は、受信用センサー、増幅器、収集・選別・記録装置によって構成されている。AE 計測に用いたセンサー、プリアンプ、ローカルプロセッサ、ウェーブメモリの主な仕様および設定値を表-1 に示す。

表-1 AE 計測装置の仕様および設定値

センサー	共振周波数	140kHz
プリアンプ	ハイパスフィルター	50kHz
	増幅	40dB
ローカル プロセッサ	増幅	20dB
	しきい値	0.2V
	デッドタイム	1msec
	コインシデンス	32 μsec
	ビークサーチタイム	64 μsec
ウェーブメモリ	リゾリューション	64 μsec
	振幅	1Vp-p
	サンプリング	100nsec
	波形長	1k word
	デレイ	-512 word

2.2 スペクトル解析法

本解析に用いたスペクトル推定法は、最大エントロピー法（以後、MEM と略す）である。信号処理において測定できるデータの数は有限であり、十分大きなラグに対する自己相関関数は未知である。それ故、高速フーリエ変換（以後、FFT と略す）によるスペクトル推定法では、データを補って処理するのである。一方 MEM では、未知のデータはできるだけ未知のままに、すなわち、信号の情報エントロピーをできるだけ大きくして、測定できるラグの自己相関関数からスペクトルを推定する。MEM は、FFT と比較すると、短いデータからもスペクトルの推定が可能であり、その分解能が極めて高いという優位性をもっている。また低い次数で解析を行うことにより、スペクトルが平滑化され、波形の特性を分類することができ、本研究の目的に適した方法であると考えられる。以下に、MEM の考え方を要約する⁹⁾。

最大エントロピーの概念をスペクトル解析に適用する場合、正規確率分布をもつ時系列のエントロピー H （正確にはエントロピー密度 h ）と時系列のスペクトル $P(f)$ の間の次の関係式を利用する^{10), 11)}。

$$h = \frac{1}{4f_N} \int_{-f_N}^{f_N} \log P(f) df + \frac{1}{2} \log 2f_N \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 f_N は Nyquist 周波数であり、(1) 式は、時系列のエントロピー密度が、その時系列のスペクトルの対数を周波数について、 f_N の範囲で積分した量であることを示している。スペクトルを計算するには、スペクトルと自己相関 $\phi(k)$ の関係（Wiener-Khinchine の関係式）

$$P(f) = \Delta t \sum_{k=-\infty}^{\infty} \phi(k) \exp(-i2\pi f k \Delta t) \quad \dots\dots (2)$$

を用いる。ここで、 Δt はデータのサンプリング間隔である。既知の自己相関 $\phi(0)$ 、 $\phi(1)$ 、 $\dots$ $\phi(m-1)$ に対しては (2) 式が成立するという制約のもとで、未知の自己相関に対して (1) 式を最大にするように推定するのが、MEM のスペクトル推定法である。この推定法は、未知の情報に対しては最大の不確定さを表すが、既知の情報に対しては整合性がある。条件付き変分法により、MEM スペクトルに対する次式が得られる^{10), 11)}。

$$P(f) = \frac{P_m}{2f_N \left| 1 + \sum_{j=1}^{m-1} \gamma_j \exp(-i2\pi f j \Delta t) \right|^2} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、係数 γ_j は予測誤差フィルター、 P_m はこのフィルターからの平均出力であり、Burg アルゴリズム¹²⁾によって効率的に計算できる。

3. 実験方法

3.1 試験体

試験体はモルタル、コンクリートおよび多孔質のアルミナセラミックスを疑似粗骨材としたモデルコンクリートの三種類である。さらにモデルコンクリートは、疑似粗骨材（厚さ 9mm のプレートまたは直径 15mm の円柱棒）の配置により、図-2 に示す 6 タイプを用意した。アルミナセラミックスの化学組成および物理的性質を表-2 に示す。アルミナセラミックスは、吸水率が大きいため、打設前に水に浸しておいた。また、アルミナセラミックスとモルタル間の 4 週曲げ試験による付着強度は、約 18kg/cm^2 であり、安山岩（約 14kg/cm^2 ）と花こう岩（約 22kg/cm^2 ）の付着強度のほぼ中間の値である。

試験体の調査を表-3 に示す。試験体は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の鋼製型枠で製作したが、打設から脱型迄の間、疑似粗骨材が正確な位置を保持できるように、テンプレートを用いて打設した。約 24 時間後に脱型、その後 20°C の恒温水槽に移して水中養生を行った。試験体は材令約 1 年で水槽から取り出し、AE 波形の減衰をできるだけ抑えるため、打設方向と直交する方向にダイヤモンドカッターで切断することによって幅を半分にした。したがって試験体寸法は、約 $50(\text{W})\times 100(\text{H})\times 400(\text{L})\text{mm}$ である。深さ 50 mm のノッチは、モルタルおよびコンクリートの場合は厚さ 1.2 mm のダイヤモンドカッターで導入し、モデルコンクリートの場合は、厚さ 0.8 mm のオイルを塗布したステンレスプレートを打設時に挿入することによって導入した。個々の試験体名は以下のように表す。

X-（試験体番号）+T または B

X は、モルタルおよびコンクリートの場合、それぞれ MT および CT とし、モデルコンクリートの場合、図-2 に示す各タイプの記号 (PL、A1、A2、S3、S4、S5) とする。最後の T または B は、縦割りした試験体が打設時の上半分または下半分を表す。

表-2 アルミナセラミックスの化学組成および物理的性質

化学組成	(%)	物理的性質	
Al_2O_3	90.0	比重	2.6
SiO_2	7.2	吸水率 (%)	13.0
Na_2O_3	0.5	耐圧強度 (kg/cm^2)	860.0
MgO	2.0	曲げ強度 (kg/cm^2)	280.0
Fe_2O_3	0.1	熱伝導率 ($\text{Kcal/mh}^\circ\text{C}$)	3.0
		熱膨張係数 (10^{-4})	5.8

表-3 試験体の調査

	水 (kg/m^3)	セメント (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)
コンクリート	194	353	700	1054
モルタル	323	587	1174	---
モデルコンクリート

図-2 疑似粗骨材（9mm厚プレートと15mm直径シリンダー）によるモデルコンクリートの種類と記号（図中の数値は、ノッチ先端を原点とした場合のシリンダーの中心座標 (mm)）

3.2 実験方法

載荷方法は、インストロン型 25ton 試験機を用いて、一定の変位速度 (0.005mm/min) で 3 点曲げ載荷を行った。荷重は 0.2kg 感度のロードセルで、また、鉛直変位 3 箇所は $1/2000\text{mm}$ 感度の変位計を用いて測定した。実験装置を図-3 に示す。また、実際のモデルコンクリート試験体の載荷の様子を写真-1 に示す。AE センサーを試験体に取り付ける必要があるため、以下 AE センサーの取り付け方法について述べる。

山田ら²⁾は、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を行い、瞬間接着剤でセンサーを直接試験体に装着した場合が最も減衰が少なく、最適な方法であると述べている。しかしながら瞬間接着剤を用いる場合、取り外しの際、センサーを壊す恐れがある。それ故、本実験では、瞬間接着剤と同じような密着性が得られる感熱接着剤を用いてセンサーを装着した。

AE 発生源の三次元位置標定を行う場合、同一平面上にない 4 個以上のセンサーが必要となるが、センサーの配置が三次元位置標定精度に影響を及ぼすと考えられる。そこで図-4 に示す 4 タイプのセンサー配置に対し、シャープペンシルの芯折による疑似 AE を用いて、三次元位置標定精度の検討を行った。疑似 AE は予測されるクラック経路上にを入力し、その標定結果を図-5, 6 に示す。ただし、AE 伝播速度は、疑似 AE を用いて測定した結果（モルタル、モデルコンクリートは 4000m/s 、コンクリートは 4500m/s ）を使用している。図-5 からわかるように、標定結果は、TYPE-3、4 より AE 発生源に近い配置となる TYPE-1、2 のほうが良く一致している。さらに図-6 から、TYPE-1 は試験体上面で、TYPE-2 は試験体背面で誤差が大きくなる傾向があるが、その他の誤差は $1\sim 2\text{mm}$ 以内である。それ故本実験では、TYPE-1 または 2 のセンサー配置で AE 信号を検出した。

図-3 実験装置

写真-1 A2型試験体と載荷装置

図-4 三次元位置標定精度検討用のセンサー配置

図-5 各種センサー配置による AE 源位置標定結果: PL-61B

図-6 AE 源位置標定結果 (TYPE-1 and TYPE-2): MT-B

4. 実験結果および考察

4.1 荷重-変位曲線

本実験により得られた荷重-変位曲線を図-7~11に示す。図-7から、プレート型のモデルコンクリートの荷重-変位曲線は、個々の試験体によって大きな相違がみられる。これは、個々の試験体の破断面の相違による(写真-2)。耐力の大きな PL-23B は、アルミナプレートの半分以上にモルタルが付着した破壊面となっているが、耐力の小さな PL-23T の破壊面は、モルタルはほとんど付着していない。図-8,9 から、円柱型の疑似粗骨材を用いたモデルコンクリート試験体は、一般に、打設時下半分の試験体(試験体名の最後が B)のほうが、上

半分の試験体（試験体名の最後がT）より耐力は大きくなっているが、最大耐力後の挙動は、よりなめらかな下に凸のモルタルに近い挙動となる。この原因も、両試験体の破断面の相違による（写真-2）。上半分の試験体は、モルタルと疑似粗骨材の境界面に沿ってクラックが進展し、破壊に至っている。一方、下半分の試験体は、モルタルと疑似粗骨材の付着強度が高く、境界面よりモルタルの中を進展するクラックが多くなり、よりなめらかな破壊面を形成している。したがって、モデルコンクリートに対して、定量的な考察を行うためには、破壊面の詳細な検討が必要になる。しかしながら、これらの図は骨材によるクラック拘束挙動を、定性的に説明しているといえる。すなわち、クラックが疑似粗骨材に到達した場合、骨材を迂回してクラックがさらに進展するためには、より多くのエネルギーが必要になる。それ故、最大耐力後において、プレート型のモデルコンクリートにはない上に凸の曲線がみられるようになり、図-11に示すコンクリートの荷重-変位曲線に近づく。本モデルコンクリート試験体は、ノッチの先端に骨材が存在しているため、Maji³⁾らのモデルコンクリート試験のように、はっきりした二つのピークは現れなかった。しかし初期剛性はモルタルとほぼ同じであるが、最大荷重の60~80%の荷重で剛性の低下が生じ、不連続な曲線となっている。この荷重-変位曲線の不連続性は、4週および1年で実験を行った全ての試験体（A型、S型）に対して見られ

た現象であるため、ノッチ先端の疑似粗骨材がその挙動に大きく影響していると考えられる。すなわち、疑似粗骨材がモルタルと完全に付着している間は、疑似粗骨材の剛性が支配的となるが、両者の境界面の最弱部に損傷が起きはじめると、モデルコンクリートは一般のコンクリートと異なり、その境界面が全幅貫通しているため、連続的にその境界面に損傷が起こり、一時的に荷重を保持したまま、変位が増大する現象となる。

(1) PL 型試験体の破断面 (2) A1 型試験体の破断面
写真-2 モデルコンクリートの破断面の例

(1) PL-23T

(2) PL-23B

図-7 荷重-変位曲線：PL-23T/PL-23B

(1) A1-2T

(2) A1-2B

図-8 荷重-変位曲線：A1-2T/A1-2B

図-9 荷重-変位曲線：S5-2T/S5-2B

図-10 荷重-変位曲線：MT-T/MT-B

図-11 荷重-変位曲線：CT-T/CT-B

4.2 三次元位置標定

(1) プレート型モデルコンクリート

三次元位置標定を行った結果を図-12に示す。標定位置は、破壊面（ノッチのほぼ延長面）を中心にかなりばらついている。そこで、しきい値を超えてからの512個/1波形のデジタルデータについて、2.2節で述べたAE波形解析を行った。MEMの欠点は、予測誤差フィルターの打ち切り次数（または項数） m を決定する合理的な基準のないことであつた。しかし、MEMと自己回帰式（以後、ARと略す）との関係が明らかにされたことから、ARについての赤池^{13), 14)}のfinal prediction error (FPE)によって、 m を決定できる。実際にはFPEがはっきりした極小値を示さない場合があるので、最適ラグ m は次の

範囲以内でFPEを最小にするように選ぶことが多い。

$$m < (2 \sim 3) \sqrt{N}$$

本解析では、 $N = 512$ であるから、 m は45～68以下となる。一般に次数 m が小さくなると、スペクトルはなめらかになる。 m を10、30、50と変えたときのスペクトルの変化の様子を、FFTによるスペクトルと一緒に図-13に示す。本解析では、スペクトルパターンの分類を容易にするために、 $m = 30$ のMEMによってスペクトルを推定する。

次数30でMEM解析を行った結果、得られた代表的なスペクトルパターンを、0～512kHzの範囲で図-14に示す。AE源の三次元位置標定の結果（図-12）から、150kHz付近と250～450kHzの2箇所にピークを持つAE

波形は、破壊面のその時点におけるほぼ最上位置からの信号であることがわかった。また、150kHz 付近に 1 箇所だけピークを持つ AE 波形は、実際の破壊面以外の位置および破壊面ではあるがその時点の最上位置より下側からの信号であった。したがって、2 箇所にはピークを持つ

図-12 3次元位置標定結果(全データ):PL-22B

AE 波形は処女破壊に対応する信号であると考えられ、これらの信号に対する AE 源を取り出すと、軟化領域の進展挙動をより明確に検討することができる。図-15 にその進展挙動を、各荷重段階毎に示す。図-15 から、PL-22B 試験体の軟化領域は、破壊面の左下より右上へ進展

(1) MEM スペクトルに 2 個のピークをもつ AE 波形

(2) MEM スペクトルに 1 個のピークをもつ AE 波形

図-14 MEM (M=30) による代表的なスペクトルパターン

(1) MEM スペクトル ($m=10$)

(2) MEM スペクトル ($m=30$)

(3) MEM スペクトル ($m=50$)

(4) FFT スペクトル

図-13 MEM スペクトルの項数 m による変化と FFT スペクトルの比較

している様子が読み取れる。写真-2と図-15より、2箇所にピークをもつAE波形は、アルミナプレートにモルタルが薄く（約1mm）付着した破壊面からの信号であり、付着したモルタルが厚くなると、2箇所にピークをもつAE信号は少なくなる。また、モルタルが付着していない破壊面からは、ほとんどAE信号が検出されなかった。

図-15 高周波成分をもつ AE 波形による
三次元位置標定結果: PL-22B

(2) 円柱型モデルコンクリート

円柱型モデルコンクリート（A1、A2、S3、S4、S5）の三次元位置標定結果を、各荷重段階ごとに図-16～20に示す。これらの図から、AE信号はクラックの先端付近ばかりでなく、クラック先端よりかなり後方においても発生し続けていることがわかる。これは、ダメージは受けているが、応力を伝達できるいわゆる軟化領域の広がりを見せていると考えられる。

同図の左下の図には、疑似粗骨材の位置と実際の破壊経路（太い点線）を示している。AEはほぼ破壊経路に沿って発生しているといえる。AE信号がモルタル中で多く、境界面で少ないのは、疑似粗骨材に付着したモルタルが少なかったためである（写真-2）。

なお、ほとんどのAE波形のスペクトルは、150kHz付近に1箇所だけピークを持つ形となり、スペクトルパターンによる評価はできなかった。したがって、AE波形の初期微動（到達時間）が明確なデータのみを用いて、位置標定を行った。

下半分の試験体は、先に述べたように、モルタルが厚く付着した破壊面となったため、2箇所にピークを持つAE信号は少なく、モルタル試験体のAE波形周波数特性と同様、100-200kHzに1箇所のピークを持つAE信号となった。

図-16 三次元位置標定結果と破壊経路: A1-2T

図-17 三次元位置標定結果と破壊経路: A2-2T

図-18 三次元位置標定結果と破壊経路: S3-2T

図-19 三次元位置標定結果と破壊経路: S4-2T

図-20 三次元位置標定結果と破壊経路: S5-2T

(3) モルタルおよびコンクリート

モルタルおよびコンクリートの三次元位置標定結果を、各荷重段階ごとに図-21および22に示す。モデルコンクリートと同様に、AE信号はクラックの先端付近ばかりでなく、クラック先端よりかなり後方においても発生し続けており、軟化領域の広がりを見せている。モデルコンクリートのような弱い境界面がないため、AE信号はより多数発生している。コンクリートのAE発生位置は、モルタルほど一様ではなく、骨材位置に起因したと思われる偏在が見られる。

図-21 モルタル試験体の三次元位置標定結果: MT-B

図-22 コンクリート試験体の三次元位置標定結果: CT-B

5. まとめ

本論文では、円柱状の疑似粗骨材を含む簡単なモデルコンクリート試験体を用いて、クラック進展に及ぼす骨材の影響を検討した。また、軟化領域の進展および大きさを推定するために、アコースティック・エミッションを計測し、3次元位置標定およびスペクトル解析を行った。これから以下の結論を得た。

- (1) モデルコンクリートに対して、定量的な考察を行うためには、破壊面の詳細な検討が必要である。
- (2) クラックが疑似粗骨材に到達した場合、骨材を迂回してクラックがさらに進展するためには、より多くのエネルギーが必要になるため、最大耐力後において、上に凸の曲線がみられるようになる。このような骨材によるクラック拘束挙動が多数重なり合うことによって、コンクリートのような最大耐力後の抵抗力が得られる。
- (3) 本モデルコンクリート試験体は、ノッチ先端の疑似粗骨材が初期剛性に寄与するが、最大荷重の60～80%の荷重で、疑似粗骨材とモルタルの境界面の損傷が大きくなり、その境界面の剛性が支配的になるため、剛性の低下が生じ、不連続な曲線となる。
- (4) プレート型モデルコンクリートの場合、AE波形のスペクトル解析(MEM)によって、軟化領域内の処女破壊と考えられる2箇所のピークをもつAE波形を識別することができ、その進展挙動を示した。このAE波形は、アルミナプレートにモルタルが薄く付着した破壊面からの信号であった。
- (5) 円柱型モデルコンクリートの場合、スペクトル解析によるAE波形の識別はできなかったが、到達時間の明確なAE波形を用いることによって、精度の良い位置標定を行うことができた。
- (6) モルタルおよびコンクリートの場合、モデルコンクリートのような弱い境界面がないため、AE信号はより多数発生し、最大耐力後の抵抗力も大きい。
- (7) AE信号はクラックの先端付近ばかりでなく、クラック先端よりかなり後方においても発生し続けており、軟化領域の広がりを示している。文献6)に示すように、その領域をマイクロクラッキング領域とブリッジング領域に分けた場合、クラック先端より後方からの信号は、後者に対応するものと思われる。したがって、AE源の3次元位置標定により、軟化領域の大きさを評価できる。

- (8) 本論文で行ったスペクトル解析では、プレート型モデルコンクリート以外のAE波形を分類することができなかった。AE波形をより詳細に分類するためには、今後、原波形解析等を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 小林昭一、大津政康：アコースティック・エミッションのコンクリート工学への応用；コンクリート工学, Vol.16, No.7, pp.9-17, 1978
- 2) 山田和夫、小阪義夫：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；材料, 第36巻, 第406号, pp.38-44, 昭和62年
- 3) A. Maji and S. P. Shah ; Process Zone and Acoustic-Emission Measurements in Concrete, *Experimental Mechanics*, Vol.28, pp.27-33, 1988
- 4) P. Rossi, J. L. Robert, J. P. Gervais and D. Bruhat ; Acoustic emission applied to study crack propagation in concrete, *Materials and Structures*, Vol.22, pp.374-384, 1989
- 5) M. Ohtsu, M. Shigeishi, H. Iwase and W. Koyanagi ; Determination of crack location, type and orientation in concrete structures by acoustic emission, *Magazine of Concrete Research*, Vol.43, pp.127-134, 1991
- 6) 篠原保二、安部武雄、古村福次郎：ノッチ深さ、載荷速度、骨材寸法、水セメント比、載荷法、養生および材令がコンクリート曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響；日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp.13～22, 1992
- 7) H. Duda; Grain-Model for the Determination of the Stress-Crack-Width-Relation, in *Analysis of Concrete Structures by Fracture Mechanics*, ed. by L. Elfgren and S. P. Shah, Chapman and Hall, pp.88-96, 1991
- 8) 篠原保二、安部武雄、古村福次郎：アコースティック・エミッションのスペクトル分析による破壊進行領域の推定法；日本建築学会大会学術講演梗概集A, PP.243～244, 1993
- 9) J. Ulrych and T. N. Bishop ; Maximum Entropy Spectral Analysis and Autoregressive Decomposition, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol.13, pp.183-200, 1975
- 10) D. E. Smylie, G. K. C. Clarke and T. J. Ulrych ; Analysis of Irregularities in the Earth's Rotation, *Methods in Computational Physics*, Vol.13, pp.391-430, 1973
- 11) 日野幹雄：スペクトル解析；朝倉書店, 1977
- 12) J. P. Burg ; Maximum Entropy Spectral Analysis, *Proceedings of the 37th Meeting of the Society of Exploration Geophysicists*, 1967
- 13) H. Akaike ; Fitting autoregressive models for prediction, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, Vol.21, pp.243-247, 1969
- 14) H. Akaike ; Power spectrum estimation through autoregressive model fitting, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, Vol.21, pp.407-419, 1969

(1994年2月2日原稿受理, 1994年10月14日採用決定)