

コンクリートにおけるアコースティックエミッションの適用に関する基礎的研究

久米 国幹・徳富 久二・迫田 順一
(受理 昭和60年5月31日)

MEASUREMENT AND APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION ON CONCRETE

Kunimoto KUME, Hisashi TOKUTOMI and Junichi SAKODA

Acoustic Emission (AE) is an elastic wave which is caused by loading from microscopic cracks in materials. AE is used to estimate the characteristics of cracks in material. An investigation of the time at which failure begins and an estimation of maximum load which the materials had been applied using AE is not sufficient to completely understand brittle materials such as concrete.

To obtain basic data in order to make use of AE for concrete, the authors have studied this problem, and conclude that it is possible to estimate the maximum load which acts upon a structure and to estimate the degree of damage in the structure using Kaiser's Effect of AE.

§1 序

アコースティックエミッション (以下 AE と略す) は固体材料が変形あるいは破壊する際に、それまで貯えられていた歪エネルギーが解放され、音響パルスとなって伝播する現象をいう。AE の応用は、破壊源の探査、亀裂進行の観察、最大応力の推定など幅広い応用分野が考えられるが、雑音による弊害、発生機構が定量的に解明されていないことや、定量的データの比較とその蓄積が少ないなどにより、金属材料への応用を除き、まだよく利用されていない。コンクリート材料など脆性材料への応用は今後急速に発展すると考えられる¹⁾。コンクリート材料に対する AE の研究は近年、破壊源の位置標定、波動特性などの理論的研究が勢力的に行われている^{2),3)}。我々は AE を脆性材料、特にコンクリートに適用する場合を念頭に、種々の実験を試みており、本報告は、コンクリートを中心にした各種の脆性材料の強度と各種の AE 特性値の関係について実験し、現段階における AE 利用の可能性について検討したものである。

§2 目的、実験方法

固体内部で発生する微小破壊により AE が発生することは、強度が微小破壊の発展形態にあると考えられるので、強度と AE の特性の間に相関があるものと想定される。工学的な基本尺度としての強度が、AE 特性と鋭敏に対応するものか、その逆に対応関係が鈍るものか、は興味あるところであり、その対応関係によって、AE の利用法の一部が決まってくる。例えば、低応力時の AE 特性と最終強度との対応が採れるとき、非破壊による低応力時の AE 計測によって強度が推定できる道が拓ける。その逆に対応関係が無ければ建築材料・構造への利用法に限界があることを示している。

AE の特性の一つであるカイザー効果の利用は他の試験法にない特徴である。カイザー効果とは、予め荷重が作用している材料に、新たに別の荷重を作用させて AE 計測を行うとき、先に作用した荷重までは AE の発生がない現象をいう。延性金属材料では明瞭にこのカイザー効果が認められる。しかし、脆性材料特にコンクリート (使用材料及び強度が異なる場合を含め) においてカイザー効果が確認できるか検討の必

要がある。すなわち、脆性材料に対する AE の実用的利用の研究は極めて少なく、その実績は緒についたばかりである。本報では、コンクリートを中心とした各種脆性材料の AE 特性を観測し、その結果をもとに、先ず、コンクリート等脆性材料への AE 利用の可能性を探ることを目的とした基礎的研究である。

以下、実験方法について述べる。

2. 1 各種の脆性材料における AE 波形観測

各種の脆性材料に対する AE 波の発生形態に特徴が生じるか、強度の異なる脆性材料について観測する。

使用した供試体は、ガラス、コンクリート、モルタル、砂-石コウの混合供試体の 4 種類である。コンクリートは、水セメント比 40, 50, 60% の碎石 AE コンクリート (碎石の最大粒径 10 mm) である。調査表を表-1 に示す。モルタルは最大粒径 5 mm の普通

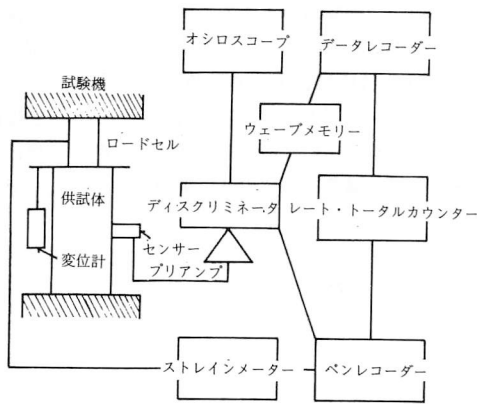
表・1 コンクリートの調査表

水セメント比	単位水量	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40%	209	523	590	940	0.209
50%	197	394	728	940	0.158
60%	193	321	799	940	0.128

(kg/m³)

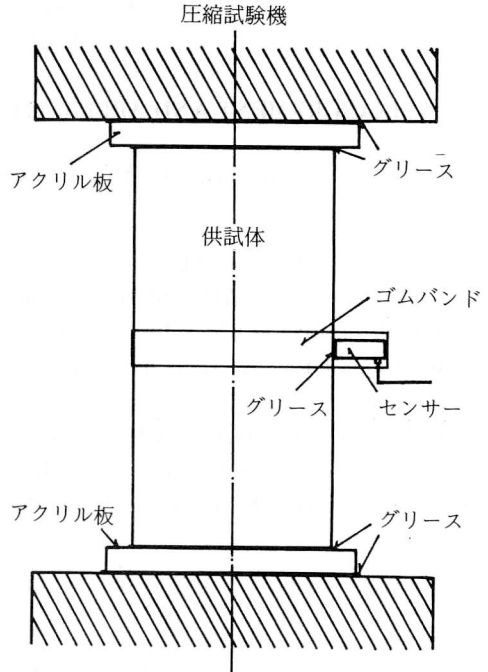
砂を使用し、水セメント比を 60% とした。砂-石コウ供試体は、水・石コウ、砂の重量比が 1:1:3 の混合によるものである。ガラス供試体は、直径 5 cm、高さ 10 cm のガラス円柱について行った。

計測システムを図-1 に示す。供試体に取り付けた



図・1 AE計測システム

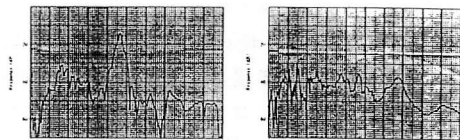
AE センサーをプリアンプ (前置増幅器)、ディスクリミネーター (振幅弁別器) を通して、AE 波をオシロスコープで観察すると共に、ウェーブメモリにより波形を記録する。これをデータレコーダに再録し、実験終了後、AD 交換を行い計算機によって処理する。図-2 は供試体へのセンサー取付け方法を示す。試験



図・2 供試体へのセンサー取付

機からの雑音を消去するために、上下の試験機載荷板と供試体間両面にグリースを塗ったアクリル板を挿入した。この方法は、種々の予備実験を試みた中で、供試体外から入力される AE 波 (雑音) を最も少なくする手法である。また、供試体と AE センサーの取付け部にも両者の間にグリースを塗り、ゴムバンドで緊結する。

センサーの周波数特性を図-3 に示す。使用したセ



AE-904S (a) AE-905S (b)

図・3 AEセンサーの周波数特性

ンサーは、共振周波数 (460 KHZ) をもつ 904S と 1MHz 周波数 (1MHZ) を持つ 905S の 2 種類であり、チタン酸ジルコン酸圧電セラミックスである。

2. 2 コンクリートの種類と AE 特性

ここでは、脆性材料中、建築材料として最も利用されるコンクリートに関して、AE 特性との相関性を検討する。前述のように AE は固体内部の微小破壊を忠実に表現できるものと考えられる。これは、コンクリートの強度がグリフィスの引張破壊過程と対応すると考えられ⁴⁾、したがってコンクリートの強度と AE 特性の間には対応関係が存在することになる。また一方では、低応力レベルで発生するボンドクラックやモルタルクラックの成長は、コンクリートの最終強度と直接的には関係しないと言われているが、これらの事実は確認されるに至っていない。AE を適用して、これらの相反する考え方を確認し、かつ AE 利用の可能性を検討するものである。

コンクリート供試体の種類は、水セメント比が 45, 55, 65 % の 3 水準をとり、骨材の種類は普通骨材、人工軽量骨材、天然軽量骨材 3 種類の組合せについて実験した。強度に関して、これら 9 種類は分離できることを予測し、コンクリート強度を判別すると同程度に、どの AE 特性が分離可能であるかを検討する。計測項目はレート・トータルカウンターによる AE 発生数、すなわち 1 秒間に発生する計数率および載荷開始より計数率を累積した、計数総数である。AE 信号の発生率、累積数などの信号処理法は、振動波形を振幅弁別器において、一定の敷居値で弁別してパルスを作り出す。そのパルスの変換方式にはリングダウン計数法とイベント計数法とがある。リングダウン計数法は、敷居値を越えた波の数を全部パルスに変換する方法であり、振幅に対する重みづけがなされる。イベント計数法は原信号を包絡線検波または休止時間を設けて、イベントとして取り扱う方法である。本実験は、リングダウン方式の計数率、計数総数である。敷居値は、機械雑音の入らない程度にディスクリレベルを上げることにより設定される。一連の実験のはじめにディスクリレベルを設定し、このレベルは実験終了まで同一のレベルを保持する。

実験手順は、供試体を圧縮試験機に設置後、前置増幅器 (プリアンプ)、振幅弁別器 (ディスクリミネータ) にフィルターをかける。ディスクリミネータは、ハイパスフィルターの遮断周波数が FLAT, 100K,

300K 及び 1MHZ の 4 段階切換えであり、ローパスフィルターのそれは FLAT, 300K, 1MHZ の 3 段階切換えであって、これにより 100HZ~1MHZ のバイパスで実験を行った。

2. 3 コンクリートのカイザー効果

カイザー効果が AE 特性の突出した特徴であり、コンクリート工学上、このカイザー効果の利用は AE の最大の利用法であると思われる。コンクリート構造物が、地震その他の外力により損傷を受けた場合、その程度を診断し、対策を講じる際に材料の応力履歴を把握することが必要である。カイザー効果を利用するとき、この応力履歴を見ることができる。

コンクリートについて、このカイザー効果が現れるという計測結果があるが¹⁾、各種のコンクリートについて明瞭にカイザー効果が現れるものとする実験例は少ない。本報告では、コンクリートへのカイザー効果の利用に関する基礎的研究として、各種のコンクリートについてカイザー効果を確認する実験を行った。

供試体は、前章で述べた、9種類の各種コンクリートである。

供試体に破壊荷重に到達しない一定荷重を作用させその間に発生する AE を計測する。次に除荷し、再載荷するときの AE の発生状況を観察する。

§3 実験結果および考察

3. 1 各種脆性材料と AE 波

図-4は、ガラス、コンクリート、モルタル、砂-

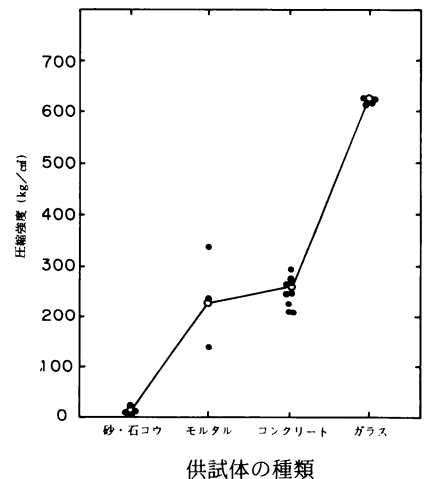
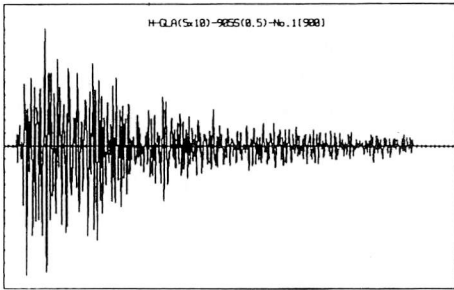


図4 供試体の圧縮強度

石コウ混合供試体の圧縮強度である。これらの強度を分散分析し、水準間検定すると、コンクリートとモルタル間には強度の差は生じない結果を示したが、他の材料間、例えば、コンクリートとガラス、およびガラスとモルタルの各二者の間には、高度に有意な差(危険率1%)を生じている。

以上の圧縮強度を持つ脆性材料に対して AE 波の分析を行う。図-5は AE 波の例(ガラス)を示す。



図・5 AE波(ガラス供試体)

解析された特性値は、フーリエ近似による卓越周波数である。波形解析は通常のスペクトル解析法であり、詳しくは文献⁵⁾による。表-2は、AE センサー 904S

表・2 フーリエ近似による卓越周波数
(a) センサー904S

種類	コンクリート	モルタル	砂・石コウ	ガラス
周波数	480 280	110	130	470
	90 140	170	460	140
	460 170	180	220	460
	240 470		230	
	130			
平均	273	158	260	357

(KHz)

(b) センサー905S

種類	コンクリート	モルタル	砂・石コウ	ガラス
周波数	190 230	210	200	310
	310 230	210	200	300
	310 230	230	210	310
	300 230		200	
	200			
平均	248	217	230	307

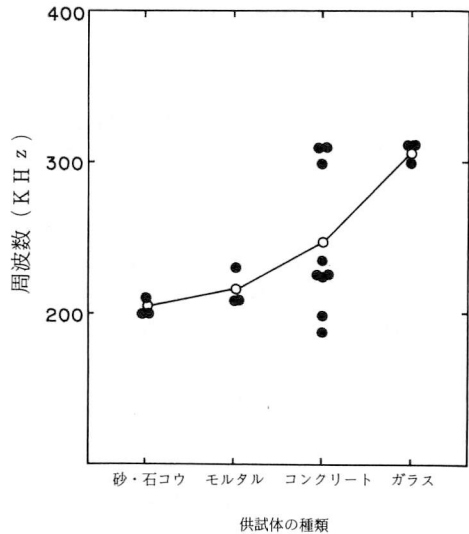
(KHz)

と 905S による計測結果の卓越周波数である。センサー 904S はバラツキが大きく、460KHZ に共振特性を持つため、この成分が強調される結果となる。904S の結果を分散分析すると、各材料間に有意差は生じない。表-3は、905S の水準間検定の結果を示

表・3 フーリエ近似による卓越周波数(905S)の水準間検定結果

種類	コンクリート	モルタル	砂・石コウ	ガラス
コンクリート				
モルタル	31			
砂・石コウ	45**	14		
ガラス	59*	90**	104**	

す。コンクリートとモルタル間、モルタルと砂-石コウ間には有意差は生じないが、その他の間には有意差(危険率5%)を生じる。すなわち強度による有意判定より鈍るが、定性的傾向は示している。これらの事情を図-6に示す。強度が大きいかほど卓越周波数は高



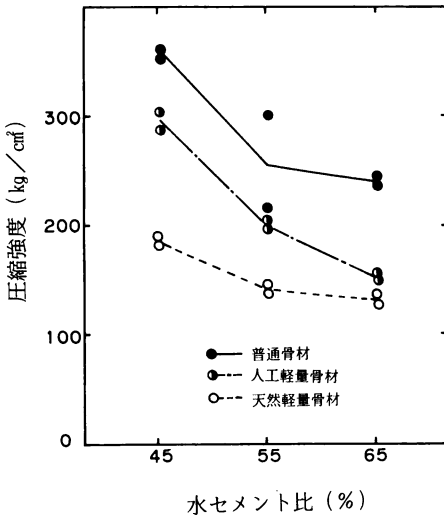
図・6 AE卓越周波数と各種材料の関係

く、感覚と一致する。AE センサーの種類によって、周波数による分離能力に差異があり、計測範囲内で顕著なピークをもたない 905S センサーの方が、AE 計測には、適当であることがわかる。

3. 2 コンクリートの種類と AE 特性

各種のコンクリート間での AE 特性の分離能力が、建築材料を取り扱う立場から考えると興味あるところであり、ここでは、普通コンクリートと軽量コンクリートについて、さらに同一種類の普通コンクリートで水セメント比の異なった供試体について、AE 計測を行い、その結果を検討する。

図-7 は、骨材の種類と水セメント比およびそれら



図・7 骨材・水セメント比の種類によるコンクリート強度

の圧縮強度の関係を示す。この結果を分散分析すると表-4 のようになり、骨材の種類間（普通骨材、天然

表・4 分散分析結果

要因	平方和	自由度	分散	分散比	F0.05	F0.01
骨材の種類	50736	2	25368	54.3**	4.26	8.02
水セメント比	36624	2	18312	39.2**	4.26	8.02
交互作用	5374	4	1344	2.9	3.63	6.42
誤差	4199	9	467			
計	96933	17				

軽量骨材, 人工軽量骨材), および水セメント比間 (45, 55, 65%) に高度な有意差があることを示す。このコンクリート供試体を使用して AE 計測を行う。AE 特性値は、計数率と計数総数である。

計数率, 計数総数について、材料の破壊最大荷重に對する 30, 50, 80% の各荷重時の AE 特性 (ここで

は計数率, 計数総数) を比較, 分析した。圧縮強度について分離できるほど, AE 特性について分離能力がある結果は生じない。最大応力の 80% 応力時の計数率に有意差が生じる。表-5 にその結果を, 表-6 に

表・5 最大応力の80%載荷時の計数率

水セメント比	45	55	65	平均
普通骨材 1	249	355	(233)	
2	239	340	233	
平均	244	348	233	275
天然軽量骨材 1	230	240	(225)	
2	190	239	225	
平均	210	240	225	225
人工軽量骨材 1	270	200	(233)	
2	232	300	233	
平均	251	250	233	245
平均	235	279	230	248

表・6 分散分析結果

要因	平方和	自由度	分散	分散比	F0.05	F0.01
骨材の種類	8298	2	4149	5.86*	4.26	8.02
水セメント比	8724	2	4362	6.16*	4.26	8.02
交互作用	8474	4	2119	2.99	3.63	6.42
誤差	6369	9	708			
計	31865	17				

分散分析の結果を示す。分散分析結果に有意差が生じててもその傾向は、図-6 の強度の傾向とは対応せず、分離能力はないことを示す。この結果はセンサー 904S を使用したことによるものと考えられる。この実験は、3. 1 の周波数分析の実験と同時期に行われ、AE センサーにより、分離能力の差異を検討する前に行われたものである。

追実験の意味も含めて、AE センサー 905S による普通コンクリート 1 種類において、計数率, 計数総数に関する AE 計測実験を行った。供試体の水セメント比は、先に述べた調合表の 40, 50, 60% である。この実験結果も、最大荷重の 30, および 50% 時の荷重における計数率, 計数総数ともに水セメント比間に有意な差は生ぜず、分離能力は悪い結果を示した。しかし、最大荷重の 80% 応力時では、一定の傾向を示

し、表-7が、80%応力時の計数率(a)、および計数総数(b)である。これらの結果は、図-8に示す

表・7 計数率・計数総数と水セメント比(最大応力の80%荷重時)

(a) 計数率と水セメント比

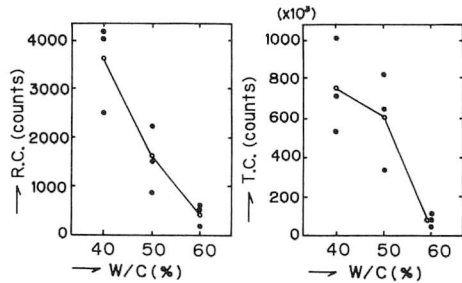
水セメント比	40%	50%	60%
計数率	2542	825	568
	4016	1513	255
	4248	2237	634
平均	3602	1525	486

(counts/s)

(b) 計数総数と水セメント比

水セメント比	40	50	60
計数総数	719	338	63
	552	656	109
	1017	818	88
平均	763	604	87

(x 1000 counts)



計数率と水セメント比 計数総数と水セメント比

図・8 計数率・計数総数と水セメント比(最大応力の80%荷重時)

ように、計数率(R.C.)では、水セメント比が40%と50%、40%と60%間で高度の有意差(危険率1%)を生じるが、50%と60%間では差は認められない。計数総数(T.C.)では、40%と60%間、また、50%と60%間に、それぞれ高度の有意差を生じる。40%と50%間では有意差を生じない。

表・8 水準間検定結果

(a) 計数率の水準間検定

水比水準	40%	50%	60%
40%			
50%	2077**		
60%	3116**	1039	

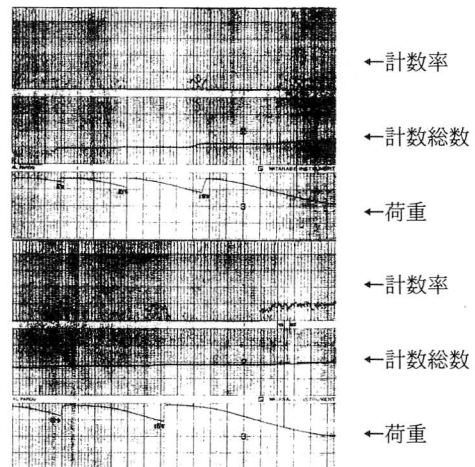
(b) 計数総数の水準間検定

水比水準	40%	50%	60%
40%			
50%	159**		
60%	676**	517**	

以上、AEセンサーの種類にも関係するが、現在のところ、圧縮強度に明瞭な差が存在する供試体を使って、コンクリートに関するAE計測を行っても、分離の程度は鈍り、定性的判断の程度を越えず、強度、あるいは、材料の性質に関する利用の限界を示すものと考えられる。また、低応力レベルでのAE特性で分離能力がないことは、低応力レベルでのボンドクラックやモルタルクラックの発生が、コンクリート圧縮強度と直接的には対応するものではないことを示し、破壊過程の考え方として興味ある結果を生じた。

3.3 コンクリートのカイザー効果

本実験は、コンクリートのカイザー効果を各種のコンクリートについて確認する実験であり、図-9がそ



図・9 カイザー効果

これらの結果の一例である。作用させた荷重との対応結果を示す。

供試体に繰り返しの荷重を作用させたとき、それ以前に作用した荷重までは、AE が発生せず、明瞭にカイザー効果を示すことがわかる。

§4 ま と め

アコースティックエミッションを脆性材料、特にコンクリート材料へ実用的に利用しようとするとき、AE 特性のどのような性質を使用するか。その方針を決定するために、既存の工学的物理量、特に強度との対応が統計的に採れることを目標とした、本実験の結果は、定性的な対応は採れるものの、低応力負荷により材料の強度を推定するなどの定量的対応は現在のところ採れず、利用には限界があることを示す。しかし、AE を連続的に構造物に設置する健全性に関する診断には、キレツの増大の程度が明確にわかることを考えると有効であろう。

コンクリート材料に AE を適用するための最大の利用法は、カイザー効果であることが判明した。コンクリートの種類にかかわらず、カイザー効果は明瞭に

現れ、これを利用することにより材料が過去に受けた応力を推定することができる。力学的損傷を受けた構造物の健全性の診断、ならびに、損傷程度の推定などに有効であることがわかる。本報告はその基礎的研究である。

参考文献

- 1) 尾上守夫著, アコースティックエミッションの基礎と応用
- 2) 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, №7, 1978. 7
- 3) 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, 第261号, 1977. 5
- 4) 藤松 進・徳富久二, コンクリートの破壊条件に関する“位相化面モーメント仮説”, 日本建築学会論文報告集, 第219号, 昭和49年5月
- 5) 大崎順彦著, 地震動のスペクトル解析入門