

# AE法を適用したコンクリートの劣化度評価 に関する実験的研究

(Part 2 : 繰返し載荷および加熱によって劣化したコンクリート)

## EXPERIMENTAL STUDY ON DAMAGE EVALUATION OF CONCRETE BY ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE (PART 2 : CONCRETE DAMAGED BY CYCLIC LOADING AND HEATING)

山田 和夫  
Kazuo YAMADA

*Abstract* In this study, the acoustic emission method was applied to the damage evaluation of concrete subjected to cyclic loading and heating. Following results were obtained in this study:

1) In the case of concrete damaged at an early age, the AE activity is hardly affected by the damage, because the reaction of hydration proceeds sufficiently after damaged and then the micro crack disappears. Accordingly, it is necessary to choose the concrete damaged at the age having sufficient hydration, so as to predict exactly the concrete damage by the AE method.

2) The damage valuation of mortar damaged by heating can be estimated by the accumulative AE events measured until maximum load, but that of concrete is very difficult, because the AE activity is also affected by the coarse aggregate.

3) In the case of specimen tested immediately after damaged, it is difficult to evaluate exactly the deterioration of the concrete, because the AE activity is also affected by Kaiser effect. The deterioration of concrete aged moderately from the initial loading can be evaluated accurately by using the amplitude distributions measured at each stress level.

### 1. はじめに

筆者らは、従来からアコースティック・エミッション (Acoustic Emission、以下では単にAEと略記する) 法のコンクリート分野への適用性を検討するために、カイザー効果を含む静的載荷時と繰返し載荷時のAE挙動やAEの周波数特性など、コンクリ

ート内部で発生するAEの基礎的特性を調査するとともに、AE法による破壊源探査を適用したコンクリートの微視的破壊過程の追跡やAEの源波形解析などを試みてきた<sup>1)~6)</sup>。また、別報<sup>7)</sup>では、AE法のコンクリートの非破壊試験法への適用性を調べるための基礎的研究として、水和反応が十分進行した長期材令下のコンクリートの劣化度評価を対象として、AEの発生状況と劣化度との関係について調査を行い、その可能性について検討を行った。本研

究では、別報<sup>7)</sup>からの継続実験として劣化後1年経過したコンクリート、新たに繰返し載荷および加熱によって劣化したコンクリートおよびモルタルを対象として、A E法によるコンクリートの劣化度評価の可能性・適用性について実験的に検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験の概要

本研究では、目的に応じて以下に示す3シリーズの実験を行った。

1) 実験-I: 本実験は、定ひずみ繰返し載荷によって劣化したコンクリートの劣化度評価を目的としたもので、実験要因として養生方法(空中養生および水中養生の2種類)、繰返し上限ひずみ度(1軸圧縮強度に対する相対応力度( $\sigma/f_c$ )が0、80および90%となるひずみ度の3種類)、初期繰返し載荷材令(1週および6週の2種類)、並びに初期繰返し載荷から再載荷までの期間(0、1ヶ月および3ヶ月の3種類)を取り上げた。なお、繰返し回数は一律に10回とし、試験体として $\phi 10 \times 20$ cmの円柱試験体を使用した。本実験の概要を表-1(a)に示す。

表-1 実験の概要  
(a) 実験-I

W/C (%)	養生方法	$\sigma/f_c^{1)}$ (%)	Age-1 <sup>2)</sup> (週)	Age-2 <sup>3)</sup> (月)
60	空中 水中	0		0
		80	1	1
		90	6	3

[注]1): 繰返し上限ひずみ度に対応した相対応力度、  
2): 初期繰返し材令、  
3): 初期繰返し載荷からの期間。

(b) 実験-II

W/C (%)	材料	加熱温度 (°C)
60	コンクリート モルタル	無加熱, 100, 200, 300, 400

(c) 実験-III

W/C (%)	養生方法	$\sigma/f_c^{1)}$ (%)	Age <sup>2)</sup> (週)
60	空中	0, 30,	(0, 1, 2, 4) <sup>3)</sup>
	水中	50, 70	12, 26, 52

[注]1): 初期載荷相対応力度、  
2): 初期載荷からの期間、  
3): 括弧内の数値は前報[7]で報告したものであることを示す。

2) 実験-II: 本実験は、加熱によって劣化したコンクリートおよびモルタルの劣化度評価を目的としたもので、実験要因として試験体の種類(コンクリートとモルタルの2種類)および加熱温度(無加熱、100、200、300および400°Cの5種類)を取り上げた。なお、加熱材令、加熱時間および加熱後試験までの期間は、それぞれ8週、15分および1週とし、養生方法は空中養生とした。また、試験体として $4 \times 4 \times 16$ cmの横打ち角柱体を用いた。本実験の概要を表-1(b)に示す。

3) 実験-III: 本実験は、別報<sup>7)</sup>からの継続実験であり、劣化後12週以上経過したコンクリートの劣化度評価を対象として、養生方法(空中養生と水中養生の2種類)、初期載荷応力レベル(1軸圧縮強度に対する相対応力度( $\sigma/f_c$ )が0、30、50および70%の4種類)、並びに初期載荷から再載荷までの期間(12、26および52週の3種類)を実験要因として取り上げた。なお、試験体として $\phi 10 \times 20$ cmの円柱試験体を使用した。本実験の概要を表-1(c)に示す。

### 2.2 試験体の製作および養生方法

実験-I、IIおよびIIIで使用した材料は、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(最大寸法=5mm、比重=2.60)および天竜川産の川砂利(最大寸法=20mm、比重=2.65)である。コンクリートの調査は、水セメント比(W/C)を0.6、設計スランブを18cmとし、またモルタルの調査は、W/Cを0.6、設計フロー値を材料が分離しない範囲でできる限り大きくなるように設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートおよびモルタルの標準調査表、実測スランブおよびフロー値を表-2に示す。なお、試験体は、実験の種類に応じて試験時まで所定の養生を行った。

表-2 調査表  
(a) コンクリート

W/C (%)	標準調査(kg/m <sup>3</sup> )				スランブ (cm)
	水	セメント	砂	砂利	
60	200	333	740	1060	17.0

(b) モルタル

W/C (%)	標準調査(kg/m <sup>3</sup> )			フロー値
	水	セメント	砂	
60	352	587	1174	242

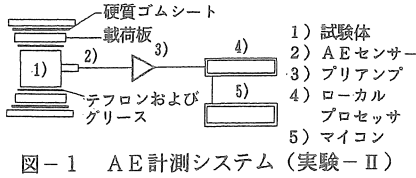


図-1 AE計測システム (実験-II)

2.3 測定・処理方法

本実験で用いたAE計測システム、圧縮試験方法およびデータ処理方法は、いずれも別報<sup>7)</sup>と同様である。ただし、実験-IIの圧縮試験に際しては、試験体端面と載荷板との接触に起因したAEが他の実験と比較してかなり多く発生したため、図-1に示すように、厚さ3mmの硬質ゴムシート以外に試験体と載荷板との間にテフロンシートおよびグリースを挿入して載荷試験を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 繰返し載荷によって劣化した場合

(実験-I)

(1) 強度特性および累積AEイベント数

表-3は、本実験で得られた圧縮強度と最大耐力時まで発生した累積AEイベント数を一覧表にして示したものである。この表によれば、材令1週の時点で繰返し載荷を行った試験体の場合、その直後の残存強度は、養生方法にかかわらずほぼ同じ値を示しているが、1および3ヶ月経過後の残存強度は、繰返し直後の残存強度に比べてかなり増加している。

表-3 圧縮強度および累積AEイベント数に関する実測結果 (実験-I)

養生方法	目標 $\sigma/f_c$ (%)	初期載荷 <sup>1)</sup> からの期間 (月)			初期載荷 <sup>2)</sup> からの期間 (月)		
		0	1	3	0	1	3
空 中	0	168 1734	197 4472	238 5961	240 2525	228 6520	235 6575
	80	150 1048	202 2155	234 6657	218 2255	236 7518	232 9225
	90	145 827	207 2717	236 4981	253 1853	170 4420	231 9243
水 中	0	156 1318	261 1607	264 2026	212 2855	224 7874	236 2649
	80	165 1257	256 1021	257 1825	222 2241	210 7763	228 4987
	90	166 1326	234 1060	247 1218	177 1287	216 6101	256 4561

[注] 上段の値は圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、下段の値は累積AEイベント数を示す。  
1): 材令1週で初期載荷を行った場合、  
2): 材令6週で初期載荷を行った場合。

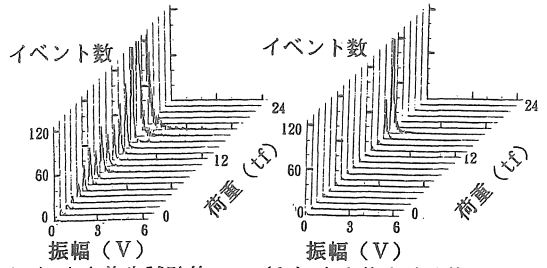


図-2 AE振幅分布 (Age-1=1週, Age-2=3月,  $\sigma/f_c=90%$ , 実験-I)

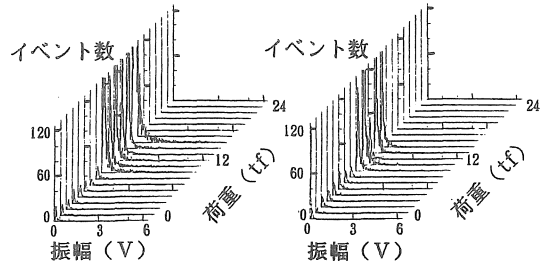
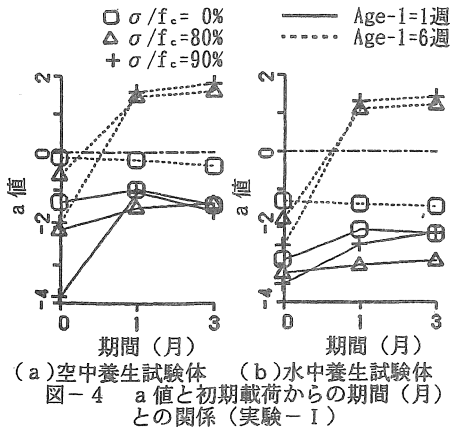


図-3 AE振幅分布 (Age-1=6週, Age-2=3月,  $\sigma/f_c=90%$ , 実験-I)

これに対して、材令6週の時点での繰返し載荷を行った試験体の残存強度は、その後の経過期間および養生方法によって殆ど影響を受けていないのがわかる。一方、累積AEイベントは、初期載荷直後に再載荷を行った試験体の場合、養生方法および初期載荷材令にかかわらずほぼ同じ値を示しているが、初期載荷後一定期間経過すると、水中養生試験体の累積AEイベント数は、一般的に空中養生時の値よりもかなり少なくなる傾向を示している。

(2) 振幅分布

図-2は、材令1週で繰返し初期載荷を行い、3ヶ月後に再載荷を行った試験体によって得られたAEの振幅分布の一例を養生方法別に示したものである。図によれば、空中養生を行った試験体 (図(a)参照) の振幅分布は、一般に載荷初期から比較的規模の大きなAEが発生し、中応力レベルになるとAEが頻発するようになり、高応力レベルになるとAEはさらに頻発して試験体が最終的な破壊に至っているのがわかる。これに対して、水中養生を行った試験体 (図(b)参照) では、中応力レベルまではAEは殆ど発生せず、高応力レベルになるとAEが頻発し始め、その規模も応力レベルの増加とともに増大して破壊に至っている。一方、図-3は、材令6



週で繰返し荷重を行い、3ヶ月後に再荷重を行った試験体によって得られた結果の一例であるが、この試験体の場合には、養生方法にかかわらず中応力レベルからAEが頻発して破壊に至っている。

(3) AEの発生状況

図-4(a)および(b)は、それぞれ空中養生および水中養生を行った試験体によって得られた式(1) (文献[7]参照)中の実験定数a値と初期荷重からの経過期間との関係を初期荷重材令および繰返し上限ひずみ度別に示したものである。

$$N = C \cdot V^a \cdot e^{bx} \quad \dots (1)$$

- ここに、V：相対応力レベル、
- N：相対応力レベルVまでに発生した累積AEイベント数、
- a：実験定数、
- b：実験定数、
- C：定数。

これらの図によれば、初期荷重直後に再荷重を行った場合のa値は、いずれも負の値で、かつ初期荷重応力レベルが大きいほど減少しているが、これは初期荷重応力レベルまでの範囲ではAEが殆ど発生しないというカイザー効果に起因した結果であるものと考えられる。これに対して、初期荷重から再荷重までの期間がある程度経過した場合になると、a値と初期荷重応力レベルとの関係は、初期荷重材令によって著しく相違している。すなわち、材令1週で初期荷重を行った場合には、a値が正值に反転する現象は全く認められないが、材令6週で初期荷重を行った試験体では、初期荷重から再荷重までの期間

が1ヶ月以上になると、a値は養生方法にかかわらず正值に反転し、かつ初期荷重応力レベルが大きいほど大きくなる傾向を示している。このa値が負から正に反転する現象は、初期荷重による劣化が著しい試験体ほど、低応力レベルからAEがより活発に発生していることを意味している。したがって、コンクリートの劣化がある程度材令の経過した時点で生じ、かつ劣化度推定を劣化後ある程度の期間が経ってから実施した場合には、a値の正負によってコンクリートの劣化度を推定することが可能であるものと思われる。なお、材令1週で初期荷重を行った試験体のa値が正值に反転しないのは、おそらく若材令で劣化したコンクリートはその後水和反応がかなり進行するため、水和反応が十分に進行した時点で劣化を受けたコンクリートよりも劣化の影響が小さくなるためであろう。

3.2 加熱によって劣化した場合 (実験-II)

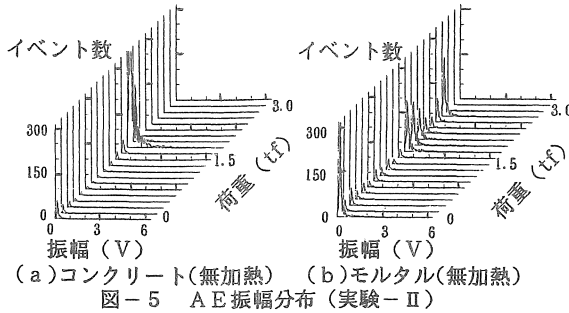
(1) 強度特性および累積AEイベント数

表-4は、コンクリートとモルタルの曲げ強度および圧縮強度と1軸圧縮強度時までに発生した累積AEイベント数を一覧表にして示したものである。この表によれば、曲げ強度は加熱温度の上昇とともに次第に低下し、特に400℃加熱になると強度は著しく低下しているが、圧縮強度は曲げ強度の場合のように明確な強度変化が認められない。一方、累積AEイベント数は、コンクリートの場合には加熱温度の影響を明確には認めることができないが、モルタルの場合には加熱温度の上昇とともに著しく増加している。このように、曲げ破壊よりも圧縮破壊の方が、またモルタルよりもコンクリートの方が加熱の影響を受け難いのは、圧縮破壊の方が試体の内部変化により鈍感であること、並びに骨材によるクラックアレスト効果は曲げ破壊よりも圧縮破壊の

表-4 強度および累積AEイベント数に関する実測結果 (実験-II)

加熱温度 (°C)	コンクリート			モルタル		
	f <sub>b</sub>	f <sub>c</sub>	累積AEイベント数	f <sub>b</sub>	f <sub>c</sub>	累積AEイベント数
0	68.2	140	5610	91.5	189	6558
100	67.8	140	5319	90.9	200	6852
200	60.1	139	6957	68.4	168	9079
300	53.8	141	7889	63.4	188	11806
400	36.7	112	6909	34.2	176	13549

[注]f<sub>b</sub>:曲げ強度(kgf/cm<sup>2</sup>)、f<sub>c</sub>:圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)。



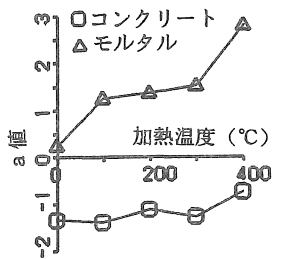
方が、またモルタルよりもコンクリートの方が著しいため、加熱によって生じた試験体の潜在的欠陥の影響を受け難いためと思われる。

(2)振幅分布

図-5(a)および(b)は、それぞれコンクリートおよびモルタルの1軸圧縮載荷時に得られたAEの振幅分布の一例を示したものである。これらの図によれば、コンクリートおよびモルタルのいずれの場合も、低応力レベルにおいてAEが頻発する傾向を示している。これは、本実験で用いた試験体が小試験体で、かつH/D(試験体の高さ(H)と最小断面寸法(D)との比)が1であったため、載荷板と試験体との境界面で生じる雑音の影響を除去しきれなかったためと思われる。また、図-5(b)に示すモルタル試験体の場合、中応力レベルにおいてAEが一時的に頻発し、ピークが2つ存在しているが、これは試験体端面の摩擦を除去したことによって、モルタルが不連続的な分離破壊を示したことによるものと思われる。

(3)AEの発生状況

図-6は、1軸圧縮載荷時のコンクリートおよびモルタルによって得られたa値と加熱温度との関係



を示したものである。ただし、a値は載荷初期に発生する雑音の影響を取り除いて求めてある。この図によれば、モルタルのa値は、加熱温度にかかわらず正值を示し、かつ加熱温度の上昇に伴って大きくなっているが、コンクリートの場合には、いずれも負の値を示し、かつ加熱温度の影響をそれほど顕著には受けていないのがわかる。これは、上述のようにコンクリートはモルタルよりも加熱による試験体内部の構造変化の影響を受け難いためと思われる。なお、モルタルのa値が無加熱時にも正の値を示しているのは、モルタルが不連続的な分離破壊を示したためであろう。

3.3 1方向単調載荷によって劣化した場合(実験-III)

(1)強度特性および累積AEイベント数

表-5は、圧縮強度および最大耐力時まで発生した累積AEイベント数を一覧表にして示したものである。この表によれば、圧縮強度および累積AEイベント数は、別報<sup>7)</sup>で示した初期載荷後4週までの結果と同様に、初期載荷応力度および初期載荷からAE測定までの期間の影響を殆ど受けないが、試験体の養生方法によってかなり相違する傾向を示している。

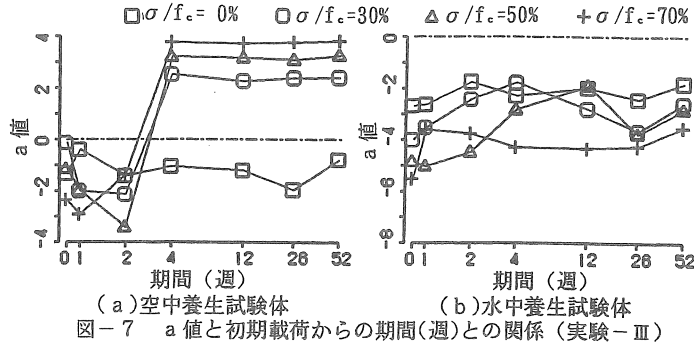
(2)振幅分布

図には示していないが、得られた結果は、別報<sup>7)</sup>に示した結果とほぼ同じであった。すなわち、空中養生試験体の場合には、AEの振幅分布に及ぼす初

表-5 圧縮強度および累積AEイベント数に関する実測結果(実験-III)

養生方法	目標 $\sigma/f_c$ (%)	初期載荷からの期間(週)		
		1 2	2 6	5 2
空	0	237 1400	237 1278	241 1653
	30	233 1178	207 1545	214 1332
	50	238 1627	235 1193	234 1110
	70	243 2342	237 1015	228 1414
水	0	238 247	224 310	231 365
	30	247 367	215 370	224 387
	50	253 293	227 329	235 402
	70	252 280	245 351	245 489

[注]上段の値は圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)、下段の値は累積AEイベント数を示す。



期荷重応力レベルの影響を認めることができたが、水中養生試験体の場合には、A Eの振幅分布に及ぼす初期荷重応力レベルの影響は明確には認められなかった。したがって、長期材令下においても水中養生試験体の劣化度評価は、空中養生試験体と比較して困難であることがわかった。

### (3) A Eの発生状況

図-7(a)および(b)は、それぞれ空中養生および水中養生を行った試験体によって得られたa値と初期荷重からの期間との関係を初期荷重応力レベル別に示したものである。なお、図中には別報<sup>7)</sup>で示した4週までの結果も併示してある。これらの図によれば、本実験で得られたa値は、養生方法および初期荷重からの期間にかかわらず別報<sup>7)</sup>で示した4週の結果とほぼ同じ値を示しており、初期荷重からの期間が4週以上の範囲になると、a値はコンクリートの劣化度に応じてある特定の値に落ち着く傾向にあることがわかる。

## 4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 若材令で劣化したコンクリートの場合には、その後の水和反応の進行により、A Eの発生挙動に及ぼすコンクリートの劣化の影響が著しく小さくなるため、A E法を適用してコンクリートの劣化度評価を正確に行うためには、水和反応がある程度進行した時点で劣化したコンクリートを対象とする必要がある。
- 2) 加熱によって劣化したモルタルでは、圧縮耐力時の累積A Eイベント数から劣化度評価を行う

ことが可能であるが、コンクリートの場合には、骨材によるクラックアレスト効果のために、加熱によって生じた劣化の影響を明確に抽出することが難しい。

- 3) コンクリートの劣化直後におけるA Eの発生挙動は、カイザー効果の影響を受けるため、A E法を適用してコンクリートの劣化度評価を行う場合には、劣化後ある程度の期間が経ったコンクリートを対象とする必要がある。本実験では、劣化後4週以上経過したコンクリートであれば、A Eの発生挙動は劣化後の期間にかかわらずほぼ同様の傾向を示した。

### 【謝 辞】

実験およびデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学大学院生の浅井陽一君、並びに愛知工業大学学部学生の安藤尚也君、皆福慎二君および高見弘昭君に対して謝辞を表します。

### 【引用文献】

- 1) 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、コンクリート工学年次講演会講演論文集、Vol. 2, pp. 129-132, 1980. 6
- 2) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫：コンクリートのアコースティック・エミッション特性と破壊挙動に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、Vol. 358, pp. 22-34, 1985. 12
- 3) 山田和夫・小阪義夫：コンクリート内部で発生したアコースティック・エミッションの伝播特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9, No. 1, pp. 499-504, 1987. 6
- 4) 山田和夫・小阪義夫：コンクリート中を伝ばす

## A E法を適用したコンクリートの劣化度評価に関する実験的研究

- るアコースティック・エミッションの減衰特性、  
材料、Vol. 36、No. 406、pp. 716-722、1987. 7
- 5) 山田和夫・土田崇仁・小阪義夫：コンクリート  
内部で発生するA Eの原波形解析、セメント技  
術年報、Vol. 41、pp. 331-334、1987. 12
- 6) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫：コンクリート  
の伝達関数に及ぼす各種要因の影響、セメント  
技術年報、Vol. 42、pp. 259-262、1988. 12
- 7) 山田和夫・山本正岳・浅井陽一：A E法を適用  
したコンクリートの劣化度評価に関する実験的  
研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.  
14、No. 1、pp. 691-696、1992. 6  
(受理 平成5年3月20日)