

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

EXPERIMENTAL STUDY ON DAMAGE EVALUATION OF CONCRETE BY ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

山田 和夫
Kazuo YAMADA

Abstract In this study, a quantitative analysis of Acoustic Emission (AE) data is examined to evaluate the deterioration of concrete structures by uniaxial compressive loadings of core samples. The stochastic theory was introduced into AE activity under uniaxial compressive loading. Applied equation is as follows:

$$N = C \cdot V^a \cdot \exp(b \cdot V) \dots\dots\dots (1)$$

in which, V is relative stress level (%), N is accumulative AE event number, a , b and C are constants. Following results were obtained in this study:

- 1) The value of parameter "a" related to the rate of concrete fracture is closely related with AE behavior under uniaxial compressive loading. In the case of high AE activity at low stress level, the value of "a" becomes positive, while "a" is negative for low AE activity.
- 2) In the case of specimen cured in air condition, the deterioration of concrete can be estimated by the value of "a".

1. はじめに

材料内部の微小破壊に伴って発生する、可聴域よりもずっと高周波の弾性波（通常、Acoustic Emission（以下、AEと略記）と呼ばれている）を測定の対象としたAE法は、コンクリートの内部破壊過程を追跡するための在来計測手法と比較して、材料内部の変形、破壊などの微小変化を動的かつ高感度に検出できるという点で格段に優れている。そのた

め、筆者も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並びに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や微視的破壊過程の追跡、AEの原波形解析などを試み、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^{1) - 6)}。

本研究では、非破壊試験法としてのAE法の適用性を調べるための基礎的研究として、AE法によるコンクリートの劣化度評価への可能性について、一

表-1 実験の概要

W/C(%)	養生方法	$\sigma/f_c^{(1)}$	Age ⁽²⁾
60	空中	0	0
		30	1
	水中	50	2
		70	4

[注] 1)初期荷重相対応力度(%),
2)初期荷重からの期間(週)。

表-2 コンクリートの調合表

W/C (%)	標準調合 (kg / m ³)				スランブ (cm)
	水	セメント	砂	砂利	
60	200	333	740	1060	18.9

連の検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、実験要因としてコンクリートに劣化を生じさせるための初期荷重応力レベル(1軸圧縮強度(f_c)に対する相対応力度(σ/f_c) = 0、0.3、0.5および0.7の4種類)、初期荷重実施後の期間(0、1、2および4週の4種類)、並びに養生方法(空中養生および水中養生の2種類)を取り上げ、劣化したコンクリートの種類と1軸圧縮荷重時のAEの発生状況との関係を調べた。実験の概要を表-1に示す。

2.2 試験体の製作および養生方法

使用材料としては、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)を用いた。コンクリートの調合は、水セメント比(W/C)を0.6、設計スランブを18cm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の標準調合表および実測スランブを表-2に示す。試験体は、 $\phi 10 \times 20$ cmの円

柱形とし、打設後2日目に脱型した後は、試験時まで前掲の表-1に示す所定の養生を行った。試験体個数は、各要因毎に2個とした。なお、コンクリートに劣化を生じさせるための初期荷重は、コンクリートの強度増加が殆ど認められなくなった時点(約3ヶ月)で行った。

2.3 測定方法

本実験では、図-1に示すAE計測システム(ローカルプロセッサ:9604、ローノイズプリアンプ:9913、広帯域型センサー:AE-900S-WB、AE解析装置:MUSIC)を用いて不感時間1msのデッドタイム方式によるAE事象(イベント)の計測を行った。AE計測装置の各機器の計測レベルは、予備実験の結果に基づいて、①増幅度:40dB(プリアンプで20dB、メインアンプで20dB)、②フィルターバンド幅:1kHz~1MHz、③ディスクリレベル:400mVのように設定した。なお、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て発生するAEを最小限とするために、試験体と載荷板との間に厚さ3mmの硬質ゴムシートを挿入して載荷を行った。また、センサーは、熱可塑性樹脂で試験体に直接接着した。

2.4 解析方法

(1)AEパラメータ

本解析では、載荷応力レベルの増加に伴って発生するAEの累積イベント数、並びに荷重増分1.2tf(応力度にして約15.3kgf/cm²)毎の振幅分布およびエネルギー分布を求めた。

(2)AEの発生状況の推定式

AEの累積イベント数と載荷応力レベルとの関係の表示には、次式で表される大津らの提案式⁷⁾を使用し、相対応力度20%毎の実験データを用いて、最小自乗法により実験定数を求めた。

$$N = C \cdot V^a \cdot \exp(b \cdot V) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、V:相対応力レベル($\sigma/f_c \cdot 100\%$)、
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およびb:実験定数、
C:定数。

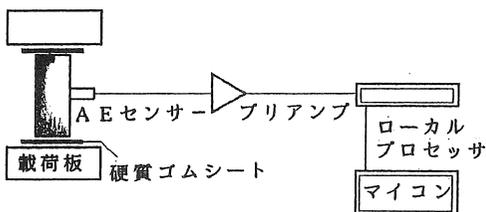


図-1 AE測定システム

3. 実験結果とその考察

表-3 圧縮強度に関する実測結果 (単位:kgf/cm²)

養生方法	目標 σ/f_c	初期載荷からの期間 (週)			
		0 週	1 週	2 週	4 週
空	0	226	216	224	233
	30	233 (29.1)	238 (28.5)	223 (30.4)	246 (27.6)
	50	243 (46.3)	244 (46.3)	239 (47.3)	236 (50.6)
	70	225 (70.3)	241 (65.6)	239 (66.0)	244 (64.8)
水	0	229	235	241	241
	30	262 (26.2)	262 (26.2)	244 (28.2)	237 (29.0)
	50	238 (48.1)	251 (45.6)	237 (48.4)	248 (46.1)
	70	237 (67.6)	257 (62.3)	252 (63.6)	249 (64.3)

[注] 括弧内の値は、実際の初期載荷相対応力度 σ/f_c (%) を示す。

3.1 強度特性

表-3は、1軸圧縮強度の実測結果を示したものである。この表によれば、本実験の範囲では、コンクリートの1軸圧縮強度は、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ていないことが分かる。また、表中の()内の値は、初期載荷応力度をその試験体の実測1軸圧縮強度で除すことによって算定した相対応力レベルであり、本実験で設定した目標値(30、50および70%)とは必ずしも一致していないが、ほぼ満足できる結果が得られている。なお、空中養生試験体の1軸圧縮強度の全平均値(245 kgf/cm²)は、水中養生試験体のそれ(234 kgf/cm²)よりも約5%大きな値となった。

3.2 AEパラメータ

(1) 累積AEイベント数

表-4は、最大耐力時までには発生したAEの累積イベント数を一覧表にして示したものである。この

表-4 累積イベント数に関する実測結果

養生方法	目標 σ/f_c	初期載荷からの期間 (週)			
		0 週	1 週	2 週	4 週
空	0	1241	1487	1331	1353
	30	1115	1545	1452	1420
	50	1269	1669	1777	1456
	70	1554	1554	1750	1177
水	0	313	319	294	309
	30	249	417	305	257
	50	256	248	310	425
	70	314	225	216	252

表によれば、累積AEイベント数に及ぼす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は1軸圧縮強度の場合と同様に明確には認められないが、累積AEイベント数は、試験体の養生方法によって著しく影響を受けていることが分かる。すなわち、空中養生時の場合の累積AEイベント数の全平均値は1441イベントであるのに対して、水中養生時の場合は294イベントとなっており、水中養生試験体では、空中養生試験体の約20%のAEが発生しているに過ぎない。

(2) 振幅およびエネルギー分布

図-2および図-3は、それぞれ空中および水中養生を行った試験体で測定された載荷応力レベル毎の振幅分布を示したものである。まず、空中養生試験体に注目してみる(図-2参照)と、初期載荷を行っていない試験体(図-2(a))では、載荷初期の段階から比較的規模の大きなAEも発生しているのが分かる。特に、1軸圧縮強度に対する相対応力レベルが50%程度以上の範囲になると、AEイベント数が次第に増加するようになり、さらに80%以上の相対応力レベルになるとAEが頻発して、試

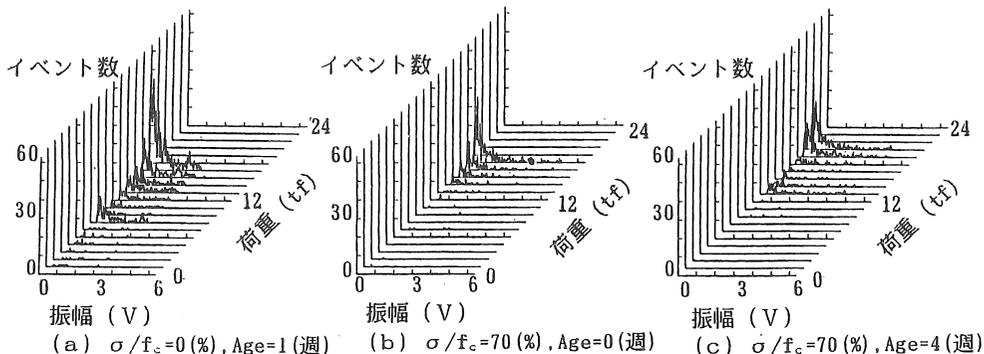


図-2 AE振幅分布 (空中養生)

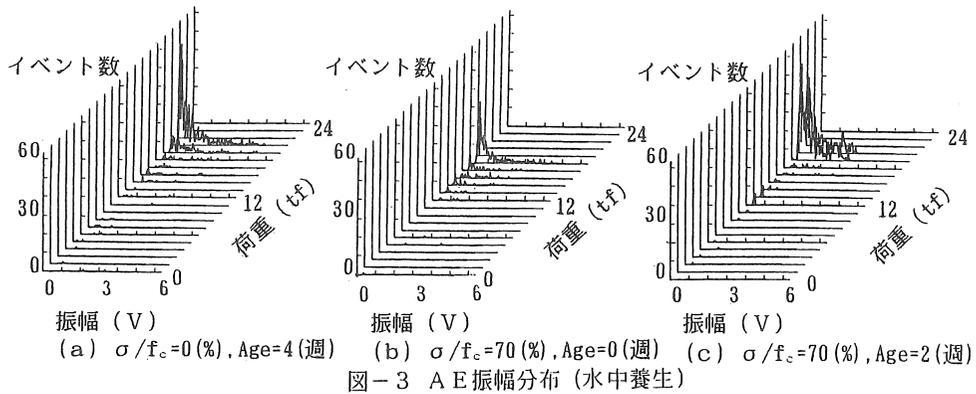


図-3 AE振幅分布 (水中養生)

験体が最終的な破壊に至っているのが読み取れる。このことから、空中養生試験体の破壊は、比較的低応力レベルから漸進的に進展しているものと推察される。なお、この試験体の特徴として、各応力レベルで観察されるAEの最大振幅値が応力レベルの影響を殆ど受けていないことが挙げられる。これに対して、応力レベルを1軸圧縮強度の70%に設定して初期荷重を行った試験体のうち、初期荷重直後に再荷重試験を行った試験体(図-2(b))の場合には、カイザー効果のために荷重初期の段階におけるAEは殆ど観察されず、初期荷重応力レベルを超えた段階になってからAEが発生し始めているのが分かる。また、初期荷重後4週間経過してから再荷重試験を行った試験体(図-2(c))では、初期荷重直後に再荷重を行った場合に比べて、若干低応力レベルからAEが発生し始めており、カイザー効果が不明瞭になる傾向を読み取ることができる。次に、水中養生試験体に注目してみる(図-3参照)と、初期荷重を行っていない試験体(図-3(a))においても、約80%の相対応力レベルまではAEが殆ど発生しておらず、空中養生試験体の場合

(図-2(a))とはAEの発生状況に著しい相違のあることが分かる。また、応力レベルが80%以上になると、AEが急激に頻発し始め、その規模も応力レベルの増加とともに増大し、空中養生試験体と比較して破壊過程が極めて脆性的となっていることが推察される。そのため、70%程度までの初期荷重応力レベルの範囲では、空中養生試験体で観察されたような初期荷重を行った試験体のAE発生状況に及ぼす初期荷重後の経過期間の影響を明確には認め

ことができなくなっている(図-3(b)および(c)参照)。なお、紙数の関係で図には示していないが、エネルギー分布についても、定性的な傾向は、上述の振幅分布の場合と同様であった。

以上のことから、1軸圧縮強度時の累積AEイベント数だけでは、初期荷重応力度および初期荷重後の経過期間の影響を明確には認めることができないが、適当な応力レベル毎に算出した振幅分布図およびエネルギー分布図を用いることによって、コンクリートの劣化度や劣化後の経過期間の影響をある程度推定することが可能であるといえる。ただし、水中養生下にある試験体の劣化度評価は、空中養生下の試験体に比べて著しく困難である。

3.3 AEの発生状況

図-4は、累積AEイベント数と応力レベルとの関係を前掲の式(1)によって近似した場合の実験結果と計算結果とを比較した例である。また、表-5は、表示式中の係数aおよび実験値と計算値との相関係数を一覧表にして示したものである。これらの

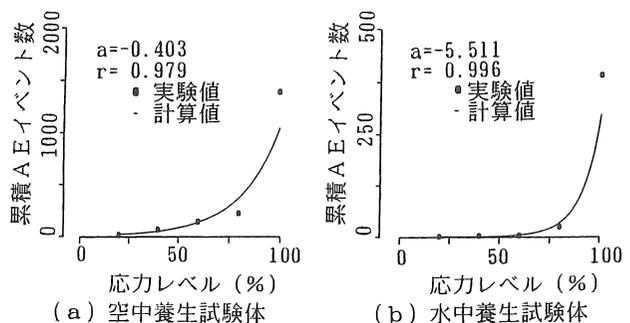


図-4 AEイベント測定例

表-5 式(1)中のa値の算定結果

養生方法	目標 σ/f_c	初期載荷からの期間(週)			
		0週	1週	2週	4週
空	0	-1.331 (0.983)	-0.403 (0.979)	-1.418 (0.994)	-1.051 (0.985)
	30	-0.133 (0.993)	-1.994 (0.992)	-2.133 (0.993)	2.508 (0.984)
中	50	-1.140 (0.994)	-1.989 (0.991)	-3.430 (0.998)	1.404 (0.984)
	70	-2.343 (0.990)	-2.926 (1.000)	-1.363 (0.995)	0.897 (0.995)
水	0	-2.681 (0.990)	-2.626 (0.991)	-1.742 (0.981)	-2.286 (0.979)
	30	-4.003 (0.999)	-3.530 (0.995)	-2.412 (0.982)	-1.770 (0.979)
中	50	-4.849 (0.996)	-5.031 (0.996)	-5.145 (0.995)	-2.826 (0.991)
	70	-5.511 (0.996)	-3.604 (0.995)	-2.133 (0.997)	-4.288 (0.996)

[注] 括弧内は、実験値と計算値との相関係数。

図および表から明らかなように、累積AEイベント数と応力レベルとの関係を式(1)によってかなり正確に表示できることが分かる。ところで、表示式中の係数aは、AEの発生過程が2状態1段階確率過程で、状態遷移確率($\mu(t)$)を $\mu(t) = a'/t + b$ と仮定した場合の係数a'に比例する値であり、載荷速度 σ' を一定、かつ応力レベルを1軸圧縮強度(f_c)で無次元化した相対応力度(σ/f_c)で表示すると、遷移確率は $\mu(V) = (\sigma'/f_c) a'/V + b$ となり $a = (\sigma'/f_c) a'$ なる関係が成立する。したがって、AEの発生確率は、 $a > 0$ のときは低応力レベルで大きく、応力レベルの増大とともに減少するが、逆に $a < 0$ のときは低応力レベルで小さく、応力レベルの増大に伴って次第に大きくなる。ただし、a値が正負いずれの場合にも、AEの発生確率は、応力レベルが無限大になるとb値に収束する。

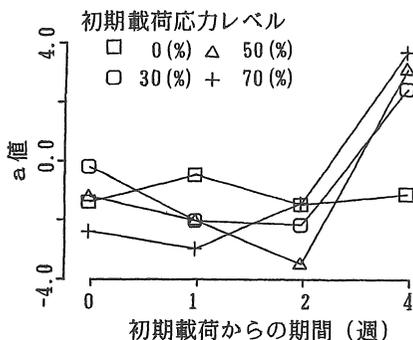


図-5 a値と初期載荷からの期間(週)との関係 (空中養生)

図-5および図-6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値と初期載荷からの経過期間との関係を初期載荷応力レベル毎に示したものである。前掲の表-5およびこれらの図によれば、初期載荷直後に再載荷試験を行った場合には、a値はいずれの試験体も負の値となっている。このことは、AEの発生確率が低応力レベルでは小さく、かつ応力レベルの増加とともに増大する傾向にあることを意味している。また、a値は養生方法にかかわらず初期載荷応力レベルが大きくなるに従って減少しており、劣化度の大きなコンクリートほど低応力レベルにおけるAEの発生確率が高応力レベルにおける発生確率と比較して小さくなっているのが分かる。このような傾向は、先に述べたようにカイザー効果によって生じているものと考えられる。これに対して、初期載荷から1および2週間経過した後に再載荷を行った場合には、上述のようなa値に及ぼす初期載荷応力レベルの影響が不明瞭となっており、さらに初期載荷から4週間経過した後に再載荷を行った空中養生試験体の場合になると、初期載荷を行ったコンクリートのa値は正值に逆転し、かつ初期載荷応力レベルの増加とともに増大する傾向を示している。このことは、AEが低応力レベルから活発に発生していることを意味している。したがって、損傷を受けてからある程度の期間が経ったコンクリートに対しては、大津ら⁷⁾が指摘しているように、a値が正負のいずれであるかによってコンクリートの劣化度を評価することも可能であるものと考えられる。ただし、水中養生を行ったコンクリートの場合には、本実験の範囲内では、a値が正に逆転する現象は認められなかった。なお、空中養生試験体で得られたa値の全平均値は-0.1。

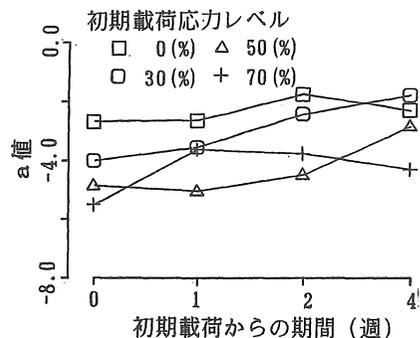


図-6 a値と初期載荷からの期間(週)との関係 (水中養生)

762であるのに対して、水中養生試験体のそれは-3.461であり、a値によっても、空中養生試験体の方が低応力レベルからAEが活発に発生していることを評価することができる。

4. 結 論

本研究では、AE法によるコンクリートの劣化度評価試験方法の可能性について実験的に検討を行った。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) 1軸圧縮強度時の累積AEイベント数では、コンクリートの劣化度を正確に推定することは不可能であるが、特定の応力レベル毎に算出したAEの振幅分布またはエネルギー分布を調べることによって、コンクリートの劣化度や劣化後の経過期間などがある程度推定することが可能である。
- 2) 劣化直後に式(1)を適用してコンクリートの劣化度評価を行った場合、カイザー効果のために正確な劣化度評価が困難となる。式(1)を用いて正確に劣化度評価を行うためには、劣化後ある程度期間が経ったコンクリートを対象とする必要がある。ただし、水中養生下のコンクリートに対しては、式(1)による劣化度評価は難しい。

なお、現在損傷後1ヶ月以上経過したコンクリートの劣化度評価について調査中であるため これら長期材令下のコンクリートの劣化度評価については、別の機会に報告する予定である。

【謝 辞】

実験およびデータ整理に際して御助力を得た本学大学院生の山本正岳君、ならびに学部学生の浅井陽一君、田中宏志君、大野智幸君および佐々木伸治に対して謝意を表します。

【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、第2巻、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、第358号、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、第9巻、第1号、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.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AEの原波形解析、セメント技術年報、第41巻、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、第42巻、pp.259-262、1988.12
- 7) 大津政康、森永浩通：AE法によるコア供試体の劣化度判定法に関する研究、セメント・コンクリート論文集、第43巻、pp.394-399、1989.12
(受理 平成4年3月20日)