

コンクリート内部で発生するAE に関する確率論的考察

STOCHASTIC APPROACH ON AE ACTIVITY OF CONCRETE

山田 和夫
Kazuo YAMADA

ABSTRACT In this study, the stochastic theory was applied to explain the AE activity. Following results were obtained in this study:

- 1) Accumulative AE events obtained by concrete and mortar specimens under the continuous bending loading increase with increasing the loading level.
- 2) The transition probability related to AE activity is constant independent of a time, but generally increases with increasing the loading level.
- 3) The predictions calculated by using the theoretical equation on AE activity proposed in this study agree well with the experimental results.

1. はじめに

コンクリートの破壊が確率現象であることは周知のことであり、これまでも数多くの研究者によって、コンクリートの破壊現象に対する確率論的な取扱いがなされている[1]。筆者も、以前コンクリート固有の強度の変動を確率論的な立場から説明することを目的として、確率過程論を適用したコンクリート強度に関する確率破壊モデルを提案するとともに、その妥当性・適用性を示した[2]-[5]。

本研究では、コンクリートの微視的破壊に伴って発生するアコースティック・エミッション（以下、AEと略記する）の発生挙動を解明するための基礎的研究として、まずAEの発生過程が確率過程とみなせるか否かを実験的に検討するとともに、確率過程論に基づく累積AEイベント数に関する提案式の適用性を筆者が過去に行った実験結果[6]、[7]と比較することによって示した。

2. AEの発生挙動に関する確率過程論の適用性

2.1 確率過程論の基礎式

本研究では、AEの発生挙動が2状態1段階確率過程であるものとみなした場合について検討する。この場合、時刻tにおいてAEが発生していない確率P(t)（以下、AEの非発生確率と呼ぶ）は、一般に次式で与えられる[8]。

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \mu(t) dt \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、P(t)：時刻tにおけるAEの非発生確率（P(0)=1、P(∞)=0）、μ(t)：遷移確率。上式において両辺の対数をとると、式(1)は以下のようになる。

$$\log \{P(t)\} = - \int_0^t \mu(t) dt \dots \dots \dots (2)$$

従って、AEの非発生確率P(t)の対数と時刻tと

の関係を調べることによって遷移確率 $\mu(t)$ を求めることができる。もし、上記の関係が直線関係であれば、遷移確率 $\mu(t)$ は時間に依存しないことになる ($\mu(t)=m$)。この場合、式(1)は以下のようになる。

$$P(t) = \exp \{-m \cdot t\} \dots\dots (3)$$

2.2 実験方法

(1) 実験の概要

本実験は、持続曲げ荷重を受けるコンクリートの AE 発生挙動と載荷応力レベルとの関係を明らかにすることを目的としたもので、実験要因として試験体の種類（コンクリートおよびモルタルの2種類）、加熱温度（無加熱、300℃の2種類）、並びに載荷応力レベル（曲げ強度 f_b ）に対する相対応力度 (σ_b / f_b) が、0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 および 0.9 の6種類）を取り上げた。試験体は、4×4×16cmの横打ち角柱体とし、持続載荷時間の上限は12時間とした。なお、加熱材令および加熱時間は、それぞれ10週および15分とし、加熱後10日目に載荷を開始した。実験の概要を表-1に示す。

(2) 試験体の製作および養生方法

本実験で使用した材料は、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。コンクリートの調合は、水セメント比（W/C）を0.6、設計スランブを

表-1 実験の概要

材料	W/C (%)	加熱温度 (°C)	載荷応力レベル
コンクリート	60	300	0.4, 0.5, 0.6,
モルタル			0.7, 0.8, 0.9

表-2 調合表

(a) コンクリート

W/C (%)	標準調合(kg/m³)				スランブ (cm)
	水	セメント	砂	砂利	
60	200	333	740	1060	5.0

(b) モルタル

W/C (%)	標準調合(kg/m³)			γ ₀ -値
	水	セメント	砂	
60	352	587	1174	254

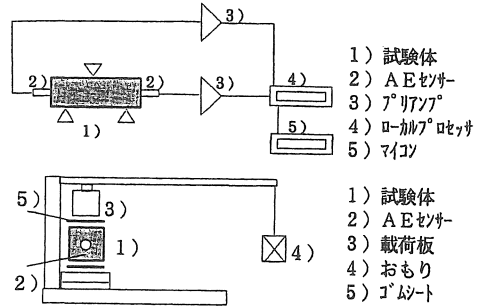


図-1 AE計測システム

5cmとし、またモルタルの調合は、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合表、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、材令1日目に脱型後、試験時まで空中養生を行った。

(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のデットタイム方式によるAE事象（イベント）の計測を行った。AE計測装置各機器の設定レベルは、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ディスクリーレベル：40mV、のように設定した。クリープ試験は、外部雑音の影響を低減させるために簡易無響音室内で行うとともに、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、前述の図-1に示すように、載荷板と試験体との間に厚さ1mmの硬質ゴムシートを挿入して載荷を行った。なお、クリープ試験終了後、設定応力レベルの確認を行う目的で、残留曲げ強度と残留圧縮強度を計測した。

2.3 実験結果とその考察

(1) 強度特性および累積AEイベント数

表-3は、コンクリートおよびモルタルで得られた残留曲げ強度、残留圧縮強度および12時間のクリープ試験終了時点での累積AEイベント数を一覧表にして示したものである。この表から明らか

表-3 強度および累積A Eイベント数に関する実測結果

材料	無加熱					加熱				
	設定応力レベル (%)	累積AEイベント数	曲げ強度 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	脆度係数	設定応力レベル (%)	累積AEイベント数	曲げ強度 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	脆度係数
コンクリート	40 (39)	215	57.9	370	6.39	40 (39)	177	50.2	400	7.97
	50 (56)	238	50.3	375	7.46	50 (48)	108	51.4	388	7.55
	60 (57)	152	59.7	421	7.05	60 (62)	148	47.2	392	8.31
	70 (64)	269	62.1	372	5.99	70 (79)	235	43.1	358	8.31
	80 (87)	77	52.0	348	6.69	80 (98)	925	41.6	333	8.00
	90 (95)	106	54.1	390	7.21	90 (90)	69	48.4	377	7.79
	平均	-----	56.0	379	6.80	平均	-----	47.0	375	7.99
モルタル	40 (35)	70	68.8	370	5.38	40 (41)	177	57.5	370	6.43
	50 (41)	80	70.8	347	4.90	50 (44)	45	66.7	400	6.00
	60 (60)	130	58.0	423	7.29	60 (59)	36	58.9	369	6.26
	70 (60)	25	67.0	432	6.45	70 (68)	250	60.0	353	5.88
	80 (74)	38	64.2	423	6.59	80 (81)	37	58.1	351	6.04
	90 (77)	521	67.8	421	6.21	90 (94)	656	57.1	359	6.29
	平均	-----	66.1	403	6.14	平均	-----	59.7	367	6.15

[注] 表中の () 内の値は、クリープ試験後に求めた残留曲げ強度で評価した場合の設定応力レベル。脆度係数は、圧縮強度を曲げ強度で除した値。

うに、加熱試験体によって得られたコンクリートおよびモルタルの脆度係数は、いずれの場合も無加熱試験体より大きくなっており、加熱によってある程度試験体が劣化していることがわかる。また、表中の括弧内の値は、載荷応力度をクリープ試験終了後に実測した曲げ強度で除すことによって算定した相対応力レベルであるが、本実験で設定した目標値(40, 50, 60, 70, 80および90%)とは必ずしも一致してはい

ないものの、ほぼ満足できる値となっている。なお、残留強度は、載荷応力レベルの影響をそれほど受けていないことがわかる。一方、累積A Eイベント数は、本実験の範囲では必ずしも明確ではないが、一般的に載荷応力レベルが大きくなるほど増加する傾向が認められる。

(2) A E の発生挙動

図-2は、時刻tにおけるA Eの発生確率(1-P(t))と時間(t)との関係を示したものである。なお、時刻tにおけるA Eの発生確率は、その時点での累積A Eイベント数をクリープ試験終了時点における累積A Eイベント数で除して求めた。また、図-3は、図-2の結果をA Eの非発生確率の対数(log{P(t)})と時間(t)との関係で表したものである。なお、図中の実線は、実験結果を直線で近似した場合の計算値である。この図によれば、実験値は、ほぼ直線で近似できることがわかる。従って、A Eの非発生確率(P(t))は、前述の式(3)を用いることによって表せられることになる。図-4および図-5は、それぞれコンクリートおよびモルタル試験体によって得られたA Eの非発生確率の対数(log{P(t)})と時間(t)との関係を載荷応力レベル別に示したものである。なお、図中には実験値を式(3)で近似し場合の計算値も併示してある。また、図-6および図-7は、それぞれコンクリートおよびモルタルの遷移確率(m)と実測載荷応力

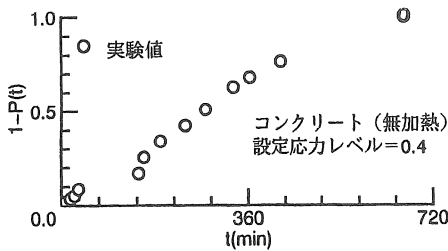


図-2 A Eの発生確率(1-P(t))と時間(t)との関係

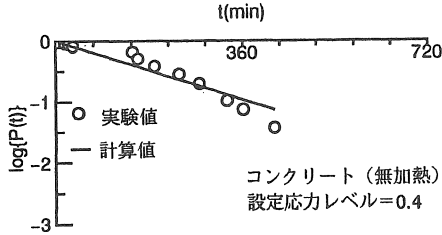


図-3 A Eの非発生確率(log{P(t)})と時間(t)との関係

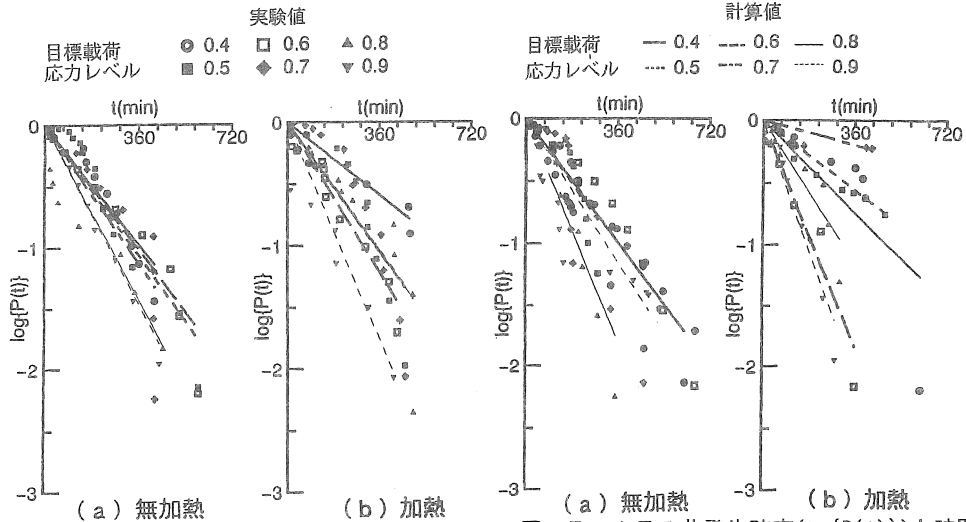


図-4 A E の非発生確率($\log\{P(t)\}$)と時間(t)との関係 (コンクリート)

図-5 A E の非発生確率($\log\{P(t)\}$)と時間(t)との関係 (モルタル)

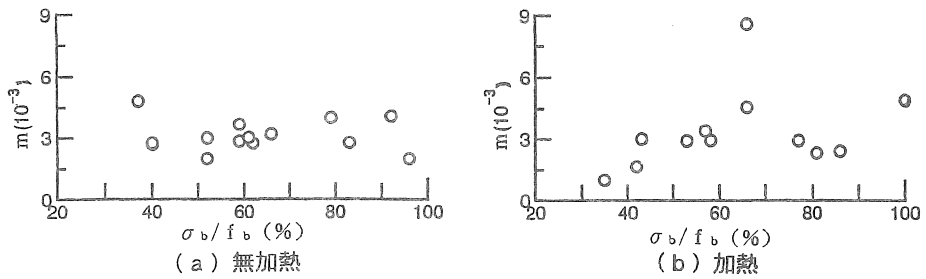


図-6 遷移確率(m)と荷重応力レベル(σ_b/f_b)との関係 (コンクリート)

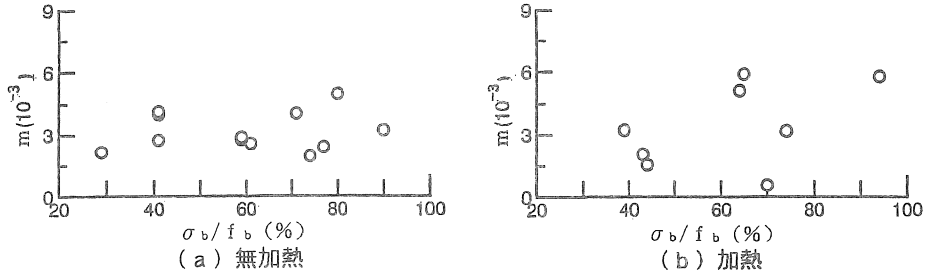


図-7 遷移確率(m)と荷重応力レベル(σ_b/f_b)との関係 (モルタル)

レベル (σ_b/f_b) との関係を示したものである。これらの図よれば、遷移確率 (m) は、試験体の種類にかかわらず荷重応力レベルが大きくなるとともに増大し、かつ加熱を行ったコンクリートおよびモルタルの m 値の方が、無加熱試験体よりも大きくなっているのがわかる。これは、応力レベルが大きくなるほど、また無加熱試験体より加熱試験体の方が、A E の発生挙動が活発であることを意味しており、一般的に認められている傾向とも一致する。

3. 累積 A E イベント数に関する理論式の提案とその適用性

3.1 累積 A E イベント数に関する理論式

ここでは、第2章の結果に基づいて、遷移確率 m は応力レベルに依存するものとみなし、式(4)のように仮定する。

$$m = a \cdot \sigma^b \dots\dots\dots (4)$$

いま、荷重速度 (σ) を一定、すなわち時刻 t にお

ける公称応力 ($\sigma(t)$) が

$$\sigma(t) = \sigma \cdot t \dots\dots\dots (5)$$

で表されるものとする、応力 σ の基でのAEの非発生確率は式(1)~(4)より次のようになる。

$$P(\sigma) = \exp \left\{ - \frac{a}{(b+1)\sigma} \sigma^{b+1} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

従って、AEの発生確率 ($D(\sigma)$) は

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left\{ - \frac{a}{(b+1)\sigma} \sigma^{b+1} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

のようになり、累積AEイベント数と応力レベルとの関係は、次式で与えられる。

$$N = \left[1 - \exp \left\{ - \frac{a}{(b+1)\sigma} \sigma^{b+1} \right\} \right] \cdot c \dots\dots\dots (8)$$

図-8は、筆者らが過去に行った実験の結果[7]に対する式(8)の適用性を示した一例である。なお、理論式中の定数の決定に際しては、準ニュートンによる非線形最小自乗法を適用し、相対応力度10%毎に実測された累積AEイベント・データを用いて決定した。図によれば、式(8)を用いた場合の累積AEイベント数に関する計算結果は、高応力レベルにおいては比較的实验結果と良く一致しているが、低応力レベルにおける計算結果は、実験結果と良く一致しているとはいえない。この低応力レベルで計算結果と実験結果とが一致しない原因の一つとして、载荷初期に試験体端面と载荷板との界面で発生する雑音の影響が挙げられる。そのため、ここでは、この载荷初期における雑音の影響を理論式中で取り扱うために、次に示すような式(8)に雑音の項 (d) を付加した式を考えることにする。

$$N = \left[1 - \exp \left\{ - \frac{a}{(b+1)\sigma} \sigma^{b+1} \right\} \right] \cdot c + d \dots\dots\dots (9)$$

3.2 累積AEイベント数に関する理論式の提案とその適用性

図-9は、図-8と同一の実験結果に対して式(9)の適用性を示したものである。なお、図中には累積AEイベント数に関する大津ら[9]の提案式：

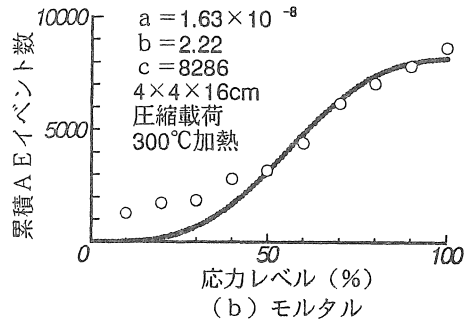
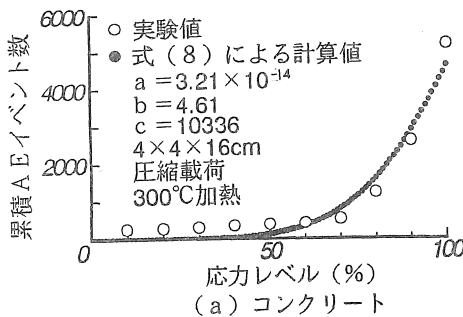


図-8 式(8)を用いた場合の累積AEイベント数と応力レベルとの関係の一例

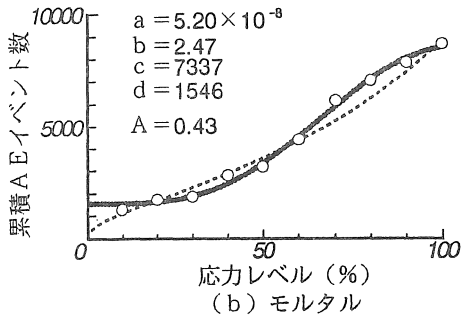
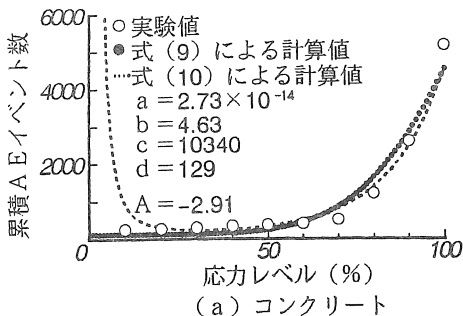


図-9 式(9)を用いた場合の累積AEイベント数と応力レベルとの関係の一例

表-4 理論式中の代表的な定数の一覧

材料	式(9)中のb	式(10)中のA
コンクリート	4.63	-2.91
モルタル	2.47	0.43

$$N = C \cdot V^A \cdot \exp(B \cdot V) \quad \dots \dots \dots (10)$$

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

による計算結果も併示してある。図によれば、理論式中に式(9)に示すような載荷初期における雑音の項を取り入れることによって、理論式の表示性能は格段に向上することがわかる。表-4は、図-9に示した実験結果に対して式(9)中の定数bおよび式(10)中の定数Aの値を算定した結果の一覧である。式(9)中の定数bは、その数値が大きくなる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と比較して相対的に小さくなり、AEが高応力レベルで集中的に発生するようになり、また逆にb値が小さくなるほど高応力レベルに比べて低・中応力レベルにおけるAEの発生が相対的に活発化することを示す。一方、式(10)によって表されるAEの発生確率は、式中の定数Aが正のときには低応力レベルで大きく、かつ応力レベルの増大とともに減少するが、定数Aが負のときには逆に低応力レベルにおけるAEの発生確率が小さく、応力レベルの増大とともにAEの発生確率が大きくなる性質を有している。この表によれば、コンクリートおよびモルタルの圧縮試験によって得られたb値は、それぞれ4.63および2.47、またこれらの試験体に対するA値は、それぞれ-2.91および0.43となっており、式(9)および式(10)いずれの式を用いても、これらの試験体の場合には、コンクリートよりもモルタルの方が相対的に低応力レベルからAEが活発に発生していることを予測している。

4. 結 論

本研究では、AEの発生挙動を確率論的な観点から実験的および理論的に一連の検討を行った。本実験によって得られた結果をまとめると、およそ次のようになる。

- 1) 持続荷重を受けるコンクリートおよびモルタルで発生するAEの累積イベント数は、一般的に載荷応力レベルが大きくなるほど増加する。
- 2) AEの発生挙動を支配する遷移確率は、一般的に時間には依存しないが、載荷応力レベルが大きくなるとともに増大する性質を有する。
- 3) 初期載荷応力レベルで発生する雑音の影響を考慮に入れた式(9)を用いることによって、AEの発生挙動をかなりの精度で評価することができる。

【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、愛知工業大学学部学生の榊原康広君、林 英祐君および中村聡宏君に対して謝辞を表します。

【引用文献】

- 1) 山田和夫：構造体コンクリート強度の変動に関する確率論的研究、名古屋大学学位論文、251p p.、1986.2
- 2) 谷川恭雄・山田和夫：セメント系複合材料の強度に関する確率論的研究（第1報：セメントペースト強度について）、日本建築学会論文報告集、第267号、pp.1-10、1978.5
- 3) 谷川恭雄・山田和夫：セメント系複合材料の強度に関する確率論的研究（第2報：モルタルおよびコンクリート強度の確率分布指標について）、日本建築学会論文報告集、第286号、pp.1-12、1979.12
- 4) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫：コンクリート強度に関する確率破壊モデルとその特徴、日本建築学会論文報告集、第347号、pp.10-21、1985.1
- 5) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫：コンクリート強度に関する確率破壊モデルの適用性とその定量化、日本建築学会論文報告集、第354号、pp.1-11、1985.8
- 6) 山田和夫・山本正岳・浅井陽一：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.691-696、1992.6
- 7) 山田和夫・浅井陽一：繰返し載荷および加熱によって劣化したコンクリートのAE法による劣

- 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.15、No. 1、pp. 625-630、
1993. 6
- 8) 横堀武夫：材料強度学（第2版）、岩波全書、
334pp.、1974. 10
- 9) 大津政康、森永浩通：A E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6年3月20日)