

論文 AE 法によるコア・コンクリート供試体の損傷度の同定

渡辺 弘史*¹・一ノ瀬 誠*²・友田 祐一*³・大津 政康*⁴

要旨: コンクリート・コア供試体の一軸圧縮試験時に AE 計測を実施することにより, コンクリート構造物の損傷度を定量的に評価する手法の一連の研究の成果を取りまとめた。そして, レートプロセス解析によって AE 発生頻度を近似することによりコンクリートの損傷累積を評価が可能なことに基づいて, 損傷力学に基づいた損傷度パラメータを参考に, 既存の実構造物の健全時のヤング率をレートプロセス解析結果から推定する新たな手法を提案した。

キーワード: AE, レートプロセス解析, 損傷力学, ローランドモデル, 損傷度評価

1. はじめに

近年, 種々の環境問題の中でコンクリートの早期劣化が注目されており, コンクリートの“メンテナンス フリー”の神話の崩壊とともに, コンクリート構造物の早期劣化や耐久性低下の事例が多数報告され始め, 社会的にも大きな影響を引き起こしている。このような中, コンクリートの耐久性についての診断技法の確立が重要視されており, 早急な構造物の定量的な損傷度評価法の確立が求められている。本研究が対象とする AE (アコースティック・エミッション) 法もそのような中で期待されている技法である¹⁾。

本研究は, 損傷を受けたコンクリート構造体の損傷度評価をコア供試体の一軸圧縮下での破壊挙動より行う方法について検討中の一連の研究²⁾での新たな成果をまとめたものである。実験では水中凍結融解試験により人工的に損傷を与えたコンクリート供試体の一軸圧縮下での AE を計測し, レートプロセス解析により発生頻度を近似し, 応力-ひずみ挙動から損傷力学の損傷パラメータをローランドモデルにより評価した。これら AE 計測と損傷パラメータとを比較検討することにより, AE 法による材料損傷評価法の可能性を検討した。

2. 解析理論

2.1 レートプロセス解析

一軸圧縮試験における AE の発生挙動の定式化に, レートプロセス解析を適用する。AE 総発生数を N , AE 発生確率関数を $f(V)$ とすると, 応力レベル V から $V+dV$ への応力増分に対し, 以下の式を得る。

$$f(V)dV = dN / N \quad (1)$$

ここで, 式(1)で得た AE 発生確率関数 $f(V)$ に対し, 損傷度の定量化のため双曲線関数を仮定する。

$$f(V) = a / V + b \quad (2)$$

ここでの a, b は定数である。

式(1), (2)より, 応力レベル V に対する総 AE 発生数 N との関係は以下のように近似できる。

$$N = CV^a \exp(bV) \quad (3)$$

ここでの C は積分定数である。

式(2)で a 値は応力レベルでの AE の発生頻度を反映し, 低応力レベルの段階では, a 値の正負により AE の発生確率が大きく異なるモデルになっている²⁾。

式(2)において示される応力レベルに対する AE の発生挙動を図-1 に示す。図-1 より AE 発生確率関数 $f(V)$ は, 応力レベルの増加に伴って b 値に収束することがわかる。 a 値は材料の応力

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻

*3 熊本大学技術専門職員 工学部技術部 (正会員)

*4 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 工博 (正会員)

レベルでの AE の発生頻度を反映し、b 値は AE の総発生数を反映しているといえる。ここでは、a 値が正ならば、f(V)が低応力レベルで高いことを意味しており、劣化した状態であると見なせる。一方、a 値が負ならば、f(V)が低応力レベルで低く、健全な状態であると見なせる。

以上のように、レートプロセス解析を適用し、一軸圧縮試験時の AE 発生挙動を式(2)、(3)で近似することにより、定量的にコンクリートの損傷度評価を行うことが可能となる。

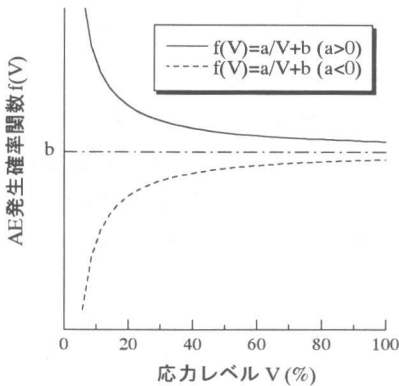


図-1 a 値と AE 発生確率関数

2. 2 ローランドモデル³⁾

損傷力学における損傷変数 Ω は弾性係数の比として以下のように定義される。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (4)$$

ここで、E : 損傷を受けた材料の弾性係数

E* : 健全な材料に相当する弾性係数

ローランドは損傷変数 Ω と一軸圧縮下でのひずみの関係を以下のように仮定した。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (5)$$

なお、

Ω_0 : 一軸圧縮試験開始時点での初期損傷度

A_0, λ : 材料固有の定数

よって式(4)、(5)より以下の式を導出できる。

$$\sigma = (E_0 - E^* A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \quad (6)$$

E_0 : 材料の初期ヤング率、

$$E_0 = E^* (1 - \Omega_0) \quad (7)$$

3. 実験概要

3. 1 供試体

一軸圧縮下での AE 計測のため、表-1の配合のコンクリート供試体を使用した。これらは損傷度を変化させるため、若材齢及び水中凍結融解試験後に圧縮試験を実施した。

尚、水中凍結融解試験を行う供試体については、劣化の度合いを顕著にするため、混和剤(AE 剤)を使用しない non-AE コンクリートを使用した。この場合には、空気量は 2.2%となった。

さらに、標準水中養生 196 日目の供試体も同様の手法で実験、解析を行った。

3. 2 動弾性係数の算出

コンクリート供試体の劣化程度を目安として、共振周波数を測定し動弾性係数を算出した。共振周波数の測定に際しては、ヤング率測定器を使用し、縦振動法により測定を行った。ただし、JIS 規格ではなく、弾性波動論より共振周波数 f は以下の式とした。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{(1-\nu)E_D}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (8)$$

ここで、L : 供試体の長さ、 ν : ポアソン比、

E_D : 動弾性係数、 ρ : 密度

表-1 示方配合

G max (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤(cc)	スランブ (cm)	空気量(%)			
			W	C	S	G						
20	55	47	179	326	816	1040	0	195.6	6.6	11.0	2.2	7.6

式(8)より、動弾性係数 E_D は、

$$E_D = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}{1-\nu} (2Lf)^2 \quad (9)$$

3.3 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験時の AE 計測システムを図-2に示す。なお、供試体の上面と下面にはシリコングリースを塗布し、テフロンシートを挿入することによって摩擦により発生する AE の低減に努めた。AE 計測条件として、AE センサは広域帯型（共振周波数：約 1MHz）のものを使用し周波数帯域は 10kHz-300kHz、検出された AE 信号はプリアンプ 40dB、メインアンプ 20dB の計 60dB で増幅した。また、AE の発生数の計測に際して、しきい値は 42dB とした。なお、AE は、縦横ひずみと同様に 2 チャンネルで実施し、全てのデータはその平均値を採用した。

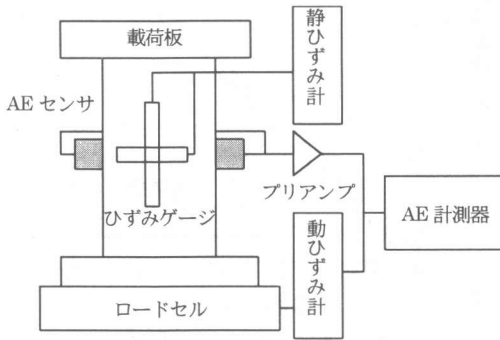


図-2 AE 計測装置

4. 実験結果及び考察

4.1 力学特性

初期接線ヤング率 E_0 を定量的に接線勾配として求めるため、応力-ひずみ曲線を以下の式で近似した。

$$\sigma = a_0 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 \quad (10)$$

ただし、 a_0 、 a_1 、 a_2 は係数である。

式(10)において、 $d\sigma/d\varepsilon|_{\varepsilon=0} = E_0$ とすると、

$$a_1 = E_0$$

となり、初期接線ヤング率 E_0 の算出が可能となる。式(10)を用いて E_0 を算出した一例を図-3に示す。

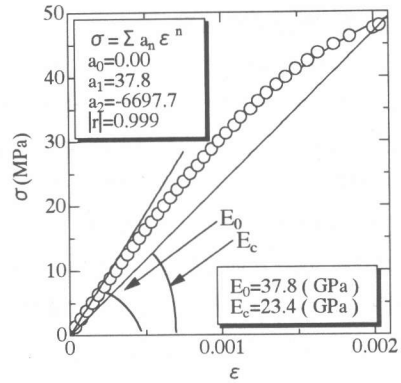


図-3 初期接線ヤング率の算出

式(10)により算出したヤング率を強度、相対動弾性係数とともに表-3に示す。表-3より、各供試体において、材齢、サイクル数による明確な変化が認められる。

表-3 力学特性

	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	相対動弾性係数 (%)
若材齢				
7 days	28.0	30.0	0.18	92.9
14 days	32.9	31.3	0.20	97.6
21 days	35.4	33.6	0.23	96.5
28 days	37.4	33.5	0.23	100
凍結融解				
0 cycle	56.3	43.6	0.24	100
10 cycle	54.1	42.4	0.22	98.3
20 cycle	51.8	37.8	0.21	95.0
50 cycle	48.4	36.4	0.16	96.7
長期材齢				
28 days	21.2	26.1	0.24	100
196 days	23.2	30.4	0.20	175

4.2 動弾性係数の考察

本研究で用いた供試体について、式(9)を用いて算出した動弾性係数と、式(10)を用いて算出した初期接線ヤング率との関係を図-4に示す。図中の直線は双方の値が一致した場合の理論直線である。図より、標準水中養生196日目の供試体以外は、ほぼ初期接線ヤング率に等しいことが解る。これより、動弾性係数と初期接線ヤング率はよく対応することが認められた。

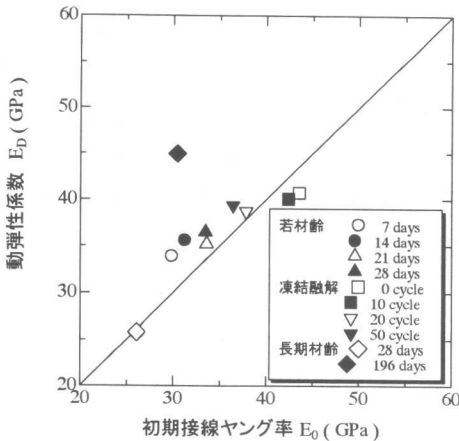


図-4 動弾性係数と初期接線ヤング率の比較

4.3 レートプロセス解析結果

レートプロセス解析により得られた結果の一例として、水中凍結融解試験0サイクル後の一軸圧縮試験結果を図-5に示す。解析を行う際、近似対象範囲は応力レベル V が、30(%)から80(%)の間とした。これは、荷重初期に端面で発生するAEと、終局付近で加速度的に発生するAEは、劣化に直接関連するとは考えにくいためである。図より、実験値と解析値がよく一致していることが認められる。よって、レートプロセス解析によりAE発生挙動は十分に近似されていることが分かる。

4.4 応力-ひずみ関係の解析結果

図-5と同じ供試体のローランドモデルでの解析結果を図-6に示す。図は応力と縦ひずみの関係を式(6)でモデル化した結果である。図より、

実験値と解析値がよく一致していることが認められる。よって、損傷変数 Ω を用いたモデルにより一軸圧縮下の応力-ひずみ挙動は十分に近似されていることが分かる。

なお、ローランドモデルでは、材料固有の定数である λ は以下の式で表せる。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (11)$$

式(11)より、 a 値と λ の相関関係を図-7に示す。図より劣化状態に関わらず a 値と λ には高い相関性が認められる。なお、図中の直線は、最小2乗法による一次近似直線である。これより、損傷の累積過程と a 値は強い相関性があることが認められる。

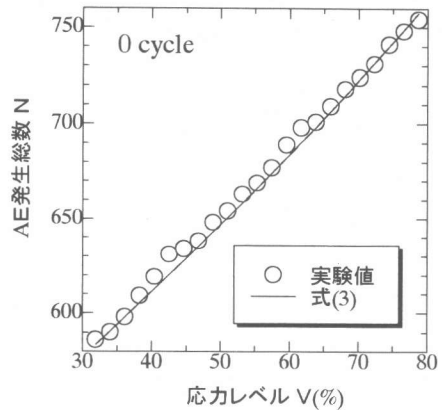


図-5 レートプロセス解析結果

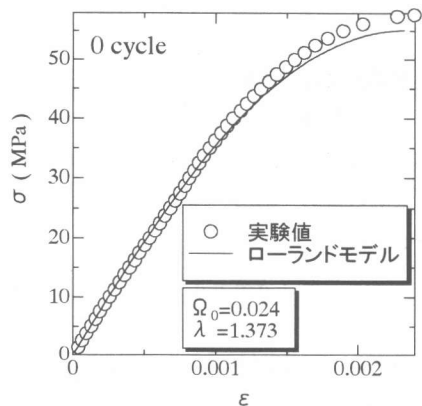


図-6 ローランドモデル解析結果

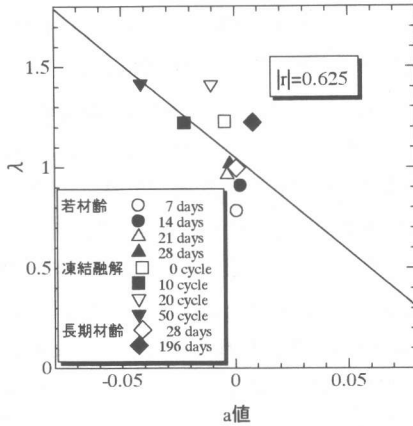


図-7 λとa値の関係

4.5 健全時のヤング率 E^* の算出

式(5)のように、損傷力学での初期損傷度 Ω_0 はコンクリートの損傷を示す定量的な指標として定義されている。しかしローランドモデルにおいては、 Ω_0 を求める際に健全時のヤング率 E^* が必須となる。しかし、既存の実構造物において健全時のヤング率 E^* を得ることは困難である。そこで、健全時のヤング率 E^* をAE計測結果から推定する方法を検討した。

コンクリートの圧縮特性を示すものとして、AE発生総数-応カレベル(図-5)、応カ-ひずみ(図-6)の關係に着目する。これら2つの關係に相関が見出せれば、AE法による損傷度評価が可能になると考えられる。

凍結融解試験を施したコンクリート供試体における一軸圧縮下でのヤング率の低下 E_0-E_c とレートプロセス解析値 a 値との相関關係及び相関式を図-8に示す。図のようにバラツキは認められるが、他のパラメータも含めた重回帰分析により、AEパラメータの中では a 値が最も高い相関性を持つことが判明している⁴⁾。この結果は、 a 値の増加がコンクリート中の損傷に関わる細孔容積の増加に対応するという港湾構造物での調査結果⁵⁾ともよく一致している。

ヤング率の低下 E_0-E_c は式(4)より、

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^*(1 - \Omega_0) - E^*(1 - \Omega_c) \\ &= E^*(\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (13)$$

図-8中の近似式より、以下の式を得る。

$$E_0 - E_c = E^*(\Omega_c - \Omega_0) = Xa + Y \quad (14)$$

$E_0=E^*$ の時、 $\Omega_0=0$ 、 $a=0$ と仮定すると、式(7)より以下の式が得られ、 E^* の推定がAEレートプロセス解析より可能となる。

$$E^* = E_c + Y \quad (15)$$

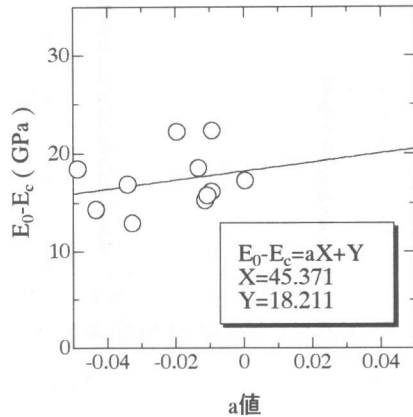


図-8 E_0-E_c とa値との相関關係

4.6 相対損傷評価

式(15)により、既存の実構造物において得ることが困難である健全なヤング率 E^* を算出することが可能と考えられる。そこで、長期材齢の供試体を用いて実験値の E_0 との相対比である、 E_0/E^* を求めることによって相対的な損傷度評価を試みた。その結果を図-9に示す。材齢28日ではほぼ1.0であったのが、材齢196日目では E_0/E^* の値が大きく1を越えている。

この結果より、式(15)を用いての相対損傷度評価の有効性が確認された。そこで、若材齢の供試体並びに凍結融解試験を行った供試体についても同様の手法で相対損傷度評価を行った。その結果を図-10に示す。凍結融解を行った供試体に関しては、サイクル数が増加するにつれ、明確な劣化が見て取れる。若材齢の供試体については、増加の傾向はうかがえるが、明確な変化

が見られず、全ての材齢においてほぼ1の値を示している。これは、初期養生段階にあるため、水和反応が停止していないためと思われる。しかし、長期材齢の供試体並びに凍結融解試験を行った供試体という、強度増進と劣化が明確な供試体については良好な結果が得られた。このことより、既存の実構造物の損傷度評価が可能となる可能性が示されたと考えられる。

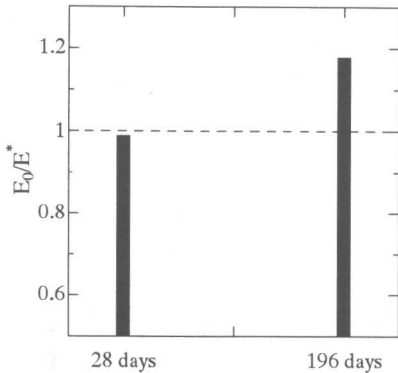


図-9 長期材齢の相対損傷度評価

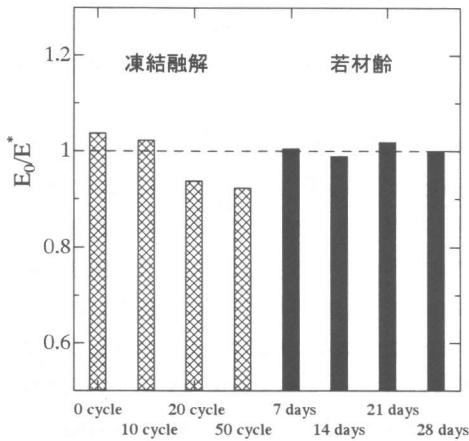


図-10 凍結融解試験を行った供試体並びに若材齢供試体の相対損傷度評価

5. まとめ

- (1) AE レートプロセス解析により、AE 発生挙動は十分近似され、その特性はパラメータ a , b によって表されていることが認められた。更に、パラメータの変化に伴い、一軸圧縮下での AE 発生挙動が損傷の有無によって異なることが明らかとなった。
- (2) ローランドモデルより、応力-ひずみの関係がよく近似された。また、 a 値と入には高い相関性が認められた。このことより、 a 値は損傷度を示すヤング率の低下との関連が認められた。
- (3) ヤング率の低下 $E_0 - E_c$ と a 値との相関関係から、近似式を用いることにより計算値としての健全時のヤング率 E^* が算出され、実験値のヤング率との相対比を求めることにより、損傷度を評価できる可能性が示された。これより、AE 法による定量的なコンクリートの損傷度評価の可能性が示された。

参考文献

- 1) 大津政康, 丹羽義次: アコースティックエミッションの特性と理論, 森北出版, 1988
- 2) 大津政康, 時任哲郎, 藤岡泰作: AE 法と損傷力学に基づいたコンクリートの劣化度評価, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.198-203, 1997
- 3) L.M.kachanov: Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986
- 4) 飯田剛史, 渡辺弘史, 友田祐一, 大津政康: AE レートプロセス解析のコンクリート損傷度評価への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.271-276, 2000.
- 5) Ishibashi, A., Matsuyama, K., and Ohtsu, M.: AE Application for Diagnosis of Deteriorated Concrete of Harbar Structures, Proc. 6th Int. Sym. on AE from Composite Materials, pp.145-152, 1998.