

論文 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

飯田 剛史*¹・渡辺弘史*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, コンクリート躯体の損傷度を定量的に評価する手法について研究した。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部の損傷累積を評価しうることを明らかにし, 損傷力学に基づいた損傷度パラメータがレートプロセス解析結果から推定可能なことを示した。既設構造物のコア供試体試験でも AE 法による損傷度評価法の有効性を検討した。

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

近来, コンクリートにおける“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劣化や耐久性低下の事例が報告され始め社会的にも大きな反響を引き起こしている。そこで, コンクリートの耐久性についての診断技法の確立が求められており, 構造物の定量的な損傷度評価法の確立は重要なものとなっている。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⁾。

本研究では, 損傷を受けた構造物コンクリートの損傷度評価を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した。実験では水中凍結融解試験により人工的に損傷させ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。また, 実構造物より採取したコンクリート・コア供試体についても同様の手法で一軸圧縮下での AE を計測し, これら AE 計測結果を比較検討す

ることにより, AE 法による材料損傷評価法の有効性を検討した。

2. 解析理論

2.1 レートプロセス解析²⁾

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。総 AE 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。

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

次に, 式(1)で得た AE 発生確率関数 $f(V)$ に対し, 以下の式のような双曲線関数を仮定する。

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

なお, ここでの a, b は定数である。

式(1), 式(2)より, 応力レベル V に対する総 AE 発生数 N との関係を以下のように近似する。

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

なお, 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。

*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 熊本大学技術官 工学部環境システム工学科

*4 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

2.2 ローランドモデル³⁾

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。

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

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

ここで、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。

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

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、

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

2.3 CEB-FIP Model⁴⁾

CEB-FIP Model Code 1990では、圧縮下での応力-ひずみ挙動図を以下の式で表している。

$$\sigma = \frac{A\eta - \eta^2}{1 + (A-2)\eta} \sigma_c \quad (8)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad (9)$$

$$A = \frac{E_0}{E_c} = \frac{E_0 \varepsilon_c}{\sigma_c} \quad (10)$$

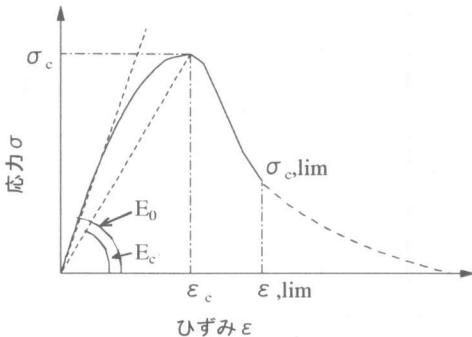


図-1 応力-ひずみ曲線

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。

また、発電所取水口ならびに既設橋の橋台及び橋脚より採取したコア供試体も実験に供した。

3.2 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 計測は、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。

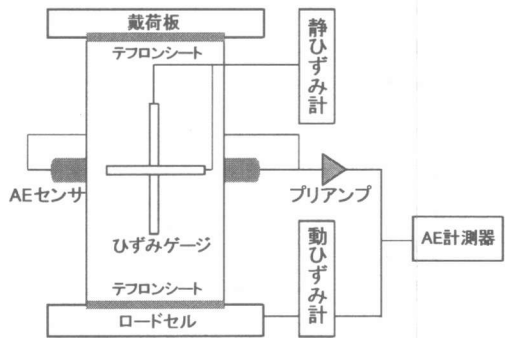


図-2 AE 計測装置

表-1 示方配合

最大粒径 (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	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	195.6	11.0	7.6

4. 実験結果及び考察

4.1 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 300 サイクル後の一軸圧縮試験結果を図-3に示す。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。

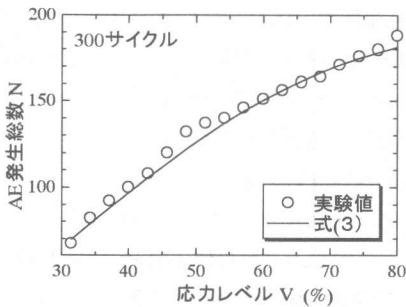


図-3 レートプロセス解析結果

4.2 応力-ひずみ関係の解析結果

図-3と同じ供試体のローランドモデルでの解析結果を図-4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。この場合の Ω_0 は0.064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。

同じく CEB-FIP Model Code 1990 による、応力-ひずみ関係を図-4に表す。CEB-FIP Model によっても圧縮下での応力-ひずみ挙動は十分にモデル化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。

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

これを式(8)と比較することにより、以下の関係が得られる。

$$A = 1 + \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

したがって、 λ とAは等価なパラメータであることが分かる。つまり、CEB-FIPのモデルには損傷力学の概念が反映されていることが分かる。そこで、 λ とa値の関係を図-5に示す。図より、コア供試体と強度の高いC, D, Hを別にすれば、打設コンクリートについては劣化状態に係わらずa値と λ には相関性が認められる。なお、全ての供試体の圧縮試験時での強度結果を表-2に示す。

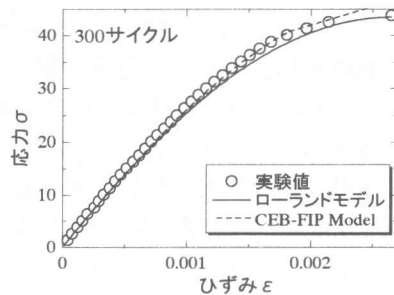


図-4 応力-ひずみ曲線

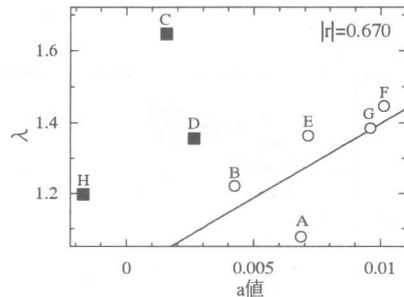


図-5 a値と λ の関係

表-2 圧縮強度

供試体	圧縮強度(MPa)
若材齢 A	25.9
若材齢 B	27.5
凍結融解 C	39.7
凍結融解 D	43.9
材齢 28 日 E	28.4
材齢 28 日 F	29.3
0 サイクル G	39.7
0 サイクル H	45.4

4.3 a値と細孔径分布

a 値が劣化度に関連することが認められるので、細孔径分布との関係を考察した。発電所取水口より採取したコア供試体を図-6のように海岸線に近い方から順に No1, No2, No3 と名付け、一軸圧縮下での AE を計測した。

また、採取したコア供試体に対して細孔径分布試験を行い、 $0.5\mu\text{m}$ 以上の細孔容積を劣化に関連する指標として評価した。a 値と $0.5\mu\text{m}$ 以上の細孔容積との関係を圧縮強度と併せて図-7に示す。図より、損傷の進行を示す a 値の増加と直径が $0.5\mu\text{m}$ 以上の細孔量の増加とは明確な相関があることが既報⁵⁾と同様に認められた。また、海岸線に近づく距離に応じてコンクリートの損傷が進んでいることが分かる。このことは圧縮強度のみでは明確に表れてはいないが、大きな細孔の容積増加としての耐久性の低下が示され、それに対応して AE のレートプロセス解析における a 値が増加していることが認められる。

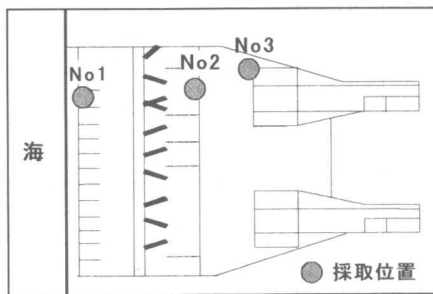


図-6 発電所取水口コア採取場所

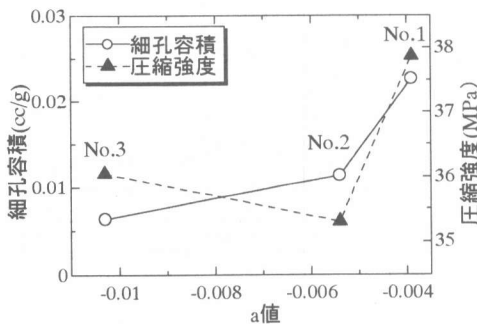


図-7 a 値と細孔容積

4.4 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。そこで、健全時のヤング率 E^* を AE 計測結果から推定し、 Ω_0 を算出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-応力レベル(図-3)、応力-ひずみ(図-4)の関係に着目する。これら 2 つの関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 値との相関関係及び相関式を図-8に示す。図のようにバラツキは認められるが、他のパラメータを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。

ところで式(4)より、ヤング率の低下 $E_0 - E_c$ は以下の式で表すことができる。

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

図-8中の近似式より、以下の式を得る。

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

$E_0 = E^*$ 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。

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

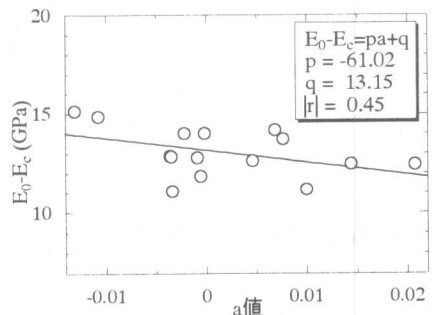


図-8 $E_0 - E_c$ と a 値との相関関係

4.5 相対損傷評価

既設橋梁の橋台、橋脚より採取したコア供試体について、一軸圧縮下での AE 計測を行い、レートプロセス解析を行った。図-9にコア供試体の採取位置を、図-10 に実験結果として、採取位置と a 値及び圧縮強度の関係を示す。

式(14)より健全なヤング率 E^* を算出し、実際の実験値 E_0 との相対比である E_0/E^* を求めることによって、採取したコア供試体の相対損傷評価を試みた。その結果を図-11 に示す。

図-10 によると、a 値においては A→C→B の順にコア供試体が損傷を受けていると考えられる。a 値が正の場合は劣化、負の場合は健全と考えるなら⁵⁾、橋台 A は健全、橋脚 B、C は損傷を受けていると評価できる。これを図-11 より、相対比 E_0/E^* について検討すると、橋台 A は健全であることを示す 1 以上の数値を示しているが、橋脚 B、C はいずれも 1 を下回っており、供試体はある程度の損傷を受けていると評価できる。なお、これらの解析結果は構造解析学上の橋台、橋脚に負荷する反力の大きさと対応している。

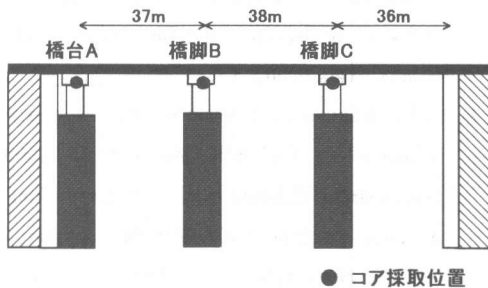


図-9 採取位置概要図

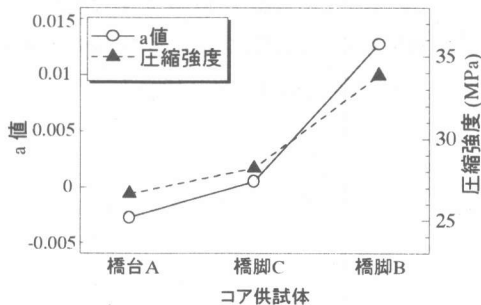


図-10 a 値と圧縮強度

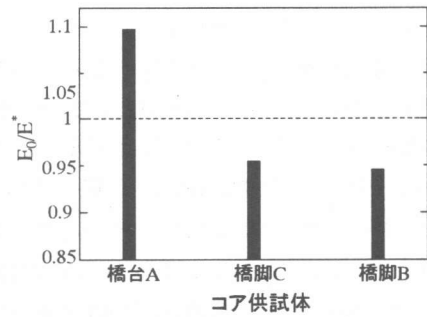


図-11 E_0/E^* による相対評価

4.6 初期損傷度 Ω_0 の算出

図-11 のように、 E_0/E^* が定量的に求められることが示されたが、その妥当性の検討として Ω_0 の値をこの手法より求め検討した。

水中凍結融解試験により、人工的に損傷を促進させたコンクリート供試体の一軸圧縮下での AE 計測を行い、レートプロセス解析を行った。図-12 にサイクル数と a 値及び圧縮強度との関係を示す。図のように、強度についてかなりのバラツキが認められ、損傷度の導入とサイクル数の対応は今回の実験ではあまり良くないことが認められる。これらの供試体の E_0 より Ω_0 を決定した。

ローランドモデルより初期損傷度 Ω_0 は以下の式で導かれる。

$$\Omega_0 = 1 - \frac{E_0}{E^*}$$

$$\Omega_0 = 1 - (1 + \lambda)(\Omega_c - \Omega_0) \quad (16)$$

これより、初期損傷度 Ω_0 は λ と $\Omega_c - \Omega_0$ により算出可能であると分かる。また、式(13)、式(14)より、以下の式を得る。

$$\Omega_c - \Omega_0 = \frac{E_0 - E_c}{E_c + q} \quad (17)$$

式(17)より、図-8を参考に a 値、 E_0 、 E_c によって、理論式としての $\Omega_c - \Omega_0$ が算出可能であることが分かる。式(17)より得られる $\Omega_c - \Omega_0$ を、ローランドモデルにより得られた実際の実験値での $\Omega_c - \Omega_0$ と比較したものを図-13 に示す。図中の直線は双方の値が理論上一致した場合の直線である。図より双方の値は非常に良い精度

で一致していることが分かる。

そこで、式(16)に式(17)より求めた $\Omega_c - \Omega_0$ を代入し、計算値としての Ω_0 を算出した。その結果を図-14に示す。図中の直線は双方の Ω_0 が理論上一致した場合の直線である。図-12のように、データとしてはまだ不十分であるが、計算式によって算出した Ω_0 により、本来未定であるはずの既存の実構造物の Ω_0 が求められる可能性が示されたと考えられる。

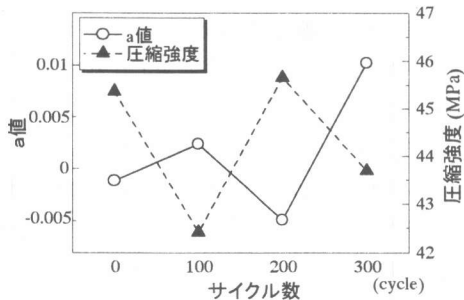


図-12 a値と圧縮強度

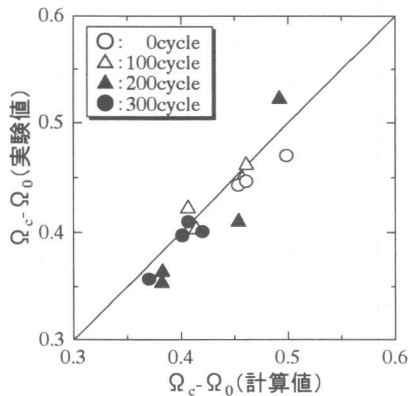


図-13 $\Omega_c - \Omega_0$ の比較

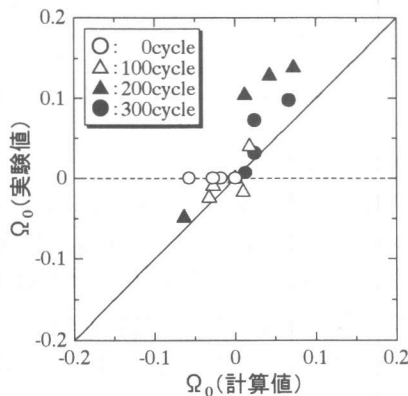


図-14 Ω_0 の比較

5. まとめ

- (1) 劣化に対応する大口径の細孔容積の増加と a 値の増加がよく対応していることより、AE レートプロセス解析による材料損傷評価法の有効性が確認された。
- (2) ローランドモデル、CEB-FIP Model より、応力-ひずみの関係がよく近似され、また a 値と入には相関性が認められた。よって a 値は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、損傷度 $\Omega_c - \Omega_0$ を求めることにより計算値としての初期損傷度 Ω_0 が算出され、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, pp198-203, 1997
- 3) L.M.kachan: Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986
- 4) G.De Schutter: Extension towards Early Age Concrete of CEB-FIP Model Code 1990 Stress-strain Relation for short-Term Compressive Loading, ACI Materials Journal, vol.96, No1, pp95-100, 1999.2
- 5) 松山公年, 大田資郎, 石橋晃睦, 濱田秀則: AE 法によるコンクリートの劣化度評価, 構造物の診断に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp159-166, 1998.7