

データベース構築に基づくAE法による劣化 コンクリートの定量的損傷度評価に関する研究

大津政康¹・鈴木哲也²

¹ 工博 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生科学専攻 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

² 修士 (農学) 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生科学専攻 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

In order to carry out maintenance and management of concrete structures, it is necessary to evaluate not only the strength of concrete but also the degree of damage. Quantitative damage evaluation of concrete is developed using acoustic emission (AE) method and damage mechanics. In the present study, damaged concrete are examined. Quantitative damage evaluation method based on fracturing behavior under unconfined compression is studied. AE behavior of concrete is dependent on the degree of damage, and could be simulated, applying the rate process analysis. Using Loland's model, a relationship between stress and strain is modeled, and an applicability of the damage parameter is confirmed. By calculating the relative damage from the database of AE rate process analysis, the relative damage of an actual structure is estimated.

.Key Words : AE , Rate process analysis , Damage mechanics , Loland's mode

1. はじめに

コンクリート構造物は、地震動による損傷や経年劣化が供用期間中に進行する。その結果、構造物の補修・改修の需要が増加することに伴い、損傷度を定量的に評価する必要性が見直されている¹⁾。

既設構造物の損傷状況は、設置条件や維持管理の状況により異なり、検査手法により調査精度が左右されるのが現状であることから、損傷度の定量的評価には課題が多い。

筆者らは、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission ; AE) 法を一軸圧縮試験に応用して、コア供試体を用いたコンクリートの定量的損傷度評価手法について検討している^{2), 3), 4), 5)}。これは、供試体の圧縮破壊時の AE 発生挙動を AE レートプロセス解析により近似し、応力-ひずみ挙動から損傷パラメータをローランドモデルにより評価するものである。既に凍結融解処理 (JIS A 1148) により人工的に劣化させた供試体や既設橋梁での提案手法の有効性を確認している⁶⁾。しかし、既設構造物へ応用する場合、同

一構造物で多数の供試体を採取することは物理的に不可能であることから、試験データの蓄積により、少数の供試体でも評価可能であることを検証する必要がある。

そこで、これまでの実験結果をデータベース化し、AE 法による既設構造物の定量的損傷度評価について検討した結果を報告する。

2. 解析手法

(1) AE レートプロセス解析

コンクリートの一軸圧縮下での AE 発生挙動は、微小ひび割れの発生過程と対応している。微小ひび割れは、漸増的に発生・集積され、主破壊となり、耐荷力の低下をもたらす。ひび割れ発生に対応する AE 発生挙動は、微小ひび割れの集積により累進的に増加する。この過程は、ある応力レベルで発生するひび割れ総数に依存し、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配すると考えられる。その場合には確率過程論による取り扱いが可能であり、本研究では一軸圧縮下の

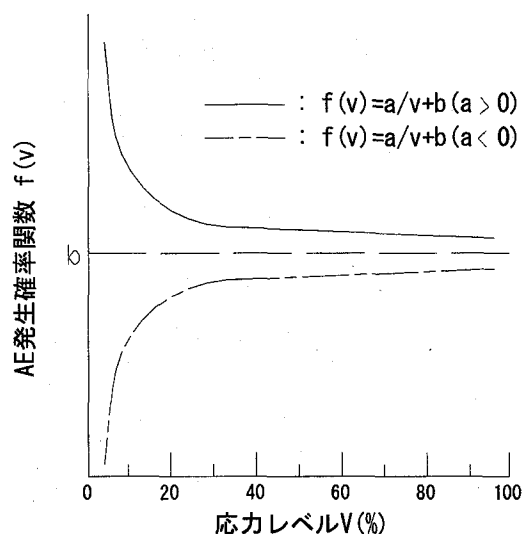


図-1 AE 発生確率関数と a 値の関係

AE 発生挙動の定式化にレートプロセス理論を適用した。

AE 発生総数 N 、応力レベル V の AE 発生確率関数を $f(V)$ とすると、 V から $V+dV$ への応力増分に対し、以下の式を得る。

$$f(V)dV = \frac{dN}{N} \quad (1)$$

式(1)の $f(V)$ を以下の双曲線関数と仮定する。

$$f(V) = \frac{a}{V} + b \quad (2)$$

なお、 a 、 b は定数である。

式(1)および(2)より、AE 発生総数 N と応力レベル V との関係を以下の式により近似できる。

$$N = C \cdot V^a \exp(b \cdot V) \quad (3)$$

なお、 C は積分定数である。

式(2)で a 値は応力レベル V での AE 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。AE 発生確率関数 $f(V)$ と a 値の関係を図-1 に示す。 a 値が正ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで高いことを意味し、構造物が劣化した状態であると評価できる。 a 値が負ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで低いことを意味し、構造物が健全な状態であると評価できる。

したがって、一軸圧縮試験に AE 測定を導入し、レートプロセス解析を適用することにより、AE 発生挙動からコンクリートの損傷度を定量的に評価することができる²⁾。

(2) ローランドモデル^{3,4)}

損傷力学における損傷変数 Ω は弾性係数の相対的变化として、以下のように定義される。

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

ここで、 E ：コンクリートの弾性係数

E^* ：損傷のないと想定された場合の弾性係数

である。ローランドは、損傷変数 Ω と一軸圧縮下でのひずみとの関係を以下のように仮定している。

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

なお、 Ω_0 ：初期損傷度

A_0 、 λ ：材料固有の定数

式(4)および(5)より以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma &= E^* (1 - \Omega_0 - A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \\ &= E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし

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

である。

3. データベース構築に伴う弾性係数 E^* の推定

(1) 健全時の弾性係数 E^* の推定

本研究では、AE 発生挙動をレートプロセス解析により、応力-ひずみ曲線をローランドモデルにより近似した。定量的損傷度評価は、これらの結果から健全時の弾性係数 E^* の推定し、初期接線弾性係数 E_0 との相対比である E_0/E^* を求めた。その際、既設構造物から採取された少数の供試体でも検討手法が適用できるよう、計測結果のデータベースを構築した。データベースに関する詳細は次項に示す。

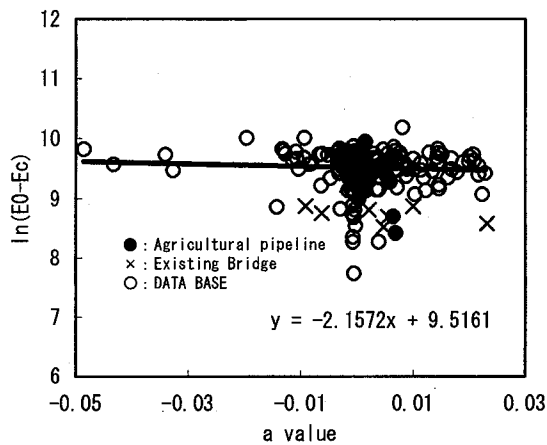


図-2 $\log_e (E_0 - E_c)$ と a 値との関係

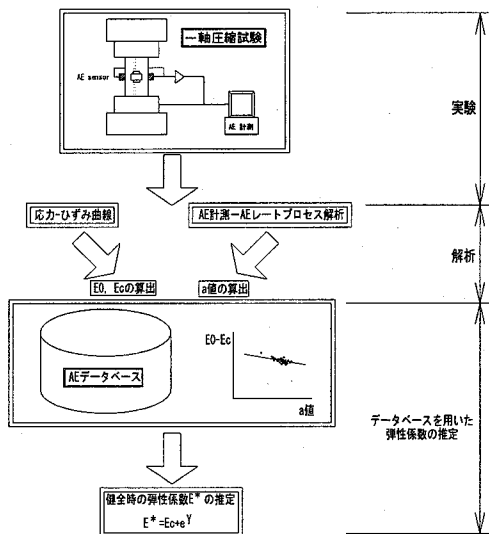


図-3 データベース概念図

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」の関係(図-5)、「応力-ひずみ」の関係(図-6)に着目した。一軸圧縮下での弾性係数の変化 $\log_e (E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析の a 値との関係を図-2に示す。一軸圧縮下での弾性係数の低下 $E_0 - E_c$ は式(4)より、

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^* (1 - \Omega_0) - E^* (1 - \Omega_c) \\ &= E^* (\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (8)$$

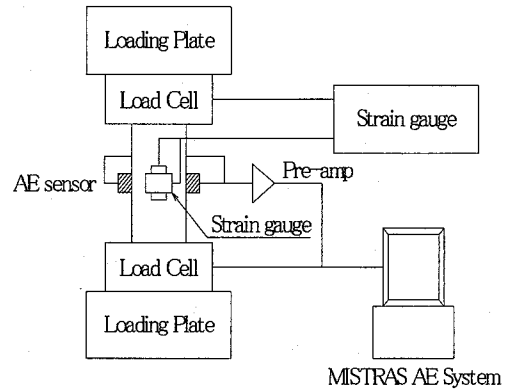


図-4 AE計測概要

図-2中の近似式より、以下の式を得る。

$$\begin{aligned} \log_e (E_0 - E_c) &= \log_e [E^* (\Omega_c - \Omega_0)] \\ &= aX + Y \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $E_0 = E^*$ のとき、 $\Omega_0 = 0$ 、 $a = 0$ と仮定すると、式(10)が得られ、これにより、健全時の弾性係数 E^* を AE レートプロセス解析結果から推定することが可能となる。

$$E^* = E_c + e^Y \quad (10)$$

(2) データベース概要

データベースは、1998年から2003年までの6年間に筆者らにより継続されてきた実験データ(250サンプル)を基礎としている。データの内訳は、「水中凍結融解処理を行った供試体」および「普通コンクリートの供試体」である。データベースの概要を図-3に示す。

4. 実験概要

(1) 供試体

実験に用いた供試体は、既設構造物より採取したものと、実験室内で水中凍結融解処理により劣化させたものの2種類である。既設構造物より採取したコア供試体は、農業用管路施設(10本)と橋梁(9本)より採取したものの2種類(19本)である。水中凍結融解処理を行った角柱供試体($w/c=55\%$ 、普通ポルトランドセメント)は、

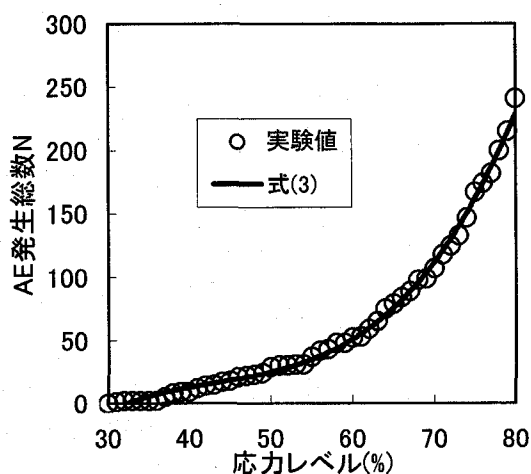


図-5 レートプロセス解析結果

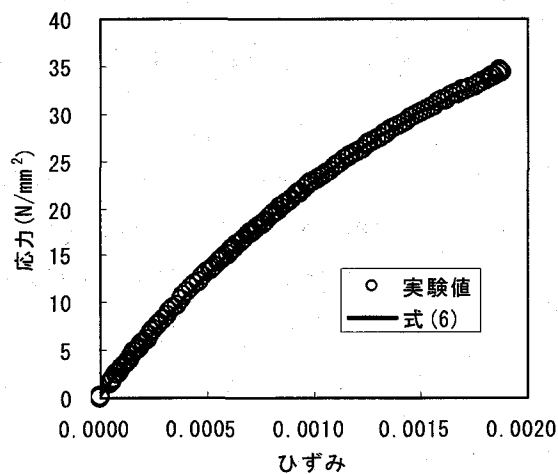


図-6 応力-ひずみ関係 (ローランドモデル)

4 種類 (0,100,200,300 サイクル) の実験条件で各 3 本作成した。

(2) AE 計測を伴う一軸圧縮試験

一軸圧縮試験時 (JIS A 1108) の AE 計測システムを図-4 に示す。供試体の載荷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 を低減させた。計測装置は MISTRAS-AE システムである。AE 計測条件は、広域帯型 (共振周波数: 約 1 MHz) の AE センサを使用した。周波数帯域は 60kHz ~ 1MHz である。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。しきい値は 40dB に設定し、不感時間は 2ms とし

た。なお、計測は、縦横ひずみと同様に 2 チャンネルで実施した。

5. 結果および考察

(1) 供試体の力学特性

既設構造物より採取した供試体は、圧縮強度が $8.0 \sim 20.4 \text{ N/mm}^2$ (管路施設), $26 \sim 36 \text{ N/mm}^2$ (橋梁) の範囲で推移した。同様の傾向は弾性係数においても確認され、初期接線弾性係数 E_0 は $8.7 \sim 34.0 \text{ GPa}$ (管路施設) を示した。実験室内で凍結融解処理を行った供試体は、サイクル数の増加に伴い圧縮強度および弾性係数が低下した。圧縮強度は、0 サイクルが 34.6 N/mm^2 に対して 300 サイクルは 32.9 N/mm^2 を示した。

(2) レートプロセス解析結果

一軸圧縮試験時に AE 計測を行った結果をレートプロセス解析により検討した結果の一例として、凍結融解処理 0 サイクル (28 日水中養生後) を図-5 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た。このことから、レートプロセス解析により劣化コンクリートの AE 発生挙動を近似できるものと考えられる。

(3) 応力-ひずみ関係の解析結果

図-5 と同一供試体において、ローランドモデルによる応力-ひずみ関係の解析結果を図-6 に示す。本図より圧縮応力下の応力-ひずみ挙動はローランドモデルにおいて十分に近似できるものと考えられる。このことから、本研究結果への損傷力学概念の導入による損傷度評価が可能であるものと考えられる。

(4) 弾性係数の推定に基づく相対損傷度評価

損傷力学における初期損傷度 Ω_0 は、式(4)に示すとおり、コンクリートの損傷に関する定量的な指標として定義されている。本研究では、実験値 E_0 と AE レートプロセス解析結果から推定し

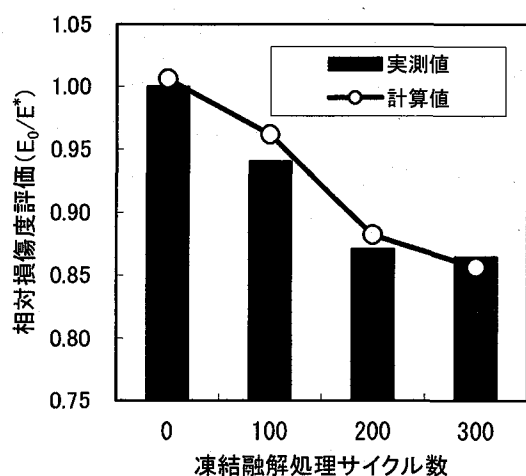


図-7 相対損傷度評価
(凍結融解処理サンプル)

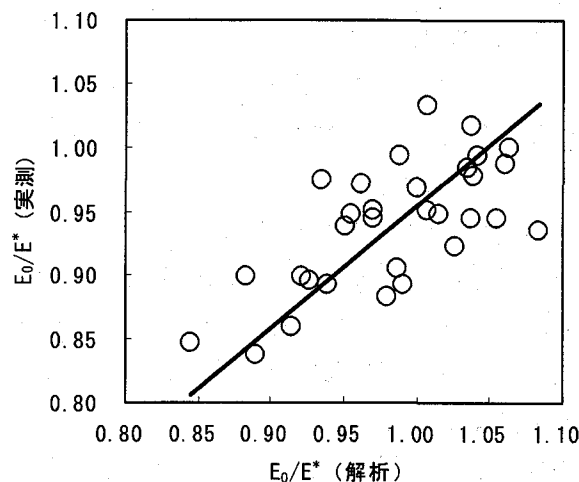


図-8 相対損傷度評価値の実測値と解析値の比較

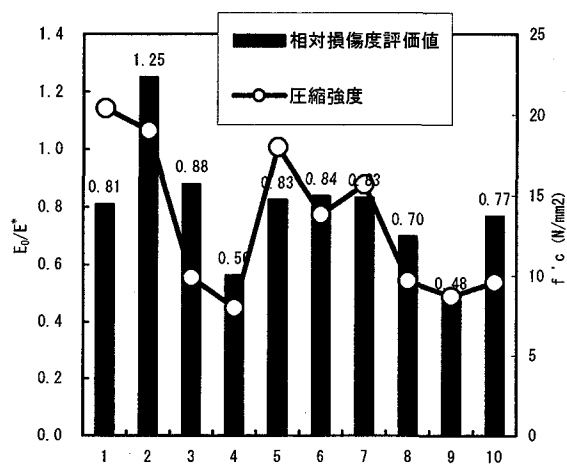


図-9 相対損傷度評価と圧縮強度の関係
(既設管路施設)

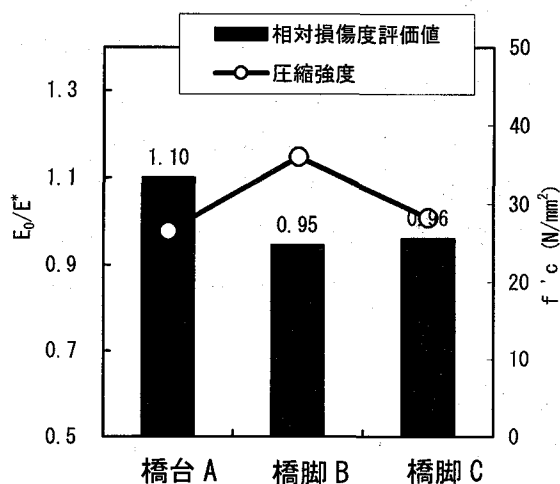


図-10 相対損傷度評価と圧縮強度の関係
(既設橋梁)

た E^* の相対比である E_0/E^* を求めることにより、各供試体条件の相対的な損傷度評価を試みた。凍結融解処理を行った供試体の結果を図-7 および図-8 に示す。サイクル数の増加に伴い相対損傷度評価値が低下した (図-7)。解析値と実測値を比較するとほぼ同一値になり、データベースを活用することにより少数の供試体でも定量的損傷度評価が可能であることが実験段階で確認できた (図-7、-8)。

そこで、既設構造物から採取した供試体について同様の方法で評価した結果を図-9 (管路施設) および図-10 (橋梁) に示す。管路施設の供試体 10 サンプルについて試験した結果、相対

損傷度評価値は 0.48～1.25 を示し、9 試料で 1.0 を下回った (1.0 以下が損傷あり)。相対損傷度評価は、圧縮強度の低い供試体ほど評価値が小さくなる傾向を示し、両者がほぼ同様の挙動を示した。これに対して、既設橋梁より採取した供試体では、採取部位により損傷度評価値の相違は確認されたが、圧縮強度はいずれの供試体も 26～36N/mm² の範囲で推移した。

これらのことから、圧縮強度のみでは構造物コンクリートの損傷状況を詳細に評価することは困難であるが、AE 計測結果を考慮することにより定量的に損傷度を評価することができるものと考えられる。

6. 結論

本研究の結果、劣化コンクリートの AE 発生挙動は、データベースの構築に基づく AE レートプロセス解析より定量的損傷度評価が可能であることが示唆された。

AE レートプロセス解析は、凍結融解処理および既設構造物より採取した供試体を用いた一軸圧縮試験における AE 発生挙動を十分に近似できた。応力-ひずみ曲線はローランドモデルにより評価することができた。

検討手法は、既存の実験データ (250 サンプル) のデータベース化により、少数の供試体においても適用が可能であることが示唆された。加えて、通常、圧縮強度のみでは明確にできない構造物コンクリートの損傷度を定量的に評価できる可能性が示唆された。

以上のことから、既設構造物を含むコア供試体の採取に制約のある条件下でのコンクリートの材質評価においてデータベース化に基づく AE レートプロセス解析が可能であるものと考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，2001.
- 2) M.Ohtsu: Rate Process Analysis of Acoustic Emission Activity in Core Test of Concrete, Proc. of JSCE No.442/V-16, pp.211-217,1992.
- 3) 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.
- 4) 渡辺弘史，一之瀬誠，友田祐一，大津政康：AE 法によるコア・コンクリート供試体の損傷度の同定，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23 No. 1, pp. 493-498, 2001.
- 5) 鈴木哲也，渡辺弘史，大津政康：AE 法によるコンクリートの定量的損傷度評価に関する研究，応用力学論文集 Vol.5, pp.809-816,

2002.

- 6) 大津政康，鈴木哲也：AE レートプロセス解析による既設構造物の定量的損傷度評価の考察，第4回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災成向上に関するシンポジウム論文集，pp. 7-12, 2003.