

# 論文 AE法によるコンクリート力学特性の推定に基づく損傷度評価法の開発

鈴木 哲也\*1・米野 現樹\*2・磯田 俊郎\*2・大津 政康\*3

**要旨**：コンクリート構造物の維持管理や補修・改修計画の策定には、損傷度の定量化が不可欠である。筆者らは、アコースティック・エミッション法および損傷力学を応用して、一軸圧縮試験にAE計測を導入し、計測結果のデータベース化に基づく構造体コンクリートの損傷度評価法を開発している。本報では、これまでに構築したAEデータベースの統計的特性を検討し、データベースによる弾性係数の推定に基づく定量的損傷度評価を試みた。その結果、データベース化に基づく損傷度の定量化が可能であることが明らかになった。

**キーワード**：AEレートプロセス解析, コンクリート力学特性, データベース, 損傷度評価

## 1. はじめに

コンクリート損傷度の定量化は、既設構造物の補修・改修の重要な判断材料である。筆者らは、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission ; AE) 法および損傷力学を応用して、コア供試体を用いた定量的損傷度評価法を開発している<sup>1), 2), 3), 4), 5), 6)</sup>。これは、供試体の圧縮試験時のAE発生挙動をAEレートプロセス解析により分析し、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。既に水中凍結融解処理 (JIS A 1148) により人工劣化させた供試体<sup>4)</sup>や既設港湾構造物<sup>2)</sup>などで本手法の有効性を確認している。加えて、評価値のデータベース化により少数の供試体でも評価できる手法を開発中である<sup>5), 6)</sup>。

本報では、既存のAE計測結果をデータベース化し、データベースを用いて推定したコンクリート力学特性の統計的特性と健全時の弾性係数 $E^*$ の推定精度を検討し、構造体コンクリートの定量的損傷度評価を試みた結果を報告する。

## 2. 解析理論

### 2.1 コンクリート圧縮破壊過程の定量化手法

コンクリートの圧縮破壊過程の定量化にAE計測を導入した。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おり、その定式化にレートプロセス理論が適用できる。

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(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。 $a$ 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、コンクリートが劣化した状態であると評価することができる。 $a$ 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、健全な状態であることが評価できる。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、コンクリートの破壊挙動を定量的に評価できる。

損傷度の定量化には、損傷力学理論を導入した。損傷力学における損傷変数 $\Omega$ は弾性係数の

\*1 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科 博士 (工学) (正会員)

\*2 熊本大学大学院 自然科学研究科博士前期課程環境土木工学専攻

\*3 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生科学専攻教授 工博 (正会員)

相対的变化として、以下のように定義されている。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (3)$$

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。損傷変数  $\Omega$  と一軸圧縮下でのひずみとの関係は下式となる。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (4)$$

なお、 $\Omega_0$ ：初期損傷度

$A_0, \lambda$ ：材料固有の定数

式(3)および(4)より以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma &= E^* (1 - \Omega_0 - A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \\ &= E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし

$$E_0 = E^* (1 - \Omega_0) \quad (6)$$

である。

## 2.2 健全時の弾性係数 $E^*$ の推定論理

圧縮応力下での AE 発生挙動は、レートプロセス理論により解析し、応力 - ひずみ挙動はローランドモデルにより近似した。これらの結果を踏まえて AE データベースを構築した。本研究では、構築したデータベースを用いて、健全時の弾性係数  $E^*$  を推定し、初期接線弾性係数  $E_0$  との相対比である  $E_0/E^*$  (相対損傷度評価) から定量的損傷度評価を試みた。AE データベースの統計的特性は次項に示す。

「AE 発生総数 - 応力レベルの関係」と、「応力 - ひずみ」の関係に着目し、それにより得られ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-1に示す。一軸圧縮下での弾性係数の低下  $E_0 - E_c$  は式(3)より、

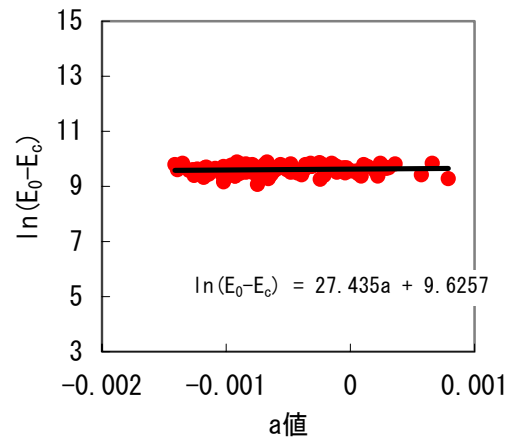


図 - 1  $\ln(E_0 - E_c)$  と  $a$  値との関係 ( $E^*$ (モデル))

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^* (1 - \Omega_0) - E^* (1 - \Omega_c) \\ &= E^* (\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $E_0$ ：初期接線弾性係数

$E_c$ ：終局時の割線弾性係数

である。

図-1 中の近似式より、以下の式を得る。

$$\log_e(E_0 - E_c) = \log_e [E^* (\Omega_c - \Omega_0)]$$

これを直線近似すると、

$$\ln(E_0 - E_c) = aX + Y \quad (8)$$

ここで、 $E_0 = E^*$  のとき、 $\Omega_0 = 0, a = 0$  と仮定すると、式(9)が得られる。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。

$$E^* = E_c + e^Y \quad (9)$$

## 3. AE データベース構築法

### 3.1 データベース概要

本研究では、図-1の関係についてデータベースを作成した。これは、1988年から2005年までに熊本大学工学部複合材料学研究室において供試された120本(既設構造物より採取した供試体および促進中性化処理を施した供試体81本を

表 - 1 データベース概要

No.	コンクリート供試体の処理方法	本数	備考
1	水中養生 28 日	33	
2	水中凍結融解処理	87	100~300cycle
3	促進中性化処理	(41)	2~6 週令, 参考値
4	既設構造物	(40)	参考値
合計	-	120 (81)	

(\*1) 既設構造物から採取した供試体および促進中性化処理供試体は、参考値として用いている。

表 - 2 データベースの統計的特性

統計項目	$E_0$ (実験値)	$E^*$ (モデル)	$E^*$ (28 日)	$E^*$ (促進中性化)	$E^*$ (凍結融解)
平均	31.4	29.7	30.5	20.6	31.3
最頻値	29.7	28.3	30.5	21.4	29.6
標準偏差	2.82	2.58	1.60	3.14	2.83
分散	7.97	6.67	2.57	9.85	8.01
尖度	-1.24	1.25	0.35	-0.60	1.01
歪度	-0.02	-0.26	-0.79	0.35	-0.42
範囲	9.7	16.1	6.7	11.9	16.1
最小	26.6	21.7	26.2	15.8	23.0
最大	36.3	37.8	32.9	27.7	39.1
標本数	33	120	33	41	87

(\*1)  $E_0$  : 初期接線弾性係数,  $E^*$  : 健全時の弾性係数

(\*2) 平均値, 最頻値, 標準偏差, 範囲, 最小, 最大の単位は GPa である。

除く) の供試体から構成されている。表 - 1 にデータベースを構成している供試体の概要を示す。

データベースは、表 - 1 に示すデータ構成の異なる 4 種類のを構築した。促進劣化処理を施していない水中養生 28 日の供試体によるデータベース ( $E^*$ (28 日)) に加えて、促進中性化処理を施した供試体で構築したもの ( $E^*$  (促進中性化)), 水中凍結融解処理を施した供試体で構築したもの ( $E^*$  (凍結融解)), および水中養生 28 日と水中凍結融解処理を施した供試体で構築 ( $E^*$  (モデル)) したものの 4 種類である。

### 3.2 データベース構築と推定精度

データベースの統計的特性を表 - 2 に示し、構築したデータベースの推定式を表 - 3 に示す。

実験値である初期接線弾性係数  $E_0$  は、平均値 31.4(GPa) に対して最大値と最小値の範囲は 9.7(GPa) と平均値に対して約 31% の範囲で変動している。実験値の分布形状は、歪度が -0.02 (=0.0; 左右対称) であり、尖度が -1.24 (=3.0; 正規分布) であることから、実験値の平均値近傍への集中が認められる。

表 - 3 構築したデータベースによる推定式一覧

データベース	推定式	Y 値 (式(9))	備考
$E^*$ (モデル)	$\ln(E_0 - E_c) = 27.435a + 9.6257$	9.6257	採用モデル
$E^*$ (28 日)	$\ln(E_0 - E_c) = -85.52a + 9.6219$	9.6219	
$E^*$ (促進中性化)	$\ln(E_0 - E_c) = -864.54a + 8.4486$	8.4486	
$E^*$ (凍結融解)	$\ln(E_0 - E_c) = 43.716a + 9.6110$	9.6110	
実構造物	$\ln(E_0 - E_c) = -22.677a + 9.1153$	9.1153	

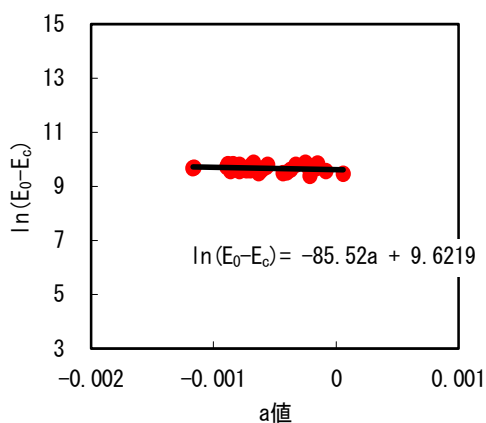


図 - 2  $\ln(E_0 - E_c)$  と  $a$  値との関係  
 $E^*$  (水中養生 28 日後)

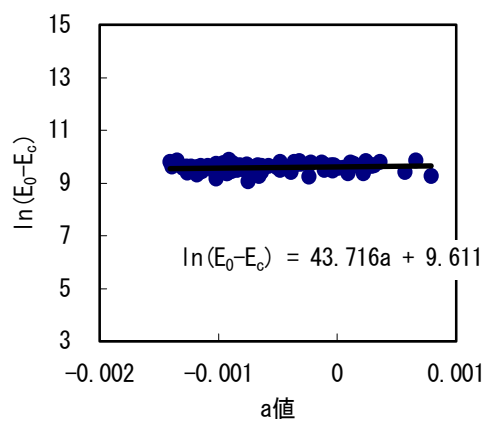


図 - 3  $\ln(E_0 - E_c)$  と  $a$  値との関係  
 $E^*$  (水中凍結融解処理)

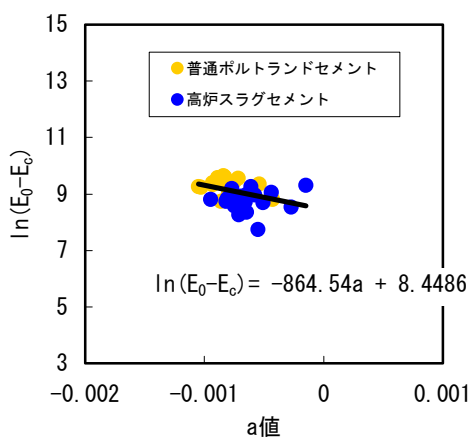


図 - 4  $\ln(E_0 - E_c)$  と  $a$  値との関係  
 $E^*$  (促進中性化処理)

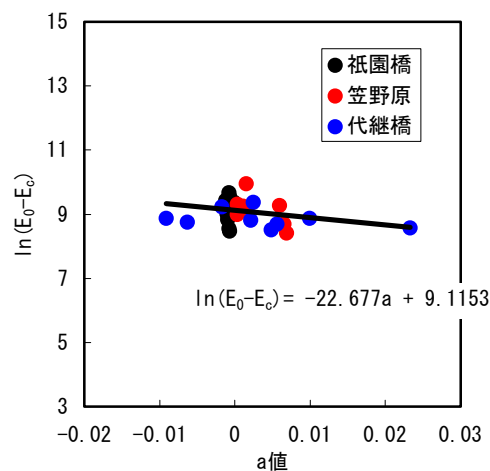


図 - 5  $\ln(E_0 - E_c)$  と  $a$  値との関係  
(実構造物)

それに対して、データベースにより推定した健全時の弾性係数  $E^*$  は、水中養生 28 日供試体と水中凍結融解処理を施した供試体により構築したデータベース（表-2 中の  $E^*$ (モデル)）の場合、平均値 31.2(GPa) と実験値に対して約 1% 低く安全側の評価になっている。水中養生 28 日供試体のみでデータベースを構築した場合 ( $E^*$ (28 日))、実験値に対する推定値の誤差は同様に 1% と実験値に対してほぼ同一値で評価している。推定値の範囲は、損傷を受けたコンクリートから  $E^*$  を推定していることから、実測値の評価値との相違は 1.66 倍になる。同様の傾向は、水中凍結融解処理を施した供試体においても確認された。促進中性化処理を施した供試体で構築したデータベース ( $E^*$ (促進中性化)) は、 $E^*$ (モデル) や  $E^*$ (28 日)、 $E^*$ (凍結融解) とは異なり、表-3 に示す Y 値が、他のデータベースと比較して低くなった。その結果、推定値が実験値 (平均) に対して 66% と低く評価されることになった。

以上のことから、各種供試体でデータベースを構築し、その特性を統計的観点から検証した結果、健全時の弾性係数  $E^*$  の推定には、促進中性化処理を施した供試体を除いて推定値の誤差は各モデルで実験値 (平均) に対して 1% 程度であり、モデルによる相違は少ない。本研究では、構築したデータベースが供用中のコンクリートを対象に弾性係数を推定することから、データベースの構成に水中養生 28 日供試体に加えて水中凍結融解処理を施した供試体を追加することにより、損傷を受けた供試体の特性を踏まえたデータベースを構築した。構築したデータベースは、図 - 1 および表 - 3 に示す  $E^*$  (モデル) である。

## 4. 実験概要

### 4.1 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をを用いた。コア供試体は、大正 7 年 (1918) に竣工したコンクリート構造物から採

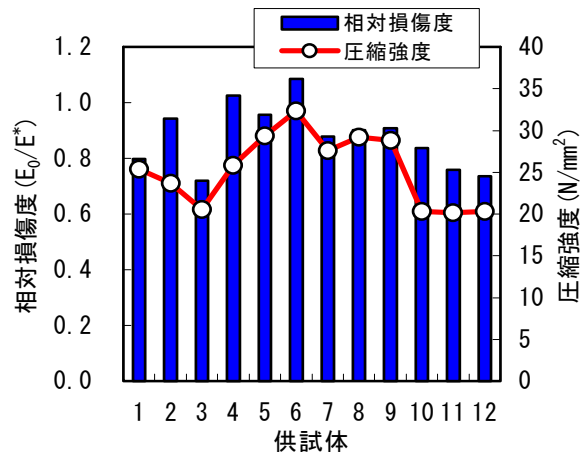


図 - 6 相対損傷度と圧縮強度の関係

取した 12 本 ( $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ) である。なお、凍結融解処理<sup>5)</sup>および促進中性化処理<sup>6)</sup>を施した供試体での検討結果は既報の研究により報告している。

### 4.2 AE 計測を伴う一軸圧縮試験

一軸圧縮試験時 (JIS A 1108) の AE 計測システムは既報<sup>5), 6)</sup>の通りである。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

### 5.1 損傷度の定量化と物性値の関係

本研究では、式 (3) に示す健全時の弾性係数  $E^*$  と初期接線弾性係数  $E_0$  との相対比である  $E_0/E^*$  (相対損傷度) による定量的評価を試みた。既往の研究<sup>5)</sup> から相対損傷度と圧縮強度とが密接な関係にあることが示唆されている。相対損傷度と圧縮強度の関係を図 - 6 に示す。同図より、評価値と圧縮強度とがほぼ同様の挙動を示すことが確認された。このことから、健全時の弾性係数の推定に基づく相対損傷度評価は、構造物コンクリートにおいて圧縮強度などの力学特性

に加えて、供試したコンクリートコア内部の微小クラックの蓄積による損傷度を定量的に評価できる可能性が示唆されたものと考えられる。

## 5.2 相対損傷度と相対動弾性係数の関係

そこで、3次元弾性体での縦波速度の定義式からポアソン比を考慮した動弾性係数  $E_d$  を算出し、構造体コンクリートにおいて相対損傷度と相対動弾性係数 ( $E_d/E^*$ ) との比較を試みた (図-7)。相対動弾性係数は、動弾性係数 ( $E_d$ ) と推定した健全時の弾性係数 ( $E^*$ ) の相対比である。図-7より、両者は図中の45度線上にほぼ1:1の関係を示し、構造体コンクリートにおいて、相対損傷度と相対動弾性係数 ( $E_d/E^*$ ) とは、ほぼ差異がないことが実験的に確認された。したがって、コア採取が困難な実構造物への損傷度評価の適用の可能性も示されたものと考えられる。

## 6. 結論

本研究の結果、コンクリート損傷度の定量化はAEデータベースの構築により可能であることが示唆された。以下に研究結果を列挙する。

- (1) 既存AE計測データのデータベース化により、健全時の弾性係数  $E^*$  を推定できる可能性が示唆された。
- (2) 既設構造物から採取した少数のコア供試体から健全時の弾性係数を推定し、相対損傷度評価が行なえる可能性が示唆された。
- (3) コンクリート力学特性である圧縮強度や動弾性係数と相対損傷度評価との関連が、構造体コンクリートにおいて示唆された。
- (4) AE法による圧縮破壊過程のモニタリングを行ない損傷度を定量的に評価でき、非破壊試験への拡張の可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) M.Ohtsu: Rate Process Analysis of Acoustic Emission Activity in Core Test of Concrete, Proc.

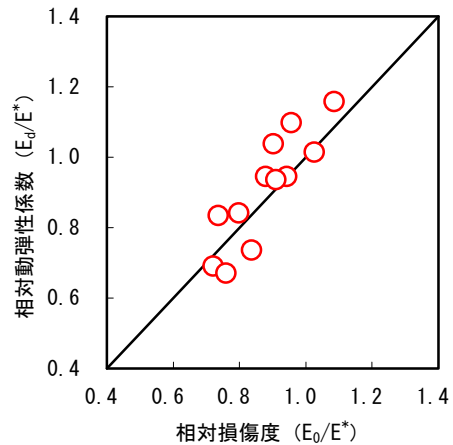


図-7 相対損傷度と相対動弾性係数の関係

of JSCE No.442/V-16, pp.211-217, Feb.1992.

- 2) 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, 2000.7.
- 3) 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, 2001.7.
- 4) 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, 2002.8.
- 5) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康: データベース構築に基づくAEレートプロセス解析による劣化コンクリートの定量的損傷度評価, コンクリート工学年次論文集 Vol.26, No.1 pp.1791-1796, 2004.7.
- 6) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康: AEレートプロセス解析に基づく中性化コンクリートの損傷度評価, 土木学会応用力学論文集, Vol.7, pp.1225-1232, 2004.8.