

論文 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 コンクリートの定量的損傷度評価

鈴木 哲也*¹・池田 幸史*²・米野 現樹*³・大津 政康*⁴

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，定量的な損傷度評価が不可欠である。本研究では，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，弾性係数の推定に基づく構造体コンクリートの定量損傷度評価について検討した。その結果，劣化コンクリートの損傷度は，既存の AE 計測結果のデータベース化により，サンプル数が少数でも定量的評価が可能であることが示唆された。

キーワード：AE レートプロセス解析，コンクリート，データベース，定量的損傷度評価

1. はじめに

近年，コンクリート構造物の損傷度評価には，構造物の強度特性に加えて，弾性波法を用いた各種評価手法の有効性が認められている¹⁾。

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，供試体の圧縮試験時の 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 - 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⁵⁾や既設港湾構造物³⁾などで本手法の有効性を確認している。しかし，提案手法を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，少数の供試体でも本手法の適用が可能であることを検証する必要がある。

本報では，既存の AE 計測結果をデータベース化し，AE 法による劣化コンクリート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

2.1 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 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。

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科博士後期課程環境共生科学専攻 修士 (農学) (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 (正会員)

*3 熊本大学 工学部環境システム工学科

*4 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)

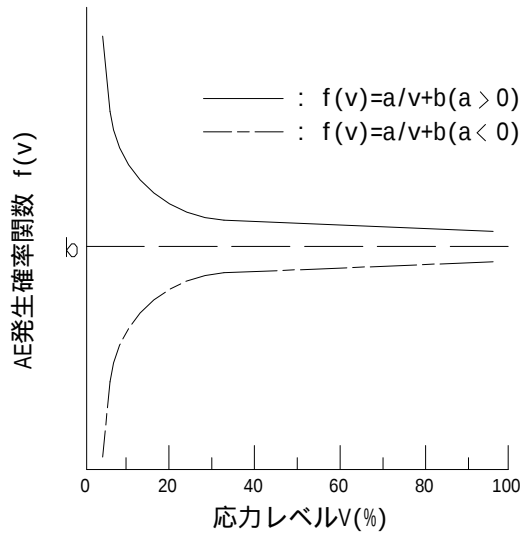


図 - 1 AE 発生確率関数と a 値の関係

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，構造物が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

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ている。

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

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。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 e^{-\lambda} \quad (5)$$

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。

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

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

3.1 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。定量的損傷度評価では，これらの結果から健全時の弾性係数 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^* 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。

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，

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

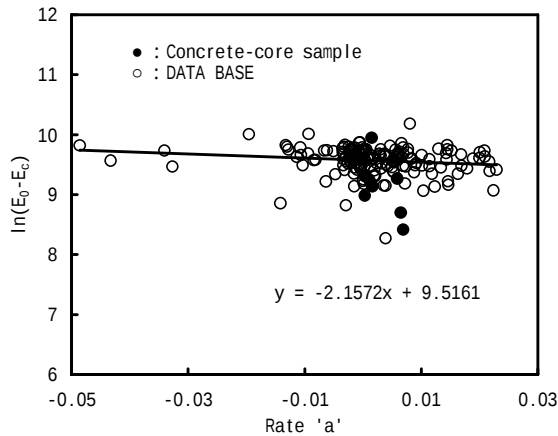


図 - 2 $\log_e (E_0 - E_c)$ と a 値との関係

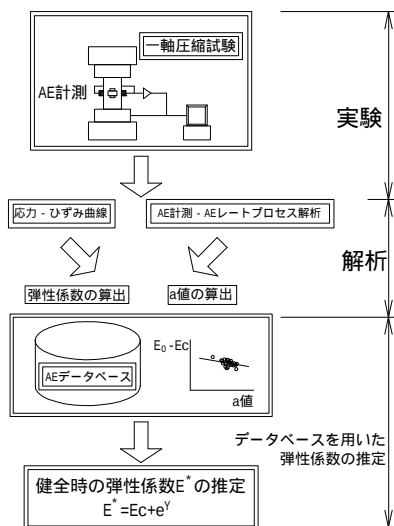


図 - 3 データベース概念図

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 - 2 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、

$$\ln(E_0 - E_c) = aX + Y \quad (9)$$

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である。

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

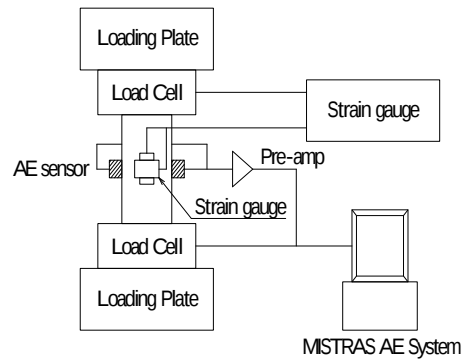


図 - 4 AE 計測概要

3.2 データベース概要

データベースは、1998 年から 2003 年まで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。なお、図 - 2 の関係には、このデータベースも示されている。

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、既設農業用管路施設より採取したものである。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、4 種類 (0, 100, 200, 300 サイクル) の実験条件で作製した。

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。

表 - 1 供試体の力学特性

No.	供試体	施工年	f'_c (N/mm^2)	E_0 (GPa)	E_c (GPa)
1	既設構造物	1979	20.4	26.2	18.2
2	既設構造物	1979	19.0	34.0	13.1
3	既設構造物	1979	9.9	22.9	11.9
4	既設構造物	1979	8.0	10.4	4.4
5	既設構造物	1967	18.0	19.9	10.0
6	既設構造物	1967	13.8	18.4	7.8
7	既設構造物	1967	15.7	18.6	8.2
8	既設構造物	1967	9.7	18.4	12.2
9	既設構造物	1967	8.7	8.7	4.2
10	既設構造物	1967	9.6	16.1	6.8
11	凍結融解 0 サイクル	-	34.6	31.8	17.3
12	凍結融解 100 サイクル	-	31.4	29.9	16.8
13	凍結融解 200 サイクル	-	32.7	27.7	17.1
14	凍結融解 300 サイクル	-	32.9	27.5	15.0

f'_c : 圧縮強度, E_0 : 初期接線弾性係数, E_c : 割線弾性係数

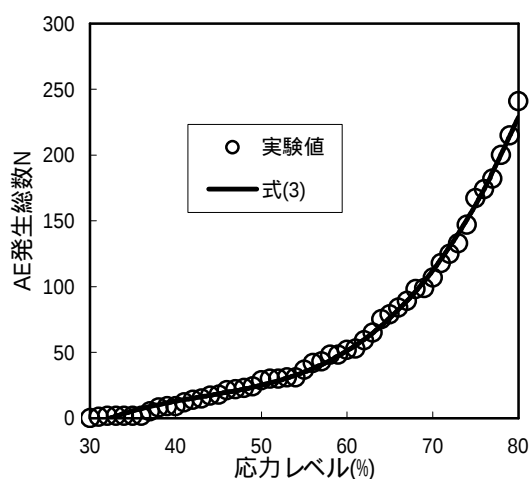


図 - 5 レートプロセス解析結果

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 供試体の力学特性

本研究に用いた供試体の力学特性を表 - 1 に示す。同一既設構造物より採取した供試体は,

圧縮強度が $8.0 \sim 20.4 \text{ N/mm}^2$ でサンプルによる相違が大きいことが確認された。同様の傾向は弾性係数でも確認された。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弾性係数が低下する傾向を示した。

5.2 レートプロセス解析結果

一軸圧縮試験時の AE 計測結果をレートプロセス解析により検討した一例を図 - 5 に示す。これは, 凍結融解処理 0 サイクル (28 日水中養生後) の供試体である。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た。他の供試体でも同様の結果が得られたことから, 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。

5.3 応力 - ひずみ関係の解析結果

図 - 5 と同一供試体における, 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ているものと考えられる。このことから, 本研

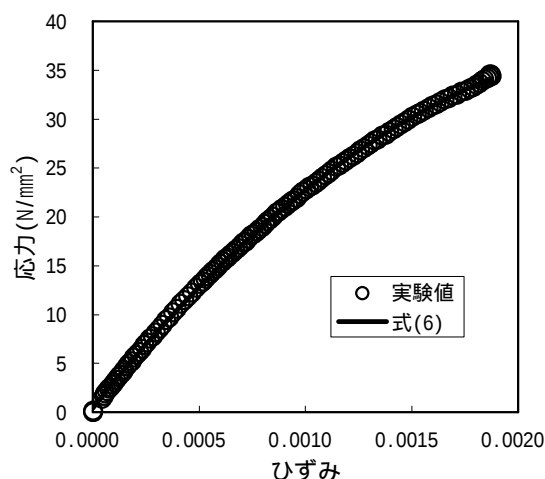


図 - 6 応力 - ひずみ関係 (ローランドモデル)

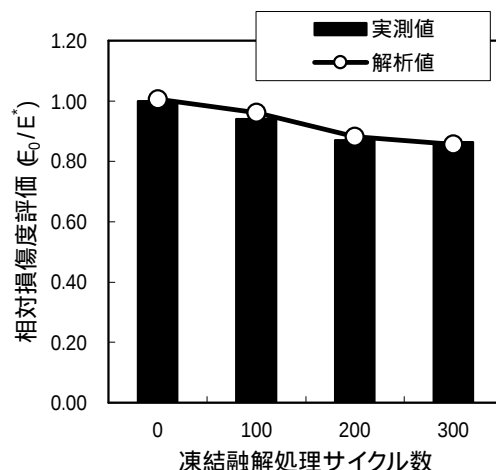


図 - 7 相対損傷度評価 (凍結融解処理)

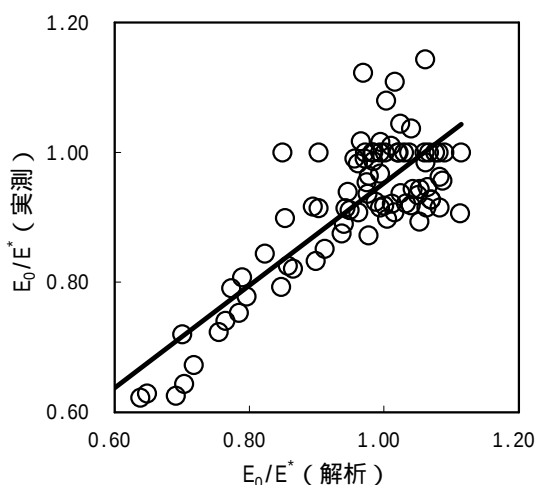


図 - 8 相対損傷度評価値の実測値と解析値の比較

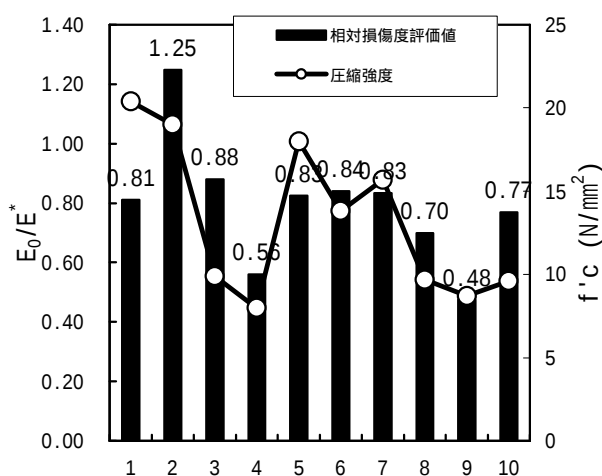


図 - 9 相対損傷度評価と圧縮強度の関係
(既設構造物)

究結果への損傷力学概念の導入による相対損傷度評価が可能であるものと考えられる。

5.4 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)に示す通り、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各サイクルの供試体の結果を図 - 7 および全データを図 - 8 に示す。相対損傷度評価値は、サイクル数の増加に伴い低下し、解析値と実測値がほぼ同一値になった。この結果から、データベース化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室段階で確認できたものと考えられる。

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 に示す。供試した 10 サンプルで相対損傷度評価値が 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。これより、圧縮強度に加えて、相対損傷度評価を導入することにより強度のみによる評価を補うデータが得られるものと考えられる。

これらのことから、データベースを用いて弾

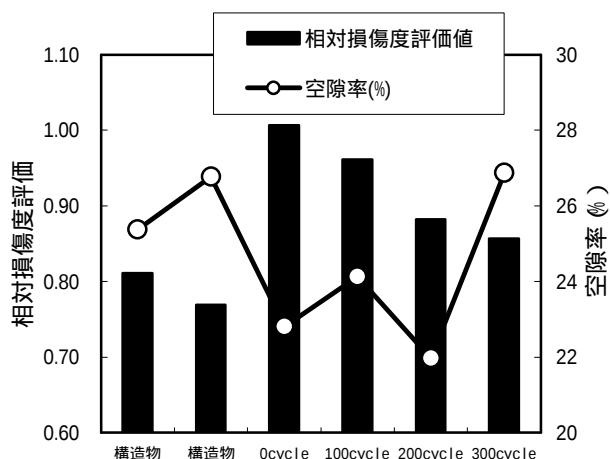


図 - 10 相対損傷度評価と空隙構造の関係

性係数 E^* を推定し、初期接線弾性係数 E_0 との比である相対損傷度 (E_0/E^*) による定量的損傷度評価の有効性が、既設構造物を含む劣化コンクリートにおいて示唆されたものと考えられる。

5.5 相対損傷度評価と空隙構造の関係

コンクリートを含む多孔質体の物性は、空隙構造に影響される。相対損傷度評価では、弾性係数や AE レートプロセス解析における a 値により供試体の空隙構造を間接的に反映させている。本項では、水銀圧入法による細孔径分布試験結果と相対損傷度評価との関係から、空隙構造が評価値へ及ぼす影響について考察する。

図 - 10 に相対損傷度評価と空隙率の関係を示す。なお、図 - 10 中の「構造物」は図 - 9 の供試体の一部について計測した結果である。空隙率の高い既設構造物および凍結融解処理 300 サイクルでは相対損傷度評価が低下する傾向にある。一般的に空隙率の増加に伴い圧縮強度は低下する。これは、微小クラックの蓄積による空隙率の増加が強度および相対損傷度評価の低下を引き起こすものと考えられる。

したがって、圧縮強度のみで構造体コンクリートの損傷度を評価するのではなく、AE 計測を一軸圧縮試験に導入することにより、定量的かつ空隙構造を考慮した損傷度評価が可能になるものと考えられる。そのためには、少数の供試体でも本検討手法の適用が可能となるデータベースの構築は有効であると考えられる。

6. 結論

本研究の結果、構造体コンクリートを含む劣化コンクリートの定量的損傷度評価は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) 劣化コンクリートの AE 発生挙動は損傷の有無により変化し、それはレートプロセス解析により近似できることが確認された。
- (2) 弾性係数の推定に基づく相対損傷度評価によりコンクリートの損傷度を推定できる可能性が示唆された。
- (3) 既存 AE 計測データのデータベース化により、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。
- (4) 圧縮強度や空隙率と相対損傷度評価との関連が、構造体コンクリートを含む劣化コンクリートで示唆された。

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.