

## 論文

## [1087] 塑性理論と AE 法に基づいたコンクリートの劣化度評価

福岡 貴己\*<sup>1</sup>・Ahmed. M. FARAHAT\*<sup>2</sup>・大津 政康\*<sup>3</sup>

## 1. はじめに

近年、終局破壊に至るまでのコンクリートの圧縮破壊挙動を解析することにおいて、塑性解析が使用されるようになり多くの成果が得られている。一方、AE法はコンクリートの劣化度を評価するのに有効的であり[1]、我々は、AEの発生頻度とコンクリートの劣化度の関係について研究している[2]。そこで本研究では、提唱中の応力空間塑性モデルにおける塑性仕事の増加を実験的に検討し、最大応力度点以降の除荷と再載荷による繰り返し載荷時の軟化領域での破壊の度合いについて、AE法により実験的に検討することにした。

現在、健全なコンクリートにおいては、応力空間塑性モデルを使用して圧縮破壊挙動を解析することは既に行われているが[3]、劣化コンクリートにおいては、まだ行われていない。そこで本研究では、応力空間塑性モデルを、劣化コンクリートにも適用可能かどうか検討することを試みた。その為、凍結融解作用によりコンクリートを劣化させる実験を行い、塑性劣化を評価する為に、AE計測法を適用して終局破壊に至るまでの健全なコンクリートと劣化コンクリートの一軸圧縮実験を行った。これらの一軸圧縮試験結果に対して、劣化コンクリートの圧縮破壊挙動に対するモデルの適用性を検討するために数値解析を行った。この実験では、最大応力度点以降の除荷と再載荷の両方の過程における軟化領域での破壊の度合いも観察した。そして、塑性劣化における損傷パラメータを、AEの発生頻度から観察される結果と対応づけることを試みた。

## 2. 解析手法

塑性理論における塑性劣化は、塑性仕事の関数として一般的に定義づけられている[3]、[4]、[5]。このとき、塑性仕事 $W^P$ は次のように定義されている。

$$W^P = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{ij}$  : 応力テンソル

$d\varepsilon_{ij}^p$  : 塑性ひずみ増分テンソル

ここでは、劣化の度合いは、塑性仕事の関数である損傷パラメータ $\omega$ を使用して評価することにする。スカラー関数である損傷パラメータ $\omega$ は、マイクロクラックなどの進行により損傷の蓄積を表し、便宜上、塑性ひずみ履歴と関連づけられ、次のような形で定義されている[3]。

\*1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

\*2 カイロ大学講師 工学部土木工学科、工博 (正会員)

\*3 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

$$\omega = \frac{\beta}{\sigma_e \varepsilon_0} \int dW^p \quad (2)$$

ここで、 $\beta$  : 材料定数

$$\varepsilon_0 : \text{ピーク時の応力に相当するひずみ} \quad \varepsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c}$$

$\sigma_e$  : 一軸応力に相当する有効応力

$\varepsilon_0$  については示方書を参考にして0.002とし、種々の実験データについて数値解析により検討した結果、提唱中の応力空間塑性モデルでは、 $\beta = 0.25$ とすれば健全なコンクリート、劣化コンクリートともに適用し得ることが認められた。

### 3. 実験概要

本実験は直径10cm、高さ20cmの11個の円柱供試体を用い、一軸圧縮試験を行った。図-1は、供試体の典型的な応力ひずみ曲線の一部を示している。その供試体を、荷重をかける前に劣化の度合いによって、A、B、C、Dの4つのグループに分類した。図-1は、このうちグループAのNo.2の応力ひずみ曲線である。図-1中でunloadingを除荷、reloadingを再載荷とする。グループAは健全なコンクリートを表し、一方、グループB、C、Dは、最高温度4℃～最低温度-17℃を1サイクルとする凍結融解作用の程度によって、40、80、120サイクルの劣化コンクリートを表している。全供試体の配合は同一である。配合表は表-1に示され、また、表-2は凍結融解劣化の供試体の分類を示している。実験では、AEセンサを円柱供試体の中央に付け、破壊過程においてAEの発生頻度を測定した。計測条件は、増幅率60dB、周波数の範囲は10kHz～300kHzで、しきい値は120mVに設定した。

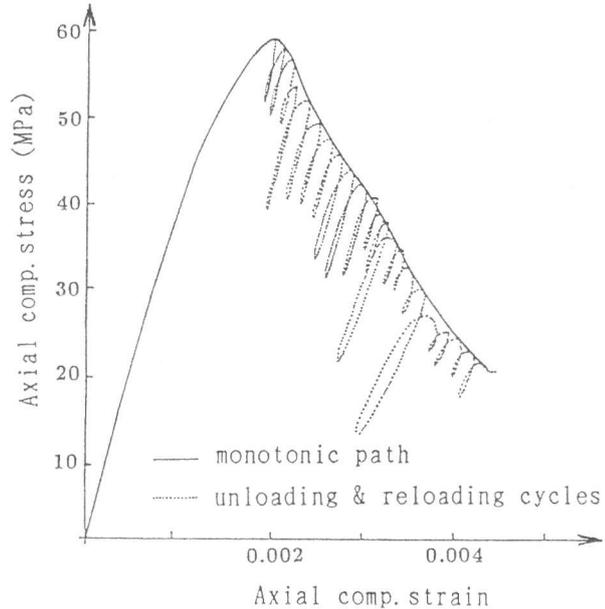


図-1 応力ひずみ曲線の一部

表-1 配合設計

単位重量 (Kg/m <sup>3</sup> )			
水	セメント	細骨材	粗骨材
172	378	735	1027

表-2 凍結融解劣化の供試体の分類

グループ	供試体数	サイクル数	相対弾性係数
A	2	0	1.000
B	3	40	0.914
C	3	80	0.710
D	3	120	0.854

#### 4. 結果及び考察

##### 4.1 A Eの発生頻度と損傷パラメータ $\omega$ の関係

図-2 (a), (b), (c), (d)は、健全なコンクリート、40, 80, 120サイクルそれぞれの劣化コンクリートの損傷パラメータ $\omega$ とA Eの発生頻度の間の関係を示している。損傷パラメータ $\omega$ は、例えば図-1の包絡線で示される曲線から、式(1)と式(2)を使用して算定される。これより、コンクリートの劣化に伴うA Eの発生頻度が増加するにつれて、モデルでの損傷パラメータ $\omega$ も増加することが認められる。図-3は、図-2の代表的な結果について、健全なコンクリートのA E- $\omega$ 曲線と各劣化コンクリートのA E- $\omega$ 曲線を比較したものである。これから分かるように、損傷パラメータ $\omega$ がある値までは、 $\omega$ の増加によってA Eの発生頻度も急激に増加しているが、それ以降は、A Eの発生頻度は緩やかに増加しており、A E総数の増加率は低下していることが認められる。

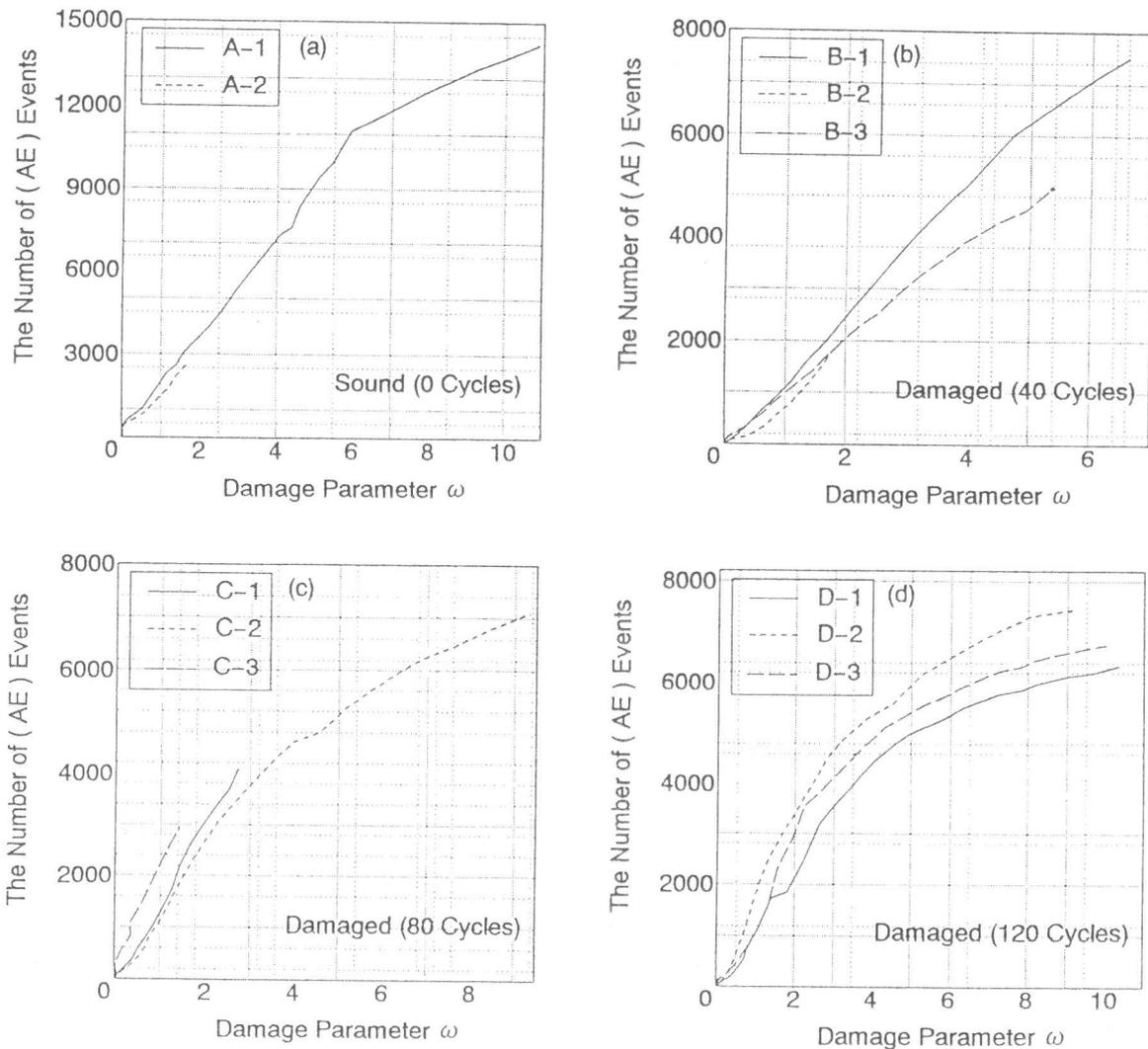


図-2 A Eの発生頻度と損傷パラメータ $\omega$ の関係

##### 4.2 除荷と再載荷の時の破壊度

図-1に示す、最大応力度点以降の繰り返し載荷時に対して、最大応力度点以降の除荷前の点

での応力レベル $\sigma_u$ と、除荷の時の破壊の程度との関係を検討する為に、破壊度 $R$ を、除荷前後に対応する単位応力当たりの $AE$ の発生頻度より定義した。さらに、最大応力度点以降の再載荷時の点での応力レベル $\sigma^*$ と、その時の破壊の程度との関係を検討する為に、破壊度 $R^*$ を、再載荷前後に対応する単位応力当たりの $AE$ の発生頻度で定義することにした。これより、除荷と再載荷の時の破壊度 $R$ と $R^*$ は、次のように求められる。

$$R = \frac{AE_{rel} - AE_{unt}}{\Delta\sigma} \quad \Delta\sigma = \sigma_u - \sigma_r \quad (3)$$

ここで、 $AE_{rel}$ ：除荷された点での $AE$ の発生頻度

$AE_{unt}$ ：除荷前の点での “

$\sigma_u$ ：除荷前の点での応力レベル

$\sigma_r$ ：除荷された点での “

$$R^* = \frac{AE_{ret} - AE_{rel}}{\Delta\sigma^*} \quad \Delta\sigma^* = \sigma^* - \sigma_r \quad (4)$$

ここで、 $AE_{ret}$ ：再載荷時の点での $AE$ の発生頻度

$AE_{rel}$ ：除荷された点での “

$\sigma^*$ ：再載荷時の点での応力レベル

$\sigma_r$ ：除荷された点での “

式(3)と式(4)の記号は、図-4に示されている。これより得られた応力レベルと破壊度の関係を、除荷時、再載荷時に対して図-5、図-6に示す。これらを見て分かるように、最大応力度点以降の応力レベルが下がるにつれて $AE$ 発生として破壊は進行している。特に、除荷の時も破壊は進行することが分かり、除荷と再載荷の時の破壊の進行度合いは、当然、除荷の時よりも再載荷の時の方がかなり高くなっていることが $AE$ 頻度数から認められる。

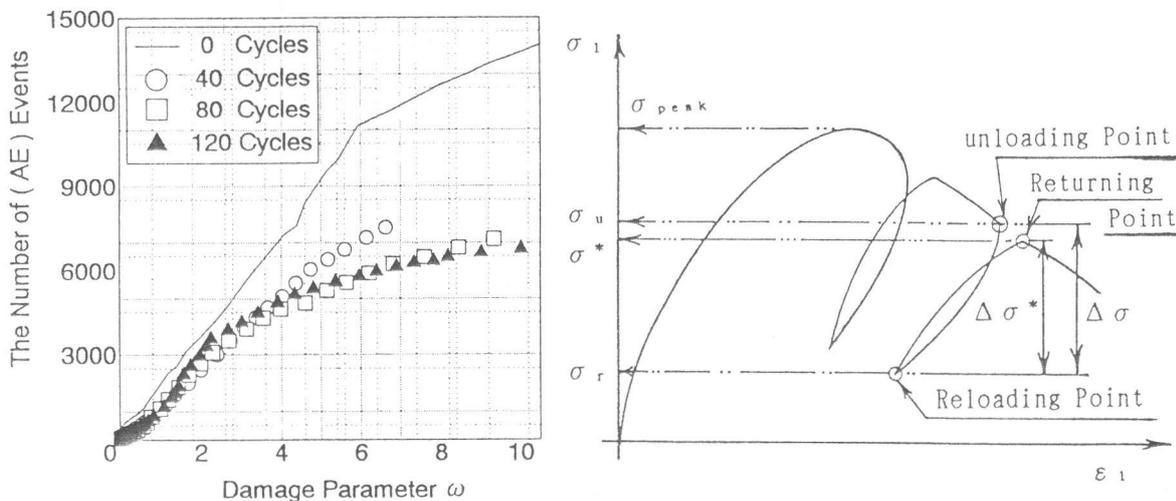


図-3 各劣化コンクリートの $AE-\omega$ 曲線の比較 図-4 軟化域での除荷-載荷ループ

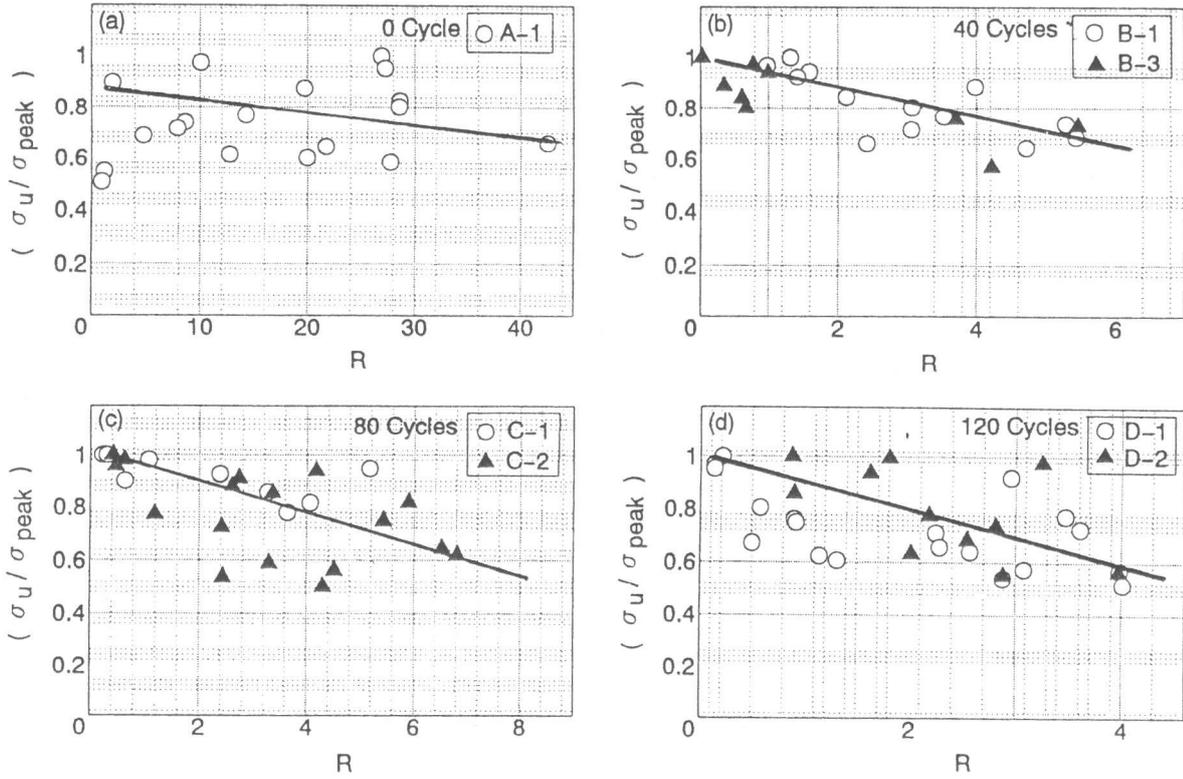


図-5 各劣化コンクリートの除荷時における破壊度

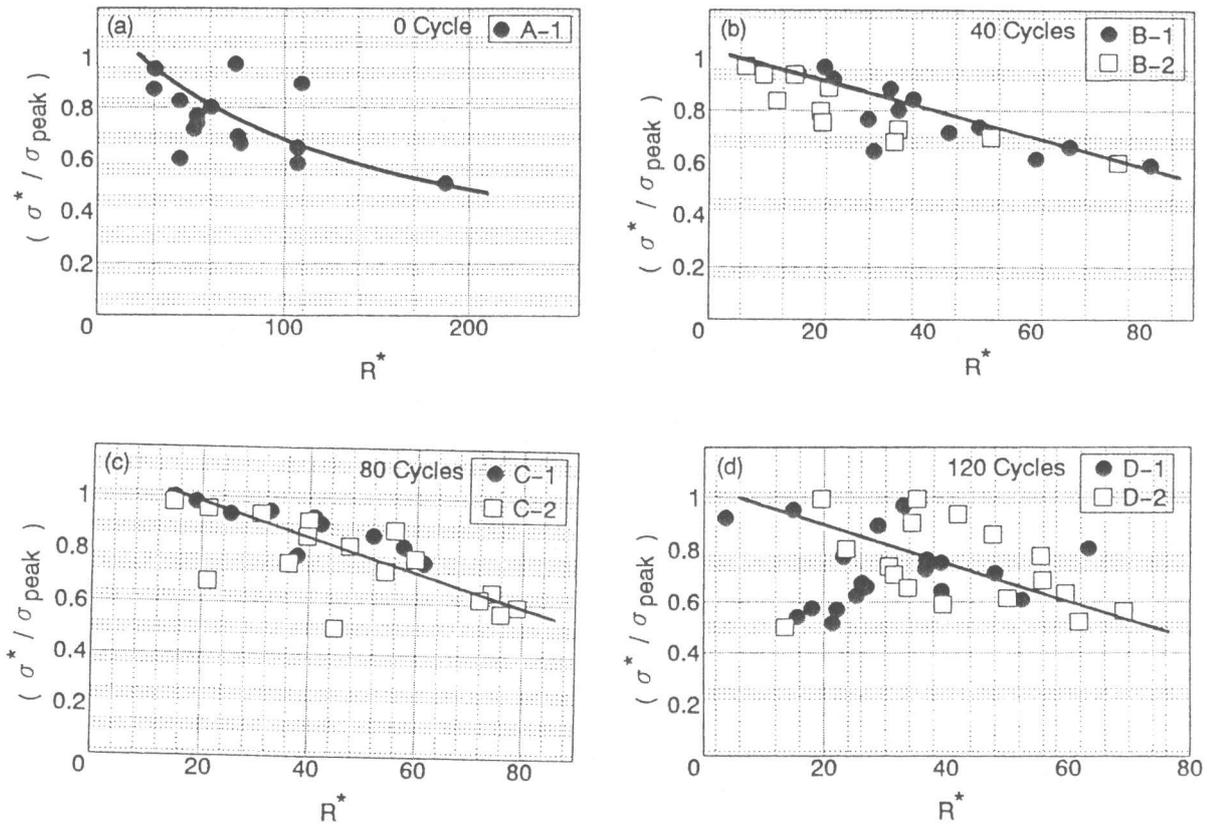


図-6 各劣化コンクリートの再載荷時における破壊度

## 5. 結論

本研究では、一軸圧縮荷重の影響の下で、最大応力度点以降の軟化領域での劣化の度合いを評価する為のA E法を適用することを試みた。劣化の度合いは、塑性仕事の関数である損傷パラメータ $\omega$ を使用して評価した。そして、提唱中の応力空間塑性モデルと実験との比較により、次のような結論を得た。

- 1) 塑性劣化における損傷パラメータ $\omega$ は、A E法によって観察される頻度で関係づけることができる。
- 2) A Eの発生頻度と塑性劣化における損傷パラメータ $\omega$ の関係は、コンクリートの劣化度を評価するのに有効的であり、A E- $\omega$ 曲線より、コンクリートの劣化に伴うA Eの発生頻度が増加するにつれて、モデルでの損傷パラメータ $\omega$ も増加することが認められた。
- 3) 最大応力度点以降の除荷と再載荷のどちらの場合にも破壊は進行し、最大応力度点以降の応力レベルが減少するにつれて、除荷時、再載荷時ともに破壊の進行度合いは高くなっている(A E発生頻度が多くなっている)ことが認められた。

## 6. 参考文献

- [1] Ohtsu, M. and Ono, K. : Crack Orientations and Moment Tensor Solutions in Acoustic Emission, Progress in Acoustic Emission III, eds. Yamaguchi, K., et al., The Japan Society for Non-Destructive Inspection (JSNDI), Tokyo, pp. 771-778, 1986
- [2] Ohtsu, M. : Acoustic Emission Characteristics in Concrete and Diagnostic Application, Journal of Acoustic Emission, Vol. 6, No. 2, pp. 99-107, 1987
- [3] Tanabe, T. and Wu, Z. S. : An Application of Work Hardening and Strain Softening Plasticity to Uniformly Cracked Reinforced Concrete Elements, Proc. of the 3rd International Conference on Computational Plasticity, Fundamental and Application, Pineridge Press, Sawnsea, UK, pp. 1705-1716, 1992
- [4] Farahat, A. M., Kawakami, M. and Ohtsu, M. : Strain-Space Plasticity Model for Triaxial Behavior of Concrete, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kumamoto University, Vol. 38, No. 3, pp. 1-24, 1993
- [5] Farahat, A. M., Kawakami, M. and Ohtsu, M. : Strain-Space Plasticity Model for the Compressive Hardening-Softening Behavior of Concrete, Journal of Construction and Building Materials, UK, 1994 (To be appeared)