

論文 劣化コンクリートの圧縮挙動の AE 法と塑性理論による評価

藤岡泰作*1・日高英介*2・友田祐一*3・大津政康*4

要旨：劣化したコンクリートの圧縮下の挙動を劣化度評価に適用するため、コア供試体の一軸圧縮試験へ AE 法と塑性理論を用いる解析方法を提案している。本研究では、水中凍結融解試験により 5 つの劣化程度の供試体を準備し、一軸圧縮試験を行った。そして、AE 法に関してはレートプロセス法により AE 発生頻度を近似し、塑性理論に関してはひずみ空間塑性モデルによりひずみの圧縮挙動をモデル化した。そこで決定した 4 つのパラメータを劣化度別に比較し、コンクリートの圧縮挙動と劣化度との関係の定量的な考察を試みた。

キーワード：AE、レートプロセス法、ひずみ空間塑性モデル、劣化度評価

1. はじめに

近年コンクリート構造物のひびわれによる早期劣化は大きな社会的問題となっており、そのため構造物の劣化診断法が必要とされている。そこで、劣化コンクリートの内部に生じた微小ひびわれの程度を評価するため、アコースティック・エミッション (AE) 法の適用が提唱されている [1]。一方、ひずみ空間塑性モデルが劣化コンクリートの圧縮挙動の解明にも適用できることが明らかにされている [2]。そこで、コンクリートの定量的な劣化度評価法の確立のため、AE 法と塑性理論を適用して、コンクリートの一軸圧縮挙動の評価を試みた。

実験では、水中凍結融解試験により人工的に劣化させたコンクリート供試体の一軸圧縮試験を行った。圧縮強度に達するまで AE とひずみを計測し、AE 発生挙動のレートプロセス解析と応力-ひずみ関係の塑性モデルに基づいたシミュレーションにより、劣化コンクリートの圧縮挙動を定量的に考察することを試みた。

2. 解析手法

2.1 レートプロセス解析

一軸圧縮試験における AE の発生特性の定量化のため、レートプロセス理論を適用する [3]。まず、応力レベル V (%) から $V + dV$ (%) までの AE 発生の確率関数 $f(V)$ を次のように仮定する。

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

ここで、 N は応力レベル V (%) までの総 AE 発生数である。既報では、この確率関数に次のような双曲線関数を仮定した [3]。

-
- *1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学科専攻 (正会員)
 - *2 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学科専攻 (正会員)
 - *3 熊本大学技術官 工学部土木環境工学科
 - *4 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

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

ここで、 a と b は定数である。この場合には、総 A E 発生数 N と応力レベル V (%) の関係が次のように得られる。

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

ここで、 c は積分定数である。一方、 $f(V)$ を一定とみなした場合 ($f(V) = b'$) には、次の結果が得られる。

$$N = c' \exp(b'V) \quad (4)$$

式(3)、(4)は、A E 発生と応力レベルの関係をレートプロセスとして表したものである。データ解析では両式の適用性を検討するため、A E 発生数に関する実験データから最小二乗法によりそれぞれの場合における a 、 b 、 c および b' 、 c' を決定した。

2. 2 ひずみ空間塑性モデル

ひずみ空間塑性モデルを応力空間における Drucker-Prager 型の破壊曲面から誘導した [4]。破壊関数 F と塑性ポテンシャル関数 G は応力空間のものをひずみ空間に変換し、全ひずみ ϵ_{ij} 、塑性ひずみ ϵ_{ij}^p 、载荷パラメータ $K(W_p)$ より次のように表現する。

$$F = \alpha A \overline{I_1} + \sqrt{B J_2} - K = 0 \quad (5)$$

$$G = \alpha A \overline{I_1} + C \sqrt{B J_2} - K = 0 \quad (6)$$

ここで、 $A = 3k$ 、 $B = 4\mu^2$ で、 k は体積弾性係数、 μ はせん断係数、 C および α は材料パラメータである。なお、ひずみテンソルの不変量 $\overline{I_1}$ 、 $\overline{J_2}$ は次の式より求められる。

$$\overline{I_1} = \epsilon_{ii} - \epsilon_{ii}^p \quad (7)$$

$$\overline{J_2} = \frac{1}{2} (\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) (\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^p) \quad (8)$$

ϵ_{ij} は偏差ひずみテンソル、 ϵ_{ij}^p は塑性ひずみテンソルである。また、载荷パラメータ K は弾性域以降に蓄積された塑性仕事 W_p の関数であると仮定し、次のように置く。

$$K = K_0 \exp\{(\beta W_p)^{\gamma} - \xi\}^2 \quad (9)$$

ここで、 β 、 γ 、 ξ は材料パラメータであり、 K_0 は K の最大値として定義されたものである。これら破壊関数のパラメータは、これまでの実験で得られた降伏曲面状の可能な限りのデータから近似することにより $\alpha=0.275$ 、 $K_0=0.315 f_c'$ と得られている[4]。

塑性ポテンシャル関数は、破壊曲面と同じ極点をもつように定義し、 C は次のようにデータ分析により得られるている[4]。

$$C = \left(1.0 + \frac{0.445}{0.674} - \frac{I_1}{\sqrt{3} f_c'} \right) m \quad (10)$$

3. 実験概要

直径10 cm、高さ20 cmの円柱供試体を作成し、水中凍結融解試験により人工的に劣化を促進させた後、一軸圧縮試験を行った。使用したコンクリートの配合を表-1に示す。空気量は4.8%、スランプ値は8.5 cmとなっている。まず凍結融解試験では、1サイクルを $-16^\circ\text{C} \sim 6^\circ\text{C}$ まで約3時間とし、サイクル別に5段階0、50、100、150、200サイクルの劣化程度をそれぞれ3本ずつ作成した。次に一軸圧縮試験では、圧縮強度に達するまでAEに関するパラメータおよび荷重とひずみを計測した。

ここで、それぞれのサイクルの劣化程度の指標として共振周波数を計測し、相対動弾性係数を求めた結果を図-1に示す。これより、ほぼサイクルに比例して劣化が進んでいることが確認される。しかし、200サイクルにおいても相対動弾性係数は80%程度であり、今回のデータとしては過大な劣化状態は用意できなかった。

表-1 示方配合

単位重量 (kg/m ³)			
水	セメント	細骨材	粗骨材
183	366	783	1016

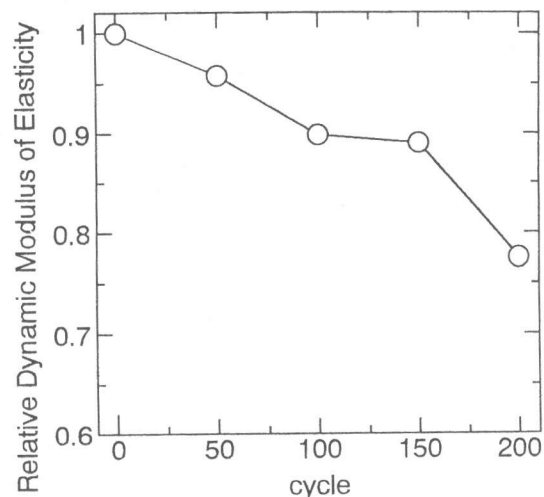


図-1 相対動弾性係数

4. 実験結果および考察

4.1 実験結果

レートプロセス法および塑性理論により得られた結果のうち、200サイクル供試体の圧縮試験結果を図-2, 3, 4に示す。図-2, 3はそれぞれAE発生頻度とAE発生確率を表したもので、ともに横軸は圧縮強度を100%とする応力の相対値で求めた応力レベルで表している。

ここで、丸印と棒グラフは実験値を、破線と一点鎖線は近似解を表している。また、解析で決定したパラメータ a と b' を AE 発生挙動の特性を表す値として図中に示している。

つぎに、図-4 は応力-ひずみ曲線を表したもので、ここで ε_1 は縦ひずみ、 ε_2 は横ひずみ、 ε_v は体積ひずみを表している。また、丸印と四角は実験結果を、実線は解析結果を表している。ここで、この解析では実験値に合うように近似モデル中の4つのパラメータ β 、 γ 、 ξ 、 m を数値シミュレーションにより決定した。これまでの成果により、 ξ と m はひずみの圧縮硬化域までの非線形性に影響を及ぼすパラメータであるとわかっていたため、劣化度別の比較の対象とすることにした[2]。 β と γ は、その成果を参考にそれぞれ2.0、0.40に固定した。

図-5 は、 ξ の効果を調べるため载荷パラメータ K と塑性仕事 βW_p の関係より数値シミュレーションを行ったものである。また図-6、7 は、本研究で注目したパラメータ a 、 b' 、 ξ および m の凍結融解サイクル別の変化を表したものである。ここで、塑性モデルを決定するのに必要なヤング係数 E 、ポアソン比 ν 、一軸圧縮強度 f_c および決定したパラメータを各供試体ごとに表-2 にまとめている。

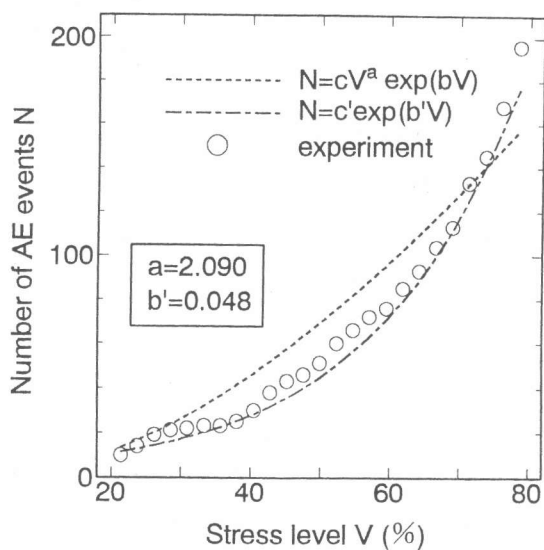


図-2 AE発生頻度-応力レベル関係図
(200サイクル)

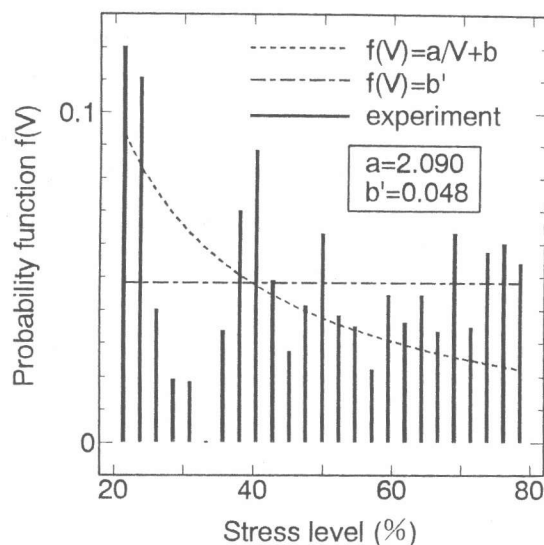


図-3 AE発生確率-応力レベル関係図
(200サイクル)

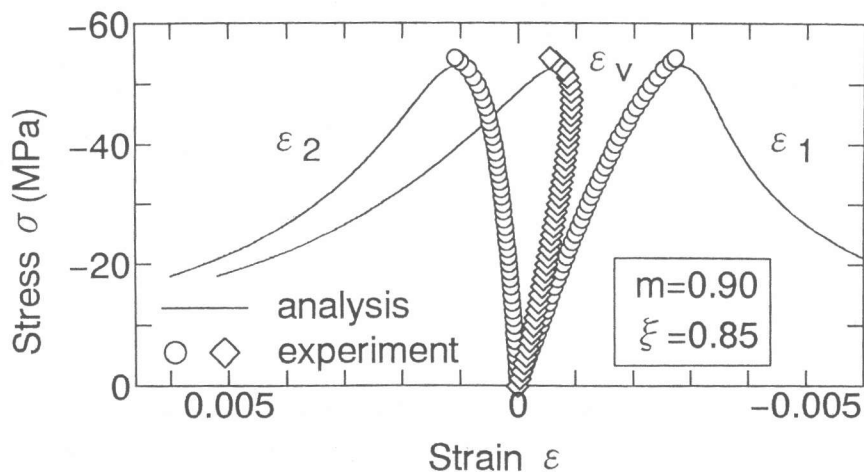


図-4 応力-ひずみ曲線(200サイクル)

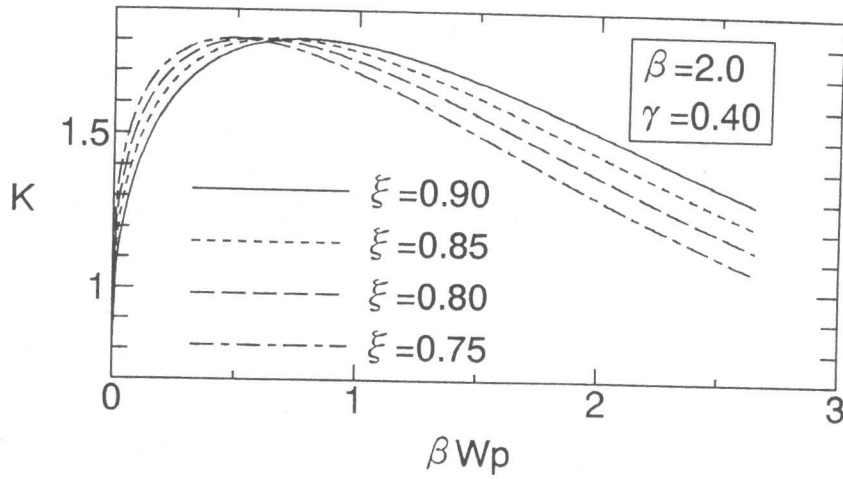


図-5 ξ に関する数値シミュレーション

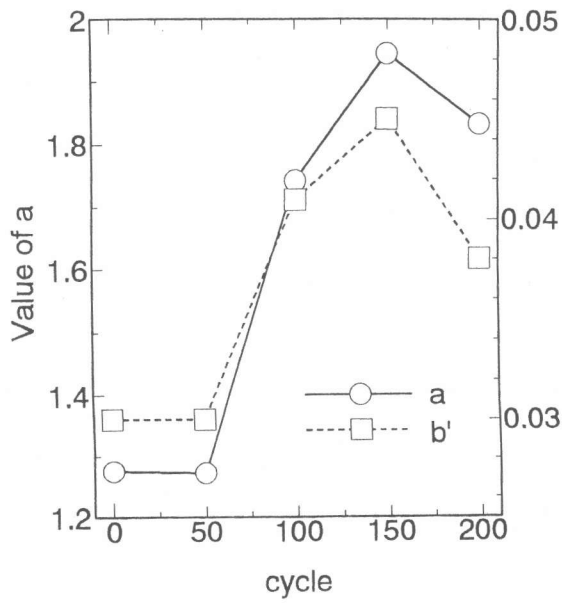


図-6 a, b' の劣化度別変化

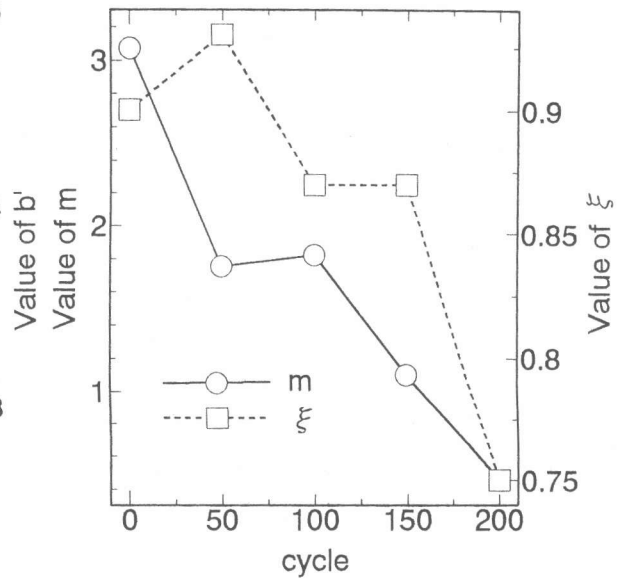


図-7 m, ξ の劣化度別変化

表-2 コンクリート物性値

	E (MPa)	ν	f'_c (MPa)	ξ	m	a	b'
健全	30497.04	0.210	51.91	0.90	3.0	1.275	0.030
劣化(50 サイクル)	31886.55	0.206	54.63	0.93	1.7	1.272	0.030
劣化(100 サイクル)	30439.13	0.204	53.63	0.87	1.8	1.742	0.041
劣化(150 サイクル)	30134.41	0.229	51.53	0.87	1.1	1.944	0.045
劣化(200 サイクル)	23216.01	0.179	52.78	0.75	0.4	1.832	0.038

4. 2 考察

レートプロセス法により A E 発生確率の近似曲線と平均値を求め、そこで得たパラメータより A E 発生頻度を近似した結果、図-2 のように十分近似できることが確認される。また、図-4 において応力-ひずみ曲線の実験値も解析値よりよく近似されることが確認される。つまり、これらの解析で得られたパラメータはコンクリートの圧縮挙動を十分表現していると考えられる。

これより、コンクリートの圧縮挙動の劣化による変化をパラメータより検討すると、図-6, 7 より a , b' の値は劣化とともに増加し、一方 m , ξ の値は劣化に対し減少するという結果が得られる。これはまず図-3 において、 a の増加は低応力レベルでの A E 発生確率が増加することになり、 b' の増加は全体的に A E が活発に発生することになると考えられる。つまり、微小ひびわれを有するコンクリートほど比較的応力レベルから A E をよく発生し、全体的な A E の発生数も増加すると考えられる。

つぎに ξ の値の変化を考察すると、図-5 より荷重パラメータ K の曲線は ξ の減少より実線から一点鎖線へと変化することが確認される。これより、劣化したコンクリートほどある破壊曲面に達するまでになされる塑性仕事の量は少なくなることが導かれる。そして、 m の値は減少し 0 に近づくので、式(10)より塑性ポテンシャル関数 G の係数 C が 1 に近づくことになる。つまり、劣化したコンクリートほど関連流れ則が満たされるようになることが認められる。

以上の結果、凍結融解試験により微小ひびわれを有する劣化コンクリートは、表-2 に示す圧縮強度 f_c からは劣化度に対する変化はほとんど見られないが、A E 及びひずみパラメータからは明らかに圧縮挙動の違いが確認された。

5. 結論

(1) 凍結融解によりコンクリートの内部では、水分が氷結しその体積膨張により未凍結水の静水圧が生じ、マイクロクラックが発生する。このマイクロクラックの形成より、劣化コンクリートの一軸圧縮試験において A E は低応力レベルからよく発生し、また全体の A E 活性度も増加することがレートプロセス解析の結果より認められた。

(2) 塑性理論を使って圧縮硬化域までをモデル化することにより、劣化したコンクリートほど少ない塑性仕事で圧縮強度まで達し、塑性流れが関連流動則に従うようになることが認められた。

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、1998
- (2) 日高英介・A. M. Farahat・大津政康：ひずみ空間での塑性理論に基づいた劣化コンクリートの圧縮軟化挙動の解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 1、pp. 537-542、1994. 6
- (3) K. Matsuyama and M. Ohtsu : Rate Process Analysis of AE Activity to Evaluate Deterioration of Concrete by Core Test , Proc. 4th Int. Sym. on AE from Composite Materials, ASNT, pp. 132-138, 1992. 7
- (4) A. M. Farahat・M. Kawakami・M. Ohtsu : 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