コンクリート損傷度評価への AE レートプロセス解析の適用[†]

米 野 現 樹* 鈴 木 哲 也*
池 田 幸 史* 大 津 政 康**

Application of AE Rate Process Analysis to Estimate Damaged Concrete

by

Genki KOMENO*, Tetsuya SUZUKI*, Yukifumi IKEDA* and Masayasu OHTSU**

Damage of concrete is quantitatively estimated by applying AE rate-process analysis and damage mechanics. Controlled-damage specimens are prepared by freezing-thawing and carbonation. AE behavior in the compression test is analyzed as the rate process. From damage mechanics, a damage parameter is estimated. Using these parameters, compression behavior in concrete is analyzed quantitatively. As a result, it is demonstrated that the degree of damage is estimated quantitatively.

Key words : AE rate-process analysis, Damage mechanics, Freezing-thawing, Carbonation

1 緒 言

コンクリート構造物は、耐久性・経済性に優れたものとして多くの社会基盤において広く用いられている。近年、既設構造物の早期劣化の事例が多く報告されており、原因としてコンクリートの中性化や凍害などが指摘されている。このような背景から、コンクリート構造物の損傷度を定量的に評価するために、構造物の損傷度診断手法の開発は重要な課題になっている。

筆者らは、AE 法¹⁾および損傷力学を応用して、コア供試体を用いたコンクリート材料の定量的損傷度評価について検討している。これは、コンクリートの圧縮応力下での 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。既に少数のサンプルでも定量的な損傷度評価を行うためのデータベースを構築し、その有効性も確認している^{2), 3), 4)}。

既設構造物では中性化現象や凍結融解現象が多く劣化要因としてみられる。そこで本研究では、実構造物でもっとも確認される劣化現象を実験室レベルで促進処理により人工的に劣化させた供試体を作成し、圧縮破壊過程を AE レートプロセス解析により評価することにより劣化コンクリートの定量的損傷度評価を試みた。

2 解 析 理 論

2・1 レートプロセス解析

コンクリートの一軸圧縮試験下での 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し、集積され、主破壊へと耐力の低下をもたらす。つまり、主破壊に至るまでの過程が微小破壊

の集積とみなされ、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。したがって、AE 発生挙動の定式化に確率過程論のレートプロセス理論が適用できる。

AE の発生総数を 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レートプロセスとして以下の式を得る。

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

式 (1) で定義する AE 発生確率関数 $f(V)$ に対し、損傷度の定量化のために、次のような双曲線関数を仮定する。

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

ここで、 a 、 b は実験定数である。式 (1)、(2) より応力レベル V に対する AE 発生総数 N の関係は以下の式にのうに導かれる。

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

なお、 C は積分定数である。式 (2) において示される、応力レベルに対する AE の発生確率関数の例を Fig. 1 に示す。図より、 a 値の正負により AE 発生確率関数 $f(V)$ は大きく異なることがわかる。 a 値が正の場合、AE 発生確率関数 $f(V)$ が低応力で高いことを示し、劣化していた状態であると評価することができる。一方、 a 値が負ならば、AE 発生確率関数 $f(V)$ が低応力で低いことを示し、健全な状態であると考えられる。

以上のように、レートプロセス解析を適用すれば、一軸圧縮試験時の AE 発生挙動を式 (3) で近似することができ、得られたパラメータ a 値を用いて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。

[†] 原稿受理 平成 16 年 10 月 28 日 Received Oct. 28, 2004

* 熊本大学大学院 〒860-8555 熊本市黒髪, Graduate Student, Kumamoto Univ., Kurokami, Kumamoto, 860-8555

** 正 会 員 熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市黒髪, Graduate School of Sci. and Tech., Kumamoto, Univ. Kurokami, Kumamoto, 860-8555

Fig. 1. Two possible relations of probability function $f(V)$.

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る。

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

ここで、 E : コンクリートの弾性係数

E^* : 無傷 (健全な) コンクリートの弾性係数である。ローランドは、損傷変数 Ω とひずみ ε との関係を以下のように仮定した。

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

ここで、 Ω_0 : 一軸圧縮試験開始時点での初期損傷度

A_0, λ : 材料固有の定数

式 (4)、式 (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 実験概要

3・1 供試体

本実験に使用したコンクリート供試体は、凍結融解試験用の角柱供試体 (100×100×400mm) を各サイクルに3本ずつ計12本、促進中性化試験用の円柱供試体 ($\phi 10 \times 20$ mm) 各サイクル10本ずつ計40本である。供試体の作製には角柱供試体では普通ポルトランドセメント (A series), 円柱供試体には普通ポルトランドセメントと高炉スラグセメント (B series) の2種を使用した。供試体に使用したコンクリートの配合条件および材料特性は Table I に示す。

3・2 水中凍結融解処理⁶⁾

凍結融解処理は JIS A 1148 に則って行った。28 日水中養生後に、供試体の中心温度が $5 \pm 2^\circ\text{C}$ から $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ の範囲を、3 時間以上 4 時間以内で往復する履歴を与えた供試体を 0, 100, 200, 300 サイクルの 4 段階に分けて作成した。

3・3 促進中性化試験

促進中性化処理は JIS A 1153 に準じて行った。ただし、圧縮試験が容易なように円柱供試体を用いた。供試体を 28 日水中養生後に上下面をエポキシ樹脂によりコーティングし中性化促進装置に入れ、炭酸ガス濃度を 10% に設定し、普通セメント、高炉セメントそれぞれ中性化 2 週齢、4 週齢、6 週齢のサンプルを準備した。その後、フェノールフタレインを用いて断面方向に中性化深さを測定した。

3・4 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験時の AE 計測システムを Fig. 2 に示す。なお、供試体上面と下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り、載荷摩擦により発生する AE の低減に努めた。計測条件として、AE 計測器は MISTRAS (PAC 社製) を用い、AE センサは広域帯型 (共振周波数: 約 1MHz) のものであり、周波数帯域は 10kHz-300kHz、AE センサの出力信号はプリアンプ 40dB、メインアンプ 40dB の計 80dB で増幅した。また、AE の発生数の計測に際して、しきい値は 42dB、不感時間は 2msec とした。

4 実験結果および考察

4・1 力学的特性

(1) 凍結融解処理

水中凍結融解試験を行った。供試体はサイクル数の増加に伴い圧縮強度、弾性係数が低下していることが確認された。その結果を Table II に示す。なお、 f'_c , E_0 , E_c はそれぞれ一軸圧縮強度、初期接線弾性係数、終局割線弾性係数である。

Fig. 2. AE Measuring System.

Table I. Mix proportion and material properties of fresh concrete.

Concrete	$G_{\max}$ (mm)	W/ C (%)	s/a (%)	Weight per unit volume (kg/m^3)				Air-entrained admixture (cc)	Slump (cm)	Air content (%)
				Water W	Cement C	Sand S	Gravel G			
A series	20	55	43.1	162	295	749	1187	118	7.9	9.3
B series	20	55	43.1	170	310	750	1005	128	8.7	4.0

Table II. Mechanical properties of concrete. (Freezing-thawing)

	$f'c$ (MPa)	E_0 (GPa)	E_c (GPa)
28days	39.4	30.6	15.1
100days	35.9	27.9	14.0
200days	34.4	27.5	13.5
300days	32.7	27.7	15.8

(2) 促進中性化処理

促進中性化試験の供試体は週齢の増加とともに中性化も進み弾性係数の低下が認められた。なお圧縮強度は、中性化の進行とともに多少増加する傾向が認められた。これは、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントを用いた両供試体で確認された。同様の結果は既往の研究^{4), 5), 6)}でも示されており、中性化に伴うコンクリート硬化体の空隙構造の変質と圧縮強度が密接に関連しているものと考えられる。また、供試体の外側から中性化した位置までの距離を供試体の半径で割ったものを中性化率として、普通ポルトランドセメント、高炉セメントそれぞれの結果を Table III, Tabl IV に示す。

4・2 応力—ひずみ関係

ローランドモデルによる解析の一例を Fig. 3 に示す。これは普通コンクリートの 28 日養生後の結果である。図より解析値と実験値がほぼ一致していることが確認できる。これより、損傷変数 Ω を用いたモデルにより、一軸圧縮下での応力—ひずみ挙動は十分に近似されていることがわかる。なおローランドモデルの材料固有の定数 λ , A_0 は以下の式 (8), (9) で決定される。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (8)$$

$$A_0 = \frac{1}{(\lambda + 1)\epsilon_c^2} \quad (9)$$

4・3 レートプロセス解析

供試体の AE 発生挙動をレートプロセス理論を用いて解析した。解析の対象範囲は応力レベルで 30% ~ 80% の範囲とした。これは、載荷初期に端面で発生する応力レベル 30% 以下での AE と、80% 以上の終局付近で加速度

Table III. Mechanical properties of concrete. (A series, carbonation)

	$f'c$ (MPa)	E_0 (GPa)	E_c (GPa)	Carbonation ratio(%)
28days	36.4	32.8	16.9	0
2weeks	37.1	30.1	16.5	18
4weeks	42.4	30.7	17.9	22
6weeks	49.8	23.9	16.7	40

Table IV. Mechanical properties of concrete. (B series, carbonation)

	$f'c$ (MPa)	E_0 (GPa)	E_c (GPa)	Carbonation ratio(%)
28days	27.4	26.6	12.5	0
2weeks	41.6	20.7	12.8	33
4weeks	44.8	19.9	12.8	41
6weeks	41.1	17.2	11.3	62

Fig. 3. Stress-strain relation.

的に発生する AE はコンクリートの損傷度に直接関連するとは考えられないためである。

凍結融解処理での AE 発生確率関数と応力レベルの関係の例を Fig. 4 に示す。0 サイクルでは応力の増加に対応して AE が発生しているのに対し、300 サイクルでは低応力時から AE が頻発していることが確認できる。このとき、 a 値はサイクル数の進行に伴い増加することが確認できる。

同様に、促進中性化試験についての結果を Fig. 5 に示す。こちらも 0 週齢のものに比較して 6 週齢たったものが低応力で AE が頻発していることが確認できる。式 (2) により算出される a 値は、A Series, B Series とともに低応力下で AE が発生しているにも関わらず、 $a < 0$ であった。しかし、凍結融解 0cycle では $a = -0.00123$ なのに対して 300cycle では $a = -0.00039$ 、促進中性化試験でも 0 週齢

Fig. 4. Relation between $f'(V)$ and stress level (freezing-thawing).

Fig. 5. Relation between $f(V)$ and stress level (B series, carbonation).

で $a = -0.00079$ なのに対して6週齢では $a = -0.00027$ と増加の傾向が確認された。したがって、供試体は、処理進行に伴い、損傷が蓄積されているものと a 値の結果から考えられる。

4・4 弾性係数の推定による相対損傷度評価

(1) 健全時弾性係数 E^* の推定

既存の構造物においては、初期物性値が不明な場合が多く、調査時点で健全時の弾性係数 (E^*) を得ることは困難である。そのため、打設時からどの程度劣化しているのかを確認することができない。そこで、健全時の弾性係数 E^* をAE計測結果から推定する手法について考察をした。

一軸圧縮応力下での弾性係数の低下 $\log(E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析値 a 値との関係を Fig. 6 に示す。³⁾

一軸圧縮下での弾性係数の低下 $\log(E_0 - E_c)$ は式 (4) より、

Fig. 6. A Data base of AE arte and elastic modulus.

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^*(1 - \Omega_0) - E^*(1 - \Omega_c) \\ &= E^*(\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (10)$$

Fig. 6 中の近似式より、以下の式を得る。

$$\begin{aligned} \log_e(E_0 - E_c) &= \log_e[E^*(\Omega_c - \Omega_0)] \\ &= x \cdot a + y \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $E_0 = E^*$ のとき、 $\Omega_0 = 0$ 、 $a = 0$ と仮定すると、以下の式 (12) が得られ、健全時の弾性係数 E^* の推定が AE のレートプロセス解析により可能となる。

$$E^* = E_c + e^y \quad (12)$$

(2) 凍結融解処理した供試体の損傷度評価

一軸圧縮試験を行った全ての供試体において、実験で初期接線弾性係数 E_0 を求め、実験では凍結融解試験前の供試体との相対比 $E_0^{\text{n cycle}}/E_0^{28}$ と AE のレートプロセス解析により求めた $E_0^{\text{n cycle}}/E^*$ を比較した。

凍結融解した供試体は実測値、解析値ともにサイクルの増加とともに低下しこの傾向はほぼ一致していることがわかる (Fig. 7)。これにより、劣化コンクリートについては一軸圧縮試験より求めた E_0 と式 (10) を用いて算出した E^* とを比較することにより定量的に損傷度を評価できることが確認できた。

(3) 促進中性化処理した供試体の損傷度評価

Fig. 8 と Fig. 9 に促進中性化処理をした供試体の結果を示す。週齢の増加とともに実測値、解析値は低下している。相対損傷度 (E_0/E^*) の値も 1.0 を下回っており損傷していることが確認できる。これは中性化の進行に伴い供試体の材質と空隙構造の変化が低応力時で微小クラックを頻発させた結果であると考えられる。また、高炉セメントを使用した供試体では普通ポルトランドセメントを使ったものと比較して著しく低下していることがわかる。これは既往の研究⁹⁾でも示されているように高炉セメントを使用した供試体の方が中性化の進行が早いためだと考えられる。

5 結 言

AE 発生挙動をレートプロセス解析により近似し、応力—ひずみ挙動をローランドモデルにより評価することにより以下のことが確認できた。

Fig. 7. Relative damage evaluation. (freezing thawing)

Fig. 8. Relative damage evaluation. (A series)

Fig. 9. Relative damage evaluation. (B series)

(1) レートプロセス解析により, AE 発生挙動は十分に近似できることが示唆された.

(2) 弾性係数の低下 $\log_e (E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析値 α 値との関係から, 健全時弾性係数 E^* を算出し, 一軸圧縮試験で得られる初期接線弾性係数 E_0 との相対比を算出することによる相対損傷度評価を行えるの可能性が示された.

(3) 凍結融解処理と中性化処理の供試体を用いることにより物理的および化学的損傷を AE のレートプロセス解析により定量的に評価できる可能性が示唆された.

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” p.29 (1988) 森北出版.
- 2) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康, 応用力学論文集, **7**, 1225 (2004).
- 3) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康, コンクリート工学年次論文集, **26**, 1791 (2004).
- 4) 飯田剛史, 渡辺弘史, 友田祐一, 大津政康, コンクリート工学年次論文集, **23**, 271 (2000).
- 5) S. P. Shah, S. E. Swartz and C. S. Ouyang, “Fracture Mechanics of Concrete” (1995) John Wiley & Sons Inc. New York.
- 6) 社 日本材料学会, “新建設材料実験”, p.160 (2000).
- 7) 鈴木一孝, 西川直弘, 林 知延, セメント・コンクリート論文集, **43**, 18 (1989).
- 8) 阿部道彦, 栢田佳寛, 田中 斉, 柳 啓, 和泉意登志, 友沢史紀, 日本建築学会構造系論文報告集, **409**, 1 (1990).
- 9) 金 尚奎, 鶴見敬章, 大門正機, セメント・コンクリート論文集, **48**, 572 (1994).