

# A E 発生挙動の確率過程論解析による コンクリートの劣化度評価研究

油野邦弘<sup>1</sup>・井上芳樹<sup>2</sup>・大津政康<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 四国電力(株) 徳島支店 電力部 土木建築課 副長 (〒770 徳島市寺島本町東2丁目29)  
元 (株)四国総合研究所 土木技術部 副主席研究員

<sup>2</sup>正会員 四電エンジニアリング(株) 土木建築部長  
元 (株)四国総合研究所 土木技術部部长

<sup>3</sup>正会員 工博 熊本大学教授 土木環境工学科

本研究は、アコースティック・エミッション(AE)法をコンクリートの劣化評価へ適用することを目的としている。ここでは、コンクリート供試体の一軸圧縮下でのAE発生挙動を解析することにより、コンクリートの劣化度を定量的に評価することを試みている。AE発生挙動の解析には確率過程論を適用し、健全なコンクリートならびにアルカリ骨材反応、凍結融解による劣化コンクリートのAE発生挙動について検討している。載荷重比Vの0~50%間では、AE発生の確率関数は $bV^a$ で表すことができ、これら定数のa, b値は、コンクリートの劣化に応じて特有な領域へ分布する。このような健全なコンクリートに対する変動から劣化の指標値を求め、この指標値に基づく劣化評価法を提案している。

**Key Words:** acoustic emission, concrete deterioration, stochastic analysis, deterioration coefficient

## 1. まえがき

コンクリート構造物と言え、半永久的なものであり、耐久性に優れているものとされてきたが、近年、塩害やアルカリ骨材反応等によるコンクリート構造物の早期劣化が重大な社会問題となっている。このため、コンクリート構造物の維持管理に関する技術の要請とともに、劣化診断技術の確立が求められている。

アコースティック・エミッション(AE)法は、構造物の診断において、微小ひびわれの発生を検出するのに適した方法であり、AE法のコンクリート構造物診断への適用については、いくつかの観点から研究が積極的に進められている<sup>1)・2)</sup>。本研究は、コンクリート構造物から採取したコンクリートコアの一軸圧縮試験にAE計測を適用し、AE発生挙動を解析することによって、コンクリートの劣化度を定量的に評価する診断技術の開発を目的として実施したものである。これは、健全なコンクリート供試体の一軸圧縮試験時のAE発生は、破壊荷重の80%程度までは比較的少なく、ほぼ一定となっているのに対して、微小ひびわれを含んだ劣化コンクリート供

試体では、載荷の初期から活発にAEが発生するという現象に基づいている<sup>3)</sup>。

本研究においては、コンクリート供試体の一軸圧縮試験時の載荷過程におけるAE発生特性が、供試体内部の破壊の進展度に関連するものと考え、荷重とAE発生数との関係に固体破壊の確率過程論を適用して、これらの関係式を導きだすとともに、実測データに基づいてこの理論の適用性について検討した。そして、健全なコンクリート供試体ならびに、アルカリ骨材反応試験と凍結融解試験によって劣化を促進したコンクリート供試体の一軸圧縮試験のAE発生特性を定量的に評価した。以上の結果より、健全、劣化コンクリートのAE発生特性からみたコンクリートの定量的な劣化度評価手法を提案し、当手法の有用性を確認することを試みた。

## 2. AE発生挙動と計測方法

### (1)一軸圧縮試験時のAE発生挙動

コンクリート供試体の一軸圧縮下でのAE発生挙動については、既に多くの知見が得られている<sup>4)</sup>。ここでは、

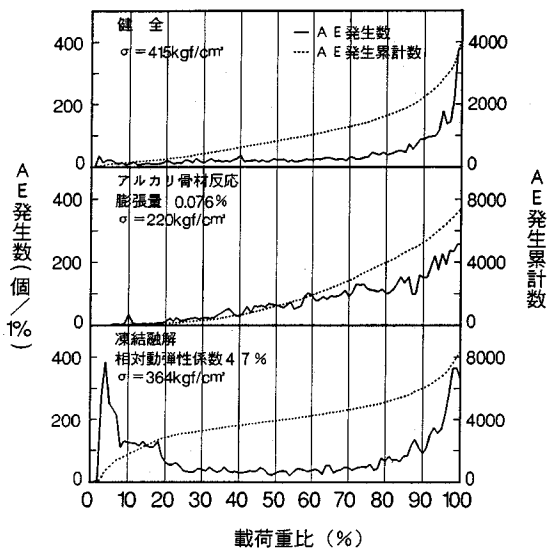
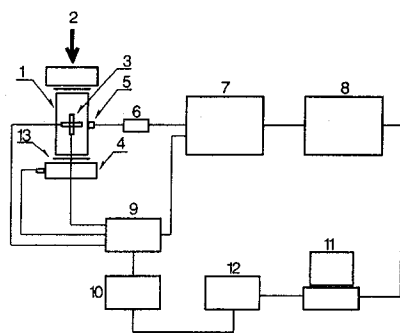


図-1 コンクリート供試体のAE発生挙動の一例

本研究で実験した健全なコンクリート供試体(φ10cm×20cm)とアルカリ骨材反応試験,凍結融解試験により劣化を促進したコンクリート供試体(φ10cm×20cm)の一軸圧縮試験におけるAE発生挙動の一例を図-1に示す。

図-1において,健全なコンクリート供試体のAE発生は,荷重開始から荷重比80%程度までの間では,比較的少なくほぼ一定の発生数となっている。その後,荷重の増加に伴って,AEの発生は急激に増加し,供試体は破壊に到っている。一軸圧縮試験時でのコンクリート供試体の荷重過程におけるAE発生数は,材料の不均質性により個々の供試体で異なったものとなり,その変動も大きいと考えられている。しかし,内部にひびわれ欠陥を含まない健全なコンクリートの荷重過程における供試体のAE発生挙動は,概ね図-1に示した発生状況と類似したものとなることが認められている。一方,アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート供試体のAEの発生は,荷重開始より荷重の増加に伴って加速度的な増加を示し,供試体は破壊に到っている。そのAE発生数は,健全なコンクリート供試体と比較して,かなり多くなっており,破壊時点でのAE発生総数は,健全なものの2倍程度となっている。また,凍結融解作用により劣化したコンクリート供試体のAEの発生は,荷重初期の低応力レベル下で急激な発生のピークがあり,その後,荷重比30%前後を過ぎてからは,AEの発生は極端に少なくなり,健全なコンクリート供試体のAE発生挙動とよく類似したものとなっている。そして,破壊時点でのAE発生総数は,アルカリ骨材反応コンクリート供試体のもと同程度で,かなり多くのAEが発生している。



- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| 1. コンクリート供試体    | 8. マイクロコンピュータ (AE計測用) |
| 2. 載荷重 (圧縮試験機)  | 9. 動ひずみ測定器            |
| 3. ひずみゲージ       | 10. データロガー            |
| 4. ロードセル        | 11. PC (データ編集用)       |
| 5. AEセンサ (1個使用) | 12. プリンター             |
| 6. プリアンプ        | 13. テフロンシート           |
| 7. AE計測器        |                       |

図-2 AE計測システムの概要

この様な凍結融解作用により劣化したコンクリート供試体のAE発生挙動は,角柱供試体(10cm×10cm×20cm)を用いた圧縮荷試験時のAE計測結果からも,同様なAE発生現象が認められることが報告されている<sup>5)</sup>。

以上述べたように,複合材料であるコンクリートの一軸圧縮試験時のAE発生挙動は,コンクリートの劣化要因と劣化の進行度(ひびわれの累積度)によって,きわめて複雑なものとなり,その変動も大きなものとなることが明らかになっている。

## (2) AE計測方法

一軸圧縮試験時のコンクリート供試体のAE計測に使用した計測システムの構成を図-2に示す。AEセンサは,共振周波数60kHz,周波数帯域30~300kHzのPZT圧電型センサ(φ19.0mm×21.3mm)を1個使用した。コンクリート供試体は,側面中央部を2cm×2cm程度の平面に研磨して,粘着性のシリコンラバーを用いてAEセンサを接着した。AEセンサで検出されたAEの電気信号は,プリアンプで40dB,AE計測器(フィジカルアコースティック社製のスパルタンシステム)のメインアンプで20dB,合計60dBの増幅(1000倍の増幅)を行い,AE事象の計測を行った。AE事象の計測に当っては,しきい値を43dB~45dBに設定し,AEセンサ検出レベルで150~180μV以上のAEを検出し計測した。また,プリアンプには,30kHzのハイパスフィルタを設置して,これ以下の低周波数の雑音等を除去した。圧縮試験では,荷重盤と供試体端面の摩擦による雑音防止対策として,これらの間にシリコングリスを塗布した0.5mm厚さのテフロンシートを挿入した。また,圧縮試験時の荷重速度は,劣化コンクリートの場合,活発に発生するAEを計測器が十分に計測処理できるように,30秒当り1ton程度の荷重増

加とした。

### 3. AE発生挙動の解析手法

#### (1) 確率過程論による荷重とAE発生数の関係式

コンクリート供試体の一軸圧縮試験でのAE発生挙動は、コンクリート内部の微小ひびわれの集積過程に対応している。載荷重の増加にともなって、微小ひびわれは漸増的に発生し集積され、コンクリートは主破壊へと進行し、耐力の低下をもたらして破壊することになる。破壊の進行に関して、主破壊に到る過程が微小破壊(マイクロクラック)の集積過程とみなされる場合には、確率過程論による取扱いが知られている<sup>3)</sup>。材料固体の破壊進行現象(AEの発生)をある種(レート)過程ととらえて、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配するものと考えて、一軸圧縮試験時のコンクリート供試体のAE発生挙動を、レートプロセス理論を用いて解析する方法が提案されている<sup>3)・6)</sup>。この解析方法を用いて、健全、劣化コンクリートの評価について詳細に研究がなされているが、解析から求められる一パラメータ値(レート値に相当)のみを用いて、コンクリートの健全性、劣化度を定量的に評価する点において問題が残されていると考えられる。このため、本研究では、コンクリート供試体のAE発生挙動を、より精度よく近似する理論式について新たに考察するものとし、実測データに基づく解析結果から、健全、劣化コンクリートのAE発生挙動特性を定量的に評価することを試みた。

本研究においては、一軸圧縮試験におけるコンクリート供試体の荷重増加に伴うAE発生の変化は、供試体内部の破壊の進展度に関連するものと考えて、AEの発生を固体破壊の確率過程論におけるもっとも単純な二状態一段確率過程として考えることとした<sup>7)</sup>。まず、一軸圧縮試験時のコンクリート供試体の荷重とAE発生数の関係は、式(1)の基本式によって表されるものと仮定した。式(1)は、載荷重比V(破壊荷重に対する百分率%)で表示)までに、まだ発生していないAEの総数を $N_0 - N$ ( $N_0$ :破壊時点のAE発生総数、 $N$ :載荷重比VまでのAE発生累計数)とし、載荷重比が $dV$ 増加するときに、 $V$ と $V + dV$ 間で発生するAEの数 $dN$ との関係を表している。

$$dN = (N_0 - N) f(V) dV \quad (1)$$

ここに、 $f(V)$ は載荷重比VにおけるAE遷移確率とする。

式(1)における、AE遷移確率 $f(V)$ の関数形について、一軸圧縮試験時のコンクリート供試体のAE計測データを用いて、概略の検討を行ってみた<sup>8)</sup>。式(1)を $f(V)$ について書き換え、差分式で表すと式(2)が得ら

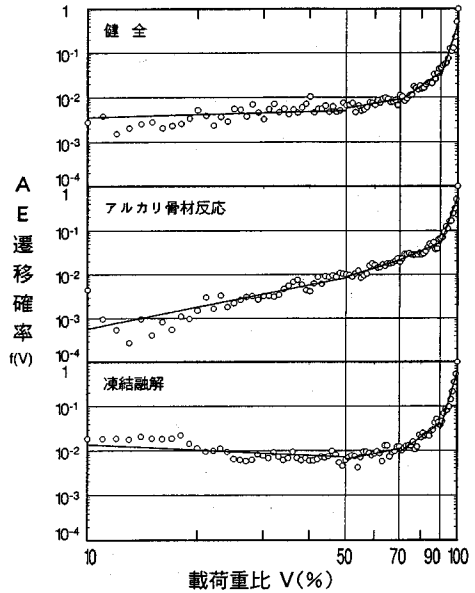


図-3 AE遷移確率の概略検討例

れる。

$$f(V_i) = \frac{N_i - N_{i-1}}{(N_0 - N_{i-1}) \cdot \Delta V} \quad (2)$$

ここに、 $f(V_i)$ :載荷重比 $V_i$ でのAE遷移確率

$N_i, N_{i-1}$ :載荷重比 $V_i, V_{i-1}$ でのAE発生累計数

$\Delta V$ :載荷重比の分割幅(1%ピッチで計算)

式(2)を用いて、図-1に示した健全および劣化コンクリート供試体の一軸圧縮試験時のAE計測データから計算したAE遷移確率 $f(V)$ の分布例を図-3に示す。図-3に実線で示したように、載荷重比VとAE遷移確率 $f(V)$ との関係が、両対数軸上で区分的に直線式で近似できるものと考え、 $f(V)$ の関数式は、次式のように求めることができる。

$$\log f(V) = a \log V + \log b \\ f(V) = b V^a \quad (3)$$

ここに、 $a, b$ は定数である。

AE遷移確率 $f(V)$ の検討結果より、 $f(V)$ は一軸圧縮試験時の載荷過程において、分割された区間での指数分布をすると仮定したことから、載荷過程の任意の分割区間における荷重とAE発生数との関係式について考察した。分割起点の載荷重比 $V_1$ でのAE発生累計数を $N_1$ とすると、載荷重比 $V_1$ でまだ発生していないAEの総数は、 $N_0 - N_1$ となり、荷重とAE発生数との関係を表す式(1)は、次のように表すことができる。

$$\frac{dN}{N_0 - N_1} = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_1} f(V) dV \quad (4)$$

ここで、 $p(V) = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_1}$  とおくと、

$p(V)$  は荷重比  $V_1$  を起点とした荷重比  $V$  における AE の発生していない確率を表す。このとき、

$$-dp = \frac{dN}{N_0 - N_1}$$

となり、 $-dp$  は、荷重比  $V$  と  $V + dV$  間で AE が発生する確率を表している。これから、式(4)は、次のように表すことができる。

$$-dp = p(V) f(V) dV \quad (5)$$

$p(V)$  の定義より、 $V = V_1$  のとき  $p(V_1) = 1$  となり、式(5)を荷重比  $[V_1, V]$  区間で積分すると、

$$\int_1^p \frac{1}{p} dp = \int_{V_1}^V f(V) dV$$

$$p = \exp\left(-\int_{V_1}^V f(V) dV\right) \quad (6)$$

となる。

AE 遷移確率  $f(V) = bV^a$  を式(6)へ代入すると、式(6)は次のように表される。

$$p(V) = \exp\left[-\frac{b}{a+1}(V^{a+1} - V_1^{a+1})\right] \quad (7)$$

$p(V) = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_1}$  を用いて、式(7)は荷重比  $V$  と AE 発生累計数  $N$  との関係式に書き換えることができる。

$$N = N_0 - (N_0 - N_1) \exp\left[-\frac{b}{a+1}(V^{a+1} - V_1^{a+1})\right] \quad (8)$$

よって、式(8)が、荷重比  $[V_1, V]$  区間での荷重と AE 発生数との関係を表す式となる。

## (2) AE 発生挙動解析への適用性の検討

一軸圧縮試験時のコンクリート供試体の応力-ひずみ曲線には、3つの特異点応力度が存在することが、既往の研究成果から報告されている<sup>9)</sup>。一軸圧縮試験におけるコンクリート供試体内部のマイクロクラックの発生と進展状況の変化は詳しく研究されており、モルタルクラックの発生とポンドクラックの発生という異なる機構が知られている。また、これらのマイクロクラックの発生と進展状況の変化は、応力-ひずみ曲線の3つの特異点における変化状況と密接に関係していることが知られている。これら3つの特異点応力度は、応力とひずみの直線関係がはずれる変化点に相当する比例限界応力度（荷重比の50%前後）と、コンクリートの塑性挙動の開始応力度とみなされ、ポアソン比が急変するときの変化点に相当する開始応力度（荷重比の70%前後）および、コンクリート供試体の体積ひずみがピーク点を過ぎて体

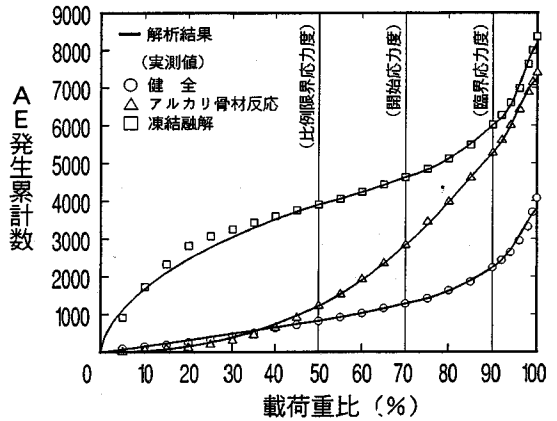


図-4 AE発生挙動の解析例

積膨張に向かう変化点に相当する臨界応力度（荷重比の90%前後）である。

このことから、一軸圧縮荷重過程でのコンクリート供試体の AE の発生状況も、供試体内部のマイクロクラックの発生・進展状況の変化を反映して、これら3つの特異点応力度で変化するものと考えた。これより、図-3において、健全および劣化コンクリート供試体の AE 遷移確率  $f(V)$  の直線近似は、概ね、上述した特異点応力度付近の荷重比50, 70, 90%の3点で区分して行うことができる。そこで、式(8)を用いた一軸圧縮試験のコンクリート供試体の AE 発生挙動解析で、各コンクリート供試体の3つの特異点応力度に相当する荷重比は、近似的に等しいものと考えて、これらの荷重比を  $V = 50, 70, 90\%$  に固定した。そして、これらの3つの荷重比で分割した荷重過程の4段階の区間において、式(8)を用いて、AE 発生挙動の解析を行うことにした。

荷重と AE 発生数との関係を表す式(8)は、最小二乗法が適用できない非線形関数となっていることから、非線形関数の最適化手法として優れている Powell の共役方向法<sup>10)</sup>を用いて、定数  $a, b$  の決定を行うことにした。

式(8)を用いて、図-1に示した健全なコンクリート供試体ならびに、アルカリ骨材反応試験と凍結融解試験によって劣化したコンクリート供試体の AE 発生挙動を解析した一例を図-4に示す<sup>11), 12)</sup>。図-4において、健全および劣化コンクリート供試体の一軸圧縮荷重に伴う AE の発生状況は、それぞれ大きく異なった特徴的な挙動を示すが、式(8)によって、これらコンクリート供試体の荷重と AE 発生累計数との関係を精度よく近似することが可能であることがよくわかる。本研究で行った健全および劣化コンクリート供試体の AE 発生挙動解析では、実測値と解析値の相関係数は、0.99程度となる高い解析精度が得られている。これより、一軸圧縮試験時のコンクリート供試体の荷重と AE 発生数との関係は、

載荷重の増加に伴って変化するA E遷移確率  $f(V) = bV^a$  ( $a, b$  は定数) によって表される確率過程としてとらえることが可能である。

健全および劣化コンクリート供試体の一軸圧縮試験のA E発生数は、個々の供試体によって異なることから、本研究においては、載荷重とA E発生数との関係で示されるA E発生挙動を、以上の理論から求められる正規化されたA E発生確率とA E発生頻度によって表すことにした<sup>12), 13)</sup>。

A E発生総数  $N_0$  に対応した、載荷重比  $V$  で発生していないA Eの確率を、 $p_0(V) = \frac{N_0 - N}{N_0}$  とおくと、

$$p_0(V) = \frac{N_0 - N}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_1} \cdot \frac{N_0 - N_1}{N_0} \quad (9)$$

式(4)における  $p(V) = \frac{N_0 - N}{N_0 - N_1}$  の定義より、

$p_0(V_1) = \frac{N_0 - N_1}{N_0}$  とおくと、式(9)は次のように表される。

$$p_0(V) = p(V) p_0(V_1) \quad (10)$$

ここで、 $p_0(V_1)$  は、任意の載荷重比  $[V_1, V]$  区間において、分割始点の載荷重比  $V_1$  で、A E発生総数  $N_0$  に対して、A Eが発生していない確率を表している。よって、載荷重比  $V$  でのA E発生確率  $P$  は、式(7)を用いて次のように求められる。

$$\begin{aligned} P(V) &= 1 - p_0(V) = 1 - p(V) p_0(V_1) \\ &= 1 - \exp\left[-\frac{b}{a+1}(V^{a+1} - V_1^{a+1})\right] \cdot p_0(V_1) \quad (11) \end{aligned}$$

また、 $p_0(V) = \frac{N_0 - N}{N_0}$  と式(1)より、次式が導かれる。

$$-dp_0 = p_0(V) f(V) dV \quad (12)$$

載荷重比  $V$  と  $V+dV$  間でA Eが発生する確率  $-dp_0$  と、A E発生頻度(A E発生確率密度)  $q(V)$  との関係は、次のように表される。

$$\begin{aligned} -dp_0 &= q(V) dV \\ q(V) &= -\frac{dp_0}{dV} \quad (13) \end{aligned}$$

式(13)の関係より、A E発生頻度  $q(V)$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} q(V) &= p_0(V) f(V) = p(V) p_0(V_1) f(V) \\ &= \exp\left[-\frac{b}{a+1}(V^{a+1} - V_1^{a+1})\right] \cdot bV^a \cdot p_0(V_1) \quad (14) \end{aligned}$$

表-1 健全なコンクリートの配合

種類 W/C	スラブ (cm)	空気量 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE減額
						W	C	S	G	
70%	7.6	3.5	20	70	49	187	267	870	906	0.534
60%	6.2	3.5	20	60	47	182	303	828	931	0.606
50%	6.1	3.7	20	50	45	177	354	779	952	1.062

表-2 劣化促進コンクリートの配合

種類	スラブ (cm)	空気量 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE減額
						W	C	S	G	
アルカリ 骨材反応	6.4	4.5	20	60	47	172	287	846	970	0.547
凍結 融解	1.6	1.9	20	60	47	174	290	867	975	-

載荷重比  $[0, 50(\%)]$  区間では、 $V_1 = 0$ 、 $p_0(0) = 1$  より、A E発生確率  $P(V)$  とA E発生頻度  $q(V)$  は、次のような簡潔な式で表される。

$$P(V) = 1 - \exp\left(-\frac{b}{a+1} V^{a+1}\right) \quad (15)$$

$$q(V) = \exp\left(-\frac{b}{a+1} V^{a+1}\right) \cdot bV^a \quad (16)$$

#### 4. A E発生挙動の特性評価

健全なコンクリート供試体および、アルカリ骨材反応試験、凍結融解試験により劣化を促進したコンクリート供試体の一軸圧縮試験のA E発生挙動特性について、A E発生挙動解析から求められるA E発生確率とA E発生頻度から考察し、それら特性の定量的な評価を試みた。

##### (1) コンクリート供試体の配合と劣化促進試験内容

A E発生挙動解析に用いた健全および劣化コンクリート供試体 ( $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ) の配合を表-1, 2に示す。健全なコンクリート供試体の配合は、普通ポルトランドセメントを使用して、水セメント比70, 60, 50%の3ケースとした。供試体は、水温20°Cで材令28日まで水中養生を行った後、室温20°C、湿度60%の養生室内で気中養生を行った。

アルカリ骨材反応促進試験のコンクリートは、低アルカリ型普通ポルトランドセメントを使用して、水セメント比を60%とし、コンクリート1 m<sup>3</sup>当りのアルカリ量をNa<sub>2</sub>O当量で6kg/m<sup>3</sup>とした。また、添加アルカリ量は、細粒状のNaOHを練り混ぜ水に加えて攪拌して、NaOH水溶液として添加した。骨材は、化学法によって、有害とされたチャート質の粗骨材を用いた。コンクリート供試体は、打設後24時間経過して脱型し、供試体を保水紙で被覆し、網袋で包むとともに、ポリエチレン製の袋に収納した後、直ちに温度40°Cの養生装置内で促進養生を行った。また、コンクリート供試体の長さ変化の測定は、別途、7.5cm $\times$

7.5cm×40cmの角柱供試体を作成し、同様な条件下で促進養生を行いダイヤルゲージ法で長さ変化の測定を行った。

凍結融解試験のコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用して、水セメント比を60%とし、AE剤を使用しないで、プレーンコンクリートとした。コンクリート供試体は、打設後24時間経過して脱型し、水温20℃で水中養生を材令14日まで行った。その後、供試体をゴムスリーブに入れて、凍結融解試験装置の試験槽内に設置して、4時間で+5℃から-18℃の凍結融解の1サイクルが完了するようにして試験を実施した。なお、コンクリート供試体の急激な動弾性係数の低下を防止する目的で、ゴムスリーブ内には水を入れないで、供試体内部の湿潤状態を保つように管理した。

## (2)コンクリート供試体のAE発生挙動の特性評価

### a)健全なコンクリート

健全なコンクリート供試体の一軸圧縮試験は、材令28日から1年経過した間の4材令で実施した。圧縮強度は、水セメント比 W/C=70%で220~410kgf/cm<sup>2</sup>、W/C=60%で370~450kgf/cm<sup>2</sup>、W/C=50%で470~560kgf/cm<sup>2</sup>であった。

コンクリート供試体(33本)のAE発生挙動の解析結果を図-5に示す。図-5のAE発生確率曲線の分布において、荷重比50%での各供試体のAE発生確率Pは、ほぼ0.1~0.25の限られた範囲に分布している。また、荷重比[0,50(%)]区間での各コンクリート供試体のAE発生頻度qは、ほぼ一定の個々の値で推移しており、この荷重比区間のAE発生挙動には、健全なコンクリートとしての特性が認められる。荷重比50%までは、一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線で示されるように、コンクリート供試体はほぼ弾性変形を示す範囲である。この荷重比区間で発生するAEは、コンクリート自体が作成時に含んでいる骨材下面の微細な空隙や空気泡等の微細な空隙による潜在欠陥からのひびわれに関係して発生したものと考えられる。このため、荷重比50%でのAE発生確率の分布とAE発生頻度の一定な推移は、コンクリート内部の潜在欠陥からのAE発生が、ある一定量の範囲で分布することによるものと考えられる。

荷重比が50%を過ぎると、コンクリート内部のひびわれ生成は活性化され、骨材とモルタルの境界で微小なボンドクラックが発生進展し、次第にモルタル中に伝播して、モルタル内部にも微小なモルタルクラックが発生し進展することが知られている。図-5によれば、これらのマイクロクラックの発生進展とともに、各供試体でのAE発生挙動は複雑となり、その変動も大きくなっていく。

上述した、荷重比[0,50(%)]区間での、健全なコンクリート供試体のAE発生挙動の特性を、解析から求められるAE遷移確率  $f(V) = bV^a$  の定数a、b値で評

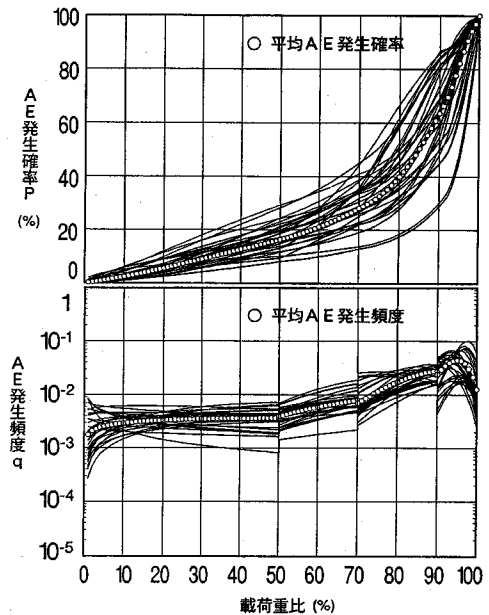


図-5 健全なコンクリートのAE発生挙動

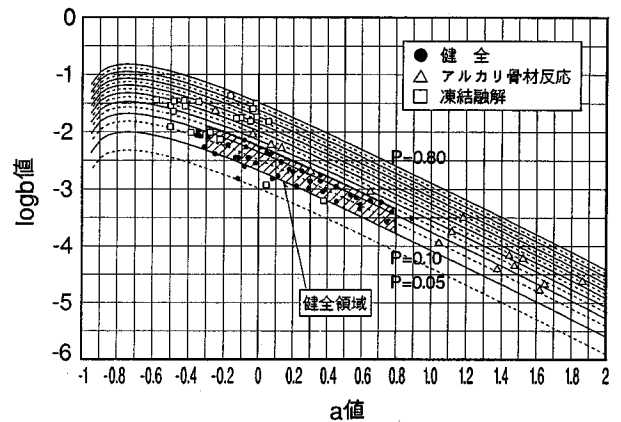


図-6 AE発生挙動解析による定数a, log b値の分布

価するものとした。a値とlog b値を横軸と縦軸にとり、各供試体のAE発生挙動解析より求められたa, log b値の関係を、荷重比50%のAE発生確率P(50)曲線上にプロットしたものを図-6に示す。健全なコンクリート供試体のa値は、ほぼ-0.3~0.8の範囲となり、a, log b値の関係は、AE発生確率P(50)の0.1と0.25曲線に囲まれた領域内に求められる。a値の範囲が-0.3~0.8と広いことは、健全なコンクリート供試体のAE発生挙動の多様性を表している。これより、健全なコンクリート供試体のAE発生挙動解析から求まる荷重比[0,50(%)]区間のa, log b値は、図-6の健全領域内にほぼ分布することとなる。また、図-6には、後述する劣化コンクリート供試体のAE発生挙動解析によって求めたa, log b値の関係を併せてプロットしている。なお、

表-3 健全なコンクリートの平均 a, log b 値

載荷重比	0~50%	50~70%	70~90%	90~100%
平均 a 値	0.229	2.545	8.211	24.226
平均 log b 値	-2.748	-6.648	-17.157	-48.513

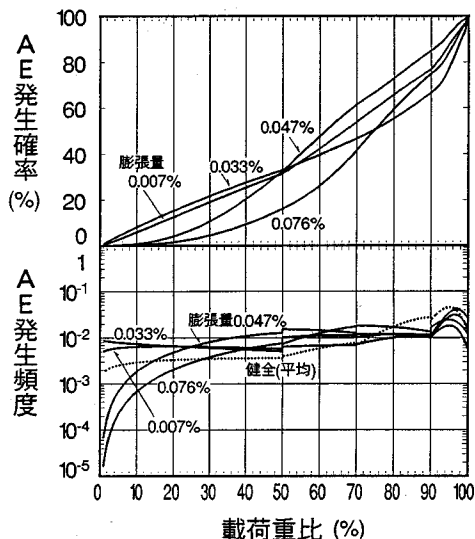


図-7 アルカリ骨材反応コンクリートのAE発生挙動

図-5には、健全なコンクリート供試体(33本)の a, log b 値の平均より求めた、平均のAE発生確率とAE発生頻度を示している。また、載荷過程を4段階に区分した各載荷重比区間の a, log b 値の平均値を表-3に示す。

b) アルカリ骨材反応コンクリート

コンクリート供試体のアルカリ骨材反応の促進過程において、材令1, 4, 18, 22, 33, 42, 68週のコンクリート供試体について、一軸圧縮試験を実施した。アルカリ骨材反応の進行によるコンクリート供試体の膨張量の増加と、解析から求めたAE発生挙動の変化との関係を図-7に示す。また、当アルカリ骨材反応促進試験におけるコンクリート供試体の膨張過程を図-10に示す。

図-7に示すように、コンクリート供試体の膨張量の増加に伴うAE発生挙動の変化は、AE発生頻度の変化によって、特徴的にとらえることができる。載荷重比[0, 50(%) ] 区間において、膨張量が、0.033%(材令18週)までのコンクリート供試体のAE発生頻度は、健全なコンクリートの平均AE発生頻度と比較して、若干高い分布を示し、アルカリ骨材反応の進行によるコンクリート内部での微小クラックの生成をうかがうことができる。一方、膨張量が0.047%(材令22週)以上となるコンクリート供試体のAE発生頻度には、それ以前とは違った極端な変化が現れている。この場合には、AE発生頻度は、低荷重レベルにおいては健全なコンクリートのものより

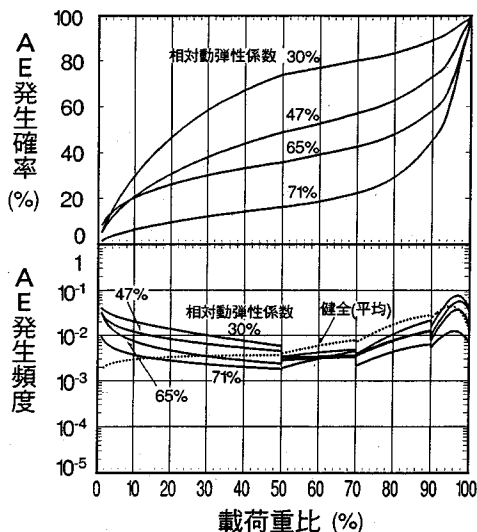


図-8 凍結融解コンクリートのAE発生挙動

小さくなり、載荷開始時に極小となって、荷重の増加とともに急激な増加を示しながら、載荷重比50%において0.01前後となる上に凸の曲線となっている。これは、相対的に載荷開始直後には少なかったAE発生が、荷重の増加に伴って加速度的に増加する現象を表している。この特徴的なAE発生頻度の変化は、アルカリ骨材反応により生成されたアルカリ硅酸塩ゲルの吸水膨張が原因となって、骨材周辺に微小クラックが生成されたことによるものと考えられる。このため、アルカリ骨材反応が進行したコンクリート供試体においては、載荷開始よりこれらの微小クラックからAEが連続的に発生し、荷重の増加とともに微小クラックの連結と相まって、AEの発生数が加速度的な増加を示すものと考えられる。

各コンクリート供試体の載荷重比[0, 50(%) ] 区間のAE発生挙動解析から求めた定数 a, log b 値の分布を図-6に示す。膨張量が0.007~0.033%のコンクリート供試体の a, log b 値は、健全なコンクリートの分布領域外に分布し、載荷重比50%でのAE発生確率は、ほぼ、0.3程度となっている。膨張量が0.047%以上のコンクリート供試体の a, log b 値は、健全なコンクリートの領域より大きく離れて分布する結果となっており、アルカリ骨材反応の進行により、コンクリート供試体のAE発生挙動が大きく変化したことを示している。以上の考察より、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化進行は、コンクリート供試体の一軸圧縮試験のAE発生挙動解析によって求められる定数 a, log b 値の分布によって評価することが可能であることがわかる。ただし、建設後長い年数が経過した実構造物では、ひびわれの癒着やゲルの結晶化が進むことが知られており、これらがAE発生特性に及ぼす影響についても検討する必要があると考えられる。

### c) 凍結融解コンクリート

凍結融解の繰り返しにより劣化を進行させたコンクリート供試体は、相対動弾性係数の低下を適時確認しながら、一軸圧縮試験を実施した。相対動弾性係数の低下で示されるコンクリート供試体の劣化過程での、解析から求めたAE発生挙動の変化を図-8に示す。

図-8に示すように、コンクリート供試体の凍結融解の繰り返しによる劣化過程でのAE発生挙動の変化は、荷重比[0, 50(%) ]区間のAE発生頻度の変化によって、特徴的にとらえることができる。この荷重比区間でのAE発生頻度は、荷重開始時点で最大となり、荷重の増加とともに低下する下に凸の曲線となっている。そして、相対動弾性係数の低下とともに、AE発生頻度の値は大きくなっている。これは、一軸圧縮試験時の荷重初期の低応力レベル下における急激なAEの発生現象を表し、コンクリートの劣化進行とともに、AEの発生ピークが大きくなることを表している。このようなAE発生頻度の変化から、AE発生確率曲線は、健全なコンクリート供試体と比べて明らかに異なる曲線となっている。コンクリートが凍結する場合には、温度降下に伴いセメント硬化体内部の毛細管空隙中の水が氷結し、未氷結の水は硬化体内部を移動し、水圧を発生して硬化体の微細組織を破壊する。このように凍結融解の繰り返しによってセメント硬化体内部で形成、蓄積された微小クラックは、一軸圧縮試験時の低応力下において容易に進展するため、AEが急激に発生するものと考えられる。

各コンクリート供試体の荷重比[0, 50(%) ]区間のAE発生挙動解析から求めた定数  $a$ ,  $\log b$  値の分布を図-6に示す。コンクリート供試体の相対動弾性係数が80%から45%程度まで低下する劣化過程では、 $a$  値は -0.3前後から -0.6程度までに変化し、荷重比50%のAE発生確率は、0.15程度から0.45程度までに増加している。相対動弾性係数が45%以下に低下した段階では、 $a$  値は、-0.2から0程度の範囲に変化し、荷重比50%のAE発生確率は、0.45から0.75程度とかなり高い値を示している。以上の考察より、凍結融解によるコンクリートの劣化進行は、荷重比[0, 50(%) ]区間のAE発生挙動解析によって求められる定数  $a$ ,  $\log b$  値の分布によって評価することが可能と考えられる。

## 5. コンクリートの劣化度評価

### (1) 劣化度評価手法とその有用性の検討

一軸圧縮試験におけるアルカリ骨材反応および凍結融解により劣化が進行したコンクリートのAE発生挙動の変化は、荷重比[0, 50(%) ]区間のAE発生挙動解析から求められるAE発生頻度の特徴的な変化によって評価できることが明らかになった。これより、荷重比[0,

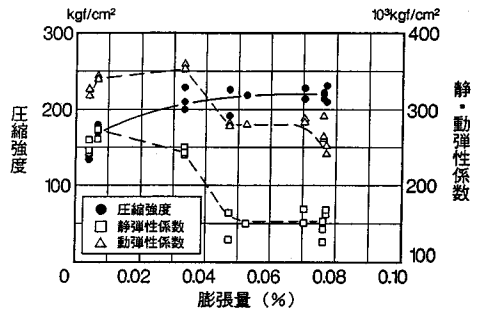


図-9 膨張量と圧縮強度，静・動弾性係数の変化

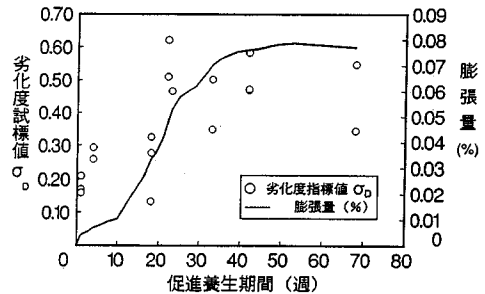


図-10 膨張量と劣化度指標値  $\sigma_D$  の関係

50(%) ] 区間での健全なコンクリートの平均AE発生頻度  $q_0$  ( $a=0.229$ ,  $\log b=-2.748$ ) を基準として、劣化コンクリートのAE発生頻度  $q$  との偏差を算定することによって、コンクリートの劣化進行度に対応したAE発生挙動の変化を定量的に評価することを試みた。この偏差値を劣化度指標値  $\sigma_D$  と呼び、この値の大きさによって、コンクリートの劣化度を定量的に評価するものとした。劣化度指標値  $\sigma_D$  の算定式を以下に示す。

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\log q - \log q_0)^2} \quad (17)$$

ここに、 $q$ ,  $q_0$  は、荷重比1~50(%)間で、1(%)ピッチで考慮する。 $q$ ,  $q_0$  の値は、(16)式によって算定される。

本研究で行った、アルカリ骨材反応促進試験における、コンクリート供試体の膨張量と圧縮強度、静・動弾性係数との関係を図-9に示す。また、膨張量と劣化度指標値  $\sigma_D$  との関係を図-10に示す。コンクリート供試体の膨張量の増加に伴う圧縮強度、静・動弾性係数の変化を見ると、圧縮強度は、促進養生期間中において漸増の傾向を示し、膨張による強度低下は認められない。一方、静弾性係数においては、膨張量が、0.033%(材令18週)までは、 $27 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$  から  $24 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$  程度のゆるやかな低下を示し、膨張量が、0.047%(材令22週)の時点で、 $15 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$  程度となる急激な低下となっている。材令28日の値と比較すると、静弾性係数は55%程度までに低下している。以降の膨張量の増加に伴う、静弾性係数の



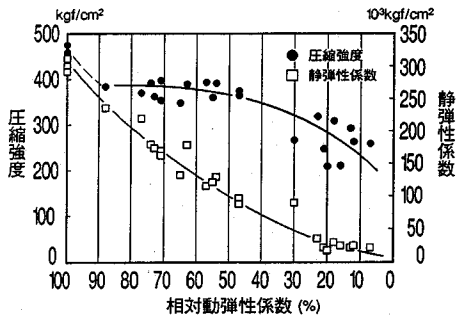


図-11 相対動弾性係数と圧縮強度，静弾性係数の変化

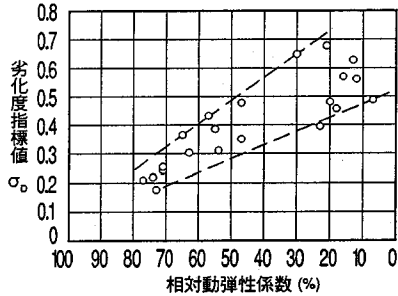


図-12 相対動弾性係数と劣化度指標値  $\sigma_0$  の関係

顕著な低下は認められない。動弾性係数においても同様な傾向が認められ、その値の低下は静弾性係数ほど大きくはないが、膨張量が収束した0.077% (材令68週) 時点で、 $25 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 程度に低下しており、材令28日の値と比較して70%程度となっている。

膨張量の増加に伴う劣化度指標値  $\sigma_0$  の変化をみると、膨張量が0.033%までの  $\sigma_0$  値は、0.25~0.33程度であるが、膨張量が0.047%になった時点では、静弾性係数の急激な低下とA E発生頻度分布が、アルカリ骨材反応による特徴的な変化を示し、 $\sigma_0$  値は0.45以上に増加している。そして、膨張量の増加とともに  $\sigma_0$  値は増加し、膨張量が収束する時点では0.6程度となっている。

以上述べたように、アルカリ骨材反応の劣化進行とともに、劣化度指標値  $\sigma_0$  は、0.25程度から0.6程度までに増加し、この  $\sigma_0$  値の増加は、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化進行度を表していると思われる。また、アルカリ骨材反応に特有な載荷重比[0, 50(%)]区間のA E発生頻度分布により、劣化要因を特定することも考えられる。実構造物でコア採取により、ゲルの溶出などのアルカリ骨材反応の可能性が見られた場合に、コンクリートの構造的な健全性を評価する場合に以上の結果を適用することが考えられる。アルカリ骨材反応による静弾性係数の急激な低下は、コンクリートの劣化を評価する上で有効な指標となることが提案されており<sup>14)</sup>、例えば、圧縮強度が低下しないケースでも劣化度指標値  $\sigma_0$  と静弾性係数および動弾性係数の低下から、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化について考慮する

必要もあることを示している。

本研究で行った凍結融解試験による、コンクリート供試体の相対動弾性係数の低下と圧縮強度、静弾性係数との関係を図-11に示す。また、相対動弾性係数の低下と劣化度指標値  $\sigma_0$  との関係を図-12に示す。

コンクリート供試体の相対動弾性係数の低下に伴う圧縮強度と静弾性係数の変化をみると、圧縮強度は、相対動弾性係数が50%程度までに低下する間で、 $370 \text{ kgf/cm}^2$ 程度とはほぼ一定となっており、相対動弾性係数が30%以下に低下すると、 $210 \text{ kgf/cm}^2$ 程度に急激に低下している。また静弾性係数は、相対動弾性係数の低下に伴って、 $30 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ から  $2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 程度へと急速な低下を示している。

劣化度指標値  $\sigma_0$  の変化をみると、相対動弾性係数が70%程度の低下において、 $\sigma_0$  値は0.25程度となっており、これから、相対動弾性係数が、10%の極限までに低下する間で、 $\sigma_0$  値は0.25から0.65程度までに増加している。これより、凍結融解の繰り返しによるコンクリートの劣化進行度を、劣化度指標値  $\sigma_0$  によって評価できると考えられる。また、凍結融解により劣化したコンクリートに特有な載荷重比[0, 50(%)]区間のA E発生頻度分布により、劣化要因を特定することも考えられる。これより、劣化度指標値  $\sigma_0$  と静弾性係数および動弾性係数の低下を考慮することによって、凍結融解の繰り返しによるコンクリートの劣化度を評価することが考えられる。

## (2) コンクリートの劣化度評価のまとめ

健全なコンクリートの一軸圧縮試験のA E発生挙動解析によって求められる載荷重比[0, 50(%)]区間の  $a$ ,  $\log b$  値は、4章で考察したように、図-6に示した健全領域の範囲にほぼ求められる。また、本研究で行った健全劣化コンクリートの圧縮強度と静・動弾性係数の関係をみると、健全なコンクリートでは、圧縮強度200~600  $\text{kgf/cm}^2$ において、静弾性係数は $20 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 以上、動弾性係数は $30 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 以上が期待できる。これより、一軸圧縮試験のA E発生挙動解析による健全なコンクリートの評価を以下のように整理した。

$a$  値は、-0.3~0.8の範囲にあり、 $a$ ,  $\log b$  値の関係は図-6に示すように、載荷重比50%のA E発生確率P(50)の0.10と0.25曲線に囲まれた領域に分布する。なお、 $a$  値が上記の領域を若干はずれたとしても、圧縮強度が200~600  $\text{kgf/cm}^2$ において、静弾性係数が $20 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 以上、動弾性係数が $30 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 以上であれば、健全なコンクリートとする。

アルカリ骨材反応および凍結融解により劣化したコンクリートの劣化度を、一軸圧縮試験のA E発生挙動解析から求まる劣化度指標値  $\sigma_0$  によって、評価するものと

表-4 劣化度指標値 $\sigma_0$ によるコンクリートの劣化度評価区分

劣化区分	劣化の進行状況	劣化度指標値 $\sigma_0$ の範囲	物性値の低下状況	
			静弾性係数 ( $\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ )	動弾性係数 ( $\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ )
I	初期段階	0.25~0.35	20以上	30以上
			20~15	28~20
II	進行段階	0.35~0.50	20~15	30~25
			15~10	20~15
			10以下	15以下
III	終局段階	0.50以上	20~15	30~25
			10以下	15以下

上段：アルカリ骨材反応試験結果  
下段：凍結融解試験結果

した。健全なコンクリートの $a, \log b$ 値の分布領域での $\sigma_0$ 値は、AE発生確率 $P(50)=0.25$ 曲線上で0.25程度、 $P(50)=0.10$ 曲線上で0.30~0.35程度となり、一定の値とならないが、コンクリートの劣化進行過程での劣化度指標値 $\sigma_0$ の検討結果より、コンクリートの劣化度を評価する場合、劣化コンクリートの $\sigma_0$ 値は0.25以上とした。コンクリートの劣化促進試験における、コンクリートの劣化進行度を表す膨張量の増加や相対動弾性係数の低下という指標値に対して、劣化度指標値 $\sigma_0$ は、コンクリートの不均質性と劣化要因によるコンクリート内部の微小クラックの形成・蓄積状況の違いを反映して、個々のコンクリート供試体である分布幅を持った値となる。このため、コンクリートの劣化進行度を $\sigma_0$ 値により、劣化の初期段階、進行段階、終局段階の3段階に区分して、静・動弾性係数との関係を考慮することによって、コンクリートの劣化度を評価するものとした。また、載荷重比[0,50(%)]区間のAE発生挙動解析によって得られる $a, \log b$ 値の分布によって劣化コンクリートの評価を行うとともに、AE発生頻度分布の特性によって、アルカリ骨材反応または凍結融解による劣化要因を特定するものとした。以上をまとめて表-4に、劣化度指標値 $\sigma_0$ によるコンクリートの劣化評価区分を示す。

本研究では、アルカリ骨材反応試験は1ケースのため、アルカリ骨材反応による劣化進行過程での静・動弾性係数の低下範囲を明らかにしたとはいえないが、当研究所で行った、アルカリ骨材反応を起こしている無筋コンクリート構造物から採取したコアの試験結果では、静弾性係数が $4 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 以下、動弾性係数で $10 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 以下という例があり、アルカリ骨材反応の劣化終局段階では、凍結融解による劣化と同様に、物性値の大きな低下が認められる場合があることが知られている。

## 6. 結論

本研究では、コンクリート供試体の一軸圧縮試験の載荷過程における荷重とAE発生数との関係で表されるAE発生挙動を、確率過程と仮定することによって、載荷開始より破壊に到るまでのAE発生挙動を近似する解析

手法を提案した。そして、健全および劣化コンクリートの多様なAE発生挙動を、当解析手法により精度よく近似できることを確認した。また、載荷重比[0,50(%)]区間のAE発生挙動解析によって求められる定数 $a, \log b$ 値とAE発生確率およびAE発生頻度によって、コンクリートの健全性と劣化度を評価する手法を提案し、その有用性を確認した。本研究で得られた成果をまとめると、次の通りである。

(1) アルカリ骨材反応および凍結融解の繰り返しにより劣化したコンクリート供試体の一軸圧縮試験のAE発生挙動は、劣化の進行度に対応して健全なコンクリートのAE発生挙動とは大きく異なったものとなり、それぞれの劣化要因に特有なAE発生挙動の変化を示す。

(2) コンクリート供試体の一軸圧縮試験の載荷過程におけるAE発生を、荷重増加に伴う確率過程と考へて、荷重とAE発生数との関係で表されるAE発生挙動を近似する解析手法を提案した。そして、当解析手法の有効性を確認するとともに、健全およびアルカリ骨材反応、凍結融解により劣化したコンクリートのAE発生挙動特性を、当解析手法から求められる載荷重比[0,50(%)]区間の定数 $a, \log b$ 値とAE発生確率およびAE発生頻度によって、評価できることを確認した。

(3) 一軸圧縮試験の載荷重比[0,50(%)]区間のAE発生挙動解析から求まる劣化コンクリートのAE発生頻度と、健全なコンクリートの平均AE発生頻度を基準として算定した偏差値の劣化度指標値 $\sigma_0$ によって、コンクリートの劣化度を評価する手法を提案した。そして、劣化度指標値 $\sigma_0$ とコンクリートの静・動弾性係数の低下を考慮して、アルカリ骨材反応と凍結融解によるコンクリートの劣化進行度を評価できることを確認した。また、これらの劣化に特有なAE発生頻度分布によって、劣化要因を特定することが考えられる。

謝辞：本研究は、四国電力(株)からの委託研究により実施したことを付記するとともに、本研究を実施するに当たって、貴重なご助言、ご指導をいただいた四国電力(株)建設部の関係各位の方々に、謝意を表すものである。

## 参考文献

- 1) 006特別研究委員会資料・土木工学におけるAE研究発表会, No.87, 日本非破壊検査協会, 1988.10.
- 2) 土木工学へのAE計測の応用に関する講習会テキスト, 九州橋梁・構造工学研究会, 1992.9.
- 3) M.Ohtsu: Rate Process Analysis of Acoustic Emission Activity in Core Test of Concrete, Proc. of JSCE, No.442/V-16, pp.211-217, Feb., 1992.
- 4) 丹羽義次監修・天津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988.

- 5) 矢村 潔 , 長井吾郎 : 劣化コンクリートのA E特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 853-858, 1993.
- 6) 大津政康, 松山公年, 多田東臣, 油野邦弘 : コンクリートの劣化度評価のためのコア供試体の圧縮試験へのA E法適用, コンクリートの非破壊試験方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 129-132, 1991.
- 7) 横堀武夫 : 材料強度学 第2版, 岩波全書, pp. 171-175, 1988.
- 8) 大津政康, 浮田和明, 油野邦弘 : 破壊の確率過程論からみたコンクリートコアの一軸圧縮試験におけるA E発生挙動について, 第8回A E総合コンファレンス論文集, 日本非破壊検査協会, pp. 189-194, 1991.
- 9) 岡田 清 , 六車 照 : コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 448-452, 1981.
- 10) 日本鋼構造協会 : 最適化手法の構造設計・解析への応用, 培風館, pp. 8-32, 1980.
- 11) 大津政康 : コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション(A E)研究の歴史と現状, 土木学会論文集, No. 496/V-24, pp. 9-19, 1994. 8.
- 12) 油野邦弘, 井上芳樹, 大津政康 : A E発生特性によるコンクリートの劣化評価法の考察, 第5回地下と土木のA E国内コンファレンス論文集, 資源・素材学会, 地下計測部門委員会, pp. 116-122, 1993.
- 13) 油野邦弘, 井上芳樹, 大津政康 : 確率過程論を用いたA E発生挙動解析による劣化コンクリート供試体の評価, 第9回A E総合コンファレンス論文集, 日本非破壊検査協会, pp. 115-120, 1993.
- 14) 小林一輔, 森 弥広, 野村謙二 : 圧縮荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No. 460/V-18, pp. 151-154, 1993. 2.

(1994. 1. 28受付)

## EVALUATION OF DETERIORATION IN CONCRETE BY STOCHASTIC ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION ACTIVITY UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Kunihiro YUNO, Yoshiki INOUE and Masayasu OHTSU

An application of acoustic emission (AE) to the evaluation of deterioration in concrete is studied. AE activity of concrete samples under uniaxial compression is analyzed to estimate the deterioration degree quantitatively. For this purpose, a stochastic analysis of AE activity is introduced. The analysis is performed on concrete newly cast, concrete expanded due to alkali-aggregate reaction, and concrete subjected to freezing-thawing process.

A probability function of AE generating behavior at stress level,  $V$ , between 0 % and 50 % to the compressive strength is represented by an exponential function  $bV^a$ . It is found that the values  $a$  and  $b$  distribute in the characteristic zones depending on the deterioration. The variation from the sound concrete is denoted by the deterioration coefficient and the classification of concrete based on the coefficient is proposed.