

損傷変数に基づいたコンクリートのAE発生特性の定式化とその考察

FORMULATION OF ACOUSTIC EMISSION ACTIVITY IN CONCRETE
BASED ON SCALAR DAMAGE PARAMETER AND ITS CONSIDERATION山ノ内 正司
Masaji YAMANOUCHI

A simple constitutive equation and a formula for acoustic emission (AE) activity in concrete under uniaxial compression are proposed based on the scalar damage parameter, using the AE technique to estimate the material properties or the initial damage in concrete. Experimentation shows that the damage is connected with unelastic longitudinal strain in the form of a power-law, while the AE generative function is nearly constant up to a transitional damage, increasing exponentially thereafter. With various concrete specimens, the bond strength and/or mortar strength of which is controlled, it is deduced that one of two parameters in the AE generative function corresponds to the state of transitional damage occurring between the phenomena of bond-cracking and mortar-cracking, and the other to the mortar resistance to branching and bridging. Furthermore, for concrete which contains pre-existing cracks the value of the latter parameter drops greatly.

Key Words : *acoustic emission, scalar damage, propagation equation, constitutive equation*

1. 序論

従来から、コンクリート構造物は強度さえ十分であればメンテナンスフリーで半永久的に使用できると考えられてきた。しかし近年、塩害やアルカリ骨材反応などの原因によるコンクリート構造物の早期劣化が問題になっており、超音波、アコースティック・エミッション(AE)、電磁場、X線などをはじめとして、コンクリート構造物の力学的健全度や余寿命を診断する手法について種々の研究が進められている^{1) 2)}。

AE手法は、構造物の微視ひびわれをリアルタイムで検出するのに適した方法であり、波形解析によって破壊源の位置や規模、破壊形式などを定量的に推定することができ、最近では、フラクチャープロセスゾーンのモーメントテンソル解析に利用されている^{4) 5)}。また、骨材とモルタルから構成される不均質なコンクリートの場合、個々の微小破壊の情報だけでなく、それらが累積することによって生じる非可逆的な材料の特性変化をマクロなスケールで評価することも重要である³⁾。AE手法においては、AE事象数の変化がこれに対応すると考えられている。

コンクリートのマイクロクラックの成長過程は、モルタル強度、骨材との付着強度、骨材の寸法形状、欠陥密度などを支配要因として、さまざまな変形の非線形挙動やAE事象となって顕現する。コンクリートが力学的あるいは化学的作用によって損傷を受けた場合、マイクロクラックに対する抵抗力の低下や欠陥密度の増加など、

マイクロクラック成長の支配要因の変化としてコンクリート内部に残留する。これらの内部構造の変化を受けたコンクリートを一軸圧縮試験をすることによって、初期損傷の影響を微視破壊過程の違い、すなわちAE発生特性の違いとして評価できると考えられる。AE発生特性をどのような物理量に関係づけてモデル化するか、また、それによって内部損傷のどのような情報を引き出すことができるか、これらは重要な問題であり、議論の余地が残されている。

大津らは、確率過程論に基づいて、載荷重比に関係したAE発生モデルを提案し⁶⁾、油野らは、その後、荷重レベルを4区間に分割してモデルの適合度を高め、コンクリートの定量的な劣化度診断手法を提案している⁸⁾。筆者は、非弾性縦ひずみに関係したAE発生モデルに基づいたコンクリートの損傷度評価に関する研究を進めてきたが、モデルの適合範囲が主破壊過程に限られているなどの問題が残されていた^{7) 8) 9)}。

本研究では、マイクロクラックの成長過程をコンクリートの損傷場の発展過程と考え、スカラー損傷変数に基づいて一軸圧縮時の構成則とAE発生モデルを提案した。さらに、各種コンクリート供試体の一軸圧縮試験を行い、モデルの妥当性を検討するとともに、モルタル強度や付着強度などの内部構造の強度特性の違いや履歴荷重による初期損傷が、マイクロクラック成長過程におけるAE発生特性に及ぼす影響を考察した。

表-1 コンクリート供試体の特性

記号	W/C(%)	付着強度	モルタル強度	骨材強度	備 考
WC30	30	高	高	高	普通コンクリート
WC40	40	高	高	高	普通コンクリート
WC50	50	中	中	高	普通コンクリート
AGE7	50	低	低	高	水中養生 7 日
DES3	60	低	低	高	打設 3 日後に乾燥
LW	45	高	高	中	人工軽量骨材コンクリート
CO	55	極低	中	高	粗骨材をアクリル樹脂でコーティング

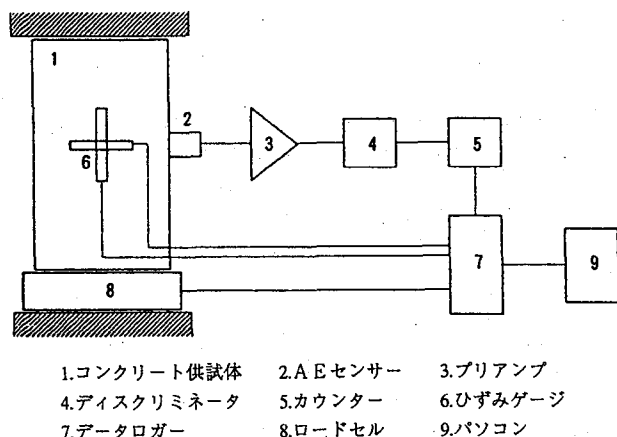


図-1 実験装置概要

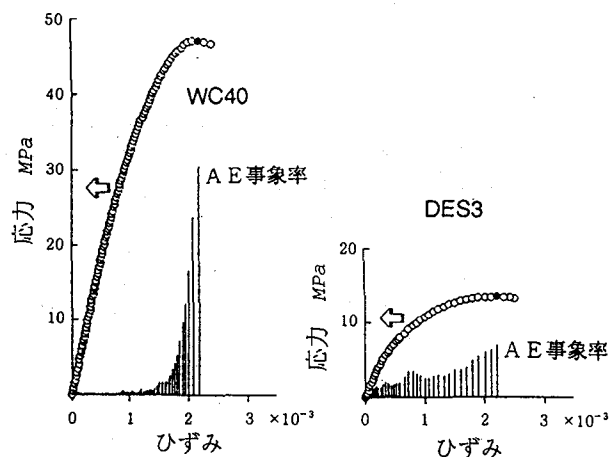


図-2 応力～ひずみ曲線とAE特性

2. 実験概要

2.1 コンクリート供試体

粗骨材との付着強度、モルタル強度、欠陥密度などの力学的な支配要因がAE発生特性に対して及ぼす影響を検討するために、表-1に示す7種類のコンクリート供試体を作成した。表において、高、中、低はそれぞれの強度の相対的な大小関係を表している。

WC30～WC50は通常の配合からなる普通コンクリートであり、28日の水中養生を行っている。AGE7では水中養生期間を7日とした。DES3については、コンクリート打設3日後に乾燥機によってセメントの水和反応を抑制し、骨材付着力とモルタル強度を共に低下させたものであり、COは、アクリル樹脂でコーティングされた粗骨材を用い、粗骨材との付着強度だけを著しく低下させている。人工軽量骨材コンクリートLWでは、骨材強度が他と比べて低めになっている。

コンクリート供試体の寸法を $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 、粗骨材の最大寸法は25mmとした。打設後7日目に研磨機によって端面を整形した。

2.2 実験方法

油圧式耐圧試験機（容量200tf）を用い、載荷速度約20kN/min（応力速度1.1MPa/min）の一軸圧縮試験を行った。

図-1に、本実験で用いた実験装置の概要図を示す。AE計測については、センサーをAE905S（NF社製）と

し、検出されたAE信号はプリアンプで40dB、ディスクリミネータで30dB増幅される。バンドパスフィルターは50～500kHz、ディスクリレベルは1mVと設定した。カウンターで計測される10秒ごとのAE事象数と、縦ひずみ3ch、横ひずみ3ch、そしてロードセルから出力される荷重値をデータロガーに取り込んだ後、10秒間隔でコンピュータに送り記録した。

2.3 一軸圧縮時の変形とAE発生特性

図-2に典型的な特性を持った2つの供試体について、一軸圧縮時の応力～ひずみ曲線、およびAE発生図を示す。ここに、棒状に示されたAEは10秒間のAE事象率を表している。なお、両者ともAE事象率のスケールは同じである。

図から、AE発生特性の定性的な傾向としては、強度が高い供試体WC40では最終破壊直前で急激に増加しているのに対し、乾燥機によってセメントの水和反応が抑制された供試体DES3では載荷初期からAE発生が認められ、以後、直線的な漸増傾向を示す。これらのAEは非線形的な変形挙動に対応してその発生パターンが変化していることが分かる。この違いは、本質的にはコンクリート内部のマイクロクラックの成長過程の違いである。

一般にコンクリートの一軸圧縮時の破壊過程は、応力レベル約35%でボンドクラックが現れ、応力レベル約50～60%でランダムな方向のモルタルクラックが、約

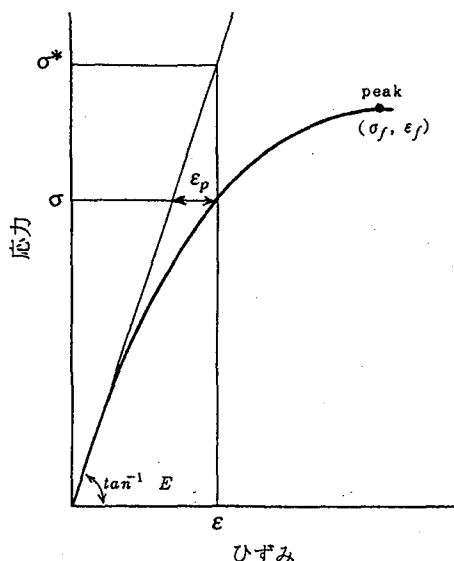


図-3 実質応力 σ^* と見掛け応力 σ

80～90%では荷重軸と平行なモルタルクラックが発生し始め、以後モルタルクラックの成長・連結によって耐荷力を失うと考えられている¹¹⁾。応力レベル約80%の点は臨界応力と呼ばれ、ダイレタンシー現象の開始点になっている。

本研究では、以上のようなマイクロクラックの成長過程を、コンクリートの損傷場の発展過程と考えた。すなわち、過去の外的な作用によって損傷 Ω が累積している系に、応力の増分 $d\sigma$ が与えられた場合、新たなマイクロクラック成長によって損傷が $d\Omega$ だけ増加し、同時に dN の A E 事象が系の外部で観測される。応力の増分 $d\sigma$ をゼロにしても、結果として系の平均的な非弾性縦ひずみ $d\varepsilon_p$ が残留することになる。以下に、これらの非可逆量の関係に基づいてモデル化した一軸圧縮時の構成則と A E 発生特性について述べる。

3. 損傷変数に基づいた一軸圧縮特性のモデル化

材料の損傷場を三次元空間内に分布したマイクロクラックと等価な損傷テンソルで表現した研究が行われている¹²⁾、本研究では簡単化のためスカラーパラメータモデルを仮定する。

ひずみ等価性の仮説¹³⁾によって、実質応力 σ^* と見掛け応力 σ との関係は、次のように表される (図-3)。

$$\sigma = \sigma^*(1 - \Omega) \quad (1)$$

ここに、 Ω は、マイクロクラック成長に伴う有効面積の減少度を表す損傷変数である。また、上式をひずみ量で表せば、

$$\varepsilon_p = \varepsilon \Omega \quad (2)$$

となり、ここに、 ε は縦ひずみ、 ε_p は非弾性縦ひずみを表している。

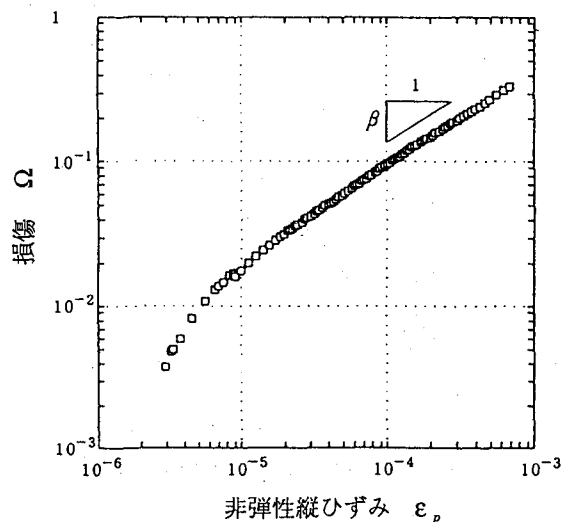


図-4 損傷と非弾性縦ひずみの関係

ここで、損傷変数 Ω を導入したことによって損傷場の発展式を仮定する必要がある。Mazars¹⁴⁾はひずみ軟化域をも対象にした4パラメータモデルを提案しているが、本研究では損傷場の発展式として、非弾性縦ひずみを変数とした次のべき乗則を仮定する。

$$\Omega = \alpha \varepsilon_p^\beta \quad (3)$$

上式は、 $\Omega \geq 1$ を満たす ε_p の存在を許すものであるが、ここでは対象とする変形をひずみ硬化域に限定しているため十分であると考えられる。

以上より一軸圧縮時における構成則は、

$$\sigma = E \left\{ \varepsilon - (\alpha \varepsilon)^{1/(1-\beta)} \right\} \quad (4)$$

となり、 $\beta=0.5$ の場合、放物線型の構成式に一致する。

また、最大荷重点の強度 σ_f 、ひずみ ε_f および損傷度 Ω_f は、 α 、 β 、初期弾性係数 E によりそれぞれ次式で表される。

$$\sigma_f = \beta E \varepsilon_f \quad (5)$$

$$\varepsilon_f = \left\{ \frac{(1-\beta)^{(1-\beta)}}{\alpha} \right\}^{1/\beta} \quad (6)$$

$$\Omega_f = 1 - \beta \quad (7)$$

式(7)より、 β は最大荷重点の有効面積の減少度を意味しており、マイクロクラック成長によって現れる非弾性的な変形に対するコンクリートの抵抗力に対応している。

図-4は、応力～ひずみ曲線の初期接線と式(1)に基づいて実験により得られた Ω と ε_p の関係を示したものである。非線形領域の初期の段階で折れ曲がり点が認められるものの、ひずみ硬化域の非線形変形全般にわたり

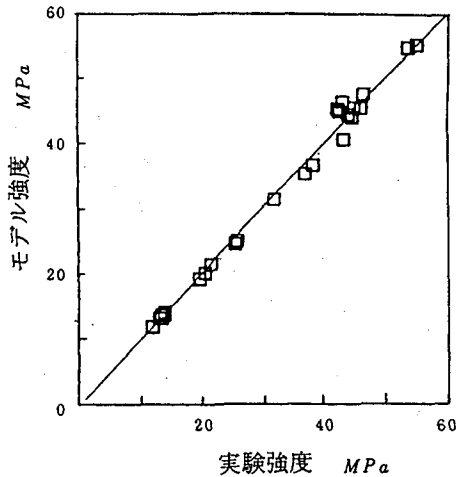


図-5 実験強度とモデル強度の関係

べき乗則に従っており、式(3)の妥当性を示している。また、実験に用いた7種類のコンクリートにおいて α 、 β は、

$$\alpha = 8.23 \sim 44.2$$

$$\beta = 0.38 \sim 0.69$$

となり、両者とも強度と正の相関関係にあった。

図-5は、式(5)より得られたモデル強度と実験強度を比較したものである。図-4に見られた折れ曲がり点と比較的大きな非弾性縦ひずみで現れている供試体で差違が生じているが、両者はほぼ一致し、提案された構成則の適合度が高いことが分かる。

4. AE発生特性とその考察

4.1 AE発生特性の定式化

AE現象は非可逆過程であり、クラック密度の増加を表した非可逆的な量との関係に基づいてモデル化するのが妥当であると考えられる。これまで応力や非弾性ひずみに基づいてAE発生特性を定式化する試みが行われているが^{5)~9)}、本研究では、損傷変数 Ω に基づいたAE発生特性の定式化を試みる。

損傷場の増分に対応したAE事象の増分は、現在の損傷場の状態に影響を受けると考えるのが妥当であろう。そこで、AE発生速度(AE事象率) dN/dt と損傷速度 $d\Omega/dt$ の関係を次のように仮定する¹⁰⁾。

$$\frac{dN}{dt} = \Psi(\Omega) \frac{d\Omega}{dt} \quad (8)$$

ここで、単位損傷当りのAE事象率 $\Psi(\Omega)$ をAE発生関数と呼ぶ。上式は、本質的にはマイクロクラックの動的な成長にかかわる複雑な問題を含み、さらにはAE計測系の条件にも影響を受けるため、現段階でAE発生関数 $\Psi(\Omega)$ を理論的に構築するのは困難であり、ここでは実際の現象に基づいて決定することにした。図-6に、実験より得られた代表的な $\Psi(\Omega)$ を示す。ここでは、10

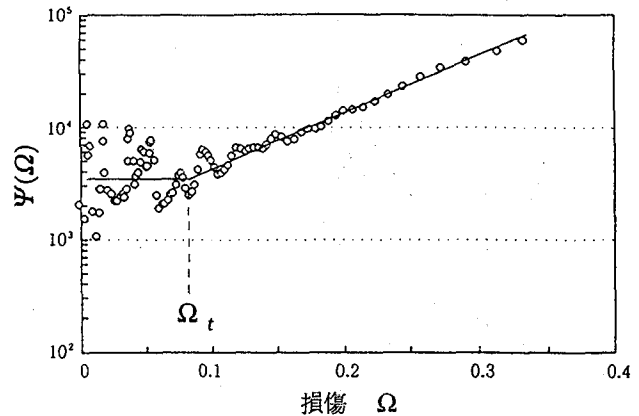


図-6 AE発生関数

秒当りのAE事象数 dN を、応力～ひずみ曲線の初期接線と式(1)の関係から得られる Ω の変化量 $d\Omega$ で除して $\Psi(\Omega)$ を求めている。全体として $\Psi(\Omega)$ の変化(dN の変化)に周期的な変動が認められるが、これは圧縮試験機の載荷速度の微小な変動の影響を受けて生じたものである。初期の破壊過程では、 $d\Omega$ が微量であるためこの変動が拡大されて現れているが、平均的に損傷速度とAE発生速度は比例関係にあると言える。遷移点 Ω_t を境にAE発生特性に違いが認められ、 $\Psi(\Omega)$ は次のように表される。

$$\Psi(\Omega) = \begin{cases} \eta & (\Omega \leq \Omega_t) \\ \eta \exp[\gamma(\Omega - \Omega_t)] & (\Omega > \Omega_t) \end{cases} \quad (9)$$

Ω_t 以前の破壊過程では、局所的なマイクロクラックの発生が相互に影響を及ぼし合うことなく材料全体に分散累積し、安定な構造変化が生じていると解釈される。これまでのコンクリートのマイクロクラック発生に関する知見¹¹⁾と、実験において Ω_t の応力レベルが50～70%であったことを総合すれば、 Ω_t 以前はボンドクラックの生成過程に、 Ω_t の点はモルタルクラックが卓越し始める点に対応していると考えられる。また、 Ω_t 以後の過程では、 γ はモルタルクラックが相互に干渉しながら成長、連結する主破壊過程に対応した、AEの指数関数的な増加度を表現している。

4.2 AE発生特性と破壊メカニズム

骨材との付着強度、モルタル強度、あるいは既存の欠陥密度などの材料特性と、 $\Psi(\Omega)$ における2つのAEパラメータ γ 、 Ω_t との関係を検討した結果を図-7に示す。

コーティング粗骨材を用いたコンクリートCOを除けば、全体として供試体強度が低いものほど Ω_t は大きく、 γ は小さくなる傾向にある。これは、供試体強度(COを除くグループでは付着強度とモルタル強度)が低いコンクリートではボンドクラックが発生しやすく、

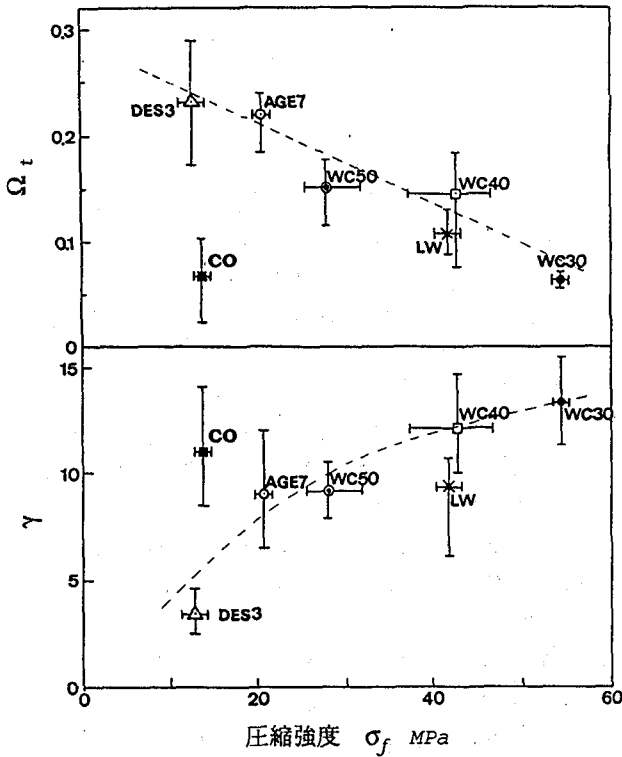


図-7 材料特性と Ω_t 、 γ の関係

モルタルクラック発生時にはボンドクラック密度が高い状態になっており、その結果 Ω_t が大きくなったと考えられる。また、それ以後のモルタルクラック成長過程においては、モルタルクラック進展時のクラックアレスト力が低いため、段階的なクラック成長が促進され、結果として γ が小さくなったものと解釈される。付着強度とモルタル強度が共に低い DES3 のように、内部構造の強度特性が著しく劣ったコンクリートでは γ が極めて小さくなる。

人工軽量骨材コンクリート LW においては、同程度の強度を持つ普通コンクリート WC40 と比べて、 γ が小さめに得られている。これは、人工軽量骨材自体の強度が碎石よりも低いため、マクロなクラック連結が生じやすいことに対応していると考えられる。

また、コーティング粗骨材を用いたコンクリート CO では、供試体強度が低いにもかかわらず、他の結果とは逆に Ω_t が小さく γ が大きくなっているのが注目される。これは、初期状態において粗骨材とモルタルの境界面が既に分離し、AE 発生を伴う新たなボンドクラックの成長が起こらず、ひずみエネルギーの解放がモルタルクラック中心に行われた結果、 Ω_t が極めて小さくなったと考えられる。また、同程度の強度を持つコンクリート DES3 と比べて γ が大きくなっているのは、供試体 CO のモルタル強度が相対的に高いことによるものと思われる。

以上のことから、損傷の増加に伴う AE 事象率の指数

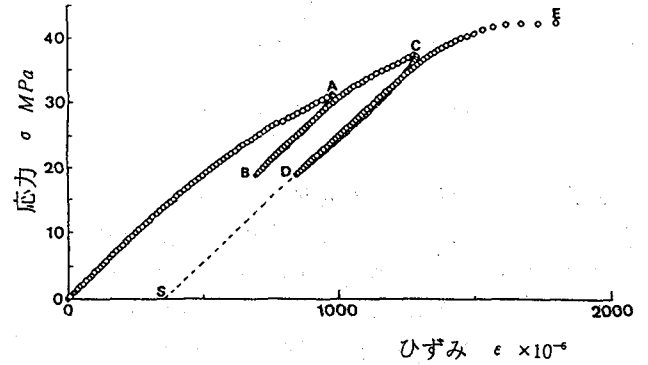


図-8 履歴載荷時の応力～ひずみ曲線

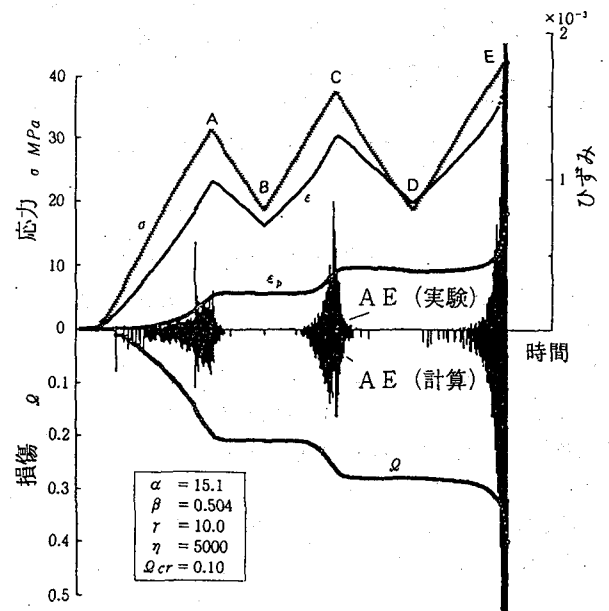


図-9 履歴載荷時の応力、ひずみ、AE、損傷の経時変化

関数的な増加度を表したパラメータ γ は、一軸圧縮時のコンクリートの動的なモルタルクラック成長過程を反映したものであり、力学的にはマクロなクラック成長・連結に対する抵抗力に関係していると考えられる。

4.3 履歴荷重時の AE 発生特性

図-8 に、W/C=35% の普通コンクリートに履歴載荷を与えたときの応力～ひずみ曲線を示す。図-9 の上段は、このときの応力、ひずみ、AE 事象率の経時変化を表したものである。図より、再載荷時の AE が過去の最大履歴応力に達するよりも幾分前から発生し始めていること、さらに除荷の直後に単調減少する AE が発生していることが注目される。これは、負の応力増分が与えられても応力レベルが高いために、局所的な応力の動的変化によって成長するマイクロクラックによるものである。

図-9 の下段には、実験で得られたひずみを用いて、

式(3)、(9)により計算した履歴載荷時の損傷場の変化とAE事象率を示す。ここで、履歴荷重を受ける場合は、損傷場の発展式(3)を次のように変形した。

$$d\Omega = \begin{cases} \alpha \beta \varepsilon_p^{(\beta-1)} d\varepsilon_p & (d\varepsilon_p > 0) \\ 0 & (d\varepsilon_p \leq 0) \end{cases} \quad (10)$$

実験結果と比べて微小なAE発生数をやや大きめに計算しているが、除荷時や再載荷時のAEにおいてもほぼ一致しており、提案されたモデルの妥当性を示していることが分かる。なお、ここではパラメータ γ については、履歴載荷全般の平均的な値を用いている。

次に、過去に受けた損傷がAE特性に及ぼす影響について考察する。図-8において、OからSまでを過去の損傷過程、最終載荷S→D→Eを損傷を受けたコンクリートの一軸圧縮過程と見なして実験データからAEパラメータ γ を求めれば $\gamma=7.5$ となり、図-7に示した同程度の強度を有する供試体WC40と比べると、初期損傷の影響によって γ が小さくなることが分かった。

5. 結論

本文では、マイクロクラックの成長過程をコンクリートの損傷場の発展過程と考え、スカラー損傷変数に基づいた一軸圧縮時の構成則とAE発生関数を提案した。さらに、実験結果との比較に基づいてモデルの妥当性を示すとともに、コンクリートの内部構造の強度特性とAE発生特性との関係について考察した。結論をまとめれば以下ようになる。

- (1) 損傷場の発展式としてべき乗則を仮定して導かれた一軸圧縮時のコンクリートの構成式は、各種コンクリートの非線形的な変形挙動をよく表し、モデルから求めた強度は実験値と比較的良好一致した。べき乗則の指数 β は、最大荷重点の有効面積の減少度と定義される。
- (2) AE発生関数を特徴づける2つのパラメータと強度との関係は、供試体強度が低いものほど Ω_t は大きく、 γ は小さくなる特性を持つ。 Ω_t はモルタルクラックが卓越し始める遷移点を表し、 γ は力学的にはマクロなクラック進展・連結に対する抵抗力に関係していると考えられる。その結果、内部構造の強度特性が劣ったコンクリートでは γ が著しく小さな値になる。
- (3) 提案モデルに基づいて計算した履歴荷重を受けるコンクリートのAE発生は実験結果にほぼ一致することが確認された。また、過去の応力履歴によって初期損傷が存在するコンクリートでは、同程度の強度を有する正常なコンクリートに比べて、 γ が小さくなる。

以上のように、AE手法によるコンクリートの損傷度評価の可能性を示唆するAEパラメータについて、いくつか有用な知見を得ることができた。今後、損傷テンソルを導入した損傷力学解析を行うと共に、AE発生関数

の理論的な構築を試み、さらに詳細な実験を通してモデルパラメータの物理的意味をより明確にし、AEを用いたコンクリートの損傷度評価手法を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会非破壊評価小委員会：土木構造・材料の定量的非破壊評価へのアプローチ, 土木学会論文集, No.428/I-5, pp.1-18, 1991.
- 2) 魚本健人、加藤潔、広野進：コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.
- 3) 新関茂、三橋博三、野村希晶：改良された3次元AE位置標定法によるモルタルとコンクリートの破壊進行領域内の微視的クラックの解析, 構造工学論文集, 38A, pp.383-390, 1992.
- 4) K.Yamaguchi, I.Kimpara and Y.Higo (editors) : Proceedings of The 9th International Acoustic Emission Symposium, 1988.
- 5) M.Ohtsu, T.Sakimoto, Y.Kawai and S.Yuji : Evaluation of concrete structure deterioration via AE observation of core tests, *J. Acoust. Emis.*, 7, 4, pp.167-172, 1988.
- 6) 油野邦弘、井上芳樹、大津政康：AE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, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.13-23, 1995.
- 7) 山ノ内正司、佐武正雄：AE法によるコンクリートの損傷度評価, 第6回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集, pp.43-47, 1987.
- 8) 佐武正雄：AEによるコンクリート構造物の破壊箇所の識別と破壊レベルの予測法の開発, 文部省科学研究費試験研究(1)研究成果, pp.8-14, 1988, 3
- 9) 山ノ内正司、佐武正雄：損傷を受けたコンクリートのAE特性, 土木工学におけるAE研究発表会, 日本非破壊検査協会006特別研究委員会資料, 87, pp.7-12, 1988.
- 10) 山ノ内正司、佐武正雄：損傷力学理論に基づいたコンクリートのAE特性, 日本機械学会第68期全国大会講演会講演論文集, Vol.A, pp.13-15, 1990.
- 11) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊, 学献社, pp.23-47, 1990.
- 12) 京谷孝史、市川康明、川本眺万：岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, 土木学会論文集, No.358/III-3, pp.27-35, 1985.
- 13) L.M.Kachanov : Introduction to continuum damage mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
- 14) J.Mazars : A description of micro- and macroscale damage of concrete structures, *Eng. Fract. Mech.*, 25, 5/6, pp.729-737, 1986.

(1996年9月6日受付)