

論文 圧縮卓越型クリープに対する微視的破壊の影響

本田 翔平*1・奥西 淳一*2・渡辺 健*3・谷村 幸裕*4

要旨: 本研究では、圧縮力作用下におけるクリープひずみと微視的破壊の関連評価を目的に、コンクリートのクリープ試験をアコースティック・エミッション (AE) 測定と併せて実施した。その結果、微視的破壊がクリープひずみの進行に影響を及ぼしていることを確認した。さらに、クリープひずみが約 30×10^{-6} までは、養生期間が同様であると、応力強度比、体積・表面積比に関わらず、あるクリープひずみに対する AE ヒット数の累積値はほぼ等しいことがわかった。AE 振幅分布から求められる傾きを示す b 値の経時変化から、クリープの進行とともにコンクリート内部で生じている微視的破壊の規模が変化していることを確認した。

キーワード: クリープ, 微視的破壊, アコースティック・エミッション (AE)

1. はじめに

コンクリートのクリープ現象は、プレストレスの減少、常時荷重作用下における構造物のたわみの経時変化や応力の再分配など、コンクリート構造物の各種性能に大きな影響を与える。そのため、構造物の設計では、その現象を予測することが重要である。

コンクリートのクリープ現象に影響する要因として、使用材料、配合、荷重開始時の応力や材齢、部材寸法、温度や湿度といった環境条件などが挙げられ、これらの指標を反映した数多くの予測式が提案されている。それぞれの予測式が想定しているメカニズムとして、水分の移動¹⁾や遅れ弾性変形²⁾などが報告されているが、クリープに対する統一した見解が得られていないのが現状である。

はりなどの部材スケールや、円柱圧縮試験体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) などの試験体スケールで観測される物理現象に対する見解を示すためには、コンクリートを骨材、ペーストおよび骨材周辺の遷移帯で構成される複合体として捉えることが有効である。その中で、骨材周辺の遷移帯は、骨材およびペーストよりも剛性および強度の点で劣るため、遷移帯で生じる微視的破壊が、コンクリートのクリープひずみに大きく影響している可能性がある³⁾。

一方、コンクリート中に生じる微視的破壊を適切に把握する手法として、アコースティック・エミッション法 (以下、AE 法と称す) が挙げられる。AE は、コンクリートの微視的破壊に伴い生じる弾性波であり、その発生頻度や振幅などの特徴を示す AE 波形パラメータは、コンクリートの破壊現象と密接な関係がある⁴⁾。このことから、圧縮力が持続的に作用するコンクリートに対して、AE 測定を行うことで、クリープに関係する微視的破壊

を捉え、クリープの駆動力の要因解明に有益な情報を与えることが期待される。

以上より、本研究では、圧縮力が持続的に作用するコンクリートのクリープと微視的破壊の関連評価を目的に、荷重実験を行い、クリープひずみおよび AE の測定を併用して行った。試験体は、寸法が $\phi 100 \times 200$ (mm) を 9 体、 $\phi 300 \times 600$ (mm) を 2 体の計 11 体の円柱試験体を用意した。試験体のパラメータは、圧縮荷重を持続的に作用したコンクリートの微視的破壊に影響を及ぼす荷重材齢、応力強度比および体積・表面積比とした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究で用いる試験体は、寸法が $\phi 100 \times 200$ (mm) および $\phi 300 \times 600$ (mm) の円柱試験体である。

表-1 に本研究で用いたコンクリートの使用材料の物性値、表-2 にコンクリートの配合、表-3 に荷重条件を示す。試験体名は、体積・表面積比 (25, 75mm)、養生期間 (14, 28 日)、応力強度比 (20, 40%) を反映させた

表-1 コンクリートの使用材料

材料	種類
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3 , 比表面積 $3300\text{cm}^2/\text{g}$)
混和材 (BS)	高炉スラグ微粉末 (密度 2.89g/cm^3 , 比表面積 $4120\text{cm}^2/\text{g}$)
細骨材 (S)	旧大井川産川砂 (密度 2.62g/cm^3 , 吸水率 1.80%)
粗骨材 (G)	1505 (密度 2.71g/cm^3 , 吸水率 0.73%)
	2010 (密度 2.71g/cm^3 , 吸水率 0.63%)

- *1 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 研究員 修士 (工学) (正会員)
- *2 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 研究員 学士 (工学) (正会員)
- *3 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 副主任研究員 博士 (学術) (正会員)
- *4 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 室長 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合条件

水粉体比 W/B (%)	高炉スラグ 置換率 BS (%)	細骨材率 s/a (%)	混和剤		単位量 (kg/m ³)					
			減水剤	AE剤	水	結合材		細骨材	粗骨材	
			SP8SV (%)	ma101 (%)	W	セメント C	高炉スラグ BS	川砂	1505	2010
52	60	48.4	0.8	0.0020	161	124	186	875	484	484

表-3 荷荷条件

試験体名称	寸法 (mm)	試験体数 (体)	高炉スラグ 置換率 (%)	荷荷材齢 (日)	荷荷強度 (N/mm ²)	28日強度 (N/mm ²)
V/S25-14-40	φ100×200	3	60	14	40% × 40N/mm ²	36.5
V/S25-28-40	φ100×200	3		28	40% × 28日強度	36.6
V/S25-28-20	φ100×200	3		28	20% × 28日強度	39.9
V/S75-28-20	φ300×600	2		28	20% × 28日強度	39.9

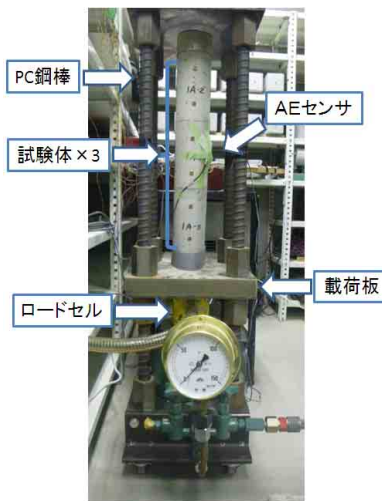


図-1 本研究で使用した試験機
および荷荷試験状況

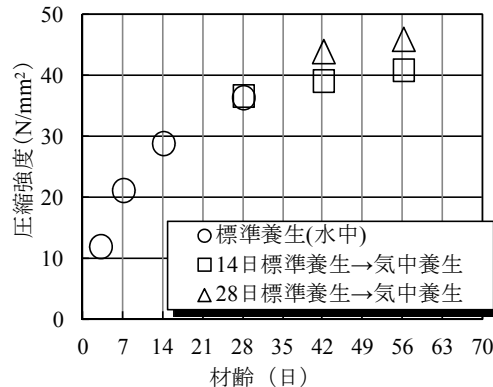


図-2 コンクリートの圧縮強度と材齢の関係

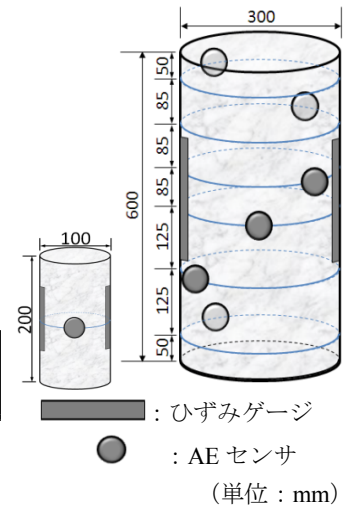


図-3 ひずみゲージと
AE センサの設置位置

名称を用いている。なお、体積・表面積比の算出において、表面積は露出した試験体表面積とし、上下端面の表面は試験体もしくは荷荷板に接着していたことから封緘状態であるとしたため考慮には入れておらず、円柱試験体の側面積のみ考慮に入れて算出している。また、応力強度比とは、コンクリートの指定した圧縮強度に対して、作用させる応力の比を示す。V/S25-14-40 については、40N/mm² の40%の応力を作用させ、その他試験体については、28日強度に対して40%もしくは20%の応力を作用させた。

また、いずれの試験体も、打設後24時間の湿布養生後、脱型した後、荷荷直前まで水中で養生した。水中養生後、上下端面を研磨することで平滑面を確保して、荷荷を開始した。

2.2 荷荷方法

図-1に、本研究で使用した試験機および荷荷試験状況を示す。試験機は、油圧ジャッキにより圧縮力を導入し、荷重導入後、周囲の4本のPC鋼棒のナットで荷荷板を固定することで、荷重を保持する仕組みとなっている。荷

荷試験で用いる試験体（以下、荷荷試験体と称す）は、V/S25シリーズではそれぞれのケースで3体の試験体を作製し、これらを直列に配置した。一方、V/S75-28-20は2体の試験体を、直列に配置して行った。試験は、温度20℃、湿度60%に設定した恒温恒湿室内にて行った。

荷荷は、JIS A 1157を参考に、荷重が試験体に鉛直に作用することを確認するために、事前に、目標応力度の1/2の荷重を荷荷し、各試験体に取り付けたひずみゲージで計測したひずみ差（最大値-最小値）が10%未満になるよう、調整を行い除荷した。

本荷荷では、荷荷開始時の応力強度比の目標値を設定した。この強度とは、クリープを計測する試験体と同一配合・養生したφ100×200mmの圧縮試験より得られたコンクリートの圧縮強度である。図-2に、コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示す。荷荷開始後、一定の応力強度比を得るために、随時、ロードセルおよびジャッキにより荷重を管理した。

また、試験中に生じるコンクリートの収縮などのひずみを計測するために、荷荷試験体と同一の配合、寸法、

および養生条件である試験体（以下、無荷試験体と称す）を用意し、荷試験体と同様に恒温恒湿室内に設置し、荷期間中、測定を継続した。なお、荷試験体の乾燥条件を同一とするために、荷試験体の荷開始以降、無荷試験体の上下端面をアルミテープで封緘し、水分の逸脱を防止した。荷および測定は、約2ヶ月間実施した。

2.3 測定項目

測定項目は、持続荷重作用下における、荷試験体の荷重、荷軸方向のひずみ、およびAEである。図-3にひずみゲージとAEセンサの設置位置を示す。

ひずみゲージは各試験体に対し、試験体高さ中央に、圧縮荷軸方向に2枚貼付した。なお、3章以降の検討では、V/S25シリーズでは、それぞれのケースで用いた3体の試験体の平均値、V/S75-28-20では、2体の平均値を用いてデータの整理を行った。さらに、V/S25シリーズでは、直列に配置した3体の試験体のうち、中央の試験体のひずみゲージと同一高さにAEセンサを1個貼付した。

一方、V/S75-28-20では、直列に配置した2体のうち1体に、螺旋状に高さ方向に等間隔で6個のAEセンサを貼付し、AEを計測した。また、それぞれのケースにおいて、無荷試験体についても、荷試験体と同位置で、ひずみおよびAEの測定を行った。

なお、AEは、使用できるAEセンサが限られていたことから、本研究では、単一のセンサで評価できるAEヒット数を用いて検討を行った。

2.4 AE 測定概要

AE測定は、周波数帯域が1kHz~400kHz、プリアンプの増幅値を40dB、しきい値を40dBに設定した。150kHz共振型のAEセンサを使用して測定を実施した。図-4にAE波形の模式図を、波形の特徴を示すAEパラメータとともに示す。最大振幅値が、しきい値を超えたAE波の一群を1ヒットと捉えている。

なお、計測したAEデータから、カウント数が1以下、およびエネルギーが0であるAEは、検討から除去した。これは、荷中、1つのAE波形において、振幅がしきい値を越えた回数として定義されるカウント数が、1であるAEは、ノイズあるいは供試体中を伝播する間に減衰したAEであると考えられ、発生源における破壊特性に関する情報を測定した波形から判断できないため、削除したものである。AE波形の包絡線下の面積と一致するAEエネルギーが0である波形も、同様の理由により、削除した^{3), 5)}。

3. 実験結果

3.1 ひずみの経時変化

本節で用いる全ひずみは、V/S25シリーズでは3体、

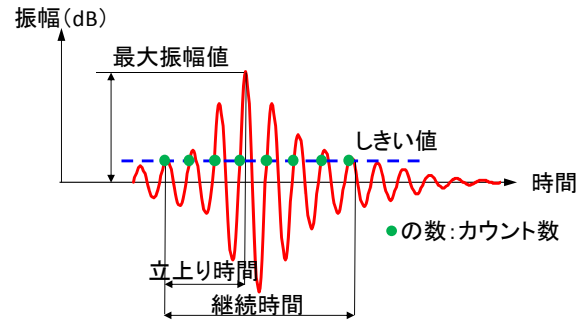


図-4 AE 波形パラメータ

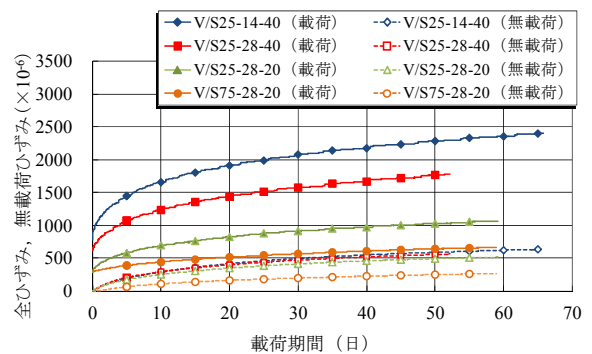


図-5 ひずみの経時変化

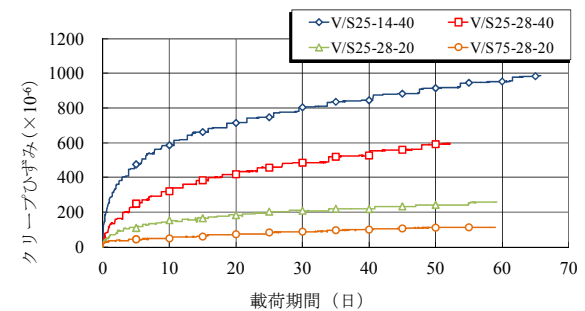


図-6 クリープひずみの経時変化

表-4 クリープひずみの比較

試験体名称	クリープひずみ (×10 ⁻⁶)		試験値/計算値
	試験値	計算値	
V/S25-14-40	915	963	0.95
V/S25-28-40	591	729	0.81
V/S25-28-20	242	398	0.61
V/S75-28-20	111	178	0.62

V/S75-28-40では2体の荷試験体で測定されたひずみを平均した値である。また、計測されたひずみから荷時に生じるひずみ（弾性ひずみと称す）と、無荷試験体で計測されたひずみ（無荷ひずみと称す）を差し引いた値を、以下の検討ではクリープひずみと称することとする。

図-5に各試験体の全ひずみー荷期間、および無荷ひずみー荷期間の関係を示す。図-5より、荷を行っ

た全試験体において、荷重と同時に弾性ひずみが生じ、その後、時間の経過とともに、ひずみが増加しているのがわかる。一方で、乾燥収縮によるひずみも時間の経過とともに増加した。本試験において V/S25 シリーズの乾燥収縮は、養生期間が異なるものの、いずれの試験体も概ね同程度の値を示していた。

図-6に、各試験体のクリープひずみ-荷重期間の関係を示す。クリープひずみは、荷重直後に大きく増加し、その後、時間の経過とともに単位時間当たりの増加率は低下している。つまり、クリープが遷移域から定常域⁶⁾へと移行していく様子が確認できる。

表-4に荷重から50日目のクリープひずみの試験値と JSCE の予測式⁷⁾による計算値を示す。なお、JSCE の予測式は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象としたものであり、本研究で用いた高炉スラグを混入した供試体には適合していない。しかしながら、荷重期間が2カ月と短い範囲ではあるが、いずれの実験値も計算値より小さく、計算値に対し実験値は60~95%の値を示しており、高炉スラグ混入コンクリートのクリープは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートのクリープと比較して、同等もしくはそれ以下となるという既往の研究⁸⁾の傾向と合致する。

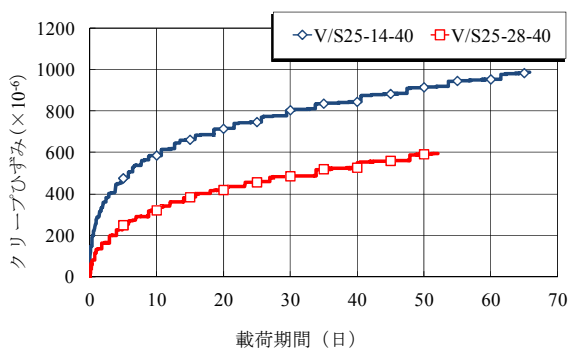
3.2 養生期間の影響

図-7に、V/S25-14-40 および V/S25-28-40 のクリープひずみ-荷重期間の関係、AE ヒット数の累積値-荷重期間の関係を示す。図-7(a)より、同一の荷重期間において、荷重開始時の養生期間が短い V/S25-14-40 のクリープひずみが、V/S25-28-40 のクリープひずみより大きいことが確認できる。水和反応が十分に進行していないこと、荷重開始時の応力強度比が他の試験体と比較して高いことなどが要因である。なお、荷重開始後10日以降における単位時間当たりの増加率はほぼ一致した。一方、図-7(b)に示す AE ヒット数の累積値の経時変化も同様に、若材齢時に荷重を開始した試験体で計測した AE のヒット数が、同一の荷重期間において大幅に増加している。

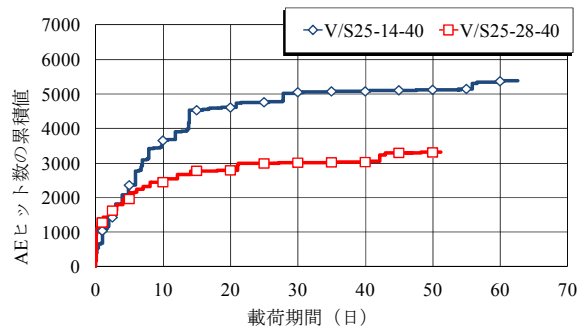
3.3 応力度比の影響

図-8に、V/S25-28-40 および V/S25-28-20 のクリープひずみ-荷重期間の関係、AE ヒット数の累積値-荷重期間の関係を示す。荷重期間が同一の場合、試験体を比較すると、クリープひずみ、および AE ヒット数の累積値ともに応力強度比の増加に伴い増加した。

また、図-8(a)より、荷重期間の増加に伴いクリープひずみの単位時間当たりの増加率が減少していること

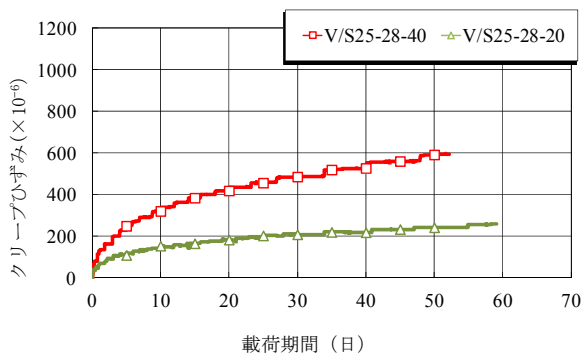


(a) クリープひずみ-荷重期間

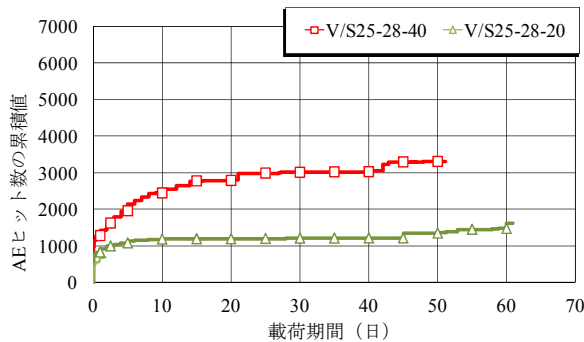


(b) AE ヒット数の累積値-荷重期間

図-7 養生期間の影響



(a) クリープひずみ-荷重期間



(b) AE ヒット数の累積値-荷重期間

図-8 応力強度比の影響

から、遷移域から定常域へと移行していることが確認できる。同様の現象が、図-8 (b) に示す AE ヒット数の累積値からも確認された。つまり、クリープひずみと AE ヒット数の累積値の経時変化が類似していることから、クリープひずみと AE ヒット数の累積値、すなわちクリープひずみと微視的破壊には相関関係があると考えられる。

3.4 クリープひずみと AE 測定値の関連評価

図-9 に、得られたクリープひずみ-AE ヒット数の累積値の関係を示す。全試験体において、クリープひずみと AE ヒット数の累積値との間に、概ね比例関係があることがわかる。つまり、これはクリープひずみと微視的破壊に正の相関関係があることを示しており、試験体内部で生じている微視的破壊が、クリープひずみに大きく影響を与えていることを示唆しているものと考えられる。

一方、各試験体データを詳細にみると傾きが異なることが分かる。V/S25-14-40 では、クリープひずみが約 400×10^{-6} までは傾きが小さく、その後の二段階では、 750×10^{-6} 程度まで傾きは大きくなっている。また、 750×10^{-6} 以降の三段階では、初期段階より小さな傾きで推移していることが確認できる。また、V/S25-14-40 の傾きは全体的に他の試験体に比べて緩やかであり、単位クリープひずみに対する AE ヒット数の累積値は少ない。他の試験体に比べ養生期間が短く、水和反応が十分に進行していなかったため、クリープひずみを引き起こす支配的な要因が、AE では計測できないと思われる塑性流動（水分の移動）に起因する現象に変化したのではないかと推測される。

V/S25-28-40 では、一段階としてクリープひずみが 20×10^{-6} 程度に達するまでに AE ヒット数の累積値は急激に増加し、その後、二段階として 30×10^{-6} 以降、クリープひずみの増加に対する AE ヒット数の累積値の増加率は低下した。また、三段階では 400×10^{-6} 以降になると、さらに AE ヒット数の累積値の増加率は低下する傾向が

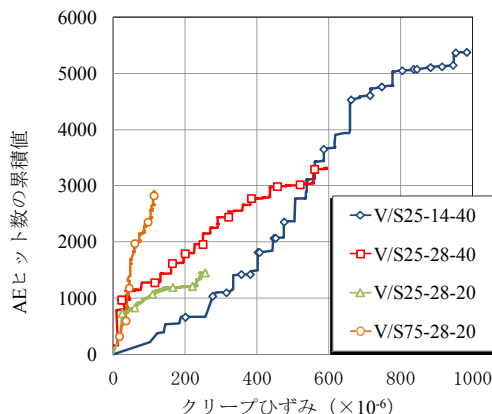


図-9 AE ヒット数の累積値とクリープひずみの関係

みられた。

V/25-28-20 では、一段階として、クリープひずみが 30×10^{-6} に達するまで V/S25-28-40 と同様の傾向を示したが、二段階の 30×10^{-6} 以降は、AE ヒット数の累積値の増加率は低下した。さらに、最終段階である 220×10^{-6} 以降では、AE ヒット数の累積値の増加率は増加傾向にあった。

V/S75-28-40 では、一段階として、クリープひずみが 40×10^{-6} に達するまで V/S25-28-40 の一段階の傾きと概ね同等の傾きで推移した。その後、僅かであるが傾きは緩やかとなる傾向が見られた。

3.5 AE の特徴

地震の分野では、Gutenberg-Richter が、地震の発生数 N と最大振幅値 A を両対数でプロットすれば、一直線でプロットされるとして、地震発生数 N と最大振幅値 A の関係として、式 (1) を提唱している。

$$\log N = a - b \log A \quad (1)$$

ここに、 N : 地震発生数、 A : 一現象の最大振幅値、である。式 (1) の傾きは $-b$ と、負であることより、大きな振幅の現象の発生数は少なく、小さな振幅の現象の発生数が多いことを示している⁴⁾。

AE 計測結果の分析においても、 N : AE 発生数とすると、式 (1) を用いて破壊現象の推定に有用な情報を得ることができる。図-10 に、AE の振幅分布の例を示す。振幅分布から得られる情報は、材料の変質や劣化を対象としている。例えば、塑性変形を含めた微小ひび割れに伴う AE では一般に小さい振幅値の分布が多く、傾き b 値は大きくなる。一方、巨視的なひび割れ発生に対する傾き b は小さな値を示す⁸⁾。

図-11 に、前節で分類したクリープひずみ-AE ヒット数の累積値の関係の各段階における傾き b を示す。

V/S25-14-40 では、段階が進むに従って、AE ヒット数の累積値の増加率が低下する一方で、傾き b は増大した。これより、ミクロな破壊の発生数の低下率に比べ、マク

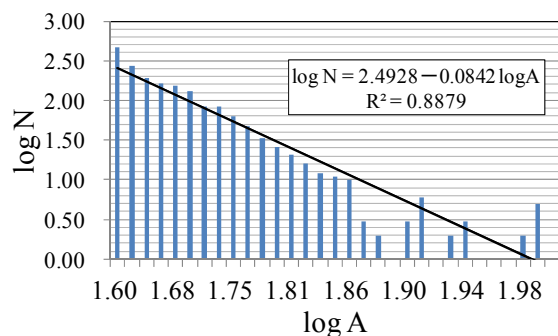


図-10 V/S25-14-40 の一段階目の AE 振幅分布

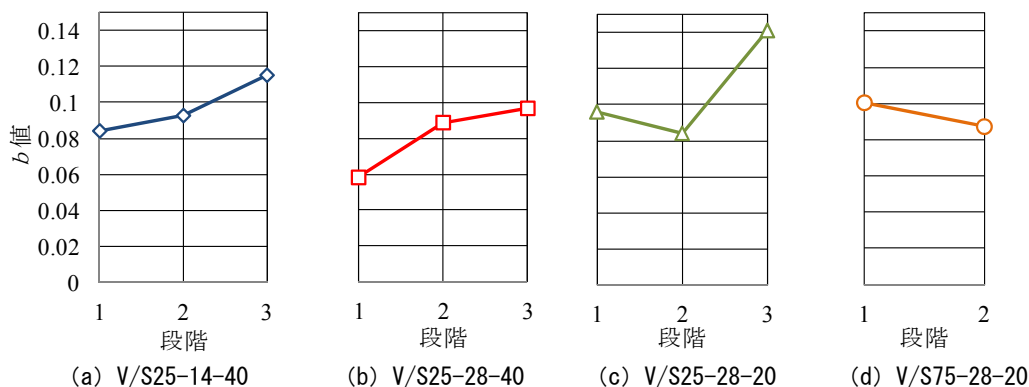


図-11 各段階における b 値

ロな破壊の発生数の低下率が大きく、最終的には、マイクロな規模の破壊現象が卓越した状態から、クリープひずみが収束すると考えられる。

V/S25-28-40 では、V/S-14-40 と同様に、段階が進むに従って、傾き b が増大する傾向がみられた。

V/S25-28-20 では、一段階の傾き b は大きく、マイクロな破壊が生じていたと考えられる。その後、二段回では傾き b は小さくなり、マクロな破壊が卓越し、三段回では再度、傾き b が大きくなっていることから、マイクロな破壊が卓越していたと推測される。

V/S75-28-20 では、V/S25-28-20 と同様に、一段階の傾き b は大きく、マイクロな破壊が卓越していたと考えられる。また、その後の二段階も V/S25-28-20 と同様の傾向が見られた。

試験体および測定段階に依存して、AE パラメータが示す値に違いがみられた。これらの値が示唆する現象についてはさらに検討を行う必要があるが、試験体の諸元、载荷条件、载荷期間および段階に応じて異なる特徴を示す、AE パラメータを用いた検討は、従来、クリープ現象を説明することに用いられてきたクリープひずみに対して、さらに多くの現象を解明できる可能性を示唆するものであると考えられる。

4. まとめ

- (1) クリープひずみと AE ヒット数の累積値との間に、概ね比例関係があることを確認した。これよりクリープひずみと微視的破壊に正の相関関係があり、試験体内部で生じている微視的破壊が、クリープひずみに大きく影響を与えていることが推測された。
- (2) クリープひずみと AE ヒット数の累積値の関係から、クリープひずみが 30×10^{-6} 程度までは、養生期間が等しい試験体においては、応力強度比、体積・表面積比に関わらず、クリープひずみの増加に対する AE ヒット数の累積値の増加量が概ね一致することが確認された。

- (3) 振幅分布から求められる傾き b の経時変化から、クリープの進行とともにコンクリートで生じている微視的破壊の規模が、载荷期間とともに変化していることを確認した。

参考文献

- 1) 浅本晋吾, 石田哲也: コンクリートのクリープ・収縮に与える微細空隙中の液体特性および分布の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp509-514, 2003.
- 2) H.Rusch, D.Jungwirth: コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976.
- 3) 渡辺健, 榎原直輝, W.Jason WeISS, 二羽淳一郎: 若材齢モルタルの引張基本型クリープと微視的破壊に対する AE 法による関連評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.455-460, 2011.
- 4) 大津政康: 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) 藤枝智子, 松本浩嗣, 渡辺健, 二羽淳一郎: AE法による圧縮クリープ荷重を受けるコンクリートの損傷評価と破壊の局所化領域の検討, Vol.33, No.1, pp.461-466, 2011.
- 6) 西林新蔵, 阪田憲次: コンクリートの破壊に関する研究, 会誌「材料」, Vol.26, No.290, pp.1091-1096, 日本材料学会, 1977.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, 2007.
- 8) 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針 (案), コンクリート・ライブラリー, 第 63 号, 土木学会, 1988.
- 9) 古川智洋, 友田祐一, 大津政康, 木嶋政智: コンクリート中の鉄筋腐食仮定の AE 法による説明, コンクリート年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1805-1810, 2006.