

論文 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

藤枝 智子*1・松本 浩嗣*2・渡辺 健*3・二羽 淳一郎*4

要旨: コンクリートのクリープ現象のメカニズムとして、水分移動や微視的破壊などが提唱されているが、統一した見解が得られていない。本研究では、コンクリートのクリープひずみを水分移動と微視的破壊に起因するひずみの重ね合わせであると仮定し、コンクリート内部の微視的破壊を捉えることができるアコースティック・エミッション (AE) 法を用いて、クリープひずみを分離した。その結果、作用応力比の増加に伴って、微視的破壊に起因するひずみの割合が増加することがわかった。さらに、ひずみエネルギー吸収率に着目することで、静的圧縮破壊と同様、クリープ破壊においても破壊の局所化を確認することができた。

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

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、有害なひび割れの発生、常時荷重下における構造物のたわみの経時変化および応力の再分配など、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、設計においてその現象を予測することが求められている。コンクリートのクリープに関する研究は国内外の研究者により長期にわたり行われており、水の移動¹⁾ や遅れ弾性²⁾ など、様々なメカニズムが報告されている。このように、現在においても圧縮強度に対する作用応力の比率により、その機構は異なると考えられている。すなわち、クリープによるひずみは、それぞれのメカニズムの重ね合わせにより、概ね評価できるとも考えられているが、作用応力比に依存して、重ね合わせの割合が変化することが考えられる。さらに、クリープに対する統一した見解は得られていないのが現状である。

コンクリートの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(以下、AEと称す)が挙げられる。AEは、コンクリート中に発生した微視的破壊に伴って発生する弾性波であり、その発生頻度あるいは振幅、周波数などの特徴を示すAEパラメータは、コンクリートの破壊挙動と密接な関係があると考えられている。

ところで、静的な一軸圧縮力が作用するコンクリートでは、破壊が局所的に発生することが指摘されている³⁾。このことを踏まえると、一定荷重作用下においても、ひずみが局所部に集中して発生する可能性がある。

そこで、本研究では、コンクリートのクリープ現象における微視的破壊の影響を確認するため、AE法を用いて、全クリープひずみから微視的破壊の貢献分の分離を試みた。ひずみ漸増荷重と除荷・再載荷を伴う圧縮持続荷重試験を、AE計測とともに実施した。AEデータを介して、ひずみ漸増荷重試験と持続荷重試験における非回復性ひずみを比較することで、圧縮クリープひずみ中の微視的破壊の貢献分を定量的に評価した。また、ひずみの試験体高さ方向の分布を調べ、破壊領域の大きさについても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究の試験体は、寸法 100×100×400(mm)の角柱試験体である。表-1 に、本研究で用いたコンクリートの材料の物性、表-2 に、コンクリートの配合、表-3 に試験体詳細と載荷方法を示す。試験体名には、前半部に載荷種類(S: ひずみ漸増荷重, R: 除荷・再載荷を伴う持続荷重試験, CF: 持続荷重試験)に基づき S, R, CF と表記し、

表-1 コンクリートに使用した材料の物性

種類	名称	物性
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4490cm ² /g
細骨材	小櫃産陸砂	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.56%, 粗粒率 2.63
粗骨材	青梅産碎石	表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 2.64%, 最大寸法 13mm, 粗粒率 6.66

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*3 財団法人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 Ph.D (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
13	60	47	180	300	892	1013

表-3 試験体詳細と載荷方法

試験体名	平均圧縮強度 (N/mm ²)	載荷種類	応力比 (%)	載荷時間 (時間)	水中養生期間 (日)	気中養生期間 (日)
S1	31.2	ひずみ漸増載荷(S)	—	—	28	3
R80	31.5	除荷・再載荷を伴う	80	121		
R60		持続載荷試験(R)	60	165		
R40		40	139			
CF90	31.5	持続載荷試験(CF)	90	2.6		
S2	33.0	ひずみ漸増載荷(S)	—	—		
R70	33.5	除荷・再載荷を伴う	70	76		
R50		持続載荷試験(R)	50	109		
CF95		持続載荷試験(CF)	95	1.8		

重量 (kg)

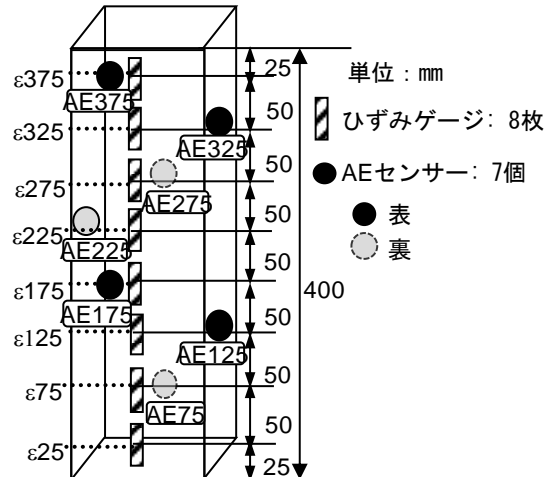
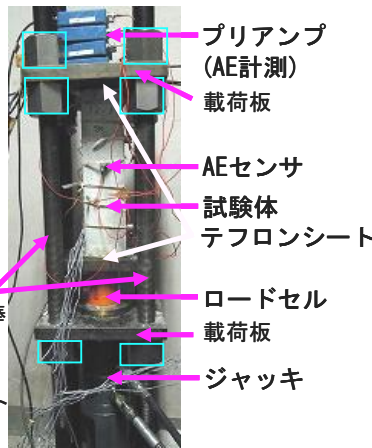
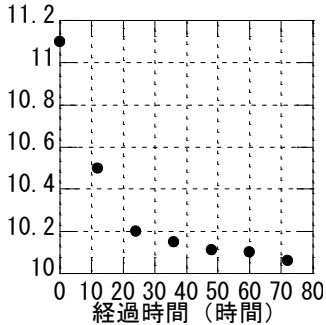


図-1 試験体重量の時間変化 図-2 載荷試験機および計測器具設置位置 図-3 ひずみゲージと AE センサの設置位置

後半部に作用応力比を百分率で表記した。ここで、応力比とは、試験体の圧縮強度に対する、作用させる応力の比率である。

なお、養生は 28 日間の水中養生を行い、3, 4 日の気中養生後に試験体の重量変化がほぼ収束したことを確認している。図-1 に試験体重量の時間変化を示す。そして、載荷試験中の乾燥収縮と自己収縮による収縮ひずみを低減させた。表-2 に、各試験体の水中養生期間と気中養生期間を示す。

2.2 計測項目

載荷中に荷重、ひずみ、AE を計測した。図-2 および図-3 に各計測機器の設置位置を示す。荷重計測のためのロードセルは、試験体の下側の載荷板と試験体の間に設置した。また、図-3 に示すように、ゲージを圧縮載荷軸方向に 8 枚貼付した。ここで、各ひずみを試験体底

面からの高さ(mm)に準じて、ε375, ε325, ε275, ε225, ε175, ε175, ε125, ε75, ε25 と表記する。さらに、7 個の AE センサを試験体表面にらせん状の位置に貼付し、プリアンプを通してコンピュータに AE を記録した。ここで、AE 計測位置を、試験体底面からの高さ(mm)に準じて、AE375, AE 325, AE275, AE225, AE175, AE125, AE75 と表記する。なお、ひずみと AE の測定結果を比較するために、AE センサの貼付高さは、ひずみゲージの貼付高さに合わせて決定した。AE センサの測定結果と同じ高さに貼付したひずみゲージの計測値を比較することで、試験体中の各部位のクリープ挙動を検討した。

なお、8 枚のひずみゲージを貼付した面と反対側の面にも ε225 と同じ高さにひずみゲージを貼付し、載荷時に ε225 と合わせてモニタリングすることで、荷重の偏心が生じないよう配慮した。

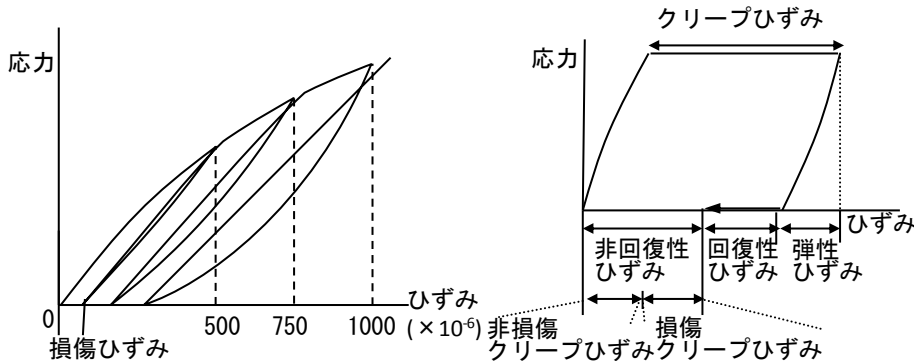


図-4 ひずみ漸増载荷の概念図

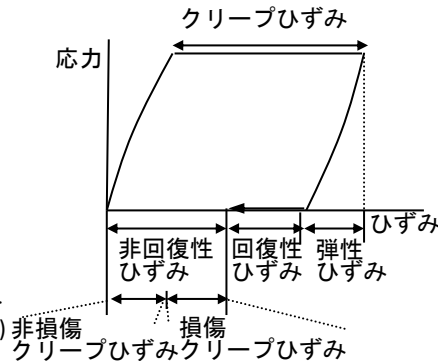


図-5 収縮ひずみの時間変化

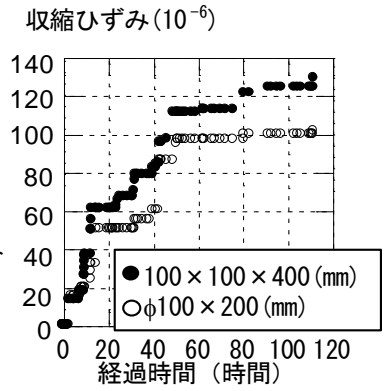


図-6 各種ひずみの定義

2.3 载荷方法

図-2 に、本研究で使用した圧縮持続载荷試験機と計測器具を示す。この試験機は、外付けの油圧ジャッキにより荷重を導入する。荷重導入後、PC 鋼棒のナットを締めて载荷板を固定することで、持続荷重が作用する仕組みになっている。

(1) ひずみ漸増载荷

図-4 に、ひずみ漸増载荷の概念図を示す。試験体の高さ方向の 8 ヶ所で計測しているひずみの平均値が、 500×10^{-6} に達した時点で除荷・再载荷を行った後、 250×10^{-6} 増加するごとに除荷・再载荷を行い、試験体が破壊するまでこれを繰り返した。

(2) 持続载荷試験

試験体を载荷板中央に設置し、持続载荷試験を行う試験体と同一の試験体で測定したコンクリートの圧縮強度に対し、それぞれの応力比に対応する荷重を持続的に作用させた。ただし、経時変化に伴う荷重の低下が予測される。そのため、ASTM C7512-02 を参考に、荷重の変動が 10% 以下になるように、载荷開始後に再度、強度を確認し载荷することで、荷重を管理した。試験体と载荷板の間にはテフロンシートを敷き、試験体上面と下面の摩擦による拘束を断ち切った。一方、試験体の経時変化を考える上で、乾燥収縮や自己収縮など、収縮によるひずみの発生を考慮するために、圧縮持続载荷試験と同時に、無载荷試験体のひずみを計測した。そして、圧縮持続载荷試験で計測したひずみから収縮ひずみを差し引くことで、圧縮クリープひずみを算出した。その収縮ひずみ計測用試験体は、寸法 $\phi 100 \times 200$ (mm) の円柱試験体とし、側面に 2 枚貼付したひずみゲージの平均値から収縮ひずみを算出した。なお、図-5 に収縮ひずみの時間変化を示す。図-5 より、持続载荷試験に用いた試験体と収縮ひずみを差し引く試験体とは試験体形状が異なるが、収縮ひずみの差が少ないことがわかる。

i) 除荷・再载荷を伴う持続载荷試験

図-6 に、各種ひずみの模式図を示す。全ひずみは弾

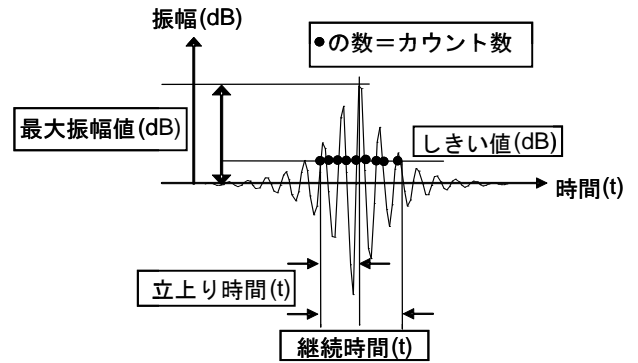


図-7 AE の波形パラメータ

性ひずみ、クリープ回復ひずみ、非回復ひずみで構成される。また、非回復性ひずみを、コンクリートの損傷に寄与する損傷クリープひずみと、損傷に寄与しない非損傷クリープひずみの和とした。試験体に配置したひずみゲージを用いて計測したひずみから、载荷時に計測した弾性ひずみを差し引くことでクリープひずみを算出する。クリープひずみが 500×10^{-6} 増加した時点で除荷を行う。除荷は、試験体を载荷板から離すと、再载荷時に試験体位置がずれてしまい、再载荷時に除荷前と同一条件で载荷できないことが予備実験により確認された。そのため、荷重を 0 まで下げずに、除荷期間は荷重を 1kN 载荷した状態を保持することとした。除荷から 3 日間経過後にクリープ回復が収束したことを確認後、除荷前の荷重まで再载荷する。なお、クリープ回復時に AE は計測されなかったため、計測を行っていない。R80, R60, R40, R70, R50 に関しては、以上の除荷・再载荷を 3 サイクル行った後、単調载荷により、試験体を破壊させた。

ii) 持続载荷試験

i) と同様の試験機、試験環境であるが、除荷・再载荷は行わない。作用応力比が圧縮強度の 90% 以上である高応力持続荷重を、クリープ破壊が生じるまで、作用させた。

2.4 AE 計測概要とデータの抽出法

AE の計測初期条件として、増幅率は 40(dB)、しきい値は試験環境を考慮して 45(dB)とした。AE には、図-6 に示すように、AE 波形の特徴を示す様々なパラメータが存在する。ここで、計測したデータから周囲のノイズを除去し、微視的破壊による AE のみに着目するため、次の3つの手順³⁾により検討に用いるデータを抽出した。はじめに、カウント数が 1 以下、およびエネルギー数が 0 である AE は削除した。これは、载荷中、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、ノイズあるいは試験体中を伝搬する間に振幅が減衰したものと考えられ、発生源における破壊特性に関する情報を、計測した波形から特定することが困難であると考えられたためである。また、波動のエネルギーは振幅の 2 乗に比例するので、振幅の減衰により AE エネルギーも時間と共に減衰するため、カウント数と同様の理由から、エネルギーが 0 である AE を削除した。

次に、イベント数を算出した。これは、1 つの AE が発生し、試験体全域に伝搬すると、試験体に設置した複数のセンサで検出される。すなわち、AE の発生数であるイベント数と、複数のセンサで検出した計測数は異なる。そこで、AE 波伝搬速度および AE センサ貼付位置を考慮して、AE 発生源に最も近い位置に貼付したセンサの検出結果をイベントとして用いた。その際、AE 波伝搬速度は 2000(m/s)とした。これは、AE 波が、振幅の小さい初期微動である縦波と、振幅の大きい主要動である横波に分類されるとすると、ある一定のしきい値を超え、計測される AE 波は横波である可能性が高いと考えられるので、AE 波伝搬速度は横波速度の一般的な値である 2000(m/s)を用いたものである。また、AE センサ貼付位置間を、AE375 から AE75 までの距離である 300(mm)として求めた。

Uchida ら⁴⁾は、AE パラメータのうち、平均周波数(=カウント数/継続時間)と RA 値(=立ち上り時間/最大振幅値)が、ひび割れ種類の識別に有効な指標であることを報告している。これは、ひび割れ面の摩擦により生じた AE 波をノイズとして排除することで、圧縮応力下でのコンクリートの破壊を適切に評価できることを確認しているからで

ある。図-7 に、Uchida らの手法により、イベント数をもつ AE を平均周波数と RA 値から、せん断型と引張型に識別した R60 の結果を、例として示す。この結果から、本研究では引張型 AE のみを検討に用いた。

3. 実験結果

3.1 クリープひずみと累積 AE イベント数の関係

図-8 に、R60 クリープひずみと累積 AE イベント数の経時変化を例として示す。また、図-9 に、R80 と R60 クリープひずみと累積 AE イベント数の関係を、例として示す。図-9 より、クリープひずみと累積 AE イベント数の関係は、正の相関があるものの、試験体ごとに傾向が異なる。これは、クリープひずみは、水分移動と微視的破壊に起因するひずみから構成されており、コンクリート内部の微視的破壊のみを計測する AE 法では、水分移動によるひずみを評価することができないためと考えられる。本研究では、持続荷重を受けるコンクリートの損傷を評価すべく、クリープひずみの分離を行った。

3.2 クリープひずみの分離

以下に、R60 を例にクリープひずみの分離手順を示す。

(1) 損傷ひずみと AE データ (ひずみ漸増载荷)

図-10 に、ひずみ漸増载荷試験における損傷ひずみ(ϵ_u)と累積 AE イベント数(AE)の関係を示す。損傷ひずみと累積 AE イベント数には正の相関があり、その関係は以下の式で近似できる。

$$\epsilon_u = 6.0 \times 10^{-4} \times \text{AE}^{1.4} \quad R^2 = 0.84 \quad (1)$$

なお、R80, R60, R40 は S1 の結果を用い、R70, R50 は S2 の結果を用いることとする。

近似式として様々な関数が用いられる可能性があるが、相関係数(R^2 値)が 1 に最も近く、原点を通る累乗関数として式(1)を用いた。以下で行う近似には、全て累乗関数を使用した。

(2) 非回復性ひずみと AE データ (持続载荷試験)

また、図-10 に、クリープ载荷試験における非回復性ひずみと累積 AE イベント数の関係を示す。非回復性ひずみ(ϵ_c)と累積 AE イベント数(AE)にはひずみ漸増载荷試験における損傷ひずみと累積 AE イベント数の関係同様、

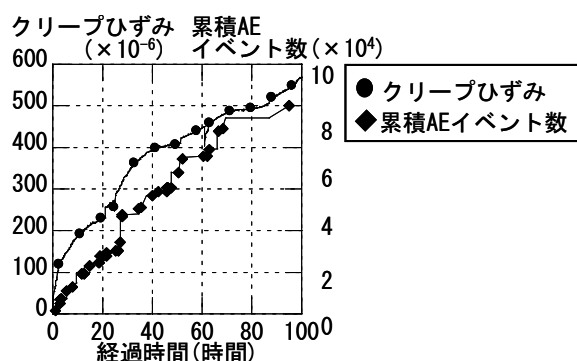


図-8 クリープひずみと累積 AE イベント数の経時変化 (R60)

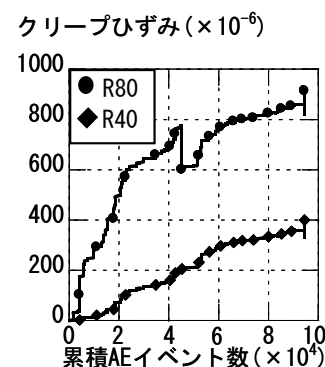


図-9 クリープひずみと累積 AE イベント数の関係

正の相関があり、その関係は以下の式で近似できる。

$$\epsilon_c = 3.4 \times 10^{-2} \times AE^{0.86} \quad R^2 = 0.81 \quad (2)$$

同じ累積 AE イベント数に対して、ひずみ漸増载荷における損傷ひずみは、クリープ荷重下での非回復性ひずみより大きい。累積 AE イベント数は材料の微視的破壊に起因するため、クリープ荷重下におけるこのひずみ増分は、水分移動等、破壊に寄与しない非損傷ひずみ成分であると考えられる。したがって本研究では、損傷クリープひずみ成分を、同じ累積 AE イベント数が生じている時点での、ひずみ漸増载荷における損傷ひずみとした。すなわち、式(1)および式(2)を連立させ、AE の項を消去することにより、非回復性ひずみ(ϵ_c)と損傷クリープひずみ(ϵ_u)との関係式は式(3)で与えられる。

$$\epsilon_c = 0.67 \times \epsilon_u^{0.58} \quad (3)$$

また、図-11 に、クリープ荷重下における全クリープひずみ(ϵ_{creep})と非回復性ひずみ(ϵ_c)との関係は、式(4)で近似できる。

$$\epsilon_c = 4.8 \times \epsilon_{creep}^{0.73} \quad R^2 = 0.75 \quad (4)$$

式(3) および式(4)より、全クリープひずみ(ϵ_{creep})と損傷クリープひずみ(ϵ_u)との関係は以下のようになる。

$$\epsilon_u = 5.8 \times 10^{-9} \times \epsilon_{creep}^{3.6} \quad (5)$$

式(5)の ϵ_{creep} に実験での全クリープひずみを代入することにより、対応する非損傷ひずみを算出することができる。

図-12 に、R60 における、全クリープひずみおよび損傷クリープひずみの経時変化を示す。なお、クリープひ

ずみの除荷時の挙動は示していない。図-12 において、全クリープひずみが不連続な曲線を描いているが、これは、クリープ回復が生じているため、再载荷時のひずみが除荷時のひずみより小さくなったためである。なお、各計測位置で全クリープひずみは同様に増加していたため、8ヶ所のひずみの平均値を用いている。

次に、損傷クリープひずみと累積 AE イベント数を比較する。図-13 に、R80 と R40 における損傷クリープひずみと、累積 AE イベント数の経時変化を示す。図-9 に示すように、累積 AE イベント数と全クリープひずみとの間には相関が見られなかったが、図-13 に示すように、累積 AE イベント数と損傷クリープひずみの間には相関が見られる。すなわち、AE 計測結果を用いて、全クリープひずみから損傷クリープひずみを分離することで、クリープ荷重下におけるコンクリートの損傷を評価することができる。

3.3 微視的破壊の貢献分の比率

3.1 節で示す手順により、各作用応力比におけるクリープひずみから、微視的破壊の貢献分を算出した。図-14 に、全クリープひずみに対する、微視的破壊の貢献分の比率を示す。図-14 より、作用応力比が大きいほど、同一クリープひずみにおける、微視的破壊の貢献分の比率が増加することがわかる。これは、コンクリートのクリープ現象のメカニズムが作用応力比に応じて変化しており、応力比が大きいほど、微視的破壊が支配的になることを意味している。

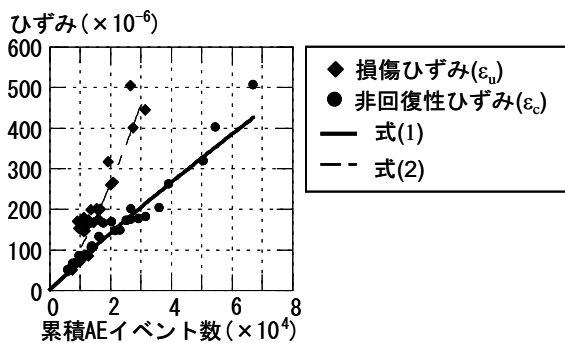


図-10 損傷ひずみならびに非回復性ひずみと累積 AE イベント数の関係 (R60)

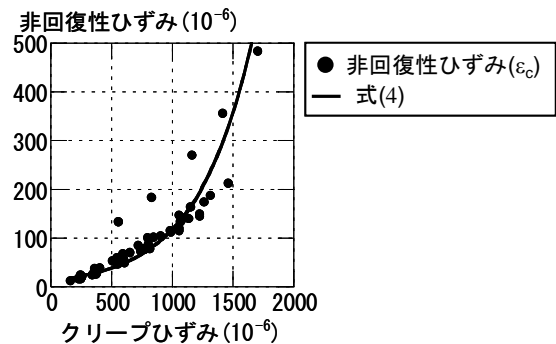


図-11 非回復性ひずみとクリープひずみの関係 (R60)

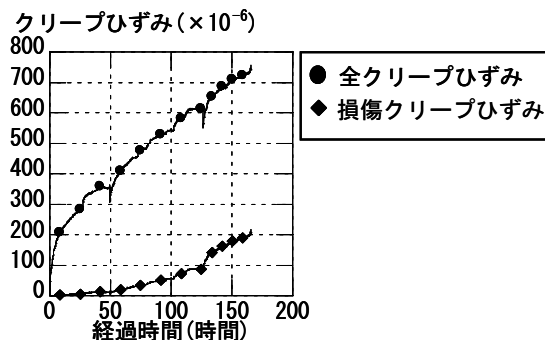


図-12 全クリープひずみと損傷クリープひずみ (R60)

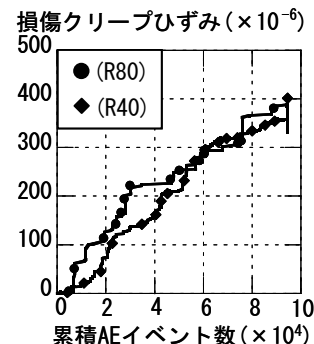


図-13 損傷クリープひずみと累積 AE イベント数の関係

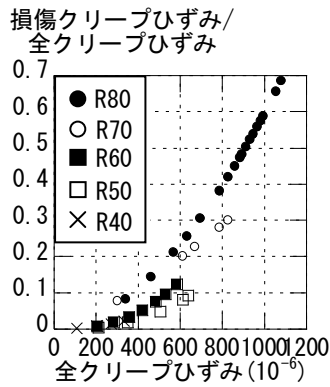


図-14 クリープひずみの貢献分の比率

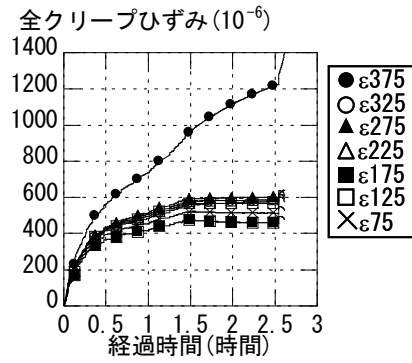


図-15 全クリープひずみの経時変化 (CF90)

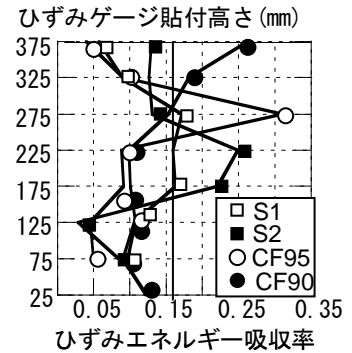


図-16 破壊領域

3.4 破壊領域の検討

図-15に、CF90のクリープひずみの経時変化を示す。時間の経過に伴い、試験体最上部で、局所的にクリープひずみが増大していることがわかる。西林ら⁵⁾は、破壊に至るまでのクリープひずみの変化は、変形速度が時間とともに減少する遷移域、変形速度が時間に無関係に一定な定常域、変形速度がしだいに増加して破壊にいたる加速域の3段階に分類することができると報告している。図-15より、クリープひずみの変化の3段階の挙動も確認できる。なお、CF90、CF95は、試験終了時まで必要とした時間が他のケースと比較し、2.6、1.8時間と短かったため、作用応力比が90%を超える高応力下においては、非損傷ひずみは生じないと考えた。したがって、以下に示す破壊領域の算定には、全ひずみを用いている。

次に、既往の研究³⁾では、得られた試験体の局所的なエネルギー吸収推定量から、試験体の全吸収ひずみエネルギー量を求め、その15%以上を吸収した領域を破壊領域と定義し、破壊領域長さを求めている。本研究でも同様の方法を用いて破壊領域長さを求めた。ここで、ひずみエネルギー量は、応力-全ひずみ曲線を積分して求めた。図-16に、算出した破壊領域を示す。図-16より、CF90およびCF95は、クリープ破壊時に局所的に破壊が生じており、クリープ破壊領域長さは、CF90が102mm、CF95が75mmである。このように、コンクリートは静的荷重下だけでなく、圧縮クリープ荷重下においても破壊領域が局所化することがわかる。

また、ひずみ漸増荷重を行った試験体を用いて、同様の方法で破壊領域を算定した。破壊領域長さは、S1が125mm、S2が110mmであった。すなわち、圧縮クリープ荷重下において破壊領域長さは、静的荷重下の破壊領域長さより減少した。

4. まとめ

本研究で、以下の結論を得た。

- (1) 同じ累積AEイベント数が生じている時点での、ひずみ漸増荷重の非回復性ひずみを損傷クリープひずみ

と仮定することにより、コンクリートのクリープひずみを微視的破壊の貢献分と破壊に寄与しない成分とに分離することができた。

- (2) 作用応力比の増加に伴い、全クリープひずみに対する損傷クリープひずみの比率は増加する。すなわち、コンクリートのクリープのメカニズムは応力比によって異なり、応力比が大きいくほど、微視的破壊が支配的になる。
- (3) 静的圧縮破壊と同様、クリープ荷重下においても破壊の局所化を確認することができた。
- (4) ひずみエネルギー吸収率を用い、破壊領域を算出した結果、静的荷重下よりも、クリープ荷重下において、破壊領域長さが減少することがわかった。

本研究の一部は、平成22年度科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号21760344)によって実施した。

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及び分布の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.509-514, 2003.
- 2) 渡辺誠一, 六車熙: コンクリートのクリープひずみに関する一考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第402号, pp.71-78, 1989.8.
- 3) 渡辺健, 岩波光保, 横田弘, 二羽淳一郎: AE法を用いた圧縮下コンクリートの破壊進展予測に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.163-168, 2003.
- 4) Uchida, M., Tsuji, N., and Ohtsu, M.: Identification of cracking in concrete structures by acoustic emission, Proceedings of the 16th International Acoustic Emission Symposium, pp.138-143, 2002.11.
- 5) 西林新蔵, 阪田憲次: コンクリートの破壊に関する研究, 材料, Vol.26, No.290, pp.1091-1096, 1977.