

論文 AE法を用いたコンクリートの圧縮クリープと微視的破壊の関連評価

藤枝 智子^{*1}・渡辺 健^{*2}・榎原 直輝^{*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、水分移動や遅れ弾性、微視的破壊などが報告されているが、統一した見解が得られていないのが現状である。そこで、本研究では、コンクリート内部の微視的破壊をより明確に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、荷重を一定に作用させたコンクリート試験体の、微視的破壊の経時変化を評価した。また、寸法 $\phi 100 \times 400$ (mm)である $h/d=4$ の円柱試験体を用いることで、同一試験体においても、計測位置によって異なるクリープ現象が生じることに着目し、これを評価した。

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。さらに、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。すなわち、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。

高応力が持続的に作用するコンクリートのクリープ現象の研究は、早野ら³⁾ により行われ、さらに、Rossiら⁴⁾ により、ひずみの増加に微視的破壊(ひび割れ)の貢献が予測されている。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い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されている。

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⁵⁾。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ことが予想

できるが、未だ明らかではない。

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計測を用い、一定の荷重を継続的に作用させる圧縮クリープ試験を実施した。特に、微視的破壊が、より支配することが予想される高応力作用下のコンクリート試験体に焦点を絞り、圧縮クリープ現象と微視的破壊の相関を明らかにした。また、本試験では、寸法 $\phi 100 \times 400$ (mm)である $h/d=4$ の円柱試験体を用いることで、ひずみおよびAEパラメータの、試験体高さ方向の分布を把握した。すなわち、これまでひずみが主に評価に用いられていたが、クリープに対して、AE法を評価方法の1つとして考えることで、コンクリート内部の微視的破壊現象の同定を通して、より詳細にメカニズムを評価できると考える。

2 実験概要

2.1 試験体概要

本試験の試験体は、寸法 $\phi 100 \times 400$ (mm)の円柱試験体を3体用意した。試験体は、4層詰めの縦打ちで型枠振動機を用いて十分に締固め、作製した。6日間の水中養生後、上端面を研磨することで平滑面を作製した。なお、研磨した面に粗骨材と繊維が存在していることから、材料分離は顕著には生じていなかったことを確認している。表-1に、本研究で用いたコンクリートの配合を示す。配合は、3体の試験体で統一したが、そのうち1体には、PVA 繊維(長さ: 30mm, アスペクト比: 45, 引張強度: 900 N/mm^2)をコンクリートの体積比に換算して対して1%混入した。そして、試験体名には、使用セメントの種類、試験体の載荷荷重の値、PVA 繊維混入の有無を

*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 Ph.D(正会員)

*3 東京工業大学 工学部土木・環境工学科

*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-1 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 | 51 | 180 | 300 | 892 | 1013 |

反映させた、N53N, H123N, H186Fと決定した。

また、養生は7日間の水中養生後に、数日気中養生を行い、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、各試験体の材齢を示す。

2.2 載荷方法

図-1に、本研究で使用した圧縮クリープ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し、試験機のネジで載荷板を固定することで持続荷重を載荷する仕組みになっている。試験体を載荷板中央に設置し、また、圧縮強度はJIS A 1108に従い3体計測した平均値とし、圧縮強度の65%の荷重を持続的に作用させた。この65%という値は、2.4節に示すAE計測環境を考慮して決定したものである。また、試験体の経時変化に伴う荷重の低下が予測されたため、ASTM C7512-02を参考に、荷重の変動が10%以下になるように、載荷開始後に再度載荷した。

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、圧縮クリープ試験と同一期間に、無載荷試験体のひずみを計測した。そして、圧縮クリープ試験により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ている。寸法φ100×200(mm)の円柱試験体を用意し、ひずみゲージを側面に2枚貼付し、その平均値を用い、温度、湿度など同一環境の基で、自己収縮と乾燥収縮による長さ変化を計測した。こうして計測した値は、載荷試験体の収縮ひずみと同等であると仮定した。最後に、持続荷重の除荷後4時間で、試験体の静的一軸圧縮試験を行い、強度、破壊位置および領域を確認した。

2.3 計測項目

載荷中に荷重、ひずみ、AEおよび変位を計測した。図-1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の上に設置した。次に、図-2に示すように、ゲージを圧縮載荷軸方向に縦に5枚貼付した。ここで、各ひずみの計測位置を試験体底面からの高さ(mm)を用い、ゲージをε335、ε277.5、ε200、ε122.5、ε45と表す。さらに、図-2(b)に示すように、4個のセンサを試験体の円周方向にらせん状に貼付し、プリアンプを通してコンピュータにAEを記録する。ここで、AE計測位置を、試験体底面からの高さ(mm)を

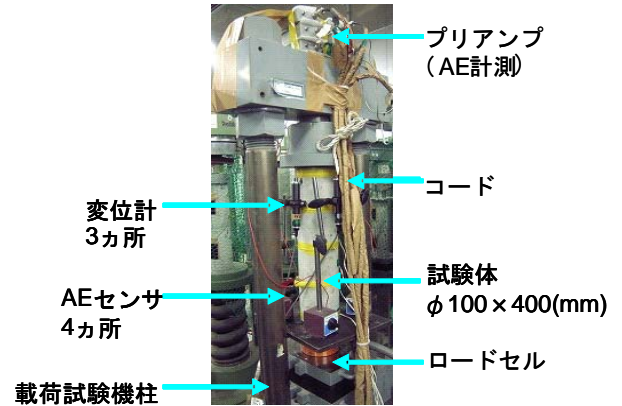


図-1 載荷試験機および計測器具設置位置

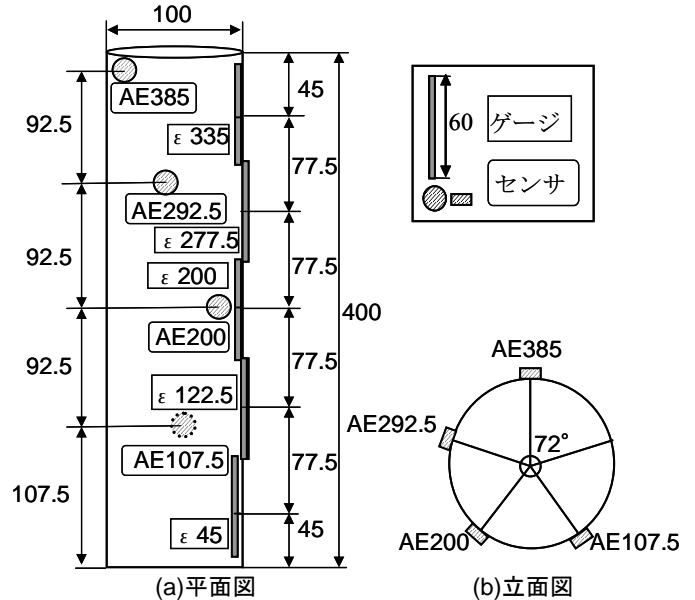


図-2 試験体のセンサとゲージ貼付位置(mm)

用いて、AE385、AE 292.5、AE200、AE107.5と表す。また、ひずみゲージが5枚に対して4個のセンサを貼付したが、このセンサ数はAE計測機器の制限によるものである。センサの貼付位置に対して、最も近くに貼付したゲージによる計測値を比較することで、試験体中の各部位のクリープ現象をAEとひずみの観点から、検討する。

また、変位計を試験体の周囲に3カ所設置し、載荷時に注視することで、偏心を減少させた。

2.4 AE計測概要

AEにより微視的破壊を計測するときには、載荷応力に注意する必要がある。これは、試験体の圧縮強度のばらつきにより高応力で載荷すると初期載荷時に破壊する可能性がある。一方で、低応力で載荷すると微視的破

表-2 試験体詳細と圧縮強度試験結果

| 試験体名 | 材齢(日) | 圧縮強度(N/mm ²) | 載荷荷重(kN) | セメント種類 | PVA繊維 | 載荷期間(時間) | 除荷期間(時間) | クリープ試験終了時の圧縮強度(N/mm ²) | |
|-------|-------|--------------------------|----------|--------|-------|----------|----------|------------------------------------|------|
| | | | | | | | | 無載荷 | 載荷 |
| N53N | 10 | 10.5 | 53.7 | 普通 | 無 | 164 | 4 | 19.6 | 18.2 |
| H123N | 6 | 23.3 | 123 | 早強 | 無 | 136 | 4 | 31.0 | 31.7 |
| H186F | 10 | 36.2 | 186 | 早強 | 有 | 22 | — | 39.4 | 26.2 |

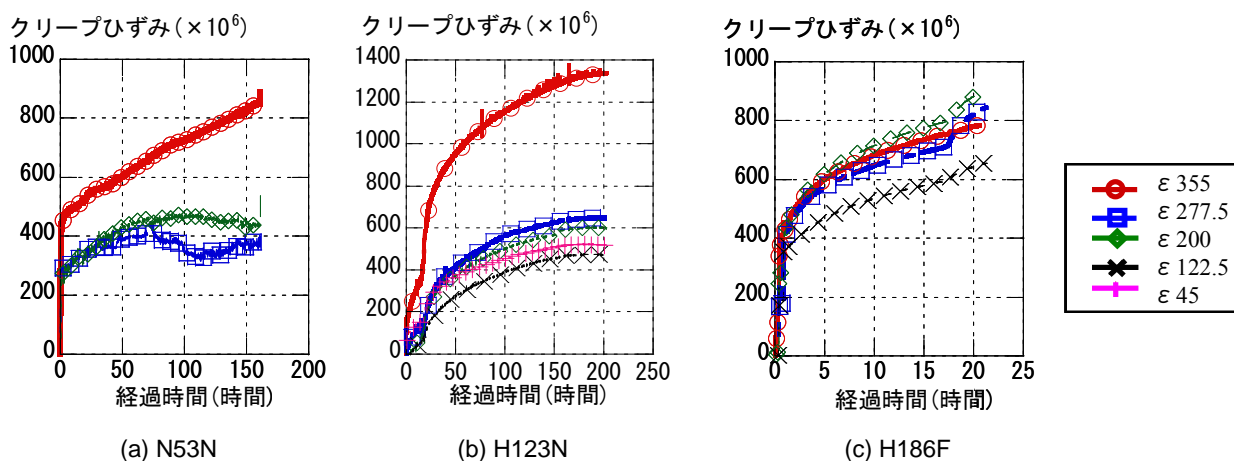


図-3 クリープひずみの経時変化

壊が発生せず、AE を計測することができない可能性がある。そこで、載荷応力を決定するために、予備試験を行い、初期載荷時に試験体が破壊せずに、かつ AE を計測することができるという、2 点を満足する載荷応力を検討した。また、試験機の載荷容量を考慮に入れて、作用応力の比率は圧縮強度の 65%に決定した。そして、AE の計測初期条件を、増幅率は 40(dB)、しきい値は試験環境を考慮して 55(dB)とした。

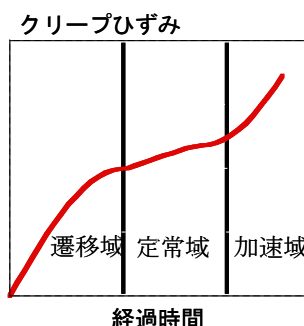


図-4 破壊に至るまでのクリープひずみ変化の概念図

3 実験結果

表-2 に、試験体詳細と圧縮強度試験結果を示す。持続応力が圧縮強度の 80%を超えた場合に、クリープは破壊を引き起こす終局ひずみの発生を促進すると報告されている⁶⁾。しかし、作用応力が圧縮強度の 65%のもと行われた本試験の H186F は、載荷期間 22 時間でクリープ破壊に至った。ここで、圧縮載荷軸方向に貼付したひずみゲージにより、高さに依存して異なるクリープひずみを確認することができる。

3.1 クリープひずみ

試験体に配置したゲージを用いて計測した全ひずみから、載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した。図-3 に、試験体の異なる高さで得られたクリープひずみの経時変化を示す。このとき、N53N の ε122.5, ε45, および H186F, N53N の ε45 は正確な計測ができなかったため、グラフに表示していない。図-3 より、N53N, H123N の試験体で試験体最上部のひずみである ε355 が最も大きく、それは、他の高さで計測したひずみの 2 倍以上の値となっている。すなわ

ち、クリープひずみが局所的に増加しており、一定の持続荷重作用下において、ひずみが局所的に生じていることを確認できた。また、H186F においては、ε200 が最も大きい値を示したが、各試験体の位置に依存したひずみのばらつきは小さく、ひずみの局所化を明確に確認することはできなかった。これは、この試験体に繊維を混入したことで、微視的破壊が、他の 2 体と比較して試験体中に分散したためと推測できる。

また、西林ら⁷⁾は、破壊に至るまでのクリープひずみの変化は、図-4 に示すように、遷移域、定常域、加速域の 3 段階に分類できると報告している。図-3 (c)に着目すると、変形が次第に増大していき破壊に至る、加速域のクリープひずみの特徴を H186F で計測することができたと推測できる。H186F の破壊直前のクリープひずみの挙動から、クリープ破壊したことを確認できた。また、クリープひずみの加速域の特徴が、クリープ破壊した H186F の ε277.5, および ε200 の局所のみ

観察されることも確認できた。なお、このことは、2.1節で述べているが、研磨した面に粗骨材と繊維が存在していることから、締固め層や締固め方法には影響しないことを示唆している。

3.2 AE データの分類とイベント数の累積値

AEには、図-5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に着目するため、次の3つの手順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。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る。このようなAEでは、発生源における破壊特性に関する情報を、計測した波形からすることが困難であると考えられたため、削除した。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。ここで、AEエネルギーを、AE波形の包絡線下の面積とする。

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のみ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越え、計測されるAE波は横波である可能性が高いと考えられ、この横波の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300(mm)として求めた。

さらに、本研究では、圧縮下で発生する破壊を対象にしており、発生したひび割れ面の摩擦により生じたノイズ

ズをAEとして検討に用いることは妥当ではない。またUchidaら⁸⁾は、AEパラメータのうち、平均周波数(=カウント数/継続時間)あるいはRA値(=立上り時間/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。図-6に、Uchidaらの報告により、イベント数をもつAEを平均周波数とRA値せん断型と引張型に識別したH123Nの結果を、例として示す。この結果から、本論文では引張型AEのみを検討に用いた。図-7に、こうして抽出したAEのイベント数の累積値を示す。図-7より、全ての試験体で試験体上部において計測したAE385のイベント数の累積値が、それぞれ同一時間において多いことがわかる。また、各試験体位置に

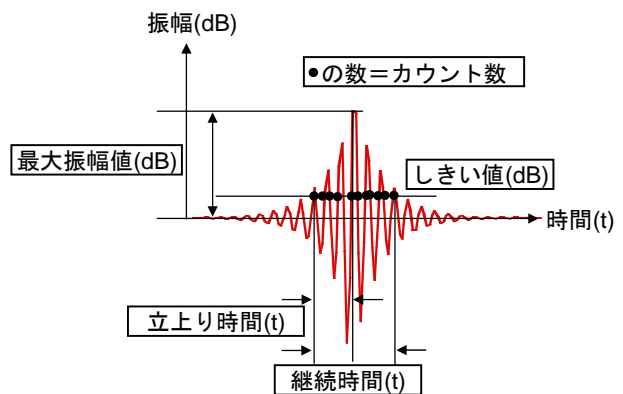


図-5 AEの波形パラメータ

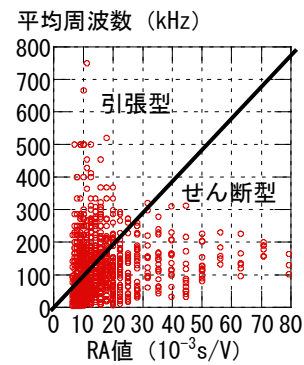


図-6 AEデータの分類(H123N)

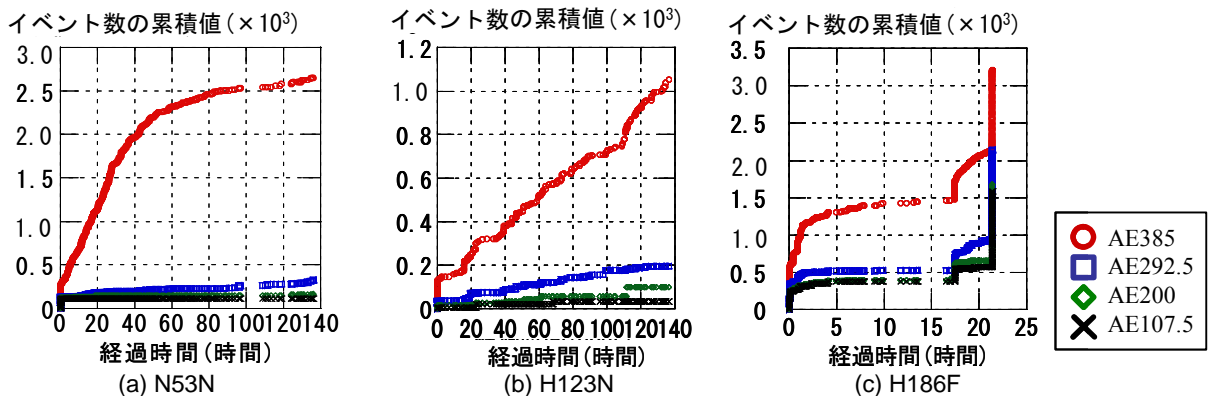


図-7 イベント数の累積値



(a) N53N (b) H123N (c) H186F
図-8 破壊状況

依存した、イベント数の累積値のばらつきにより、微視的破壊の局所化も確認できる。さらに、図-7(c)より、H186Fでは、クリープ試験終了直前でクリープひずみの加速域が観察されたが、この時イベント数の累積値の増加が確認できることから、微視的破壊は、クリープひずみの増加に貢献していると言える。なお、AEの発生源分布の変遷については、本試験体では、特徴的な挙動が見られなかったため、議論は行わないことにした。

3.3 試験体の破壊状況

図-8に、各試験体の破壊状況を示す。ここで、図中の破壊領域を四角の枠で示す。図-8(a)(b)より、N53N、H123Nは共に試験体上部で破壊していることが確認できる。また、(c)よりH186Fは試験体上部から中央部にかけて破壊していることが確認できた。このことから、繊維を混入したコンクリートは破壊領域が増加することを、目視により確認できた。また、これは、3.1節においてH186Fのクリープひずみがほぼ均一であったことと整合している。すなわち、繊維を混入したコンクリートにおいて、クリープひずみのばらつきは比較的少なく、その結果、破壊領域が増加したと考える。

3.4 ひずみエネルギー吸収量とAEパラメータの比較

クリープひずみの増加に伴う試験体のひずみエネルギー吸収量は、発生・蓄積したひび割れの他に、ひび割れに伴い検出されるAEエネルギーの累積値との相関が報告されている⁹⁾。ここで図-8 破壊状況、ひずみエネルギー吸収量は、試験体の荷重-変位曲線下の面積に等しいとして算出した。この相関は、以下のように説明できる。まず、ひび割れが発生することでひずみが増加する。さらに、ひずみの増加に伴いひずみエネルギー吸収量が増加する。また、ひび割れが発生することでAEも検出される。すなわち、ひび割れという現象を介した、ひずみエネルギー吸収量とAEエネルギーの累積値の2つの物理量を関連づけられる可能性があると考えられるのである。さらに、久保ら⁸⁾により、圧縮疲労試験時のひずみエネルギー吸収量とAEエネルギーの累積値は比例する関係にあると報告されている。今回、圧縮ク

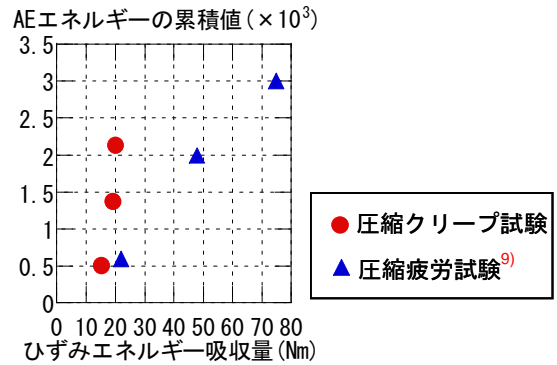
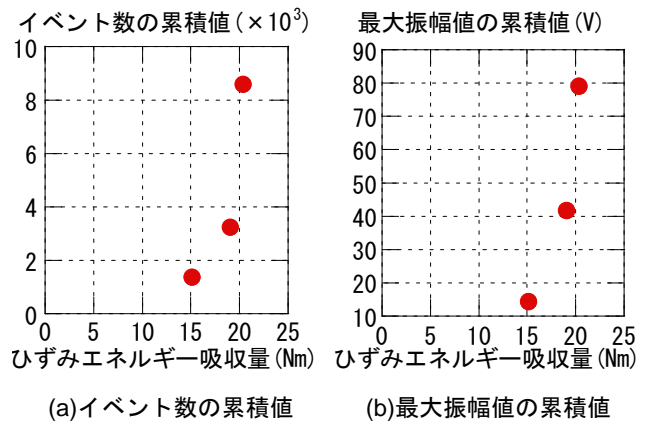


図-9 圧縮疲労試験との比較



(a) イベント数の累積値 (b) 最大振幅値の累積値
図-10 ひずみエネルギー吸収量とAEパラメータの比較

リープ試験と圧縮疲労試験の結果が一致すれば、異なる圧縮応力作用下において、ひずみエネルギー吸収量とAEパラメータを、一指標として同等に扱うことができる。そのため、図-9に、久保ら⁹⁾により行われた圧縮疲労試験と、本研究の圧縮クリープ試験における、ひずみエネルギー吸収量とAEエネルギーの累積値の関係を示す。図-9より、両試験共に、コンクリート内部でひび割れを生じるときのひずみエネルギー吸収量が大きくなると、ひび割れが発生したときに検出されるAEエネルギーの累積値が増加することが認められる。いずれの関係もほぼ直線近似できることが確認できたが、圧縮クリープ試験の結果は、圧縮疲労試験の結果が示す傾きより大きく、その特徴は異なる。すなわち、AEの計測結果が異なったことから、ひずみエネルギー吸収量が同一であっても、圧縮疲労試験時と圧縮クリープ試験において発生するひび割れの状態は、異なる可能性があると判断される。

次に、検出したAEは、様々な最大振幅値を有している。このAEの最大振幅値は、AEの発生源である微視的破壊の状況に依存して異なるため、最大振幅値を用いて、コンクリート内部のひび割れの規模を識別できる可能性がある。

そこで、3.2節で計算したイベント数の累積値と、最大振幅値の累積値の関係を、ひずみエネルギー吸収量と

比較した。まず、図-10 (a)にひずみエネルギー吸収量とイベント数の累積値の関係、(b)にひずみエネルギー吸収量と計測した AE 波形の最大振幅値を経過時間と共に累積した最大振幅値の累積値を示す。図-10 (a)(b)より、ひずみエネルギー吸収量がある値以上の領域において、イベント数の累積値、および最大振幅値の累積値が増加している。そのため、ひずみエネルギー吸収量とイベント数の累積値、最大振幅値の累積値の関係は、横軸のひずみエネルギー吸収量に切片をもつ一次関数のようにも見える。

ただし、ひずみエネルギー吸収量が比較的小さい領域でも、イベント数の累積値、最大振幅値の累積値が0であることは考えにくい。1章でも述べたが、クリープのメカニズムには様々な要因があり、それは作用応力比で、その貢献度が異なることが考えられる。例えば、圧縮強度の30%程度の低応力作用下のクリープでは、高応力作用下のクリープより、ひずみエネルギー吸収量が低く算出される。また、水の移動による影響が支配的であると報告されている¹⁾ため、コンクリート内部では、微視的破壊の発生は極めて少ないと想定できる。これより、微視的破壊を計測する AE のパラメータの1つである、イベント数の累積値、最大振幅値の累積値はひずみエネルギー吸収量と比較し、さらに低く算出される。そして、応力比を増加していくと、ある応力比以上の領域で、ひずみエネルギー吸収量に伴い、イベント数の累積値、最大振幅値の累積値が増加していく。さらに、圧縮疲労試験および圧縮クリープ試験のひずみエネルギー吸収量と AE エネルギーの累積値は、傾きが異なるものの、イベント数の累積値、最大振幅値の累積値と同様に、指数関数により評価できる可能性がある。

つまり、変位の値から得られたひずみエネルギー吸収量と、AEにより得られた各物理量には相関があり、その関係は、異なる作用応力比に依存して変化するクリープ現象の原因となるメカニズムの貢献度の割合に付随すると推測できる。そして、このことから、AEから得た情報によりコンクリート内のひび割れ状態を知ること、コンクリートの透水性や物質透過性など耐久性の諸問題に関するコンクリートの損傷状況を評価する助けになると考えられる。

4 まとめ

本研究で、以下のことを確認した。

- (1) 試験体の計測位置に依存して異なるひずみの値と AE により、一定の持続荷重作用下におけるクリープ破壊時のクリープひずみとイベント数の累積値が、局所的に増加することを確認した。
- (2) クリープひずみの増加に伴い、イベント数の累積

値が増加することから、微視的破壊がクリープ現象に貢献することを確認した。

- (3) ひずみエネルギー吸収量と、イベント数の累積値、特に最大振幅値の累積値の関係から、微視的破壊とその他の貢献度の違いに付随して変化するクリープ現象を評価できる可能性を示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、太平洋セメント中央研究所の河野克哉氏、石田征男氏、杉山真悟氏に多大な協力を得た。この場を借りて、謝意を表す。また、本研究の一部は、平成21年度科学研究費補助金(若手研究(B)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) 早野博幸, 柴田辰正, 岡本享久, 石川雄康: 超軽量骨材を用いたコンクリートのマイクロクラック発生に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.55-60, 1998.
- 4) Rossi, P., Godart, N., Robert, J., Gervais, J., and Bruhat, D.: Investigation of the basic creep of concrete by acoustic emission, Materials and Structures, Vol.27, No.12, pp.510-514, Nov. 1994.
- 5) 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.
- 6) 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
- 7) 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.
- 8) Neville, A., 三浦尚: ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版, pp.583, 2004.
- 9) 久保陽平, 渡辺健, 二羽淳一郎: 圧縮疲労破壊するコンクリートの AE 発生挙動に関する実験的研究, 土木学会第60回年次学術講演会, No.1-527, pp.1051-1052, 2005.