論文　若材齢モルタルの引張型基本クリープと微視的破壊に対するAE法による関連評価

渡辺　健[*1]・榊原　直輝[*2]・W. Jason WEISS[*3]・二羽　淳一郎[*4]

要旨：本研究では，若材齢モルタルの引張クリープと微視的破壊の関連を評価することを目的に，若材齢モルタルの引張クリープ試験をアコースティック・エミッション(AE)計測と併せて実施した。その結果，引張クリープひずみと AE イベント累積値の間には，応力強度比の大小に関わらず正の相関があること，および基本クリープひずみに占める微視的破壊貢献分の割合が細骨材量によって異なることがわかった。すなわち，AE 法を用いることにより，若材齢モルタルの引張クリープメカニズムの変化を評価することができた。

キーワード：若材齢モルタル，引張クリープ，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

コンクリートのひび割れ発生を正確に予測するためには，収縮だけではなく引張荷重作用下におけるクリープを把握することが重要となる [1)]。特に若材齢時は，セメントペースト(以下，ペースト)の収縮が顕著に生じる [2)] うえ，強度発現も十分に進行しておらず，ひび割れの発生する危険性が高い。従来，若材齢コンクリートの引張クリープに対して，載荷応力や水セメント比，載荷材齢等の影響が検討されてきたが [3)]，引張クリープメカニズムの解明には至っていないのが現状である。

はり等の部材スケールや，円柱圧縮試験体(φ100×200mm)等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(Interfacial Transition Zone：以下，ITZ)で構成される複合体として捉えることが有効である [1)]。そのなかで骨材周辺の ITZ 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 [4)]，ITZ 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 [5)]。

ところで，この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(以下，AE)法が挙げられる。AE はコンクリート中で発生する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波形の特徴を示す 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。このことから，引張持続荷重作用下のコンクリートに対して AE 計測を行うことで，クリープに関係するコンクリート内部の微視的破壊を評価し，クリープメカニズムの解明に有益な情報を与えることが期待される。

以上を踏まえ，本研究では，若材齢モルタルの引張クリープと微視的破壊の関連評価を目的に，若材齢モルタルの引張クリープ試験を AE 計測と併せて実施した。試験対象は，骨材，ペーストおよび ITZ の 3 相構造を単純化し検討できるモルタルとし，試験パラメータは，持続荷重作用下において生じる微視的破壊の進行に大きな影響を及ぼすと考えられる，応力強度比および細骨材量とした。なお，本研究では，外部への水分逸散を防止した試験体のクリープ(以下，基本クリープ)を対象とした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表－1 に本研究で用いたモルタルの使用材料を，**表－2** にその配合を各材料の重量比で示す。試験体中の ITZ の量の違いが微視的破壊の発生程度に及ぼす影響を評価するため，細骨材量をパラメータとした 3 種類のモルタルを作製した。

試験体は，載荷軸方向に断面寸法が一様な直方体型(幅

表－1　モルタルの使用材料

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 3300cm^2/g)
細骨材 (S)	セメント強さ試験用標準砂 (絶乾密度 2.64g/cm^3，吸水率 0.42%)

表－2　モルタルの配合

配合名	W/C	S/C	W: C: S (重量比)
S/C 2.0	0.40	2.0	4: 10: 20
S/C 0.5		0.5	4: 10: 5
S/C 0.0		0.0	4: 10: 0

*1　(公財)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)
*2　東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　(正会員)
*3　Prof., School of Civil Engineering, Purdue University, Ph.D.
*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)

50×厚さ 20×長さ 420mm)とし，打設時のブリーディング量を少なくする目的で，練混ぜにはダブルミキシング法 [6]を採用した。また，打設による載荷軸方向の差異を除去するため，試験体の側面を上面にした状態で打設を行った。さらに，試験体は打設後 24 時間で脱型し，試験体からの水分逸散を防ぐ目的で試験体表面をアルミテープにて被覆した。その後は，温度 25℃，相対湿度 70%に制御された恒温恒湿器内に静置し，封緘養生を施した。なお，この間の試験体の質量変化が無いことから，試験体からの水分逸散を適切に防げたことを確認している。

2.2 載荷方法

試験体に一定荷重を持続的に作用させることが可能なてこ式引張クリープ試験機(てこの腕長比 1:12)を独自に開発し，この試験機を用いて引張クリープ試験を行った。**図－1** にクリープ試験の状況を，**図－2** に試験体と試験機を接続するアルミニウム製の平板(以下，アルミプレート)を示す。試験体は，両端にエポキシ樹脂系の接着剤を用いて接着したアルミプレートを介して試験機に固定した [7]。また，アルミプレート接着箇所で断面厚の変化により剛性が急激に変化しないように，またその結果生じる応力集中を避けるためにアルミプレートのエッジを斜めに加工している [7]。

2.3 試験条件

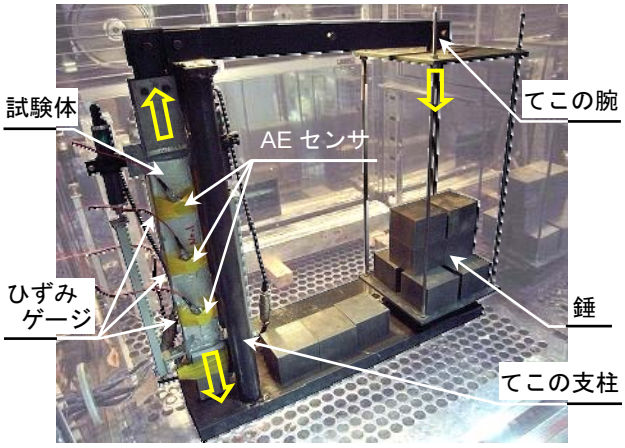
本研究では応力強度比をパラメータのひとつとしているが，若材齢モルタルの強度は時間の経過に伴い著しく変化する。そこで，クリープ試験に先立ち，クリープ試験用の試験体と同一条件にて作製および養生を行った円柱試験体(φ50×100mm)に対して割裂引張試験を行い，材齢と割裂強度の関係を求めた。クリープ試験中は，対数関数で近似したそれらの関係に基づき，約 12 時間おきに追加載荷を行うことで，クリープ試験中の応力強度比を一定に保つよう努めた。

また，クリープ試験中の環境条件(温度・湿度)を一定にすること，および AE 計測に対する周辺の雑音によるノイズの影響を低減することを目的に，試験空間を外環境から完全に遮断可能な恒温恒湿器内にてクリープ試験を行った。なお，設定温湿度は養生条件と同様，温度 25℃，相対湿度 70%である。前述したように，試験体はアルミテープで被覆されており，試験中の試験体からの水分逸散が無いことから，上記の環境条件においても基本クリープを対象とした実験を行うことが可能である。

2.4 計測項目

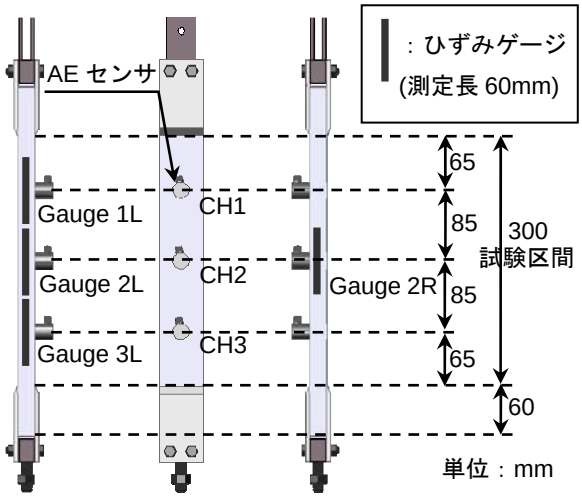
持続荷重作用下でのモルタル試験体のひずみおよび AE を計測した。**図－3** にひずみゲージと AE センサの設置位置を示す。載荷軸方向のひずみの差異および荷重の偏心を観察するため，試験体左側面には載荷軸方向に沿って 3 枚のひずみゲージを，右側面には高さ中央に 1 枚のひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは貼付位置が高い順に Gauge 1，2，3 とし，左側面を添え字 L，右側面を R で表す。また，AE センサは試験体正面に 3 個設置した。設置の際は，AE センサ(φ19mm)が十分に収まるようにアルミテープをφ23mm 程度の円状に切り取り，その箇所にビニルテープを用いて AE センサを固定した。なお，設置位置の高さはひずみゲージの中心と等しく，設置位置が高い順に CH1，CH2，CH3 と表記する。

また，試験中に生じる自己収縮等によるクリープ以外のひずみを補正するため，載荷試験体と同一環境下に静



図－1　てこ式クリープ試験機を用いた試験の状況

図－2　試験体とアルミプレートの接着



図－3　試験体寸法とひずみゲージおよび AE センサの貼付箇所(左より，左側面図，正面図，右側面図)

置した無載荷試験体のひずみの計測を行った。以下に示す全ひずみは，載荷試験体で計測されたひずみから，無載荷試験体のひずみを差し引いたひずみである。また，クリープひずみを，全ひずみから載荷時に生じる弾性ひずみを差し引いたひずみと定義する。

2.5 AE 計測概要および AE イベント数の算出

AE センサには 150kHz 共振型のものを用い，計測の際はプリアンプの増幅値を 60dB，しきい値を 38dB に設定した。これは，計測条件を検討する段階で行った予備実験の結果に基づいており，恒常的に発生するノイズを含まない範囲で，より多くの AE を検出できるように決定した値である。**図－4** に AE 波形の模式図を，波形の特徴を示す代表的な 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，それを以下の AE イベント数の算出で用いることとする。なお, 本研究ではカウント数が 1 の AE はノイズと考え，検討から省いている。

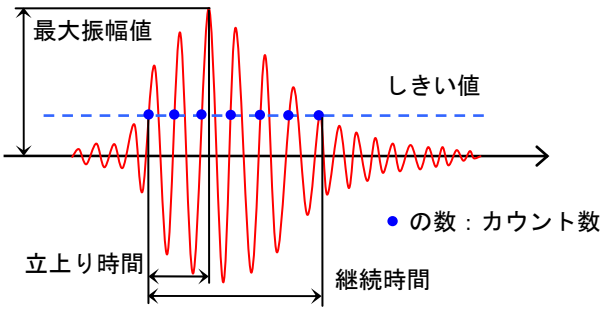
次に，発生した AE 事象の数と定義される AE イベント数の算出方法を示す。一般に，ひとつの AE 事象が発生しその波が試験体全般に伝搬すると，試験体に貼付した複数のセンサでその信号を検出する。そのため，イベント数算出のためには，複数のセンサで検出した AE ヒットが同一事象によるものなのか否かを判別する必要がある。そこで，本研究ではその判別にあたり，AE センサの貼付位置間の距離および AE 波伝搬速度(2130m/s：実測値)を考慮した。AE 波が最初にセンサに到着した時間から, 一定時間内に他のセンサで AE を検出した場合，それらは同一事象によるものと考え，ひとつのイベントとして捉えた。なお，同一事象による AE を複数のセンサで検出した場合，最初にセンサに達した AE のみに着目し，この AE のパラメータを検討に用いることとした。

3. 実験結果

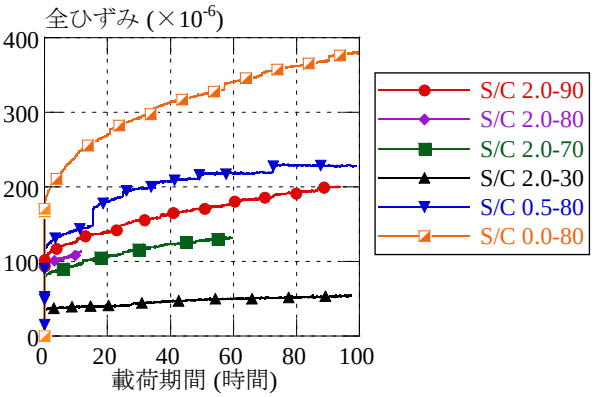
表－3 に本研究における試験ケースを示す。ケース 1～4 は配合 S/C=2.0 の試験体で，応力強度比の影響を検討するために用意した。また，ケース 5 および 6 は，細骨材量の影響を検討するための試験体で，それぞれ配合を S/C=0.5，S/C=0.0 とした。載荷開始材齢は，実験の都合上 1.6～3.4 日としたが，載荷中の応力強度比を保持しており，結論に対する影響は小さいと考える。また，S/C 2.0-80 は，載荷期間 11.6 時間で試験体端部が破断した。アルミプレート接着部の影響が要因として考えられるが，本試験体を含む全ての試験体で，**図－3** に示す Gauge 2L および 2R で測定したひずみの差は僅かであった。このことから，載荷による偏心は少ないと判断し，全試験体を以下の検討に用いることとする。なお，**表－3** に示す初期載荷時の弾性係数の値は，初期載荷応力を初期載荷時に生じた弾性ひずみで除した値である。

3.1 全ひずみの経時変化

図－5 に各試験体の全ひずみ－載荷期間関係を示す。



図－4　AE の波形パラメータ



図－5　全ひずみの経時変化

表－3　各試験ケースの載荷開始材齢および載荷期間

ケース	試験体名	S/C	応力強度比	載荷開始材齢 [日]	載荷期間 [時間]	初期載荷時の弾性ひずみ [×10^{-6}]	初期載荷時の弾性係数 [kN/mm^2]
1	S/C 2.0-90	2.0	0.90	2.0	93.8	99.5	32.4
2	S/C 2.0-80		0.80	1.6	11.6*	90.5	31.5
3	S/C 2.0-70		0.70	1.9	59.5	78.5	32.7
4	S/C 2.0-30		0.30	2.1	97.5	34.9	33.0
5	S/C 0.5-80	0.5	0.80	2.1	98.8	109.5	21.5
6	S/C 0.0-80	0.0	0.80	3.4	100.0	166.5	15.7

* 載荷期間 11.6 時間で，試験体端部が破断。

なお，各試験体のひずみには，**図－3** に示す Gauge 2L および 2R で測定したひずみの平均値を用いた。**図－5** より，全試験体において初期載荷時に弾性ひずみが生じた後に，持続荷重によってひずみが増加していることがわかる。また，初期載荷時に生じた弾性ひずみの値に着目すると，**表－3** および**図－5** より，S/C=2.0 の試験体ではその大きさが応力強度比の大小と一致していることがわかる。その一方，S/C 2.0-80，S/C 0.5-80，S/C 0.0-80 では，S/C の減少に伴って値が大きくなっており，細骨材量の減少すなわちペースト量の増加に伴い，剛性が低下していることが確認できる(**表－3**)。

3.2 応力強度比の影響

2.5 節で説明した手法により，各試験体の AE イベント数を算出した。**図－6(a)**および**(b)**に，S/C 2.0-90, S/C 20-80, S/C 2.0-70, S/C 2.0-30 のクリープひずみ－載荷期間関係，AE イベント累積値－載荷期間関係をそれぞれ示す。同一の載荷期間で各試験体の値を比較すると，クリープひずみ，AE イベント累積値ともに応力強度比の増加に伴い値が大きくなる傾向をつかむことができる。

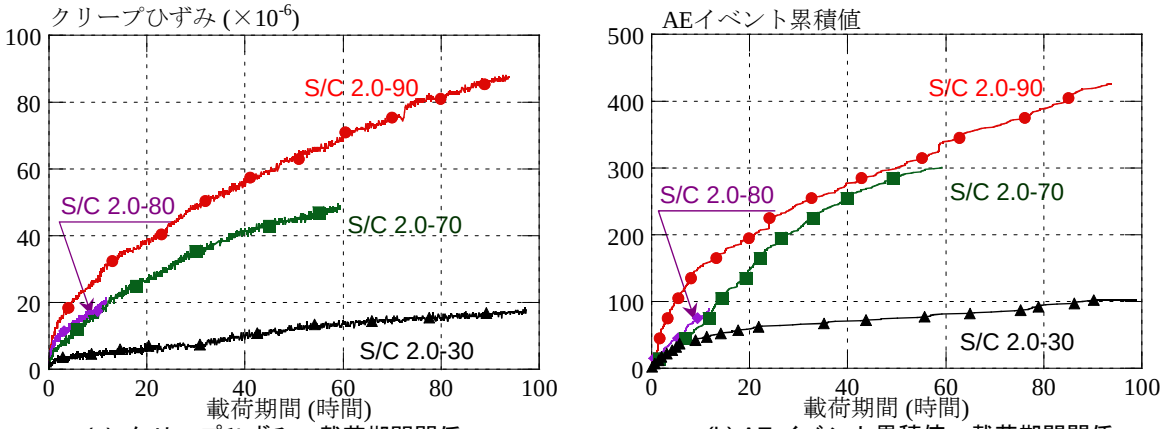
また，クリープひずみ曲線の形状に着目すると，時間の経過とともに単位時間あたりの増分が減少しており，クリープが遷移域から定常域へと移行していく様子を確認することができる。この特徴が，**図－6(b)**に示す AE イベント累積値曲線においても観測されたことから，試験体内部で発生する微視的破壊の発生割合(単位時間あたりの発生数)は，クリープひずみの経時変化同様，時間の経過とともに減少していくと考えられる。さらに，載荷開始直後に AE イベントが多く計測されたことから，遷移域におけるクリープひずみの増分に微視的破壊が大きく貢献していることが推察される。

以上のように，各試験体のクリープひずみと AE イベント累積値の大小関係および形状が非常に類似していることから，クリープひずみと AE イベント累積値との間に強い相関関係があることがわかる。この関係に対する更なる検討を 3.5(1)で示す。

3.3 細骨材量の影響

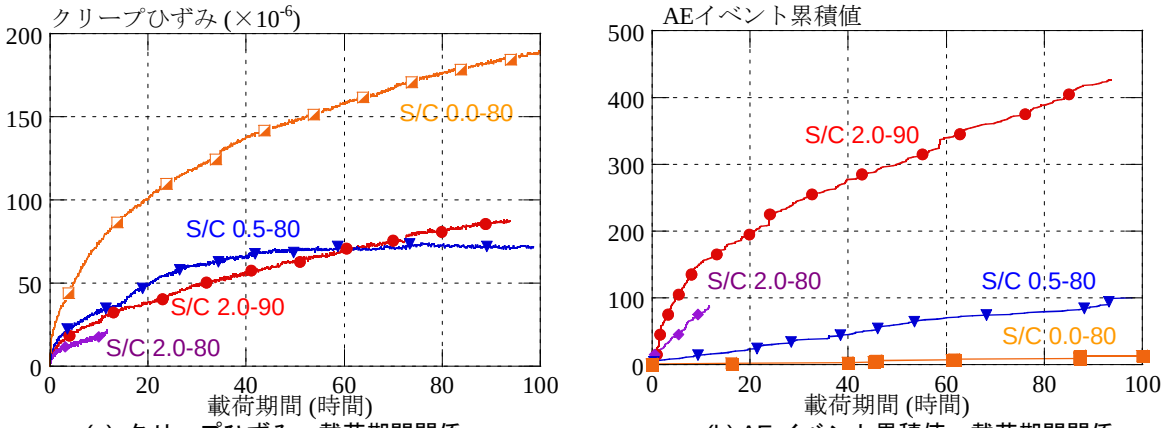
図－7(a)および**(b)**に，S/C 2.0-90, S/C 2.0-80, S/C 0.5-80, S/C 0.0-80 のクリープひずみ－載荷期間関係，AE イベント累積値－載荷期間関係をそれぞれ示す。本来であれば，応力強度比が 80%の試験体 3 体で比較するのが望ましいが，S/C 2.0-80 は試験中に破断したため，S/C 2.0-90 を加えた 4 体で比較を行った。**図－8** に比較した 3 種類の配合の試験体を概略図で示す。

図－7(a)より，S/C 0.5-80 のクリープひずみは，載荷期間 40 時間以降は頭打ちとなり，60 時間付近で S/C 2.0-90 のクリープひずみと大小関係が逆転している。一方，S/C



(a) クリープひずみ－載荷期間関係　(b) AE イベント累積値－載荷期間関係

図－6　応力強度比の影響



(a) クリープひずみ－載荷期間関係　(b) AE イベント累積値－載荷期間関係

図－7　細骨材量の影響

0.0-80 のクリープひずみは載荷期間 100 時間に至るまで，全試験体の中で常に最大の値を示した。これは，クリープの主要因であるペーストの単位量が増えるとともに，骨材による変形の拘束効果が消失したためと考えられる。

次に，図－7(b)より各試験体の AE イベント累積数は，S/C の減少に応じて小さくなっていることがわかる。特に S/C 0.0-80 では，載荷期間 100 時間の時点で検知された AE イベント数が僅か 13 であった。このことから，2.5 節に示す AE 計測条件の設定により，周辺の雑音によるノイズの影響を適切に排除できたことがわかる。さらに，図－2 に示す試験体とアルミプレートの接着箇所からも AE はほぼ発生しないことが同時に確認できる。

使用した細骨材の強度がペースト部に比べて十分に大きいことを考えると，S/C 0.5-80 および S/C=2.0 の試験体で検知された AE イベントの大部分は，ペースト部ではなく ITZ で発生したと考えられる(図－8)。従来，細骨材量の増加に伴い単位ペースト量が減少することで，クリープひずみは減少すると考えられてきたが，ITZ の増加により微視的破壊が発生しやすくなることを考えると，細骨材量の増加はクリープひずみを増加させる要因となることも考えられる。

3.4 AE 波形の分類

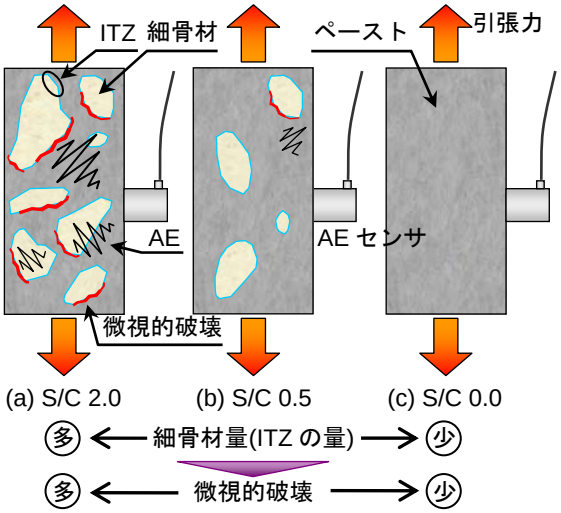
Ohtsu[8]らの報告に基づき，本実験で計測された AE を「Tensile crack」と「Other-type crack」に分類する。ここで，「Tensile crack」は破壊の進行に寄与する AE，「Other-type crack」は既に形成されたひび割れ面の摩擦等に起因する AE と考えることができ，分類には AE パラメータである RA 値(=立上り時間/最大振幅値)と平均周波数(=カウント数/継続時間)を用いる。図－9 に分類結果を示す。なお，グラフ中の数字は各試験体でのプロット数(試験終了時の AE イベント累積値)を示している。

図－9 より，引張荷重作用下で生じる AE を対象としている本実験で計測された AE の大部分は「Tensile crack」に分類され，「Other-type crack」はほとんど計測されなかった。このことから，本実験で計測された AE は，そのほぼ全てが破壊の進行に起因する「Tensile crack」であり，AE イベントとクリープひずみの関連を，微視的破壊の進行とクリープひずみの関係に置き換えることができることを示している。すなわち，この結果は微視的破壊の進行がクリープを引き起こしていることを裏付けるものである。

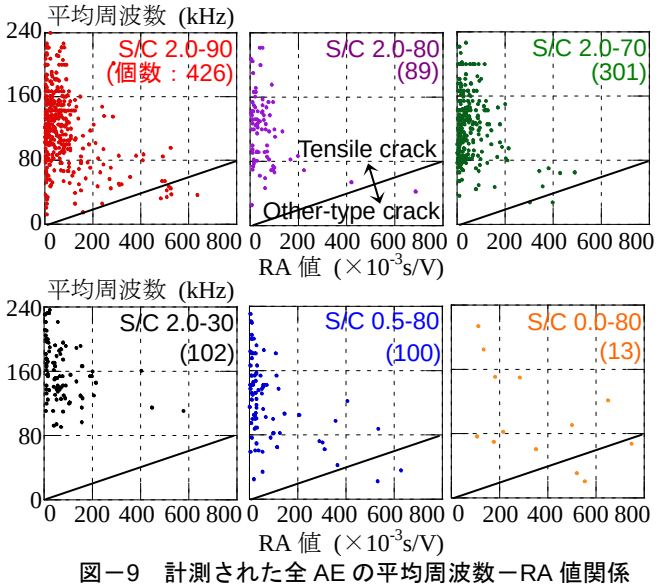
3.5 クリープひずみと AE イベント累積値の関連評価

(1) クリープひずみと AE イベント累積値の相関関係

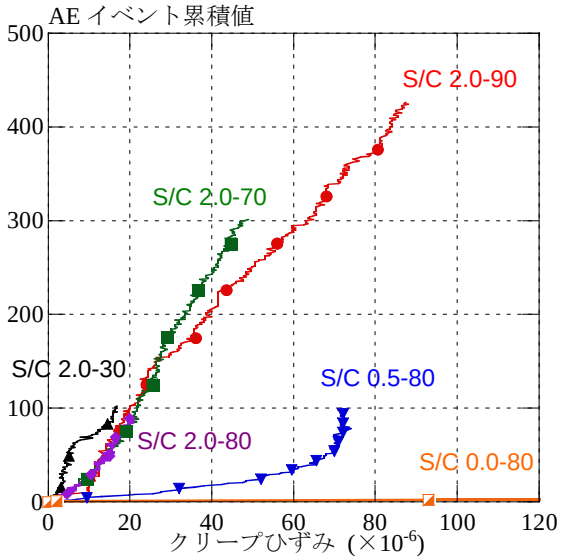
図－10 に AE イベント累積値－クリープひずみ関係を示す。S/C=2.0 の試験体では，クリープひずみと AE イベント累積値との間におおよそ比例関係が成立していることがわかる。これは，両者の間に正の相関があることを意味しており，AE イベント，すなわち試験体内部で生じる微視的破壊がクリープの進行に大きく影響を与えて



図－8　細骨材量に依る微視的破壊発生頻度の比較



図－9　計測された全 AE の平均周波数－RA 値関係



図－10　AE イベント累積値－クリープひずみ関係

いることを示している。また，この相関関係より，AE イベント累積値の推移を把握することで，クリープひずみの進行を予測できる可能性がある。すなわち，クリープひずみという部材・試験体スケールで観測される物理現象を，AE イベント累積値を介して，ITZ における微視的破壊というミクロな現象から説明することができれば，クリープひずみの進行を予測することが可能となる。

従来，コンクリート構造物のクリープは，同配合のコンクリート試験体を用いたクリープ試験の結果に基づいて予測されてきたが，このようにミクロなスケールに遡り，計測されたクリープひずみという巨視的な現象を検証していくことで，将来的に様々な特性をもつコンクリートに広く適用できる，汎用的なクリープ予測式の構築に有益な情報を与えることができると考えられる。

一方, S/C 0.5-80 では AE イベント累積値－クリープひずみ関係に明確な線形関係を確認することができなかった。S/C=2.0 の試験体で線形関係が現れたのに対し，S/C 0.5-80 でそれが現れなかった原因は不明のため，今後更なる検討が必要とされる。

(2) 基本クリープひずみ中の微視的破壊の貢献分

図－10 より，S/C=2.0 の試験体の AE イベント累積値－クリープひずみ関係は，応力強度比にかかわらずほぼ同一線上にある。このことから，細骨材量が同一であれば応力強度比によらず，ある一定のクリープひずみ増分に対する AE イベント数は等しいことがわかる。

また，S/C 0.5-80，S/C 0.0-80 では，S/C=2.0 の試験体に比べて，AE イベント累積値－クリープひずみ関係の傾きが小さい。これは，クリープひずみ増分に対する AE イベント数が少ないことを表しており，細骨材量を減らしペースト量を増加させたことにより，微視的破壊の発生頻度が減少したとともに，クリープを引き起こす支配的なメカニズムが塑性流動(水分の移動)に起因するものとなったためと考えられる。

従来，基本クリープひずみに対する微視的破壊の貢献分の割合は，応力強度比や配合によって異なると言われてきたが，AE 法を用いたこれらの検討により，その貢献割合の大小関係を AE イベント累積値－クリープひずみ関係から評価することができた。

4. まとめ

本研究で得られた知見を，以下に整理する。

(1) クリープひずみと AE イベント累積値の関係より，微視的破壊が若材齢モルタルの引張型基本クリープひずみの進行に大きく貢献していることを確認した。

(2) セメントペースト試験体で計測された AE イベント数がごく僅かであったこと，および本実験で計測された AE のほぼ全てが「Tensile crack」に分類されたことから，遷移域から定常域までの過程において，引張持続荷重を受ける若材齢モルタルに生じる微視的破壊のほとんどは ITZ で発生することがわかった。

(3) S/C=2.0 の若材齢モルタル試験体では，AE イベント累積値－クリープひずみ関係に強い相関があり，応力強度比によらず，ある一定のクリープひずみ増分に対する AE イベント発生数がほぼ等しかった。

(4) 細骨材量によって基本クリープを引き起こす支配的なメカニズムが変化し，基本クリープひずみに占める微視的破壊貢献分の割合が変化することを，AE 法を用いて評価することができた。

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) Moon, J. H., Rajabipour, F., Pease, B. and Weiss, J.: Autogenous Shrinkage, Residual Stress, and Cracking in Cementitious Composites: The Influence of Internal and External Restraint, Fourth International Seminar on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology, 2005

2) 田澤栄一，宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響，土木学会論文集，No.502/V-25，pp.43-52，1994.11

3) 入矢桂史郎，根木崇文，服部達也，梅原秀哲：若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究，土木学会論文集，No.620/V-43，pp.201-213，1999.5

4) Otsuki, N., Yodsudjai, W., Nishida, T. and Yamane, H.: New Test Methods for Measuring Strength and Chloride Ion Diffusion Coefficient of Minute Region in Concrete, ACI Materials Journal, Vol.101 No.2, pp.146-153, March-April 2004

5) Bernard, O., Ulm, F. J. and Germaine, J. T.: Volume and Deviator Creep of Calcium-leached Cement-based Materials, Cement and Concrete Research, 33, pp.1127-1136, 2003

6) 田澤栄一，宮澤伸吾：新しい練り混ぜ方法がコンクリートの性質に及ぼす影響，セメント・コンクリート，No.466，pp.40-48，1985.12

7) Li, Z. and Shah, S. P.: Localization of Microcracking in Concrete under Uniaxial Tension, ACI Materials Journal, Vol.91 No.4, pp.372-381, July-August 1994

8) Ohtsu, M. and Tomoda, Y.: Phenomenological Model of Corrosion Process in Reinforced Concrete Identified by Acoustic Emission, ACI Materials Journal, Vol.105 No.2, pp.194-199, March-April 2008