

研究種目：若手研究 (B)  
研究期間：平成 21 年度～平成 22 年度  
課題番号：21760344  
研究課題名 (和文) セメント系複合材料の微視的破壊と経時的体積変化の関連評価  
研究課題名 (英文) Relationship between micro-cracks and time-dependent volume change in cementitious composite  
研究代表者  
渡辺 健 (WATANABE KEN)  
公益財団法人 鉄道総合技術研究所・副主任研究員  
研究者番号：40450746

## 研究成果の概要 (和文)：

骨材を内包した若材齢モルタル試験体の引張クリープ試験を行った。そして、持続的荷重が作用した若材齢コンクリートの崩壊までの一連の過程において、アコースティックエミッション (AE) パラメータ解析を通して追跡しながら、内部に発生・蓄積する微視的破壊が如何にクリープ変位や崩壊に寄与するかを明らかにした。

## 研究成果の概要 (英文)：

骨材を内包した若材齢モルタル試験体の引張クリープ試験を行った。そして、持続的荷重が作用した若材齢コンクリートの崩壊までの一連の過程において、アコースティックエミッション (AE) パラメータ解析を通して追跡しながら、内部に発生・蓄積する微視的破壊が如何にクリープ変位や崩壊に寄与するかを明らかにした。

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
平成 22 年度	800,000	0	800,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	810,000	4,310,000

## 研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：モルタル，微視的破壊，経時的体積変化

## 1. 研究開始当初の背景

水和反応や乾燥、温度変化の過程において経時的に体積変化が生じるセメントマトリクスには、外部拘束、ならびに骨材や補強材がこの変形を拘束することで残留応力が発生する。そして、その残留応力が限界値に達すると微細なひび割れ(マイクロクラック)を発生させる。コンクリート部材の残留応力を

予測し、適切にひび割れ発生を予測するためには、材料の収縮だけでなくクリープ現象を適切に把握することが必須である。コンクリートのクリープ機構として、古くより粘性、物質の変異、浸出や物質移動およびひび割れなど諸現象の働きが提案されてきたが、すべての現象を包括し得る理論は存在していない。さらに、構造設計・施工・材料などコンクリート構造物に関わる要素がそれぞれ独

立して研究・開発されている現状では、コンクリートのクリープ現象を唯一のモデルで表現することは困難であると考えられる。

複合材料であるのコンクリートの研究に対するひとつの方向性として、メソスケールやミクロスケールで事象を捉え巨視的な物理現象を追跡する、マルチスケールの問題としての取組みが挙げられる。とりわけ、RC構造物の巨視的な変形を議論するには、骨材とセメントマトリクスとの複合体としてコンクリートを取り扱ったメソスケールの有効性が挙げられている。メソスケールに焦点をおいたクリープの研究では、微視的破壊(マイクロクラック)の役割を明確化することが鍵になっており、最近ではレーザー顕微鏡・デジタルマイクロスコープ・中性子ラジオグラフィなど、ひび割れを可視化・定量化する技術の開発とともに、徐々に開拓されている。しかし、いずれの手法も計測精度が向上する反面、計測対象が限定的であるため、コンクリート構造部材のような広領域への展開が困難であることもともなって、微視的破壊とクリープ現象に関して明確な結論には至っていないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では、持続的荷重が作用した若材齢コンクリートの崩壊までの一連の過程において、内部に発生・蓄積する微視的破壊が如何にクリープ変位や崩壊に寄与するか明らかにすることで、若材齢コンクリートのクリープ機構を実験的に解明することを目的としている。

## 3. 研究の方法

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。表-1 に本研究で用いた試験体概要を示す。

表-1 試験体諸元

試験体名	S/C	応力強度比	荷重開始材齢 [日]
S/C 2.0-90	2.0	0.90	2.0
S/C 2.0-80		0.80	1.6
S/C 2.0-70		0.70	1.9
S/C 2.0-30		0.30	2.1
S/C 0.5-80	0.5	0.80	2.1
S/C 0.0-80	0.0	0.80	3.4

試験体は、荷重軸方向に断面寸法が一様な直方体型(幅 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を採用した。また、打設による荷重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°C、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 荷重方法

試験体に一定荷重を持続的に作用させることが可能にてこ式引張クリープ試験機(てこ比 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 にクリープ試験の様子を、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。接着の際にはクリープ試験中に剥離が生じない十分な接着強度が得られるよう、予備実験の結果に基づき L クランプを用いて4時間以上圧着させた。なお、接着面積はアルミプレート 1 枚につき 3000mm<sup>2</sup>(幅 50×長さ 60mm)である。また、アルミプレート接着箇所での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。

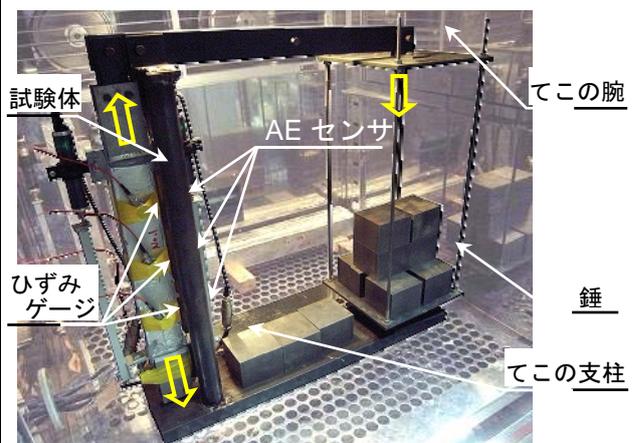


図-1 てこ式クリープ試験機を用いた試験の状況



図-2 試験体とアルミプレートの接着

### 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 時間おきに追加荷重を行うことで、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、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。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 a、右側面を b と表記する。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の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-3 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播すると、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、イベント数を算出する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 波伝播速度を考慮した。その際、AE 波伝播速度には AE 波の横波の一般的な速度である 2000(m/s)を用い、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、最初にセンサに到着した 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。

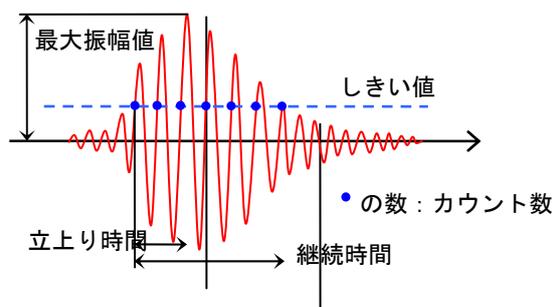


図-3 AE の波形パラメータ

### 3. 研究成果

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、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 1.6~3.4 日である。なお、S/C 2.0-80 は、載荷期間 11.6 時間で応力集中により試験体端部が破断したため、その時点までの測定結果を議論する。

#### 3.1 全ひずみの経時変化

図-4 に各試験体の全ひずみ-載荷期間関係を示す。なお、各試験体のクリープひずみには、荷重の偏心による影響を省くため、両側面で計測したひずみの平均値を用いた。図-4 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、図-4 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。

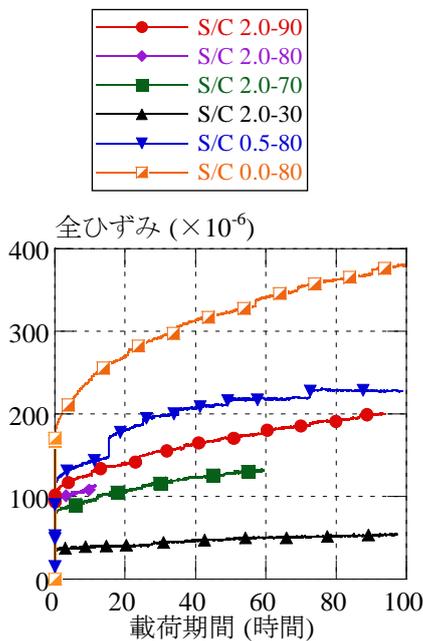


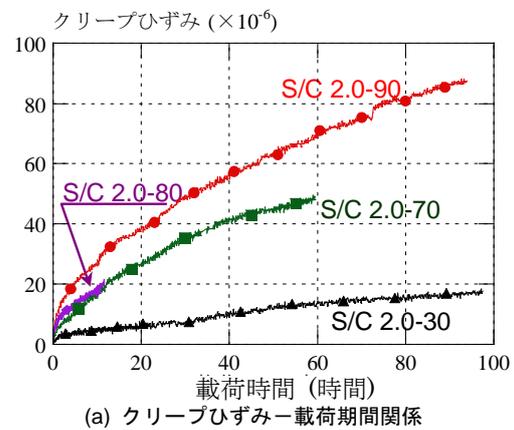
図-4 全ひずみの経時変化

#### 3.2 応力強度比の影響

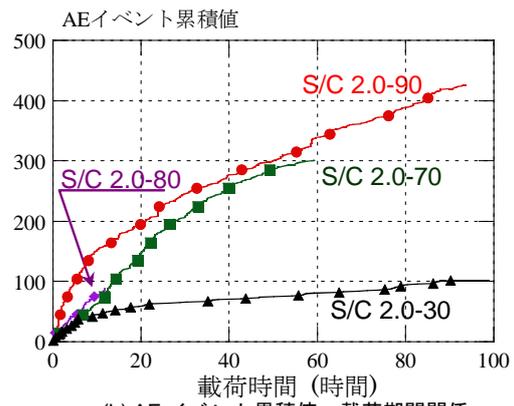
2.5 節で説明した手法により、各試験体の AE イベント数を算出した。図-5(a) および (b) に S/C 2.0-90、S/C 2.0-80、S/C 2.0-70、S/C 2.0-30 のクリープひずみ-載荷期間関係、

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-5(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が大きく貢献していることが推察される。



(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-5 応力強度比の影響

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 3.6(1)で示す。

### 3.5 AE 波形の分類

既往の報告に基づき、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。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。

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と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。

### 3.6 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-6 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クリープ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) 全ひずみに対する微視的破壊の貢献分

図-6 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、あるクリープひずみ増分に対する AE イベントの発生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 イベント発生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。

すなわち、従来、全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クリープひずみ-AE イベント累積値関係から評価することができた。

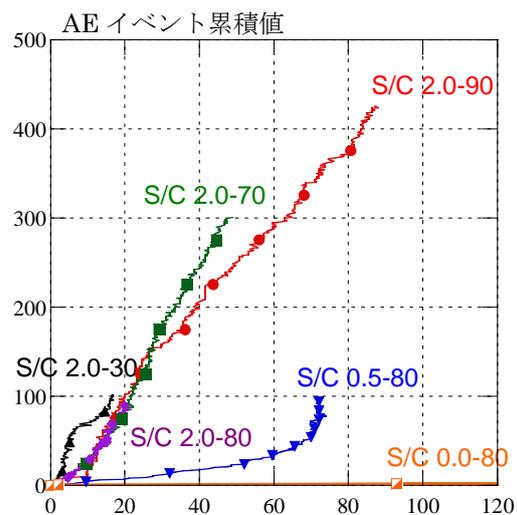


図-6 AE イベント累積値-クリープひずみ関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① 渡辺 健, 榊原直輝, W. Jason WEISS, 二羽淳一郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.455-460, 2011.6.
- ② 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.461-466, 2011.6.
- ③ 藤枝智子, 渡辺 健, 榊原直輝, 二羽淳一郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1739-1744, 2010.7.

〔学会発表〕（計2件）

- ① Fujieda, T., Watanabe, K., Sakakibara, N. and Niwa, J.: Evaluation of the Relationship between Compressive Concrete Strain and Microcracks of Concrete by Using Acoustic Emission, 2010 Taiwan-Japan Joint Symposium on the Advancement of Urban Earthquake Hazard Mitigation Technology, 89-92, 2010.9
- ② 榊原直輝, 渡辺 健, 二羽淳一郎: 細骨材量および応力強度比に依存した若材齢モルタルの引張型基本クリープ, 土木学会第65回年次学術講演会概要集, V-167, pp333-334, 2010.9.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

特になし

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

渡辺 健 (WATANABE KEN)

公益財団法人 鉄道総合技術研究所・副主任研究員

研究者番号：40450746

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：