

論文 引張クリープの影響を考慮した若材齢モルタルのひび割れ発生メカニズムの検討

松本 浩嗣*1・榊原 直輝*2・二羽 淳一郎*3

要旨: 若材齢モルタルを用いた拘束リング試験をアコースティック・エミッション計測と併せて実施することで、若材齢モルタルの拘束ひび割れ発生メカニズムを、引張クリープひずみの発生によるリラクセーションおよび微視的破壊による強度低下に着目して検討した。その結果、細骨材量の増加に伴い、拘束ひび割れ発生時の自由収縮ひずみに対するクリープひずみの割合が大きくなり、リラクセーションの影響が無視できなくなること、また微視的破壊に起因するクリープひずみ成分によりモルタルの引張強度が低下し、割裂引張強度を下回る引張応力で拘束ひび割れが生じる傾向があることを明らかにした。

キーワード: 引張クリープ, 若材齢モルタル, 拘束リング試験, アコースティック・エミッション(AE)

1. はじめに

一般的に、コンクリートの収縮によるひび割れは、収縮が拘束されることにより生じる引張応力が引張強度に達した時に発生するとし、弾性計算により照査される。しかしながら、セメントペーストの収縮が顕著に生じる若材齢時は、脆弱部である骨材周辺の遷移帯(Interfacial Transition Zone: 以下, ITZ)で発生する微視的破壊が引張クリープを進行させる要因のひとつであり、引張強度が低下する可能性がある。応力が作用したコンクリートは一定のひずみ状態で、クリープによりリラクセーション(応力緩和)が生じる。そのため、より正確にひび割れ発生を予測するためには、リラクセーションによる引張応力の減少と微視的破壊による引張強度の低下を併せて考慮する必要がある。具体的には、ひび割れ予測解析に用いるコンクリートの材料モデルにクリープひずみを導入し、かつ引張強度をクリープひずみの発生に伴い低減するなどの措置が望まれる。

コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験方法には外部拘束型、一軸内部拘束型、リング型等があり、中でも一軸試験体の端部を外部拘束する手法が一般的であるが、特に強度発現が十分に進行していない若材齢時に端部の定着が滑り、コンクリートに作用する引張応力が減少する問題が報告されている²⁾。一方、リング型試験はコンクリートの打設直後から収縮を拘束することが可能であり、若材齢を対象とした本研究に適した手法と言える。

ところで、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、収縮拘束下のコンクリートに対して AE 計測を行うことで、拘束応力の上昇に伴って発生する微視的破壊を評価し、拘束ひび割れ発生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。

そこで本研究では、若材齢モルタルを用いた拘束リング試験を AE 計測と併せて実施し、若材齢時に収縮が拘束されるモルタルのひび割れ発生メカニズムを引張クリープひずみおよび微視的破壊に着目して検討した。試験対象は、骨材、セメントペーストおよび ITZ の 3 相構造を単純化して検討できるモルタルとし、微視的破壊に顕著な影響を及ぼす細骨材量を実験パラメータとした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 使用材料

表-1 に、本研究で用いたモルタルの配合を各材料の重量比で示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、細骨材には小櫃産陸砂(表乾密度 2.61g/cm³)を用いた。試験体中の ITZ の量の違いが収縮拘束下で生じる微視的破壊の発生程度に及ぼす影響を評価するため、細骨材量の異なる 3 種類のモルタルを作製した。モルタルの圧縮強度(材齢 28 日)は、全配合に共通して 47.8~49.5N/mm²である。

表-1 本研究で用いたモルタルの配合

配合名	水セメント比 (W/C)	砂セメント比 (S/C)	W:C:S (重量比)
S/C 2.0	0.40	2.0	4:10:20
S/C 1.0		1.0	4:10:10
S/C 0.5		0.5	4:10:5

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博士(工) (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 (学生会員)

*3 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)

(2) 試験体の形状・寸法

拘束試験体は外径 450mm, 内径 355.6mm, 厚さ 47.2mm, 高さ 100mm のリング状モルタル試験体であり, 内部に配置された鋼管(外径 355.6mm, 厚さ 12.7mm, 高さ 100mm)によりモルタルの収縮を拘束する。なお, 鋼管には JIS G 3444 に適合する一般構造用炭素鋼鋼管を用いた。また, 同一環境下で生じる自由収縮ひずみを測定するため, 内部に鋼管を配置しない, 拘束試験体と同一形状・寸法の自由収縮試験体も併せて作製した。

(3) 試験体の製作方法

拘束試験体の内周側には収縮拘束用の鋼管, 外周側には内径 450mm の紙製ボイド管を型枠として用いた。拘束試験体底面の摩擦を低減するため, 試験体底面に減摩パッドを 2 枚重ねて配置した。また, 拘束試験体内周側の鋼管外側に剥離剤を十分に塗布することで, 試験体の円周方向に拘束力が導入されないように配慮した。

モルタルの練混ぜには, 打設時のブリーディング量を少なくする目的でダブルミキシング法³⁾を採用した。打設後 24±1 時間, 温度 20°C の環境下で封緘養生を施した後, 外周側のボイド管型枠を脱型し, その後直ちに試験体の上下面をアルミテープで被覆した。乾燥面を試験体外側面に限定することで, 試験体高さ方向に依存しない変形を期待できる。なお, 内側に鋼管を配置しない自由収縮試験体に対しては, 内側面にもアルミテープを貼付することで拘束試験体と同一の乾燥条件を与えた。

2.2 試験条件

図-1 に, 拘束リング試験の様子を示す。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, 外環境から遮断可能な恒温恒湿器内に拘束・自由収縮両試験体を静置し, 試験を実施した。なお, 拘束リング試験の再現性を確認するため, S/C 2.0 に関しては 4 体の試験体を作製した。また, 恒温恒湿器の設定温湿度は, 温度 20°C, 相対湿度 60%である。

2.3 弾性係数試験および割裂引張試験

本研究で対象とする若材齢モルタルは, セメントの水和反応により時間の経過に伴いその強度特性が著しく変化する。そのため, 収縮拘束試験に先立ち弾性係数および引張強度の経時的な変化を, 以下に説明する手法で求めた。なお, これらの関係は 3 章の検討で用いる。

弾性係数は, 拘束試験体と同一形状・寸法のリング試験体を円周方向に 24 分割した試験体を用いて, 試験体高さ方向に一軸圧縮試験を行うことで求めた。試験で得られた応力-ひずみ曲線から, 縦ひずみが 50×10^{-6} になる点と, 最大荷重の 1/3 に相当する点を結ぶ割線の傾きを弾性係数とした。なお, 試験体高さ方向と円周方向の弾性係数, および拘束応力履歴を受けた試験体と履歴を受

けていない試験体の弾性係数が, それぞれほぼ等しいことを予備実験で確認している。

一方, 引張強度は直径 50mm の円柱試験体を用いた割裂引張試験で求めた。拘束試験体と同一の養生(乾燥)条件を模擬するため, 乾燥面の面積(S)に対する全体積(V)の比が拘束試験体のそれ($V/S=42\text{mm}$)と等しくなるよう, 円柱試験体の高さを 84mm としたうえで, 側面をアルミテープで被覆し乾燥面を上下面に限定した。なお, 割裂引張強度と一軸引張強度は異なる可能性があるため, 後述する強度と応力の比較は相対的なものである。

2.4 計測項目

(1) 拘束試験体

鋼管内側面のひずみ, 拘束試験体外側面のひずみおよび AE を計測した。図-2 に, ひずみゲージと AE センサの貼付位置を示す。鋼管にはゲージ長 2mm, モルタルには同 60mm のひずみゲージを用いた。なお, セメント水和熱による鋼管の温度変化に対して鋼管ひずみの測定値を補正するため, 鋼管内側面の温度を熱電対で計測した。

(2) 自由収縮試験体

自由収縮試験体の内外両側面でひずみの計測を行った。自由収縮試験体の内側面はアルミテープにより被覆され湿潤環境となっているため, ひずみゲージに防湿処理を



図-1 拘束リング試験の様子

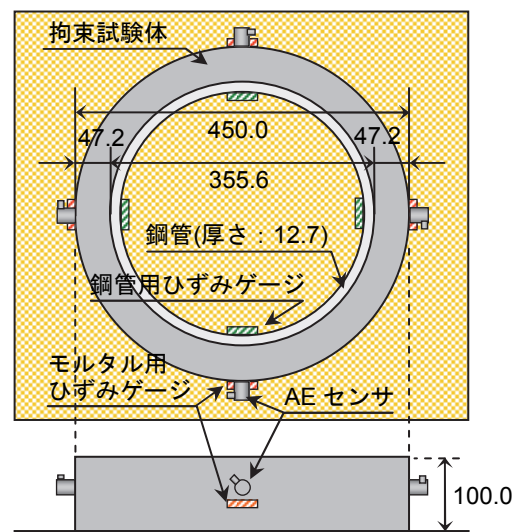


図-2 ひずみゲージおよび AE センサ貼付位置
上: 平面図, 下: 立面図(単位: mm)

施している。なお、防湿処理がひずみの計測値に影響しないことを予備実験で確認している。

2.5 AE 計測概要およびデータ抽出法

150kHz 共振型の AE センサを用い、プリアンプの増幅値を 60dB、しきい値を 38dB に設定して計測を行った。図-5 に AE 波の模式図を、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 イベント数の算出に用いる。なお、本研究ではカウント数が 2 以上、かつ Ohtsu ら⁴⁾の報告に基づき「Tensile crack」に分類された AE のみを検討で用いた。ここで「Tensile crack」は破壊の進行に寄与する AE であり、その他の 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

3.1 弾性係数および引張強度

図-4、図-3 に弾性係数、引張強度の経時変化をそれぞれ示す。ある一定材齢において、弾性係数は細骨材量の増加に伴い大きくなる傾向が見られたが、割裂引張強度に関しては、細骨材量による違いは僅かであった。これらの関係の対数近似式を、以下の検討で用いる。

3.2 鋼管ひずみ

表-2 に本研究における試験ケースを、主な試験結果と併せて示す。各試験体のひずみの値は、円周方向に沿って貼付した 4 枚のひずみゲージで計測した値の平均値である。表-2 より、拘束ひび割れ発生材齢は、細骨材量の減少に伴い短くなることが確認できる。自由収縮ひずみの進展速度はクリープひずみの大きさとリラクゼーション量に影響するため、拘束ひび割れ発生材齢の長短を決める主要因になると考えられる。

図-7 に鋼管ひずみの測定結果を示す。鋼管がモルタ

ルの収縮を拘束することにより、時間の経過とともに鋼管の圧縮ひずみが増加していることが確認できる。脱型後(材齢 1.0 日以降)、ひずみの増加速度は時間の経過とともに減少し、拘束ひび割れ発生時にひずみの値が急激に 0 に近づいている。このことから、拘束ひび割れ発生時に鋼管に作用する応力がほぼ解放されていることが確認でき、拘束試験体と鋼管の境界面における付着はほとんど除去されていると判断できる。なお、全ケースにおいて、試験体を半径方向に貫通する拘束ひび割れ 1 本のみが発生した。また、内側と外側でひび割れ幅の相違は認められず、発生位置にも規則性は認められなかった。

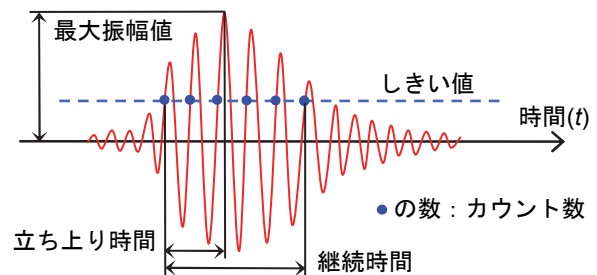


図-5 AE の波形パラメータ

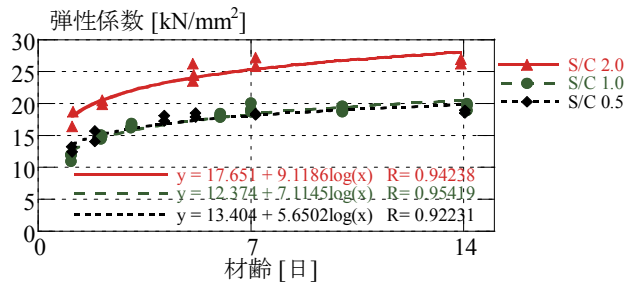


図-4 材齢と弾性係数の関係

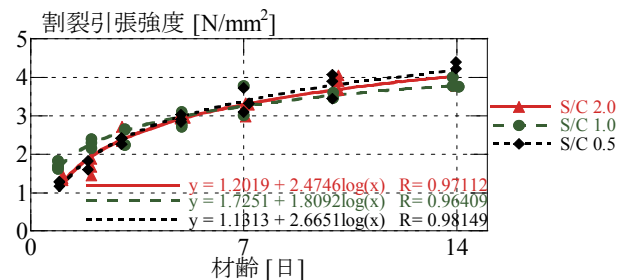


図-3 材齢と割裂引張強度の関係

表-2 各試験ケースの試験結果概要

試験体名	S/C	拘束ひび割れ発生材齢 [日]	鋼管ひずみ最大値* [$\times 10^{-6}$]	自由収縮ひずみ* [$\times 10^{-6}$]	
				拘束ひび割れ発生時	材齢 4.5 日時
S/C 2.0-1	2.0	4.56	-41.5	-176.3	-174.5
S/C 2.0-2		4.79	-54.9	-172.0	-161.5
S/C 2.0-3		4.88	-45.4	-165.0	-153.3
S/C 2.0-4		4.16	-43.4	-165.3	-170.0
S/C 1.0	1.0	2.84	-43.5	-179.0	-254.5
S/C 0.5	0.5	1.65	-38.5	-98.8	-274.8

* 圧縮ひずみを負、引張ひずみを正とする。

3.3 拘束試験体に生じる引張応力

Swamy ら⁵⁾が提案した式(1)を用いて、拘束試験体に生じる円周方向の引張応力を算出する。式(1)は、鋼管に働く円周方向の圧縮応力が半径方向に線形分布していると仮定したうえで、鋼管に生じる円周方向の圧縮力と拘束試験体に生じる同方向の引張力のつりあいから、拘束試験体に働く円周方向の平均引張応力を算出する式である。

$$\sigma_{t_avg} = -\varepsilon_{IS} E_s \frac{(R_{IC} - R_{IS})}{2(R_{OC} - R_{IC})} \left(1 + \frac{R_{IS}^2 + R_{IC}^2}{2R_{IC}^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 σ_{t_avg} : 拘束試験体円周方向の平均引張応力、 ε_{IS} : 鋼管内側面のひずみ(測定値)、 E_s : 鋼管の弾性係数(184.8kN/mm²: 実測値)、 R_{IS} : 鋼管の内径、 R_{IC} ・ R_{OC} : 拘束試験体の内径および外径である。また、鋼管の外径を併せて R_{OS} と定義する。なお、本試験では試験体外側面のみを乾燥面としているが、前述したように内側と外側とで拘束ひび割れ幅に差異が認められなかったため、半径方向のひずみ分布の影響は無視できるものとした。

図-8 に、拘束試験体に作用する平均引張応力と、割裂引張強度の比較を配合ごとに示す。S/C 2.0 および S/C 1.0 の試験体では、拘束ひび割れ発生時の引張応力が同材齢の割裂引張強度を大きく下回っており、S/C 2.0 では割裂引張強度の 74%(平均値)、S/C 1.0 では同 78%の引張応力で拘束ひび割れが発生した。若材齢時のコンクリートを対象とした既往の研究⁹⁾においても同様の現象が報告されており、若材齢時のクリープにより引張強度が低下したと考えられる。一方 S/C 0.5 では、割裂引張強度の 102%の引張応力で拘束ひび割れが発生し、S/C 2.0 および S/C 1.0 の試験体で観測されたような顕著な強度低下は確認されなかった。配合の違いに起因するクリープメカニズムの違いがその一因として考えられる。

3.4 引張クリープひずみ

拘束試験体に生じる引張クリープひずみを、島ら⁷⁾が提案した手法で算出する。図-6 に、クリープひずみ算出のために仮定する拘束試験体内側面(鋼管外側面)における変形の適合条件を示す。

拘束試験体内側面において、拘束力により生じる半径

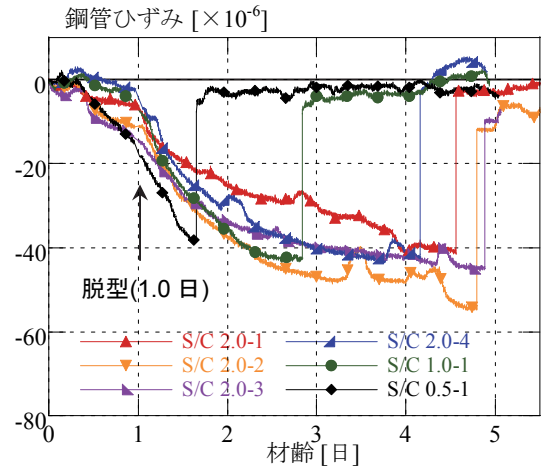


図-7 各試験ケースの鋼管ひずみ

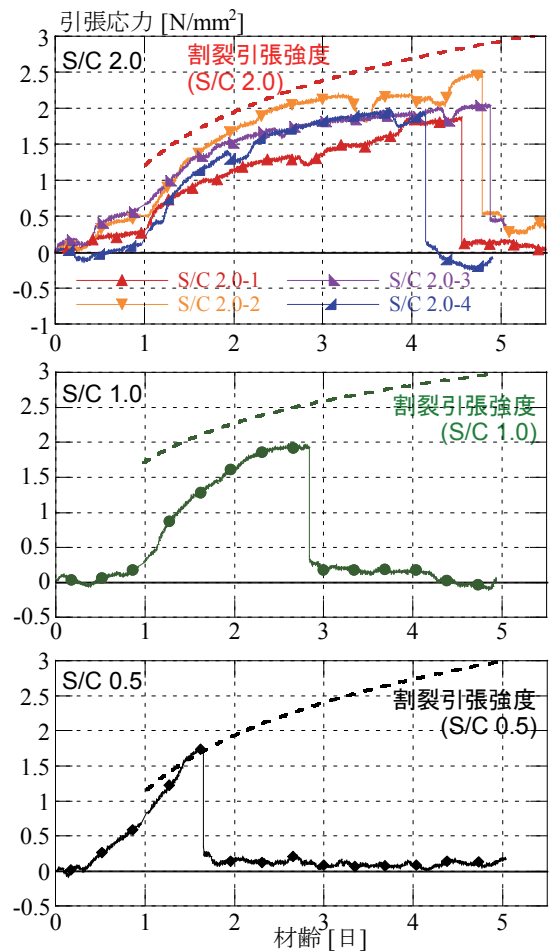


図-8 引張応力と割裂引張強度の比較

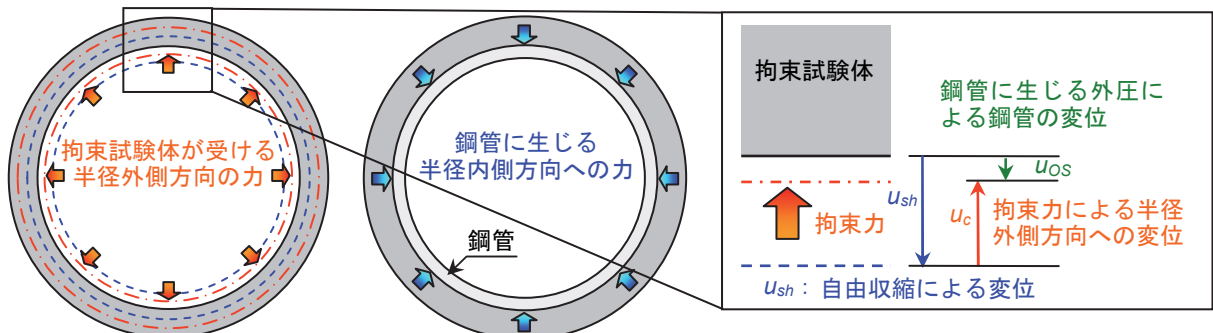


図-6 拘束試験体と鋼管の境界面における変形の適合条件

外側方向への変位 u_c が、自由収縮による変位 u_{sh} から鋼管外側面の半径内側方向への変位 u_{OS} を差し引くことで求まるとすると、拘束力により生じる拘束試験体の円周方向のひずみ ε_c は式(2)で求まる。

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{R_{IC}} = \frac{u_{sh} - u_{OS}}{R_{IC}} \quad (2)$$

次に、 ε_c が弾性ひずみ ε_e とクリープひずみ ε_{cr} の和であると仮定すると、拘束試験体円周方向のクリープひずみ ε_{cr} は自由収縮ひずみ $\varepsilon_{sh}(=u_{sh}/R_{IC})$ を用いて式(3)で表される。

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_c - \varepsilon_e = \varepsilon_{sh} - \frac{u_{OS}}{R_{IC}} - \frac{\sigma_{t-avg}}{E_C} \quad (3)$$

ここで、 u_{OS} は鋼管内側面のひずみ測定値 ε_{IS} を用いて、式(4)で求まる。

$$u_{OS} = \frac{1}{2R_{OS}} \left\{ (1-\nu_s)R_{OS}^2 + (1+\nu_s)R_{IS}^2 \right\} \cdot \varepsilon_{IS} \quad (4)$$

ここで、 ν_s は鋼管のポアソン比であり $\nu_s=0.3$ とする。また、弾性ひずみ ε_e の計算には、式(1)で算出される拘束試験体に作用する平均引張応力 σ_{t-avg} と図-4 に示す弾性係数の値を用いる。弾性係数 E_C の値は、引張応力下で測定されたものであることが望ましいが、既往の研究においても引張および圧縮弾性係数の大小関係に関して未だ統一した見解が得られていない⁸⁾ため、本研究ではそれらの値が同等であると仮定し、2.3 節に示す手法により求めた弾性係数を用いることとした。

表-3 に、上記の手法で算出した、各試験体の拘束ひび割れ発生時のクリープひずみを示す。なお、同一材齢における自由収縮ひずみの大きさが配合によって大きく異なるため、同材齢での自由収縮ひずみ ε_{sh} に対するクリープひずみ ε_{cr} の割合 ($\varepsilon_{cr}/\varepsilon_{sh}$) を併記している。さらに、各種ひずみの経時変化および材齢 1 日ごとの $\varepsilon_{cr}/\varepsilon_{sh}$ の変化を、S/C 2.0-3 を例として図-9 に示す。なお、図-7 に示されているように、材齢 1 日目の乾燥開始前に生じる自己収縮により導入される応力が比較的小さいことから、本検討では乾燥開始後の結果のみを議論することとした。表-3 より、拘束ひび割れ発生までに生じるクリープひずみの自由収縮ひずみに対する割合は、S/C 0.5 および S/C 1.0 で約 20%、S/C 2.0 で 41%(平均値)となり、細骨材

表-3 クリープひずみ算出結果(拘束ひび割れ発生時)

試験体名	クリープひずみ [$\times 10^{-6}$]	自由収縮ひずみに対するクリープひずみの割合
S/C 2.0-1	81.1	0.46
S/C 2.0-2	49.5	0.29
S/C 2.0-3	80.6	0.49
S/C 2.0-4	65.6	0.40
S/C 1.0	40.3	0.23
S/C 0.5	18.7	0.19

量の増加に伴いその割合が大きくなる傾向が見られた。

応力強度比を一定に保った若材齢コンクリート(またはモルタル)の引張クリープ試験では、単位セメント量の減少、すなわち単位骨材量の増加に伴い同一載荷期間でのクリープひずみが減少することが報告されている¹⁾。しかしながら、本研究で実施した収縮拘束試験において、細骨材量が大きい試験体では、拘束ひび割れ発生材齢が長くなることに起因して時間の経過とともにクリープひずみが増大し、拘束ひび割れ発生時に着目すると、最終的にクリープひずみの自由収縮ひずみに対する割合が増加した(図-9)。このことは、拘束ひび割れ発生メカニズムに対するクリープの影響が大きくなったことを示しており、それに伴い大きなリラクセーションが生じたことが予想される。リラクセーションは試験体に作用する引張応力を緩和し拘束ひび割れ発生材齢を長くするため、特に細骨材量の大きい試験体では、リラクセーションを引き起こすクリープひずみを適切に考慮することで、より正確なひび割れ発生予測が可能になると考えられる。一般的なコンクリートの砂セメント比(S/C)が 2~3 であることを考慮すると、このことはコンクリートに対しても同様と考えられ、拘束ひび割れ発生を予測する際にクリープひずみを考慮する必要性を示唆している。

3.5 AE パラメータの検証

2.5 節で述べた条件に従い各試験体の AE イベント数を算出し、図-10 に S/C 2.0-3、S/C 1.0、S/C 0.5 の拘束ひび割れ発生までの AE イベント累積値-材齢関係を、全ひずみ-材齢関係と比較して示す。収縮拘束試験では、時間の経過に伴い弾性ひずみとクリープひずみがともに増加するため、拘束試験体内部で生じる AE(微視的破壊)を全ひずみと関連付けて検討した。また、S/C 2.0 の試験体では、AE 計測を行った全ての試験体で同様の AE 計測結果が得られたため、各種ひずみの経時変化(図-9)と同様、S/C 2.0-3 を例として示す。なお、全ひずみは式(2)から求まる拘束試験体円周方向のひずみ ε_c である。

図-10 より、S/C 2.0-3 では AE イベント累積値と全ひずみの経時変化に強い相関性が確認できる。AE イベント累積値、全ひずみともに、時間の経過とともに単位時

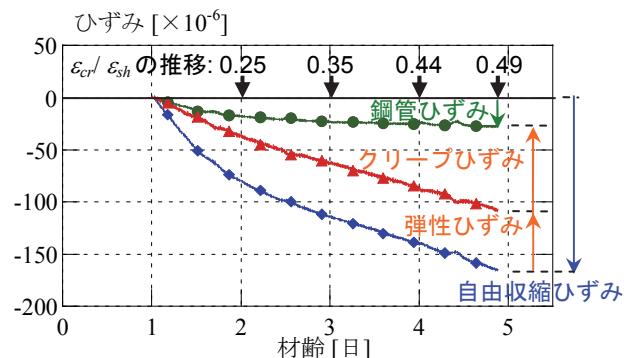


図-9 各種ひずみ算出結果の例(S/C 2.0-3)

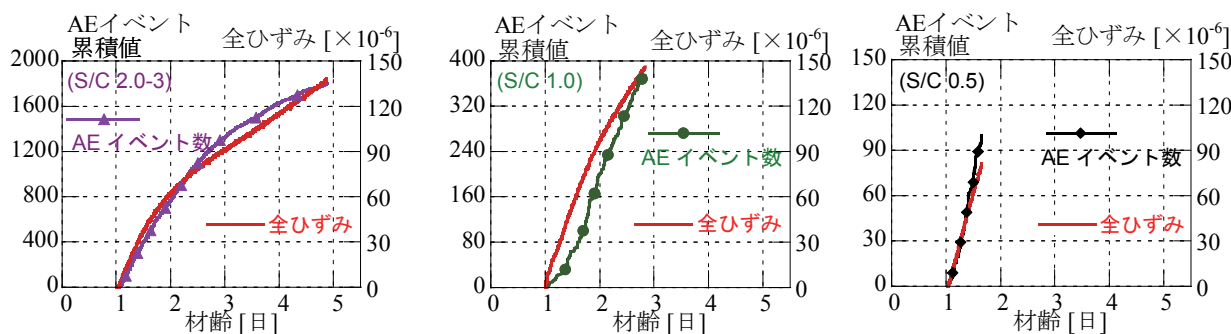


図-10 AE イベント累積値と全ひずみの経時変化(左: S/C 2.0-3, 中央 S/C 1.0, 右 S/C 0.5)

間あたりの増分が減少する傾向があり、その傾向は拘束ひび割れ発生直前まで変化しなかった。また、脱型直後に AE イベントが多く計測されたことから、作用する引張応力が比較的小さい段階から、強度が十分に発現していないために多くの微視的破壊が発生し、全ひずみが増加したものと考えられる。S/C 1.0 および S/C 0.5 では拘束ひび割れ発生材齢が非常に短いものの、S/C 2.0-3 と同様にそれらの関係は相関しており、AE イベント累積値が全ひずみで一義的に表すことができる可能性を示唆している。なお、S/C 0.5 では自己収縮の影響も懸念されるが、既往の一軸引張試験において、どの荷重段階でも AE イベントがほとんど発生しなかった¹⁾ことから、材齢 1 日目の AE イベント累積値はほぼゼロと考えられる。

次に、ある一定の全ひずみ増分に対する AE イベント数に着目する。図-10 より、全ひずみが 60×10^{-6} となるまでに計測された AE イベント数は、S/C 2.0-3 で約 750 であるのに対し、S/C 0.5 では僅か 70 程度であった。このことから、細骨材量を減らしたことにより脆弱部である ITZ の量が減少し、微視的破壊の発生頻度が減少したとともに、全ひずみが生じる支配的なメカニズムが弾性ひずみと塑性流動(水分移動)によるものに変化したと考えられる。一方、細骨材量の大きい試験体では、全ひずみに対する AE イベント数が大きい。3.3 節で述べたように、本研究では S/C 2.0 および S/C 1.0 の試験体で拘束ひび割れ発生時に大幅な強度低下が確認されたが、これは細骨材量の増加に伴って微視的破壊に起因するクリープひずみ成分が増加したためと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 拘束ひび割れ発生時の自由収縮ひずみに対するクリープひずみの割合は、細骨材量の増加に伴って大きくなる。
- (2) 拘束リング試験体の円周方向に生じる全ひずみと AE イベント累積値の関係には相関性があり、同一配合の場合、ある一定の全ひずみ増分に対する AE イベント数は、作用応力レベルに依らずほぼ一定である。
- (3) 細骨材量の違い、すなわち ITZ の量の違いによって、

モルタルに全ひずみを生じさせる支配的なメカニズムが変化し、全ひずみに対する微視的破壊貢献分の割合が変化することが、AE 計測の結果から示された。

- (4) 細骨材量の増加に伴い、拘束ひび割れ発生時に作用する応力が割裂引張強度よりも小さくなる傾向がある。これは、細骨材量が大きいほど ITZ の量が増加し、クリープにおける微視的破壊の貢献分が増加することで強度が低下するためと考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺健, 榊原直輝, Weiss, W. J., 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
- 2) 大野俊夫, 魚本健人: コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.29-44, 2000.11
- 3) 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
- 4) 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, Mar.-Apr.2008
- 5) Swamy, R. N. and Stavrides, H.: Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking, ACI Journal, Vol.76, No.3, pp.443-460, Mar.1979
- 6) 大野俊夫, 魚本健人: 乾燥収縮ひび割れ発生時の引張伸び能力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.733-738, 1997
- 7) 島弘, 市川大介: 円環状試験体を用いた乾燥収縮が拘束される応力履歴下におけるコンクリートの引張クリープの測定, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.477-489, 2009.10
- 8) 青木優介, 平野雄大, 鈴木孝治, 嶋野慶次: 直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.531-536, 2007