

論文 収縮低減型混和剤を用いたコンクリートの収縮ひび割れ低減効果に関する検討

小川 亜希子^{*1}・今本 啓一^{*2}・西 祐宜^{*3}・小池 晶子^{*3}

要旨：コンクリートの収縮ひび割れ低減のための対策として、本論文では収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートについて、拘束率を一定に制御可能な一軸拘束試験による収縮ひび割れ試験及び経時的な直接引張試験を行い、収縮ひび割れ抵抗性の定量的検討を行った。その結果、高性能 AE 減水剤を用いたものと比較して、収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートのひび割れ材齢が延びる傾向が見られた。一方、両者の圧縮・引張強度及び拘束試験におけるクリープなどの差は見られず、このことから自由収縮ひび割れの低減分が直接的に収縮拘束応力の低減に作用し、ひび割れ低減効果を生み出すことが分かった。

キーワード：乾燥収縮、ひび割れ、拘束応力、収縮低減剤、クリープ、引張強度

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れはその耐久性に大きな影響を及ぼす要因の一つである。このため、構造物における収縮ひび割れを抑制するために材料レベルで収縮ひび割れを低減するための方策がとられる。このような中で、調査面で単位水量を低減するなどの方策や膨張材を用いるといった対策とともに近年用いられる材料の一つに収縮低減剤がある。この収縮低減剤の作用機構については古くから研究¹⁾がなされ、収縮低減効果に一定の成果を挙げているが、一方で凍結融解抵抗性が低下するなどの報告もあり、コンクリートの総合的な品質を確保するためには検討の余地を残している。さらにこの種の収縮低減剤を用いる上で、収縮ひび割れを低減することが収縮ひび割れの低減にどの程度寄与するかといった定量的な情報が十分に蓄積されていないケースが多く、実構造物への適用にあたっての障壁となることが多い。

そこで、収縮低減剤の長所を残しながらその欠点を極力排除してコンクリートの総合的な品質を確保する材料（収縮低減型混和剤）を提案し、さらにこの収縮低減型混和剤の収縮ひび割れ低減効果を定量的に検討することは重要な意義を持つ。

本論文は収縮低減型混和剤を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性について、高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートとの比較の下に定量的な検討を行った結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び調査

使用材料及び計画調査を表 - 1 及び表 - 2 に示す。フ

レッシュコンクリートのスランプ及び空気量の目標値はそれぞれ 18.0cm 及び 4.5% とした。

また、本研究は収縮低減剤の添加量がコンクリートの収縮ひび割れ性状に及ぼす影響について実験・検討を行ったものである。以下に、本研究で使用する主な混和剤の概要を示す。

(1) 高性能 AE 減水剤

標準形 種であり、主成分はポリカルボン酸系化合物である。

(2) 収縮低減型高性能 AE 減水剤

標準形 種（収縮低減タイプ）であり、主成分はポリカルボン酸系化合物とグリコールエーテル系誘導体、概要は高性能 AE 減水剤に収縮低減性能を付与したものである。

表 - 1 使用材料

W: 水	上水道水
C: セメント	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
S: 細骨材	掛川産砂(表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.04%, 粗粒率2.82)
G: 粗骨材	青梅産碎石(表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.59%)
混和剤	シリーズ1(Ad): 高性能AE減水剤標準形 シリーズ2(SRA): 高性能AE減水剤標準形収縮低減タイプ

表 - 2 計画調査

	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]				混和剤添加率 [C*%]
			W	C	S	G	
シリーズ1 (Ad)	45	48	175	389	813	910	0.63
シリーズ2 (SRA)							1.1

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学 工学部 建築学科 准教授 工博 (正会員)

*3 株式会社 フローリック 技術本部コンクリート研究所 (正会員)

2.2 試験項目

2.2.1 自由収縮試験

自由収縮試験体の形状は 100×100×500mm であり、中央部分には埋込式ひずみゲージを設置しひずみを計測する。試験体は同条件で 3 体作成し、自由収縮ひずみの計測値は 3 体の平均値とする。

試験体は打設後、型枠内で乾燥開始材齢である材齢 7 日まで封緘養生とする。脱型後すぐに恒温恒湿室(20℃, R.H 60%) に移動し、床上に静置する。乾燥開始時刻は拘束ひび割れ試験の開始と同時刻とし、計測間隔は 30 分とする。

2.2.2 拘束ひび割れ試験

本研究で使用する拘束ひび割れ試験装置²⁾(図-1)の特徴は、自由収縮ひずみと拘束試験体の実ひずみから算出される拘束率(式(1))を一定に制御しながら、その時発生する荷重(拘束応力)をリアルタイムで計測できる点にある。これにより実構造物に応じた拘束率を再現した材料性能評価が可能となる。本研究では拘束率を 80, 60, 50% に設定し、制御間隔を 15 分(計測間隔は 30 分)として拘束応力及び実ひずみデータを計測した。

拘束ひび割れ試験体は 100×100×945mm の柱状のもので、その中央部分に埋込式ひずみゲージを設置する。試験体は各拘束率で 1 体ずつとする。養生条件については自由収縮試験体と同じとする。

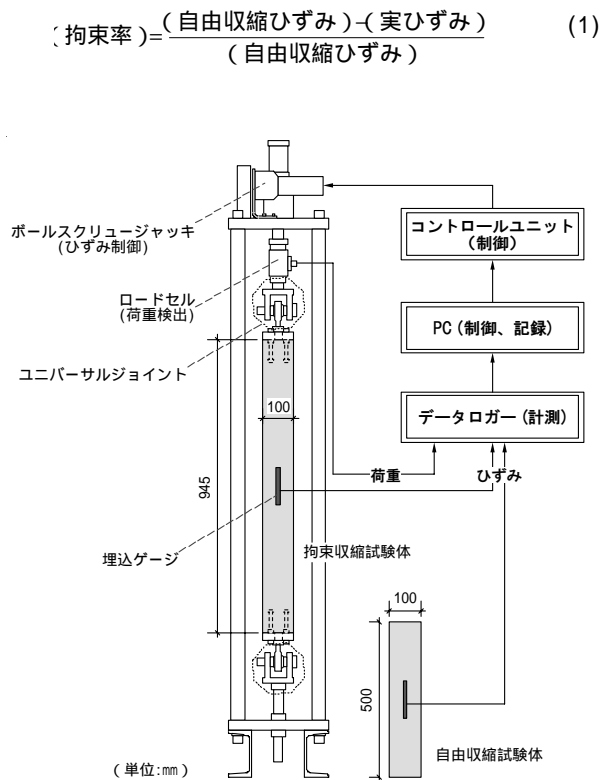


図-1 拘束ひび割れ試験装置

2.2.3 圧縮・割裂引張強度試験及び圧縮ヤング係数試験

圧縮試験方法は、JIS により圧縮強度試験(JIS A 1108)及び圧縮ヤング係数試験(JIS A 1149)にそれぞれ従い行う。割裂引張強度試験(JIS A 1113)も同様に行う。

試験体は 100×200mm のものを各 3 体ずつ用意し、材齢 7, 14, 28, 56 日にて試験を行う。打設後 7 日間は自由収縮試験及び拘束ひび割れ試験体と同一条件で封緘養生し、脱型後は各試験材齢まで恒温恒湿室内で気中養生とする。

2.2.4 直接引張強度試験及び引張ヤング係数試験

本研究では引張強度試験として、割裂引張試験と並行し直接引張試験を行う。試験体形状(図-2, 写真-1)は 100×100×500mm のもので、中央 300mm は断面を 100×80mm としたダンベル型のものである。試験材齢及び試験体数は他の強度試験と同じとする。

載荷速度は JIS を参照し、割裂引張強度試験での載荷速度範囲内で載荷する。また試験体中央部には自由収縮試験及び拘束ひび割れ試験と同様の埋込式ひずみゲージを設置し、ひずみを測定する。引張ヤング係数は、引張強度の 1/3 における割線弾性係数として算出する。

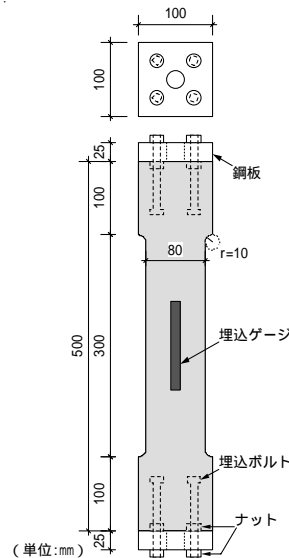


図-2 直接引張強度試験体



写真-1 直接引張試験状況図

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

表-3 にフレッシュ性状を示す。試験項目はそれぞれ JIS によりスランプ(JIS A 1101), 空気量(JIS A 1128), コンクリート温度(JIS A 1116)に従って行った。コンクリートの打設はいずれも 20℃ の実験室内で行った。高性能 AE 減水剤を用いたもの(以下, Ad)に比べ収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリート(以下, SRA)はスランプが小さくなる傾向がみられたが、その他の項

目では大差ない結果となった。いずれもワーカビリティとして問題のないコンクリートが得られた。

表 - 3 フレッシュ性状

	スランブ	空気量	コンクリート温度
	[cm]	[%]	[]
シリーズ1 (Ad)	21.7	4.2	22.0
シリーズ2 (SRA)	17.9	4.1	23.5

3.2 強度試験結果

圧縮強度試験、割裂引張強度試験及び直接引張強度試験結果を図 - 3 に示す。圧縮強度及び割裂引張強度については、どの材齢においても Ad と SRA にほとんど差は生じなかった。

直接引張強度試験においては、いずれも乾燥開始から一度強度が低下する傾向が見られた。この原因について、乾燥開始によってコンクリート表面及び内部の間に乾燥収縮量の差（湿度勾配）が生じることでコンクリートに内部拘束応力が発生したことが考えられる。強度試験時にはすでに試験体表面に引張応力が生じた状態で引張力を受けることにより、見かけ上低い荷重で破断に至ったのではないと思われる。

強度低下の傾向は SRA の方が大きいものの、その後再び強度は上昇し、材齢 56 日では Ad と同程度かそれ以上の強度が得られた。

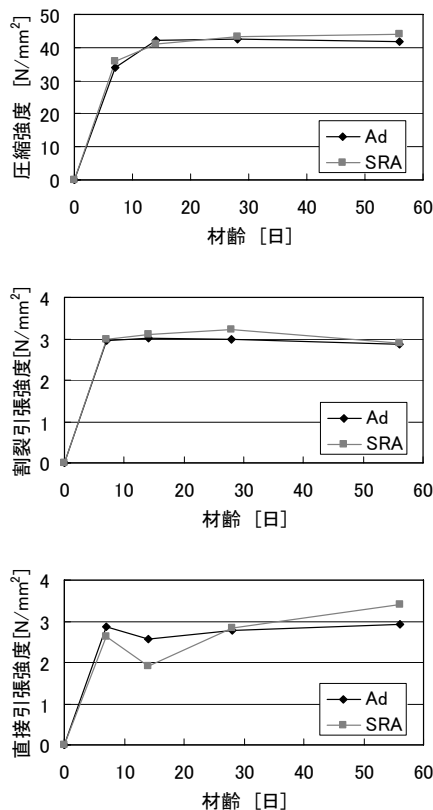


図 - 3 強度試験結果

また、図 - 4 に割裂引張強度と直接引張強度を比較したものを示す。両強度を比較した論文は過去にも書かれている。一般的に直接引張強度は割裂引張強度に比べて低い傾向があるとされているが、本研究の結果も、全体的に割裂引張強度が直接引張強度を上回る傾向が見られたが、その誤差は一割程度の範囲内に収まった。

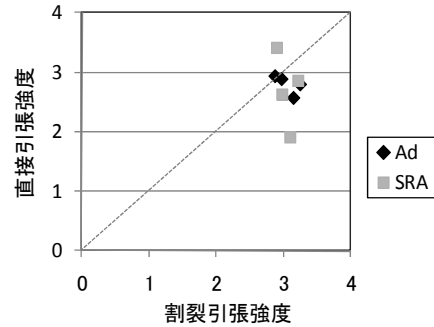


図 - 4 引張強度比較

3.3 ヤング係数

図 - 5 に圧縮ヤング係数及び引張ヤング係数を示す。いずれのシリーズも圧縮・引張ともに載荷材齢の材齢 7 日から材齢 56 日までほとんど値が変化しないという結果になった。

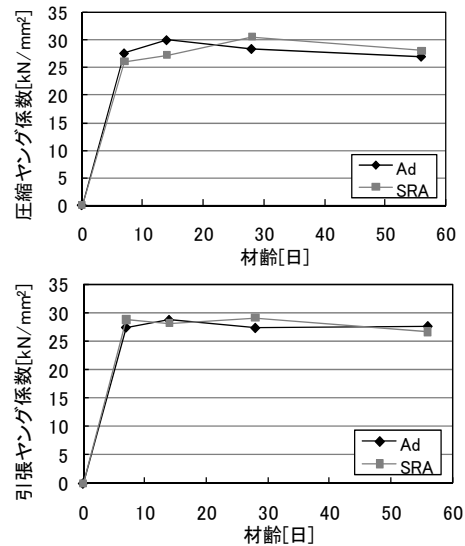


図 - 5 ヤング係数試験結果

また、両ヤング係数を比較したものを図 - 6 に示す。グラフからも分かるように、両者の値は良い相関関係が見られ、ヤング係数に関しては圧縮・引張ともほぼ同値となることが分かった。

なお、これより以降の応力強度比及びクリープひずみなどの検討では、全て引張ヤング係数結果を使って算出及びフィッティングを行っている。

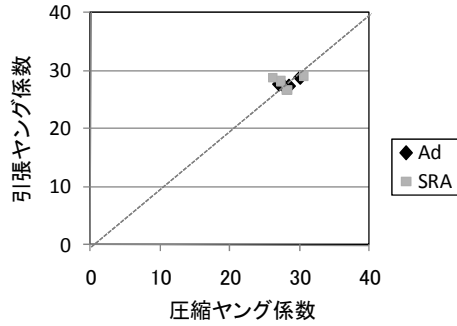


図 - 6 ヤング係数比較

3.4 拘束ひび割れ試験結果

3.4.1 ひび割れ発生材齢

図 - 7 は、各シリーズそれぞれの拘束率試験体のひび割れ材齢を比較したものである。ひび割れ発生の判断は、試験体破断時あるいは最大応力時の材齢（例えば、可視的ひび割れの発生しなかった SRA 拘束率 50%）とする。拘束率 60% では SRA の方が先に破断したが、拘束率 50% 及び 80% では、SRA のひび割れ発生材齢が Ad に比べて大幅に遅れる結果となった。

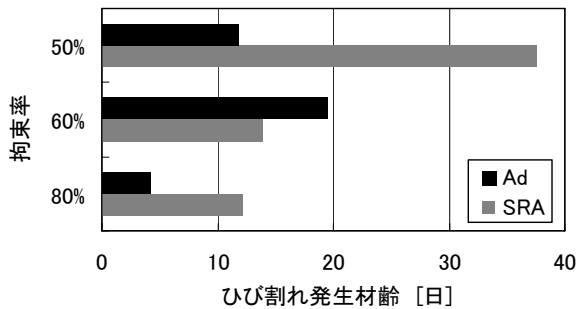


図 - 7 ひび割れ発生材齢

3.4.2 自由収縮ひずみ

図 - 8 に自由収縮ひずみ変化を示す。SRA の収縮低減剤添加率は少量であるが、乾燥初期段階からその収縮ひずみが低減しているのが分かり、SRA に含まれる収縮低減剤の効果が顕著にみられる結果となった。

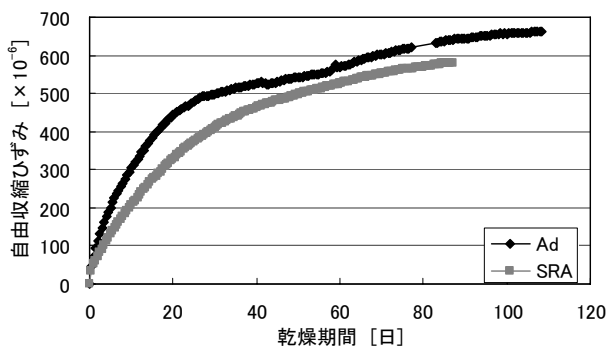


図 - 8 自由収縮ひずみ変化

3.4.3 拘束応力変化

図 - 9 に拘束応力変化を示す。なお、図中の凡例については記号の後に記述した数字が拘束率を示している。いずれも拘束率 80% が最初に破断する結果となり、また拘束率の大きいものほど載荷初期から応力が上昇する傾向がみられた。同じ調合で比較すると、Ad は拘束率によらず拘束応力の終局値がほぼ同程度となったが、SRA は拘束率 50% の終局値が他に比べて大きくなった。

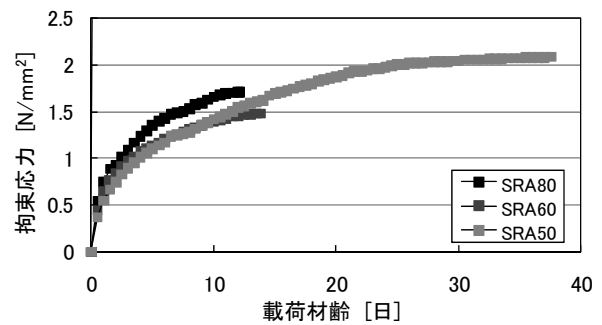
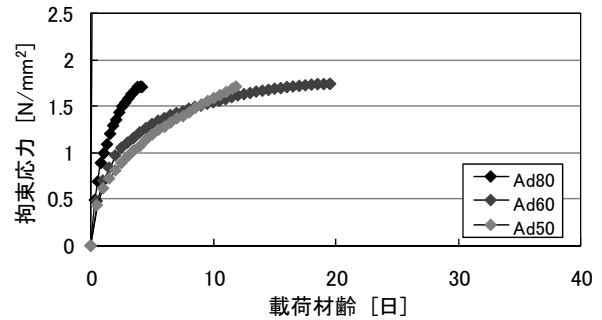


図 - 9 拘束応力変化

3.5 収縮応力強度比

図 - 10 に応力強度比を示す。応力強度比とは、ひび割れ発生時の拘束応力をその材齢における引張強度で除した値である。一般に、コンクリートのひび割れは引張強度よりも低い応力で発生し、応力強度比にして 0.7 程度とされている。またひび割れ発生材齢が遅くなるほどその値は大きくなる傾向があるとされる³⁾。

図は前年度の実験結果⁴⁾も併せて示したものである。3.3 で示したように、応力強度比の算出では直接引張強度を採用した。図より、応力強度比は、これまでの実験結果に示されるように必ずしもひび割れ発生材齢が遅くなることによりその値が大きくなる傾向を示すものではないが、ひび割れ発生時の応力強度比の大きさは、本研究ではいずれも 0.6~0.8 の間に収まる結果となった。また両者の値にほとんど差は見られず、また拘束率による値の差も見られなかった。

また、図 - 11 には拘束ひび割れ試験体と同一養生下の直接引張試験強度を用いた応力強度比の経時変化を示

す。拘束率ごとに比較すると、各強度試験材齢においていずれも応力強度比の発現はSRAの方がAdに比べて緩やかなものとなっている。このため、Adについては乾燥初期の段階で破断時に近い値まで急速に上昇する傾向が見られた。

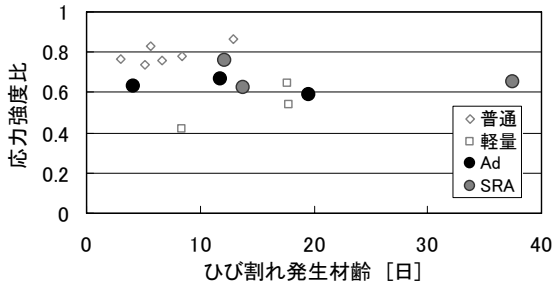


図 - 10 直接引張強度による収縮応力強度比の分布

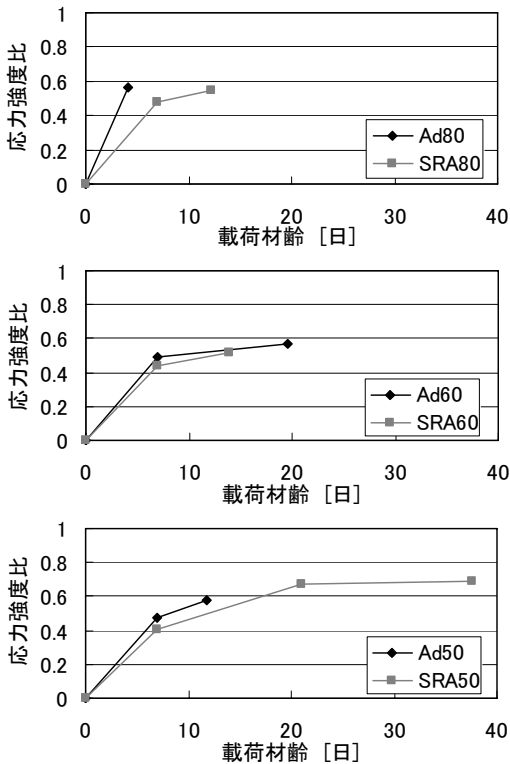


図 - 11 応力強度比の経時変化

3.6 クリープひずみ

図 - 12 は、同一の自由収縮ひずみに対する、載荷時に生じている単位応力度あたりのクリープひずみを示したものである。クリープひずみの計算にあたり、より精緻な値を得るため、直接引張試験により得られた引張ヤング係数を用い、一軸拘束試験における拘束ひずみ中の弾性ひずみとクリープひずみを分離した。なお、ここでこのクリープひずみは、マイクロクラックなどの発生によるひずみも含めたもので、計算上の弾性ひずみ以外の全ひずみ量という概念で捉えたものである。

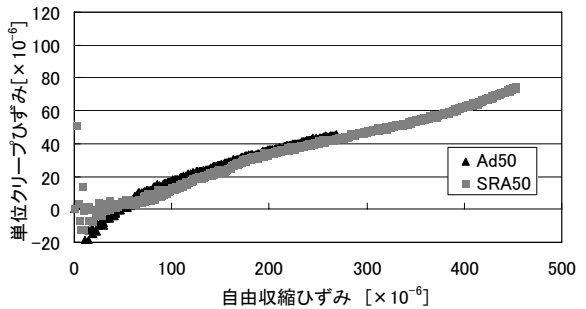
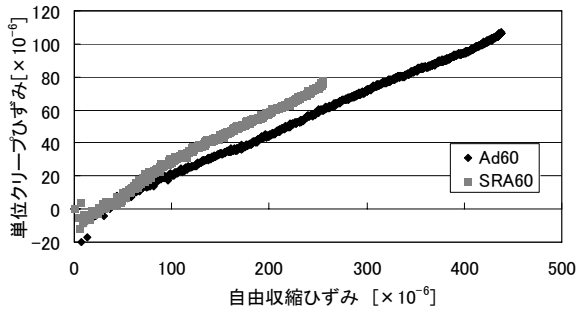
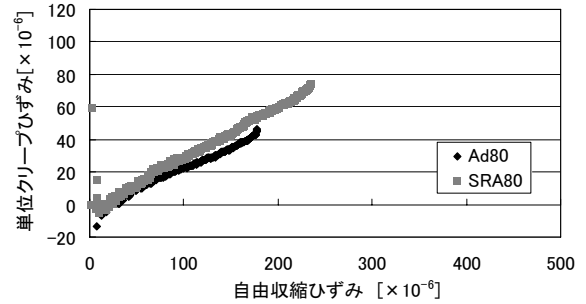


図 - 12 クリープひずみの変化

乾燥状態にあるコンクリートのクリープ試験について、「乾燥クリープ」という言葉があるように、一般的にクリープひずみは収縮ひずみの増大によってその値も増大すると考えられている⁵⁾。それゆえ、本研究において収縮ひずみが低減された SRA においては逆にクリープひずみの値も減少することが予想されるが、図 - 12 に示されるように両者にほとんど差は見られなかった。一方で、いずれも拘束率の上昇に伴いクリープひずみが増大する傾向がみられ、このことから収縮拘束応力の予測計算にあたっては、従来の弾性範囲の載荷に基づくクリープではなく、このような拘束応力下のクリープひずみに基づいて実施することが必要であると考えられる。

4. 今後の展望

4.1 実構造物レベルでの評価へ向けて

本研究で行なっている一軸拘束試験機による拘束ひび割れ試験について、この実験結果を実構造物レベルでの検討に応用させるため、以下の試みを行なった。

文献 3) に示される有効ヤング係数法(式(2))によって収縮拘束応力を算定する。なお今回は、Ad:拘束率 50% ($\alpha = 0.5$) を例に以下記述する。

$$\sigma_{sr}(t) = \sum \frac{E(t')}{(1 + \phi(t, t'))} \lambda(t') \Delta \epsilon_f(t') \quad (2)$$

ここに、

$\sigma_{sr}(t)$: 材齢 t における収縮拘束応力の予測値 (N/mm²)

t : 試験体の載荷材齢 (日)

t' : 自由収縮ひずみに変化が生じた材齢 (日)

$E(t')$: 材齢 t' におけるヤング係数 (N/mm²)

$\phi(t, t')$: 材齢 t' に載荷された材齢 t における
クリープ係数

$\lambda(t')$: 材齢 t' における拘束率

$\Delta \epsilon_f(t')$: 材齢 t' における自由ひずみの変化量

拘束率 λ は一定とし、収縮ひずみ増分 $\Delta \epsilon_f$ は図 8 の実測値、ヤング係数 $E(t')$ は図 3 の圧縮強度を CEB-FIP1990 モデルコード式に代入したのから NewRC 式でフィッティングし、クリープ係数については時間変化として整理したデータを双曲線式でフィッティングし (図 - 13)、Whitney 則に準じて平行移動させることによって任意の載荷材齢におけるクリープ曲線を得た。

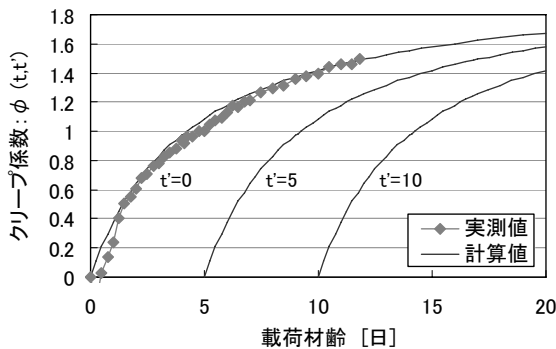


図 - 13 クリープ曲線のフィッティング

4.2 計算結果

図 - 14 に拘束応力の実験結果と 4.1 による計算値を比較したものを示す。計算の結果、当然ではあるが、計算値は実験値とほぼ一致しており、このコンクリートの拘束応力を評価するにあたっての有効ヤング係数法の適用性が確認された。

さらに図中には、建築学会収縮ひずみ予測式³⁾における V/S (体積表面積比) 評価に基づいて壁部材 ($V/S=8.57$) を想定した応力履歴を示す。部材寸法の増大に伴い収縮ひずみは減少する。一方、引張強度は寸法効果を無視すると大きな変化はないと仮定した。図より、壁部材レベルではひび割れの危険性は一層低減されることが示されており、拘束試験から抽出した力学特性を応力解析に取り込むことで、実構造物レベルでの収縮ひび割れ低減効果がより定量的に評価できるものと期待される。

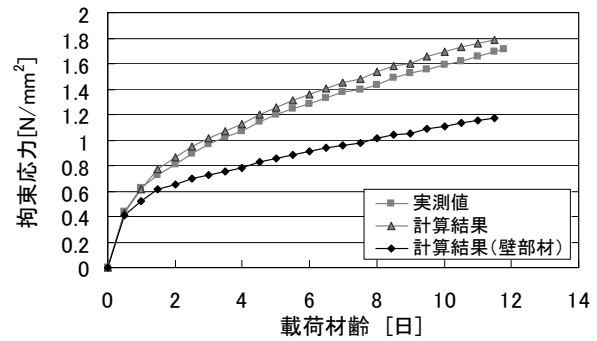


図 - 14 応力計算結果

5. まとめ

今回の実験により以下の知見が得られた。すなわち、収縮低減型高性能 AE 減水剤を混和剤として用いたコンクリートでは一般的に、高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートに比べて拘束ひび割れ試験でのひび割れ材齢が延びる傾向が見られた。その原因について応力構成成分などの観点から考察を行い、前者は後者と比較して基本的な物性値をほとんど変えることなく収縮ひずみのみを低減させることが明らかとなった。このことは、収縮低減型混和剤を用いたコンクリートでは、同時刻における収縮ひずみの差が収縮拘束応力の直接的な低減に寄与し、ひび割れ材齢を遅らせたと考えられる。

今後の展望として、更なるデータの集積に加え、 V/S (体積表面積比) を変化させたコンクリートにおけるクリープ特性などの情報を取得し、合理的なひび割れ予測方法を確立する必要があると思われる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東京理科大学助教 本間敏明氏のご協力・ご助言を得たことを付記する。

参考文献

- 1) 佐藤健, 後藤孝治, 酒井公式: セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤の作用機構, セメント技術年報, Vol.37, pp.65-68, 1983
- 2) 濱永康仁ほか: ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発, 日本建築学会構造系論文 No.616, pp.1-7, 2007.6
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ メカニズムと対策技術の現状, 2003.5
- 4) 小川亜希子, 今本啓一ほか: ひずみ制御型一軸拘束試験機を用いた人工軽量骨材コンクリートの収縮ひび割れ発生性状に関する実験的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.105-108, 2008
- 5) 橋田浩: コンクリートの乾燥クリープとその機構, コンクリート工学, pp.33-36, Vol.35, No.10, 1997.10