

高吸水性樹脂を混和したコンクリートの収縮特性に関する調査

| | | |
|------|-------|------|
| 技術本部 | 技術研究所 | 久徳貢大 |
| 技術本部 | 技術研究所 | 西尾峻佑 |
| 技術本部 | 技術研究所 | 小島利広 |

概要： AE 剤に代わる空隙形成の方法として高吸水性樹脂の添加を検討している。今回は、高強度プレキャスト製品製造時のひび割れ対策の観点から、高吸水性樹脂を混和したコンクリートの自己収縮試験と乾燥収縮試験を実施し、長さ変化を調査した。その結果、水セメント比 35%以下において自己収縮は高吸水性樹脂の添加量に比例して低減された。乾燥収縮に対する影響は明瞭でなく、高吸水性樹脂添加による自己収縮の低減により乾燥収縮を加味した総収縮量を減少させる。そのため、高吸水性樹脂の添加は、高強度プレキャスト製品製造におけるひび割れ防止に有利となる。

Key Words： 高吸水性樹脂，自己収縮試験，乾燥収縮試験

1. はじめに

高吸水性樹脂は自身の質量の数十倍から数百倍の水を吸収して膨潤し、それを乾燥環境下におくと吸収水を放出する。高吸水性樹脂をコンクリートに混和した場合には、練混ぜ時に吸水膨潤してセメントの水和反応に伴い放水するため、コンクリートの自己収縮を抑制する内部養生材としての利用が検討されている¹⁾。

凍結融解抵抗性は気泡間隔係数が小さいほど優れる傾向にあり、微細な気泡を導入すれば総空気量を減少させられるため圧縮強度を犠牲にしないで凍結融解抵抗性を確保できる。空気の連行では気泡同士の癒着、輸送や締固め作業での空気量減少など様々な不安定要因が存在することも知られている。そのため、AE 剤による空気連行に代わり微小中空粒子をコンクリートに混和する方法²⁾が知られており、国内でも検討されている³⁾。この方法はあらかじめ大きさの決まった空隙がコンクリート硬化後に形成されるため、気泡間隔は微小中空粒子の混和量で決定される利点がある。

筆者らは、微小中空粒子と同様にその混和量で気泡間隔を制御可能にする方法として、高吸水性樹脂の利用を検討している。高吸水性樹脂はコンクリートの練混ぜ時に膨潤し、凝結硬化に伴い水を放出して体積を減じ、最終的には空隙が形成される。既に、膨潤後の平均粒子径が 50 μm となる比較的細かい高吸水性樹脂を混和し凍結融解抵抗性が向上する結果を得ている⁴⁾。

高吸水性樹脂により形成される空隙量は混和量で決定し変動しないため、高強度のプレキャスト部材製造において強度管理の上で有利となる。加えて、低水セメント比のコンクリートを使用したプレキャスト部材の製造では、自己収縮や乾燥収縮などの長さ変化によるひび割れが品質管理上の課題となる。高吸水性樹脂添加による自己収縮の低減は部材製造時の有害なひび割れの抑制が期待されるものの、大径粒子ほど優れた低減効果を有する¹⁾との報告もある。本報告では、上述の比較的細かい高吸水性樹脂を混和し、給熱養生を施したコンクリートの自己収縮試験および乾燥収縮試験を実施し、長さ変化を調査した結果を報告する。



久徳貢大



西尾峻佑



小島利広

2. 試験概要

2.1 試験項目と水準

高吸水性樹脂（以下、SAPと略記）の添加量による収縮特性の違いを調査するため、水セメント比と高吸水性樹脂の添加量を変化させ、自己収縮試験および乾燥収縮試験を行った。

試験項目と水準を表-1に示す。ここで、SAPの添加量とはコンクリート中に占める吸水膨潤したSAPの容積比である。例えば、SAPの添加量が1.0%ならばコンクリート1m³あたり10リットルの容積として空気量と同じような扱いで配合中に組込まれる。水セメント比30%

と40%ではSAPの添加量を0.0%、1.0%の2水準とし、水セメント比35%ではSAPの添加量を0.0%、1.0%、2.0%、3.0%の4水準とした。

2.2 使用材料

使用材料および略号を表-2に示す。本試験では、プレキャスト製品を想定してセメントには早強ポルトランドセメントを採用した。細骨材および粗骨材はプレキャスト製品工場の常用品とした。

本試験で使用したSAPを写真-1に示す。SAPは練混ぜ時の水のような電解質を多量に含む液中でも約40倍の吸水能を有し、平均粒径が膨潤後に約50μmになるものを選定した。

化学混和剤として高性能減水剤および空気量調整剤（消泡剤）を使用した。

表-1 試験項目と水準

| 水セメント比 (%) | SAPの添加量 (vol%) | 試験項目 | |
|------------|----------------|--------|--------|
| | | 自己収縮試験 | 乾燥収縮試験 |
| 30 | 0.0 | ○ | ○ |
| | 1.0 | ○ | ○ |
| 35 | 0.0 | ○ | ○ |
| | 1.0 | ○ | ○ |
| | 2.0 | ○ | ○ |
| | 3.0 | ○ | ○ |
| 40 | 0.0 | ○ | ○ |
| | 1.0 | ○ | ○ |

表-2 使用材料および略号

| 材料 | 略号 | 特性または仕様 |
|--------------|-----|---|
| セメント | C | 早強ポルトランドセメント, 密度: 3.14g/cm ³ |
| 水 | W | 上水道水(小田原市) |
| 細骨材 | S | 砕砂, 表乾密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 1.07%, 粗粒率: 3.00 |
| 粗骨材 | G | 砕石2005, 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 0.72% |
| 高吸水性樹脂 | SAP | 膨潤後粒径: 約50μm, 吸水能: 約40倍 |
| 高性能減水剤 | SP | 主成分: ポリカルボン酸エーテル系化合物 |
| 空気量調整剤 (消泡剤) | D | 主成分: ポリアルキレングリコール誘導体 |



写真-1 高吸水性樹脂

2.3 コンクリートの配合

SAPの添加量がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響を調査するため、コンクリートの配合は表-3に示すようにSAPを含むペースト容積および単位粗骨材量を一定とした。また、単位細骨材量は各水セメント比で一定として、単位モルタル量を統一した。表中の W_1 は本試験における単位水量であり、本論における水セメント比は W_1/C と表記した。 W_2 はSAPが所定の容積に膨潤するために必要な水量であり、所定の容積とはSAPの添加量のことである。

スランプは水セメント比30%、35%の配合で $18.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、40%の配合で $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ となるように高性能減水剤の添加量で調整した。空気量はNon-AEコンクリートを想定して $2.0 \pm 1.0\%$ となるように空気量調整剤(消泡剤)を使用して調整した。

表-3 コンクリートの配合

| 配合名 | ペースト容積 (L/m ³) | W ₁ /C (%) | (W ₁ +W ₂)/C (%) | SAPの添加量 (vol%) | 設計空気量 (vol%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|----------------|----------------------------|-----------------------|---|----------------|--------------|---------|--------------------------|--------|-------|-------|----------------------|--------|
| | | | | | | | 水 W ₁ | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | SAP吸水 W ₂ | 紛体 SAP |
| W/C30%-SAP0.0% | 350 | 30.0 | 30.0 | 0.0 | 2.0 | 44.5 | 160 | 533 | 760 | 956 | 0 | 0 |
| W/C30%-SAP1.0% | | | 31.9 | 1.0 | | 44.5 | 155 | 517 | 760 | 956 | 10 | 0.244 |
| W/C35%-SAP0.0% | 326 | 35.0 | 35.0 | 0.0 | | 46.4 | 160 | 457 | 823 | 956 | 0 | 0 |
| W/C35%-SAP1.0% | | | 37.2 | 1.0 | | 46.4 | 155 | 443 | 823 | 956 | 10 | 0.244 |
| W/C35%-SAP2.0% | | | 39.7 | 2.0 | | 46.4 | 150 | 428 | 823 | 956 | 20 | 0.488 |
| W/C35%-SAP3.0% | | | 42.1 | 3.0 | | 46.4 | 144 | 413 | 823 | 956 | 30 | 0.732 |
| W/C40%-SAP0.0% | 308 | 40.0 | 40.0 | 0.0 | | 47.9 | 160 | 400 | 873 | 956 | 0 | 0 |
| W/C40%-SAP1.0% | | | 42.5 | 1.0 | | 47.9 | 154 | 386 | 873 | 956 | 10 | 0.244 |

2.4 練混ぜ方法および養生方法

練混ぜは20℃の室内にて二軸強制練りミキサーを使用し、図-1に示す方法で行った。まず、セメントおよび細骨材をミキサーに投入して空練りを30秒間行い、次に水を加えてモルタル練りを90秒間行った後、粗骨材を投入してコンクリート練りを60秒間行った。なお、粉体のSAPはセメントと事前に混合して用いた。練混ぜ水として、前述のSAPの吸水量を補填する目的の W_2 は W_1 と併せて計量した。

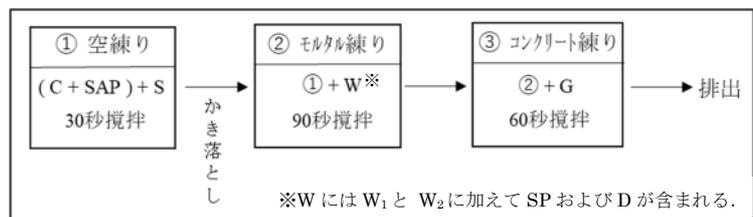


図-1 練混ぜ方法

養生方法はプレキャスト製品の蒸気養生を模すため、写真-2に示す可変恒温恒湿槽を用いて給熱養生とした。温湿度は図-2の設定条件とし、前置きは20℃を3時間保持し、昇温速度は+10℃/h、最高温度は50℃を4時間保持、降温は-5℃/hとした。前置き時の相対湿度は60%を3時間保持し、昇温以降は98%とした。



写真-2 可変恒温恒湿槽

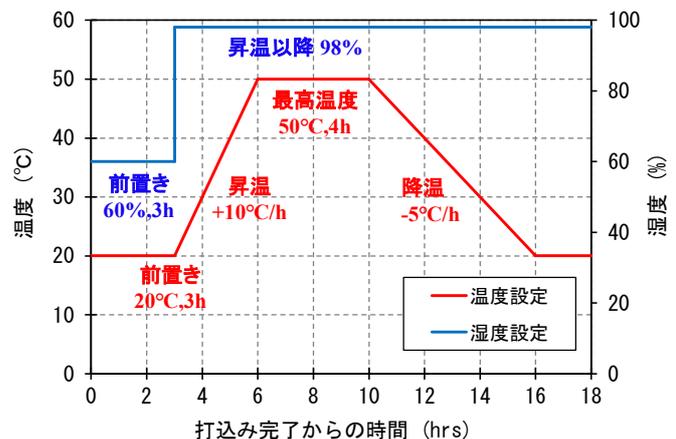


図-2 給熱養生の設定条件

2.5 試験方法

2.5.1 自己収縮試験

自己収縮試験は日本コンクリート工学協会「超流動コンクリート研究委員会報告書(II)」の「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁵⁾を参考に行った。試験体数は各試験水準で1本とした。

自己収縮試験に用いた型枠および埋込み型ひずみ計の設置状況を図-3に示す。100×100×400mmの角柱試験体用の鋼製型枠を使用し、型枠とコンクリートとの縁を切るため内側5面にポリエチレンシートを貼り、底枠にはテフロンシートを敷いた。コンクリートの長さ変化による変形を拘束しないように両端枠には、発泡スチロール板を設置した。

埋込み型ひずみ計は試験体の中央にビニル被覆結束線を用いて固定し、東京測器研究所社製の埋込み型ひずみ計(型番:KM-100B)を使用した。なお、温度測定にはT型熱電対を用いて、測点は埋込み型ひずみ計と同じ位置とした。

試験体は採取の翌日に脱枠後、ただちに封緘処理を行った。その後、試験体を温度が20℃、相対湿度が60%の室内に保存した。

自己収縮ひずみは、式(1)を用いて温度による影響の補正を行った。なお、ひずみの算出時には熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定した。計測ではコンクリート打ち込み完了時のひずみを基長とした。

$$\text{自己収縮ひずみ} = \varepsilon_t - \gamma \Delta T \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 ε_t : 埋込み型ひずみ計から得られた材齢t日のひずみ(埋込み型ひずみ計の温度補正後のひずみの値)

γ : コンクリートの熱膨張係数(一般に $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

ΔT : 熱電対より得られた材齢t日の試験体の温度と打ち込み温度との差(℃)

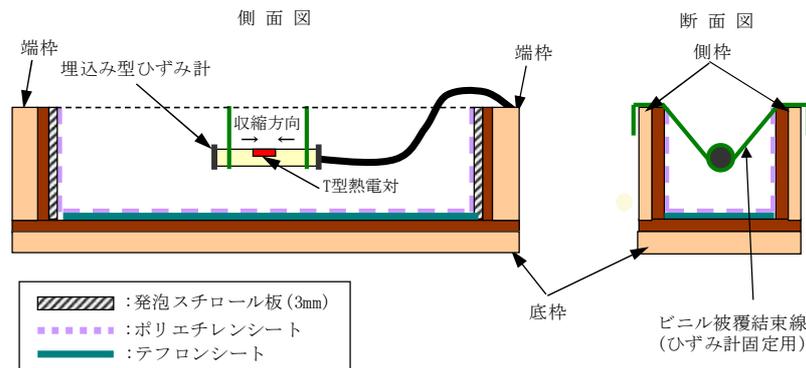


図-3 自己収縮試験で用いた型枠および埋込み型ひずみ計の設置状況

2.5.2 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は「JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法)」に準拠して実施した。試験体数は各試験水準で3本とした。

試験体形状は100×100×400mmの角柱とし、試験体の両端面中央には、ゲージプラグに代えて一辺が15mm、厚さが2mmの真鍮板を埋め込んだ。

試験体採取の翌日に脱枠後、ただちに封緘処理を行った。その後、試験体を温度20℃、相対湿度60%の室内に保存し、材齢7日に封緘を解いて同室内に保存した。材齢7日のひずみを基長として所定の時期に試験体長および質量の測定を行った。ひずみの計測には写真-3に示す傾斜型測定器を用いた。



写真-3 傾斜型測定器

3. 試験結果および考察

3.1 自己収縮試験

図-4に材齢7日までの自己収縮ひずみの経時変化を水セメント比ごとに示す。SAP無添加の試験体を比較すると水セメント比が大きくなるにつれて収縮量は減少した。いずれの試験体も、給熱養生期間に急激な収縮をした後に膨張に転じ、給熱養生終了後の膨潤が停止した後は穏やかな収縮を示した。この挙動は、蒸気養生下における自己収縮を調査した村岸ら⁹⁾の試験結果と同様であった。SAP添加の有無による収縮量の違いを水セメント比で比較すると、水セメント比40%と35%以下では傾向が異なる。すなわち、水セメント比40%でのSAP添加の有無によるひずみの差はわずかであるのに対し、水セメント比35%と30%では比較的大きな差を示した。この理由として、セメントの水和反応に伴う自己乾燥に対して吸水したSAPが内部養生材として機能したことが示唆される。

図-5に最も収縮した点、膨張が停止した点のひずみおよびそれらの差をまとめたグラフを示す。水セメント比35%と30%では、SAPの添加量が増加するに伴って、最も収縮した点の収縮が低減している。一方、膨張が停止した点のひずみも、SAPの添加量が増加するに伴い収縮から膨張に転じてその膨張量が増加している。また、最も収縮した点と膨張が停止した点のひずみの差は、各水セメント比でSAPの添加量による差が最大でも 20×10^{-6} 程度とSAPの添加量に関わらず同程度であった。

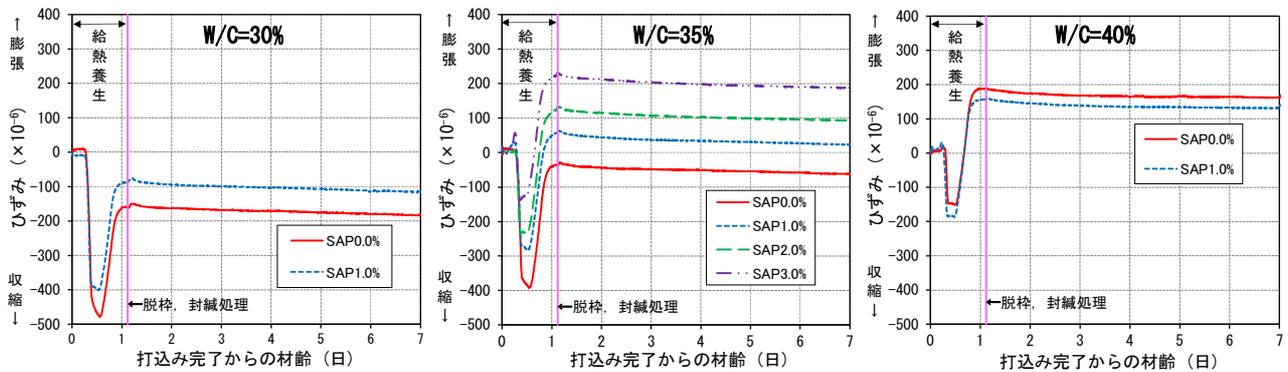


図-4 水セメント比ごとにおける材齢7日までの自己収縮ひずみの経時変化

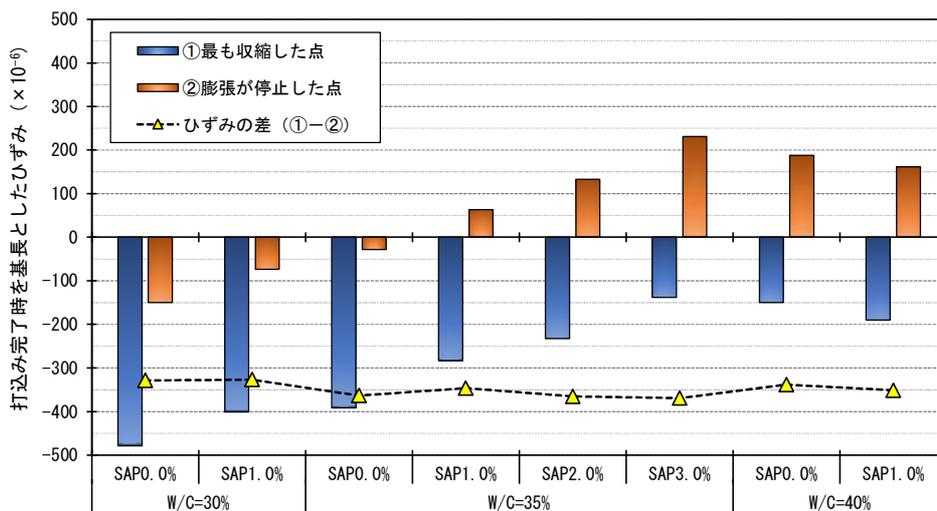


図-5 最も収縮した点、膨張が停止した点のひずみおよびそれらの差

水セメント比 35%以下の配合における SAP の添加量と最も収縮した点および膨張が停止した点におけるひずみとの関係を図-6 に示す。図中の式は最小二乗法での近似式である。水セメント比 35%において、最も収縮した点のひずみとの関係における決定係数は 0.983, 膨張が停止した点では 0.996 となり、収縮量と SAP の添加量に高い相関性があることを示した。また、水セメント比 30%と 35%の条件下におけるこれら 4つの近似式の傾きは 76~85 の範囲にあり、ほぼ同等と思われる。そのため、今回の試験範囲では、水セメント比 35%以下の配合におけるコンクリートの自己収縮ひずみは、SAP の添加量が 1.0%増加すると約 80×10^{-6} 低減された。

図-7 に材齢 90 日までの自己収縮ひずみの経時変化を水セメント比ごとに示す。SAP 添加の有無および添加量により生じた材齢初期のひずみの差は、長期的にも維持されたままであった。

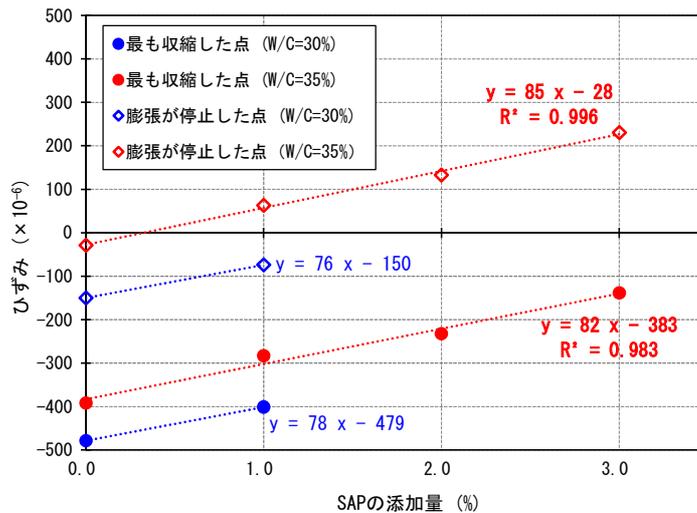


図-6 SAP の添加量と最も収縮した点および膨張が停止した点におけるひずみとの関係

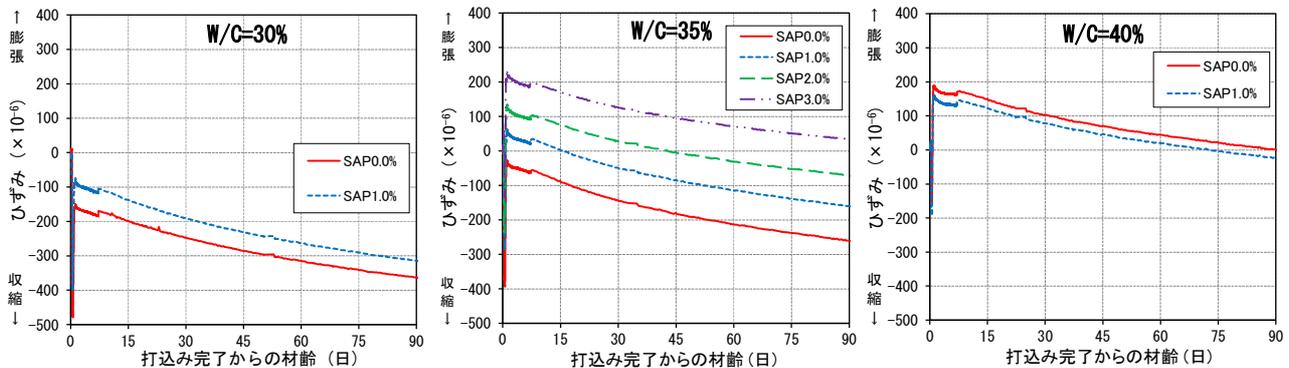


図-7 水セメント比ごとにおける材齢 90 日までの自己収縮ひずみの経時変化

3.2 乾燥収縮試験

各水セメント比における乾燥収縮ひずみの経時変化を図-8に示す。図中のデータは各試験水準における試験体3本の計測値の平均である。水セメント比ごとの乾燥収縮ひずみは、SAP添加の有無に因らずほぼ同じである。さらに、水セメント比35%における乾燥収縮ひずみはSAPの添加量にかかわらず同程度であり、SAPの添加量が乾燥収縮に与える影響も明瞭でない。

図-9に各水セメント比における質量変化率の経時変化を示す。いずれの水セメント比においても、SAPの添加量が増加するに伴って質量変化率は明らかに増加している。一般的に、乾燥収縮ひずみは質量変化に比例するが、今回の試験結果では、SAPの添加量が増加すると質量変化率は高くなるものの、乾燥収縮ひずみの変化は少なかった。

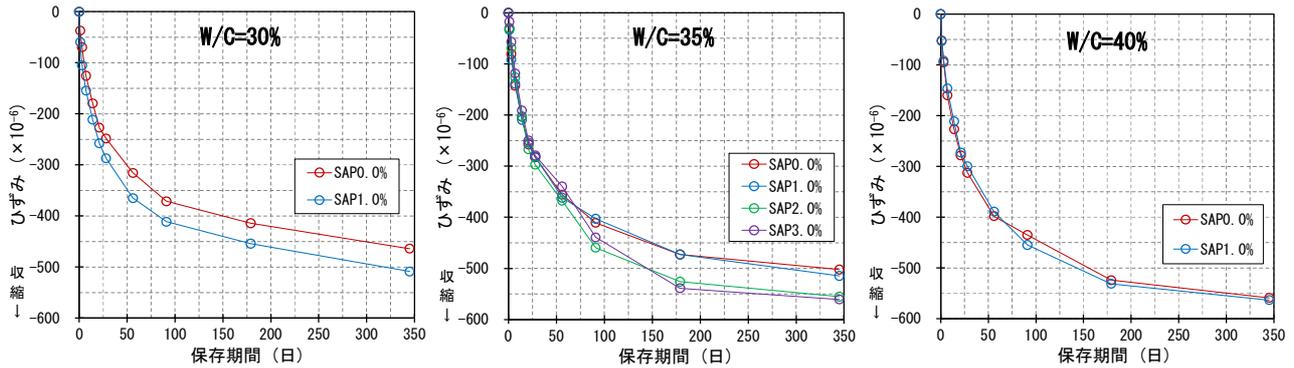


図-8 乾燥収縮ひずみの経時変化

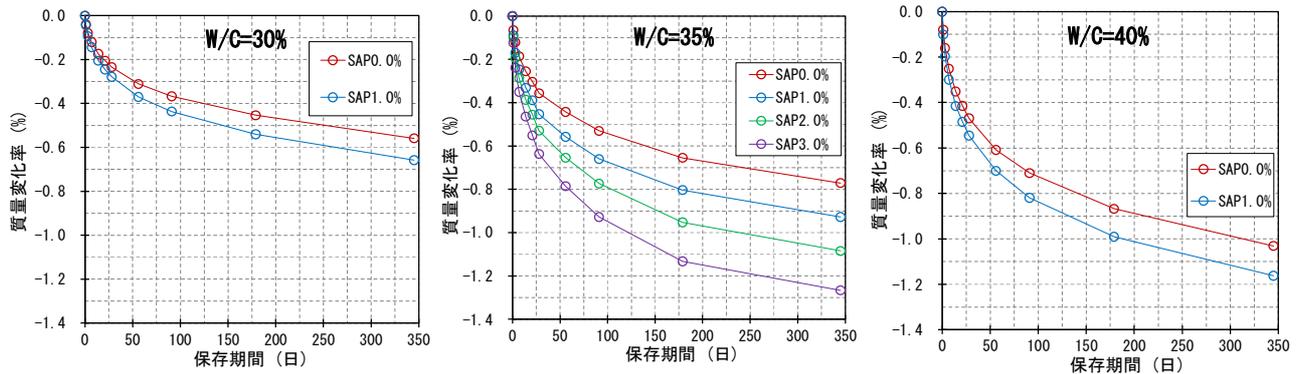


図-9 質量変化率の経時変化

3.3 収縮特性の評価

打込み完了から材齢7日までの自己収縮ひずみ、材齢7日から保存期間350日までの乾燥収縮ひずみおよびそれらを合わせた全収縮量を図-10に示す。水セメント比40%では、SAP添加の有無による全収縮量のひずみの差が約 30×10^{-6} と少ない。SAP添加によって自己収縮を低減した水セメント比35%以下では、SAPの添加量が多いほど全収縮量も低減している。膨潤後の粒子径が $500\mu\text{m}$ 程度になるSAPを用いてモルタルで検討した桑原ら⁷⁾も、材齢初期の膨張による自己収縮の低減が乾燥収縮を相殺し、全収縮量は減少することを報告している。今回の試験では、膨潤後の粒子径がエントレインドエアと同レベルの $50\mu\text{m}$ 程度になるSAPを用いた。比較的粒子径の小さいSAPでも、その添加によって自己収縮を低減する効果を発揮することが確認された。さらに、自己収縮を低減し乾燥収縮を加味した総収縮量を減少するため、高吸水性樹脂の添加は、高強度のプレキャスト製品製造におけるひび割れ発生防止に有利となる。

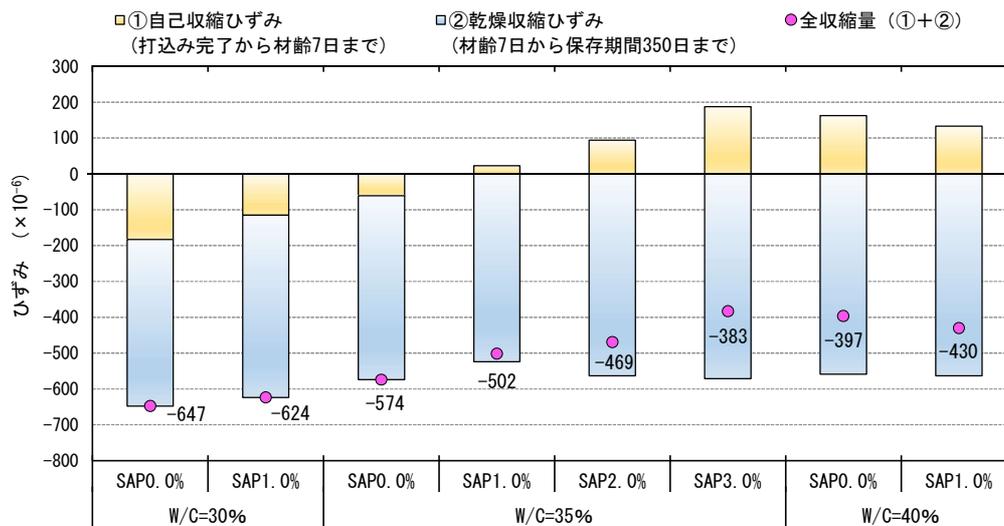


図-10 打込み完了から材齢7日までの自己収縮ひずみ、材齢7日から保存期間350日までの乾燥収縮ひずみおよびそれらを合わせた全収縮量

4. まとめ

高強度プレキャスト製品の凍結融解抵抗性向上のために、AE 剤に代わる空隙形成の方法として高吸水性樹脂を用いるコンクリートの実験的検討を進めている。そのため、高吸水性樹脂には平均粒径が膨潤後に約 50 μm とエントレインドエア相当になるものを使用している。今回は、高強度のプレキャスト製品製造時のひび割れ対策の観点から、高吸水性樹脂添加による収縮特性の違いを調査するため、水セメント比と高吸水性樹脂の添加量を変化させ、自己収縮試験および乾燥収縮試験を実施した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 自己収縮試験

- ・高吸水性樹脂の添加が自己収縮に与える影響は水セメント比によって異なり、水セメント比が 40% では高吸水性樹脂添加の有無による自己収縮ひずみの差はわずかであったが、水セメント比が 35% 以下では高吸水性樹脂の添加によって自己収縮を低減した。
- ・水セメント比 35% 以下において、高吸水性樹脂の添加量が増加するに従い収縮ひずみは低減された。収縮ひずみの低減量は高吸水性樹脂添加量に比例し、今回の試験においては、高吸水性樹脂をコンクリートの容積比で 1.0% 添加するごとに収縮ひずみは約 80×10^{-6} 低減された。

(2) 乾燥収縮試験

- ・高吸水性樹脂添加の有無による乾燥収縮ひずみの差はわずかで、乾燥収縮に与える影響は明瞭でなかった。
- ・高吸水性樹脂の添加量が多いほど質量は減少したが、乾燥収縮ひずみは質量変化率ほど差がなかった。

(3) 収縮特性の評価

- ・今回の試験で用いた比較的粒子径の小さい高吸水性樹脂でも、その添加によって自己収縮を低減する効果を発揮することを確認した。
- ・高吸水性樹脂の添加は、自己収縮を低減し乾燥収縮を加味した総収縮量を減少させるため、高強度のプレキャスト製品製造におけるひび割れ防止に有利となる。

5. おわりに

凍結融解抵抗性を確保する目的で、高吸水性樹脂の添加を検討している。今回の試験で、比較的粒子径の小さい高吸水性樹脂でも自己収縮を低減する効果を示すことが確認された。高吸水性樹脂の製造方法や組成および種類によって結果が異なることも考えられる。海外ではコンクリート用の高吸水性樹脂が製造供給されているが、国内では実績を聞かない。高吸水性樹脂のユニークな特性を利用するための研究や技術開発が進展するためにも、コンクリートに混和することを前提とした高吸水性樹脂製品の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 横田ら：2, 3 の超吸水性ポリマーを内部養生材として使用したモルタルの自己収縮挙動の比較，コンクリート工学年次論文集，vol.34, No.1, pp.508-513, 2012 年
- 2) A.M.Neville 著：三浦尚訳「ネビルのコンクリートバイブル」技報堂出版，pp.683-684, 2004 年
- 3) 林ら：中空微小球を用いたコンクリートのフレッシュ性状および凍結融解抵抗に関する一考察，土木学会第 71 回年次学術講演会，pp.529-530, 2016 年 9 月
- 4) 久徳ら：高吸水性樹脂を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する実験的検討，pp.415-420, プレキャストコンクリート工学会 第 29 回シンポジウム論文集，2020 年 10 月
- 5) 社団法人 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，pp.209-210, 1994 年 5 月
- 6) 村岸ら：廃瓦粗骨材を用いたフライアッシュコンクリートが受ける蒸気養生後の乾燥の影響，土木学会第 69 回年次学術講演会，pp.643-644, 2014 年 9 月
- 7) 桑原ら：超吸水性ポリマーの混入がモルタルの収縮挙動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol.35, No.1, pp.1951-1956, 2013 年