

論文 超吸水性ポリマーによる貯水方法がモルタルの物性に及ぼす影響

山崎 健仁*1・胡 巧英*2・五十嵐 心一*3

要旨：超吸水性ポリマー（SAP）の混入は初期の液相の空間分布や固体構造の形成に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、練り混ぜ水の一部をゲル化させた状態で存在させ、水の分布特性を変化させたときのモルタルの若材齢における物性を水和反応と組織形成の観点から検討した。その結果、練り混ぜ水の一部をゲル化して貯水させることがモルタルの強度低下や乾燥収縮に及ぼす影響は大きくはなかった。また、SAP の混入により若材齢期にて膨潤が生じ、結果として全収縮は低減されることが明らかとなった。

キーワード：体積変化、乾燥収縮、電気抵抗率、超吸水性ポリマー、内部養生材、ハイドロゲル

1. はじめに

超吸水性ポリマー（SAP）は、早期に練り混ぜ水の一部を吸収し、若材齢においてその水を放出するという特徴があるため、コンクリートの自己収縮を低減するための内部養生材としての利用が検討されてきた。したがって、SAP の混和材としての性能に関する研究は、主に、若材齢における自己収縮が顕著である高強度コンクリートを対象としてなされることが多い¹⁾。しかし、近年、必ずしも自己収縮が顕著でない比較的高い水セメント比のコンクリートに対する利用も検討されている。例えば Snoeck らは²⁾、SAP を混入したコンクリートの対凍害性について明らかにしており、SAP を混入することで、SAP 無混入の供試体と同程度の強度を有しながらも凍害を抑制できると述べている。また、現在、RILEM の研究委員会 TC260-RSC（委員長：Prof. V. Mechtcherine, ドレスデン工科大学）では SAP の普通コンクリートに対する適用を含めた指針の整備を進めており、発行の折には多様な展開の基本になることが期待されている³⁾。

SAP はコンクリートに練り混ぜられると、早期に練り混ぜ水の一部を吸収することによってセメントペーストマトリックス内の自由水量を減少させる⁴⁾。しかし、そのような保水は長時間継続するとは限らず、若材齢において吸収した水を放出し、結果として練り混ぜから打ち込みまでのフレッシュ特性にも影響を及ぼすと考えられている。さらに、水の存在形態に着目すると、練り混ぜ直後には水分をいったんゲル水として保持し、その後液状水として放出することは、水量が同じであったとしても液相の空間分布を変化させることにもなる。この初期特性を生かしてレオロジー調整材としてだけでなく、新たな用途へと展開していくことが検討されている。

自己収縮を低減させるために SAP を混入する場合、従来、SAP の吸水能相当の水を練り混ぜ水に加えて混入す

るという外割り添加（以後、外割混入と称す）の考え方を採り、内部貯水を行ってきた⁵⁾。しかし、この方法によると系全体の水量が増すことになるので、強度や耐久性などのコンクリートの性能低下が懸念される⁶⁾。これに対して、練り混ぜ水の一部を内割置換するという考え方（以後、内割混入と称す）に立って SAP を混入するならば、系全体の水量は増えないことになり、コンクリートの性能への悪影響も抑制できると期待される。しかし、自由水でない内部貯水はマトリックスの水セメント比を変化させることにもなり、これが内部組織の形成や強度などの性能発現に及ぼす影響は明らかでない。

また、従来の考え方に従い SAP を外割り添加にて混入した場合にて、周囲の環境の乾燥状態にかかわらず、SAP が内包した水分を単純に放出としたならば、セメントペーストマトリックス領域の水セメント比は増大していることになり、若材齢における自己収縮のみならず、硬化後の乾燥収縮に対しても影響を及ぼすと考えられる。Jensen らは⁷⁾、自己収縮が顕著である供試体に対して SAP を外割混入することで、コンクリート中の水量を増加させた結果、乾燥収縮が増大したと報告している。また、桑原らは⁸⁾、水セメント比を変化させた供試体に対して SAP を外割混入した結果、比較的高い水セメント比の供試体においては全体の収縮ひずみに及ぼす影響は大きくないが、乾燥収縮はわずかに低減されることを示している。すなわち、SAP を混入した供試体の収縮挙動は水セメント比によっても相違することも考えられ、SAP の使用の拡大のためには、低水セメント比のみならず高水セメント比におけるデータの蓄積も必要と考えられる。

本研究においては、練り混ぜ時に吸水能相当の水を加えることなく SAP を混入して、練り混ぜ水の一部をゲル化した状態（ハイドロゲル）で存在させたときの乾燥収縮特性について、若材齢における水和反応と組織形成の

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻（学生会員）

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻（学生会員）

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工)（正会員）

表-1 モルタルの配合

配合	W/C	W/C _e	C : S : W _m : W _{SAP}	フロー値	始発	終結
SAP無混入	0.55	0.55	1 : 2 : 0.55 : 0	214	5:30	6:49
SAP-A(3%C)	0.58	0.55	1 : 2 : 0.55 : 0.03	220	5:34	7:23
SAP-A(5%W)	0.55	0.52	1 : 2 : 0.52 : 0.03	200	5:27	6:50
SAP-A(10%W)	0.55	0.49	1 : 2 : 0.49 : 0.06	181	5:34	6:50
SAP-B(3%C)	0.58	0.55	1 : 2 : 0.55 : 0.03	200	5:36	7:25
SAP-B(5%W)	0.55	0.52	1 : 2 : 0.52 : 0.03	196	5:40	6:46

W:モルタル全体の水量(W_m+W_{SAP}), W_m :セメントペーストマトリックス中の水量

W_{SAP} :SAPの保持水量, W/C_e :有効水セメント比($(W-W_{SAP})/C$)

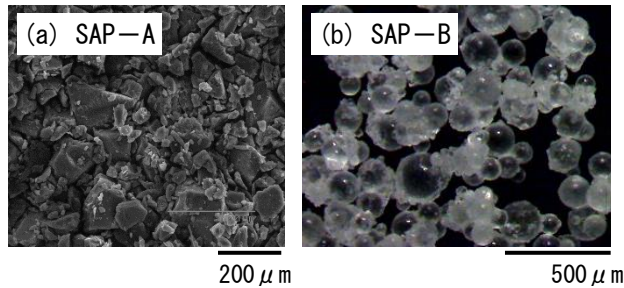


図-1 SAP 粒子

観点から考察する。また、毛細管空隙構造の特徴を電気抵抗率の変化から考察し、若材齢における強度発現と関連づけながら論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体作製

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³，比表面積：3310cm²/g）を使用し，細骨材には石川県手取川産の川砂（密度：2.60g/cm³，吸水率：1.81%）を使用した。JIS R 5201 に準じて，水セメント比 0.55，セメント砂比（C:S）1:2 のモルタルを練り混ぜた。SAP には水溶液重合法により製造された SAP-A（D₅₀:60μm，図-1(a)）と逆相懸濁重合法により製造された SAP-B（D₅₀:200μm，図-1(b)）の 2 種類を使用し，乾燥状態からの吸水能（製造元より提供されたアルカリ性溶液使用時の公称値）は 28.0g/g 及び 13.3g/g である。SAP はモルタル全体の水セメント比を変化させずに，練り混ぜ水の 5%（SAP-A(5%W)）あるいは 10%（SAP-A(10%W)）を SAP が保持するようにした供試体（ $W_{SAP}/W=0.05, 0.1$ ）とセメントペーストマトリックスの水セメント比を 0.55 に保持したまま，吸水した SAP ゲルがセメントペーストの体積の 3%（SAP-A(3%C)）となるように，SAP を混入した供試体を作製した（表-1）。以上の配合をまとめると SAP-A（5%W）と SAP-A（3%C）は SAP の混入量がほぼ同じとなっており，同程度のハイドロゲルがセメントペーストマトリックス内に存在する配合となる。しかし，モルタル全体の水セメント比は異なっており，硬化後の内部組織が相違することが考えられる。

2.2 長さ変化試験



図-2 長さ変化測定装置

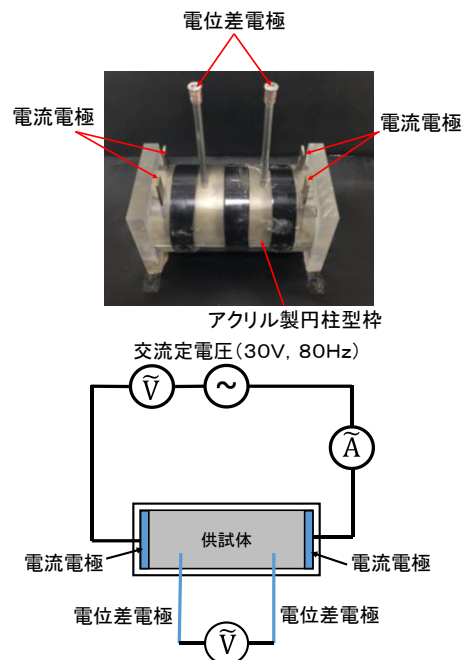


図-3 電気抵抗測定装置の模式図と供試体用型枠

ASTM C 1698-09 に従い，ポリエチレン製のコルゲートチューブ（直径：約 30mm，長さ：約 420mm）供試体を打ち込み，20℃の恒温室にて水平に静置し，長さ変化測定装置を用いて供試体の長さ変化を継続的に測定した（図-2）。打ち込み直後からの変形についてはレーザー変位計を使用し，硬化後の長さ変化は接触式のダイヤルゲージを用いて，打ち込み直後から材齢 7 日までの長さ変化を記録した。

また，密封養生後に乾燥を受ける供試体として，直径約 30mm，長さ約 390mm の円柱供試体を作製した。打ち込み後，材齢 7 日にて脱型し，気中養生（温度：20℃±2℃，湿度：60±5%）を行った。気中養生期間中の長さ変化は

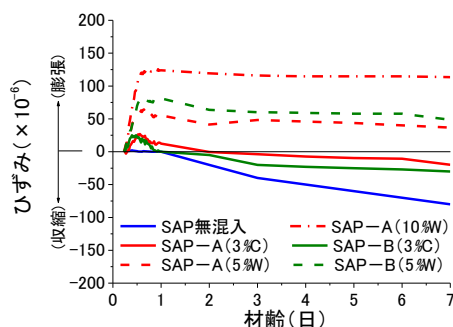


図-4 密封養生期間におけるひずみ変化

ダイヤルゲージを用いて材齢 28 日まで継続的に測定した。

2.3 凝結試験

水セメント比が 0.55 のセメントペーストに対して JIS R 5201 に従い、凝結試験を行い、始発および終結を決定し、始発を誘導期の終了の目安とした。なお、供試体にはブリーディングが確認されており、終結の計測は供試体裏面に行っている。

2.4 電気抵抗率測定

JSCE-K 562-2008 に規定される四電極法により、電圧 30V、周波数 80Hz の交流電圧を供試体に印加し、打ち込み直後のフレッシュな状態から材齢 24 時間までのモルタルの電気抵抗率を 5 分間隔で測定した(図-3)。なお、図-3 に示す装置にて、供試体は直径 50mm、長さ 100mm であり、電位差電極間距離を 50mm として供試体に流れる電流値と供試体中央部の電位差電極間の電圧値を用いて、以下の式(1)により電気抵抗率 $\rho(\Omega \cdot m)$ を得た。

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} (\Omega \cdot m) \quad (1)$$

ここに V は電位差電極間の電位差(V)、 A は供試体の断面積(m^2)、 I は供試体に流れる電流(A)、 L は電位差電極間の距離(m)である。

2.5 強熱減量試験と水和度の算出

水セメント比が 0.55 のセメントペーストを型枠(20×30×5mm)に打ち込み、所定時間にて脱型し、速やかに 110℃、24 時間炉乾燥を行った。その後、乾燥試料を乳鉢で素早く粉砕し、更に 24 時間真空乾燥を行った。粉砕した試料を JIS R 5202 に規定される方法に準じて強熱し、式(2)より材齢 t における結合水量 $W_n(t)$ を求めた。

$$W_n(t) = \frac{m - m'}{m'} \quad (2)$$

ここに m は強熱前の試料質量(g)、 m' は強熱後の試料質量(g)である。得られた結合水量に対して Powers のモデルに従い、完全水和時の結合水量をセメント質量の 23% として、式(3)より水和度 α を求めた⁹⁾。

$$\alpha = W_n(t) / 0.23 \quad (3)$$

2.9 圧縮強度試験

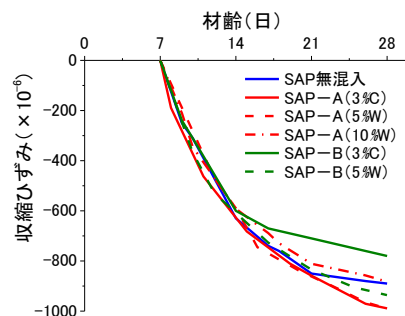


図-5 乾燥養生期間における収縮ひずみ変化

モルタルを 40×40×160mm の三連型枠に打ち込み、材齢 1 日にて脱型し、その後、20℃の水中養生を行った。そして、材齢 1, 7, 28 日にて JIS R 5201 に従って圧縮強度試験を行った。

3. 結果および考察

3.1 密封および気中養生供試体における収縮挙動

表-1 に練り混ぜ直後のフロー値とセメントペースト供試体における凝結時間をあわせて示した。いずれの供試体も同程度のフロー値を示しているが、SAP を内割混入した供試体はフロー値が低減しており、モルタル中の自由水量を低減させていることの効果が確認できる。また、凝結時間に関しては、始発に差異は生じていないが SAP を外割混入した供試体は終結時間が遅延している。しかし、終結時間の遅延は 30 分程度であり、SAP 混入による凝結時間への影響は大きくないようである。

図-4 は始発を始点としたときの長さ変化を示したものである。SAP 無混入のものは始発後の数時間にわたって収縮や膨張などの体積変化をほとんど示さないが、材齢 1 日を過ぎるとわずかに収縮し始め、材齢 7 日まで緩やかに収縮が続く。また、SAP を外割混入した SAP-A (3%C) と SAP-B (3%C) は、SAP の種類に関わらず材齢 12 時間まで体積膨張を示し、それ以降は徐々に収縮している。しかし、材齢初期においてわずかに膨張したことによりある程度相殺され、材齢 7 日における収縮量は SAP 無混入の供試体よりも小さい。その一方にて、SAP を内割混入して練り混ぜ水の 5% をゲル化して内割貯水させた SAP-A (5%W) と SAP-B (5%W) は、始発から膨張傾向を示し、材齢 1 日以降もほとんど収縮せずに膨張を保持している。その中でも練り混ぜ水の 10% を SAP が保持するように内割混入した SAP-A (10%W) は大きな膨張を示し、材齢 1 日以降もほとんど収縮しない。SAP-A を内割混入した供試体は、SAP の混入量が増加することで収縮低減に及ぼす効果も大きくなるようである。また、SAP を内割混入したものと、外割混入したものとを比較すると、たとえモルタルが保持するハイドロゲルの量が同程度であったとしても、収縮低減傾向

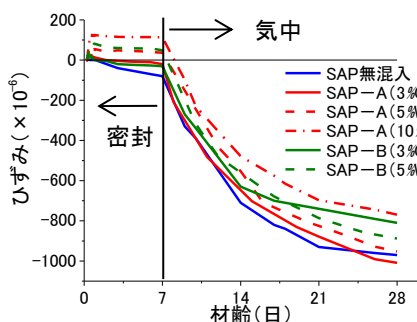


図-6 全収縮ひずみの比較

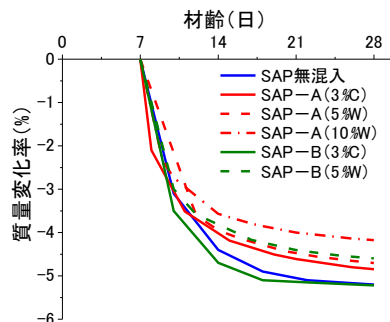


図-7 質量変化率の比較

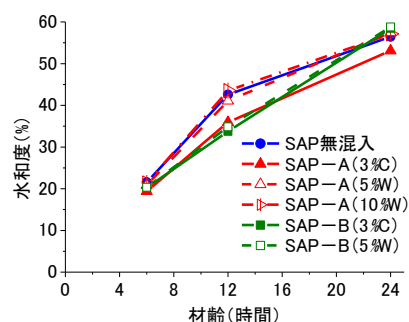


図-8 若材齢における水和度の変化

は相違するようである。

図-5 は材齢 7 日までの密封養生を行った後に乾燥させたときの乾燥収縮の変化を示したものである。いずれの供試体も材齢 14 日程度まで急激な収縮を示し、それ以降は緩やかに収縮を継続している。また、材齢 28 日における収縮量は、SAP 無混入の供試体と SAP を混入した供試体とで相違はほとんどなく、同程度の収縮量を示している。その一方にて、SAP-B (3%C) は材齢 14 日以降の収縮傾向が他の供試体と相違し、収縮がわずかに低減している。

図-6 は密封養生後に乾燥環境におかれた場合の全収縮ひずみの変化として、図-4 の密封時における体積変化と図-5 の乾燥収縮を合わせて示したものである。SAP 無混入の供試体は密封養生時から緩やかな収縮傾向を示していたが、気中養生を開始することで急激に収縮し始める。SAP を外割混入した SAP-A (3%C) は、密封養生下において SAP 無混入の供試体よりも収縮量が少なかったにもかかわらず、気中養生を行うと材齢 28 日においては SAP 無混入の供試体とほぼ同程度の収縮量を示している。また、異なる SAP を外割混入した場合と比較すると、SAP-B (3%C) は密封養生下においては SAP-A (3%C) と類似した変化傾向を示すものの、気中養生後の収縮量が低減されているため、全収縮量も低減されている。SAP を内割混入した供試体は密封養生下において膨張傾向を示しているが、練り混ぜ水の 5% を内割貯水するように混入した SAP-A (5%W) と SAP-B (5%W) は膨張量が小さく、気中養生下における収縮量が SAP 無混入の供試体と同程度であったため、全収縮量を低減できていない。その一方にて、練り混ぜ水の 10% を内割貯水するように SAP を混入した SAP-A (10%W) は、乾燥養生における収縮傾向は SAP 無混入のものと相違はないものの、密封養生下において大きな膨張を生じたために全収縮量が低減している。SAP を内割置換にて混入する方法は、モルタル全体の単位水量が増加していないために、乾燥収縮の変化が SAP 無混入の供試体と同様の傾向であったと考えられる。しかし、図-4 に示し

たように SAP の混入によるハイドロゲルの存在は、密封養生期間における初期膨張に影響を及ぼすようであり、そのような膨張が生じることにより、結果として全収縮量を低減することができたものと考えられる。

図-7 は気中養生期間の質量変化を示したものである。いずれの供試体も材齢 14 日程度まで急激に質量が減少し、それ以降は質量変化が緩やかになる。SAP 無混入の供試体と SAP-B (3%C) の水分逸散量が多いのに対して、SAP を内割混入した供試体と外割混入した SAP-A (3%C) は SAP 無混入の供試体よりも水分逸散量が少ない。また、内割置換にて SAP を混入する場合、SAP の混入量が多いほど、供試体からの水分逸散量は少なくなっている。桑原らは⁸⁾、SAP を外割混入したモルタルについて、その混入量を変化させて質量変化を計測し、SAP の混入量が増加すれば水分逸散量も増加すると報告している。つまり、セメントペーストマトリックス中の水セメント比は変化させていないにもかかわらず水分逸散量が増加したことになり、練り混ぜ水の一部を貯水させた本結果と相違している。SAP がセメントペーストマトリックス内の自由水を保水して初期のセメントペーストマトリックスの水セメント比を低減させることは、同時に水分の初期分布に影響を及ぼし、ゲル状水としての水分がモルタル内に不均質に分布することにより、供試体の水分逸散量が変化したと考えられる。また、水分逸散量と図-5 の乾燥収縮とを比較すると、材齢 14 日において変化傾向が穏やかになるのは対応しているが、全水分逸散量と収縮量の相関関係は明らかではなく、SAP の混入系によっては水分逸散量が少ないからといって乾燥収縮も低減されるとは限らないことには留意が必要である。

3.2 電気抵抗率の変化と内部組織形成との対応

図-8 は水和度の変化を比較したものである。材齢 6 時間においてはいずれの供試体も同程度の水和度を示している。材齢 12 時間においては SAP-B を混入した供試体と SAP を外割混入した SAP-A (3%C) は水和度が他の供試体よりも低い。しかし、材齢 24 時間においてはその差がなくなり、ほぼ同程度の水和度を示している。

モルタル内部の相対湿度が高いとき、水和により生じた反応生成物はその表面により多くの水分を吸着させ膨潤を生じうる。つまり、水和度が等しいことから材齢 24 時間における反応生成物の量はいずれの供試体も同程度であり、水分も十分に残存しているので類似した体積変化傾向を示すと予想される。しかし、実際には SAP を混入した供試体のみ膨張傾向を示しており、このことから自由水の存在状態の変化が初期体積変化に影響を及ぼしていることが考えられる。

図-9 は電気抵抗率の変化を示したものである。SAP 混入の有無にかかわらず、電気抵抗率は材齢 2 時間程度から増大し始め、材齢 24 時間まで増加し続ける。材齢 24 時間における電気抵抗率の値はいずれの供試体も同程度であるが、SAP を混入した供試体は若干電気抵抗率が低下する傾向が認められている。また、SAP-A を混入した供試体は、外割混入した供試体と内割混入した供試体とで電気抵抗率に差が生じていない。これとは対照的に、SAP-B を混入した供試体は、外割混入した SAP-B (3%C) において電気抵抗率の低下が顕著である。図-8 に示したように、材齢 24 時間における水和物量には相違がなく、細孔溶液中のイオン濃度による電気特性にも大きな差異はないと考えられる。また、表-1 に示したようにいずれの供試体も同様の凝結特性を示しており、セメント硬化体固体相としては同量の組織が形成されていると考えられる。すなわち、図-9 の結果から SAP を混入した多くの系にて、水和反応の進行にともなう内部組織の形成に大きな差異はなく、セメントペースト中の水分の主たる移動経路である毛細管空隙ネットワークの連続性も類似していたと考えられる。しかし、SAP-B (3%C) は電気的な特性が若干異なっており、毛細管空隙ネットワークの連続性は他の供試体よりも高かったものと考えられる。つまり、セメントペーストマトリックス領域における水セメント比は変化させずに、SAP をハイドロゲルとしてモルタル内に存在させることが、新たな空隙を導入したことと同様の効果をもたらし、SAP 無混入の供試体よりも透過性の高い構造が形成され

たとえられる。しかし、SAP-B (3%C) と同様に SAP を外割混入した SAP-A (3%C) は電気抵抗率の低下が小さい。これは、SAP-A の粒径が SAP-B に比べて小さく、主たる伝導経路となる毛細管空隙ネットワークの連続性を変化させるような大きな空隙が、若材齢にて導入されなかったためであると考えられる。

図-10 は圧縮強度の変化を示したものである。SAP 無混入の供試体は、圧縮強度が材齢 7 日まで急激に増加し、その後、材齢 28 日までは緩やかな増大を示した。SAP を外割混入した SAP-A (3%C) は SAP 無混入の供試体と同様の变化傾向を示し、材齢 28 日における圧縮強度も同程度である。その一方にて、同様に SAP を外割混入した SAP-B (3%C) は材齢 1 日においては SAP 無混入の供試体と同程度の圧縮強度であるが、材齢 7 日において小さな強度を示し、材齢 28 日においてもその差が小さくなることはない。また、SAP を混入して、練り混ぜ水の 5% を内割貯水させた供試体は、材齢 28 日において SAP 無混入の供試体とほぼ同程度の圧縮強度である。しかし、SAP を混入して、練り混ぜ水の 10% を内割貯水させた SAP-A (10%W) は他の SAP を混入した供試体と比較すると強度が低下している。SAP の混入により、吸水膨張した SAP ゲルは若材齢時に大きな空隙を形成し¹⁰⁾、その空隙が反応生成物によって充填されることなく残存したならば、モルタルの強度は低下すると考えられる。しかし、SAP-A を混入した供試体や SAP-B を内割混入した供試体は、SAP 無混入の供試体と比較すると、そのような空隙が残存していると考えられるにもかかわらず強度はほとんど低下していない。その一方にて、SAP を外割混入した SAP-B (3%C) は小さな強度を示し、図-9 で示した SAP の粒径の違いによる初期構造形成の相違が影響していると考えられる。また、練り混ぜ水の 10% を SAP が保持するように内割混入した SAP-A (10%W) は SAP-B (3%C) と同程度の強度を示すことから、モルタル内部に存在するハイドロゲルの量が多いと強度は低下するとは単純には結論されない。これらのことから、比較的高い水セメント比において SAP を混

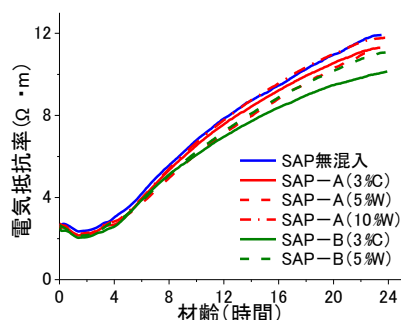


図-9 若材齢における電気抵抗率の変化

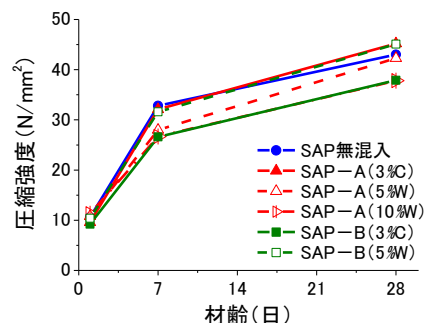


図-10 圧縮強度の比較

入して、練り混ぜ水の一部を貯水させることが、硬化後の強度を著しく低下させることはなく、その一方にて、材齢初期の膨潤によって長期における全収縮を低減することができていることになる¹⁴⁾。同じ水セメント比であってもモルタル内部にゲル化した水分と液状水が共存することは、セメントの水和反応が活発に進行する若材齢にて、セメントペーストマトリックス内の水分供給状態を変化させ、これが若材齢期のモルタルの体積変化に影響を及ぼすと考えられる。しかし、SAPの膨張とその後の収縮により生じた粗大な貯水粒子痕は、反応生成物によりその後ある程度充填されるようであり、単純にSAP体積相当分の空隙が生じた供試体よりも強度への影響は小さくなったと考えられる。

4. 結論

本研究は練り混ぜ時に吸水能相当の水を加えないでSAPを混入して、練り混ぜ水の一部をゲル化した状態で存在させたときの収縮特性を強度発現と組織形成の観点から考察することを目的とした。本研究において得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) SAPを内割置換にて混入する方法は、モルタル全体の単位水量を変化させないため、乾燥収縮を大きく変化させない。
- (2) SAPを混入することによって、若材齢期に膨潤を生じさせることができ、結果として全収縮を低減することができる。
- (3) 練り混ぜ水の一部をSAPにより貯水し、モルタル内部にハイドロゲルを存在させても、透過性の高い構造は形成されないようである。
- (4) SAPの混入方法の相違が収縮特性や組織形成に及ぼす影響は、同量のハイドロゲルがモルタル内に存在していたとしても異なる。
- (5) SAPの収縮後に残される空隙が反応生成物により充填されるならば強度低下は小さくなると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり O. M. Jensen 教授（デンマーク工科大学）ならびに A. Assmann 博士（BASF ドイツ）から SAP の提供を受けた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Kong, X., Zhang, Z. and Lu, Z.: Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete, *Materials and Structures*, Vol.48, No.9, pp.2741-2758, 2015
- 2) Snoeck, D. Heede, P. V. and Belie, N. D.: Towards an

adequate deicing salt scaling resistance of high-volume fly ash (HVFA) concrete and concrete with superabsorbent polymers (SAPs), *Proc. of International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Frost Action in Concrete*, pp.141-150, 2016

- 3) RILEM, Recommendations for use of superabsorbent polymers in concrete construction, Technical Committee 260-RSC 参照:
http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp_id=327
- 4) Zhu, Q. et al: Effect of ionic crosslinking on the swelling and mechanical response of model superabsorbent polymer hydrogels for internally cured concrete, *Materials and Structures*, Vol.48, No.7, pp.2261-2276, 2015
- 5) Jensen, O. M. and Hansen, P. F.: Water-entrained cement-based materials 1. Principles and theoretical background, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.4, pp.647-654, 2001
- 6) Hasholt, T. H. et al.: Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength?, *Construction and Building Materials*, Vol.31, pp.226-230, 2012
- 7) Jensen, O. M. and Hansen, P. F.: Water-entrained cement-based materials 2. Experimental observations, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, No.6, pp.973-978, 2002
- 8) 桑原寛司, 五十嵐心一: 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
- 9) Powers, T. C.: Physical properties of cement paste, 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, D.C., 1960, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards Monograph 43, Vol.2, pp.577-613, 1962
- 10) Wang, Y., Li, M. and Tian, Q.: Water release process of superabsorbent polymers in cement paste at early age, *Proc. of International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service Life of Cement-Based Materials and Structures*, pp.241-247, 2016
- 11) Assmann, A. and Reinhardt, H.W.: Tensile creep and shrinkage of SAP modified concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.58, pp.179-185, 2014