

論文 超吸水性ポリマーによる練り混ぜ水の一部のゲル化が自己収縮挙動に及ぼす影響

山崎 健仁*1・胡 巧英*2・五十嵐 心一*3

要旨: 内部養生材として超吸水性ポリマー (SAP) を用いる場合, その吸水能に相当する水量を余分に加えて, 若材齢における自己収縮を低減している。本研究においては吸水能相当の水量を余分に加えず, 練り混ぜ水の一部をゲル化させることが体積変化傾向に及ぼす影響について組織形成と関連づけながら検討した。その結果, 内部養生水として余分な水量を加えなくとも, 自己収縮は低減されることが確認された。また, このような水分存在形態の変化にともない, 内部組織も変化することが明らかとなった。

キーワード: 若材齢, 自己収縮, 電気抵抗率, 超吸水性ポリマー, 画像解析, 内部養生材, ハイドロゲル

1. はじめに

低水セメント比のコンクリートを使用するときを考慮すべき事柄として, 若材齢における自己収縮が挙げられる。これが拘束されることによるひび割れの発生が長期耐久性に影響することが懸念され, 自己収縮の低減方法の確立とそのための配合設計手順の明確化は重大な意味を持つ。若材齢における自己収縮を低減する方法として内部養生法が挙げられ, 内部養生材として軽量骨材や超吸水性ポリマー (SAP) が用いられる。これらをコンクリートの練り混ぜ時に混入することで, 内部相対湿度を高く保ち, 自己収縮は低減されるといわれている¹⁾²⁾。このとき, SAPはその吸水能に相当する水とともに混入され, 練り混ぜ開始からの短時間にてその水分を吸収し, これを若材齢において徐々に放出していくと考えられている。これにより, 内部相対湿度を高く保つだけでなく, 水和反応も促進させるといわれている¹⁾。著者らは³⁾, SAPを内部養生材として用いた場合の自己収縮低減効果を明らかにしており, SAPの粒径や製造方法による物性の相違も影響していることがわかっている。また, SAPによりフレッシュコンクリートの水分の一部がゲル状になって存在することが, フレッシュ特性やレオロジー特性にも影響を与える⁴⁾⁵⁾。このことが若材齢における水和反応の進行と固体構造の形成に影響を与えることが考えられる。

しかし, その一方において, 練り混ぜ水にSAP用の内部養生水をさらに加えた場合, SAPが内部貯水を放出した後には, コンクリート内に新たな空隙が導入され, 低水セメント比の高強度コンクリートを使用する場合には, 強度や耐久性を低下させることになりうる。また, 内部養生水とともにSAPを混入することにより, 水和反応はむしろ遅延するという意見もあり⁶⁾, 余分な水分を導入

することによる凝結への影響を考えねばならないことにもなる。

以上の内部養生法の発展においては, 内部養生水も練り混ぜ水として考えたときのセメントペースト全体の水セメント比よりも, SAPが保持している分の水量を除いたセメントペーストマトリックス中の水セメント比 (有効水セメント比) に注目し, 配合設計における水セメント比を変化させないようにしている。これに対して Justsらは⁷⁾, セメントペースト全体の水セメント比が同じならば, SAPを加え, セメントペーストマトリックスの有効水セメント比を小さくした供試体では, 若材齢における水和反応の誘導期は短くなり水和熱の放出が低減するものの, 加速期以降の水和反応はSAP無混入の供試体と同様の傾向を示すことを報告している。また, 内部養生水として余分に水分を与えず, 貯水性の軽量骨材を用いて練り混ぜ水の一部を吸水させて有効水セメント比を小さくしても, 自己収縮を低減できることが実験的に明らかになっている⁸⁾。この考え方に基けば, SAPを用いた場合でも余分な水分を加えるのではなく, 練り混ぜ水の一部を吸水させたゲル状水分として保持させるだけで自己収縮を低減できることが期待され, このことは強度や耐久性の観点からも好ましいものと考えられる。

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自己収縮特性を若材齢における水和反応と組織形成の観点から考察する。また, SAPを混入することで有効水セメント比を低くした場合の毛細管空隙構造の特徴を明らかにし, 電気抵抗率の変化との対応を考察することによって, 若材齢における水分存在形態が骨格形成に及ぼす影響について論ずることを目的とする。

*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 セメントペーストの配合

配合名	W/C	W/C _e	C : W _m : SP : W _{SAP}	フロー値(mm)	始発(時:分)	終結(時:分)
REF	0.28	0.28	1 : 0.280 : 0.0056 : 0	244	3:20	4:51
SAP-AL(10%W)	0.28	0.252	1 : 0.252 : 0.0075 : 0.028	240	3:38	5:56
SAP-BL(10%W)	0.28	0.252	1 : 0.252 : 0.0070 : 0.028	233	3:42	4:46
SAP-BS(10%W)	0.28	0.252	1 : 0.252 : 0.0080 : 0.028	232	3:19	5:34
SAP-BL(20%W)	0.28	0.224	1 : 0.224 : 0.0084 : 0.056	230	2:56	4:38
SAP-BL(0.39%C)	0.33	0.28	1 : 0.280 : 0.0056 : 0.050	239	4:13	5:54

W: セメントペースト全体の水量($W_m + W_{SAP}$), 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($(W - W_{SAP})/C$), SP: 高性能減水剤

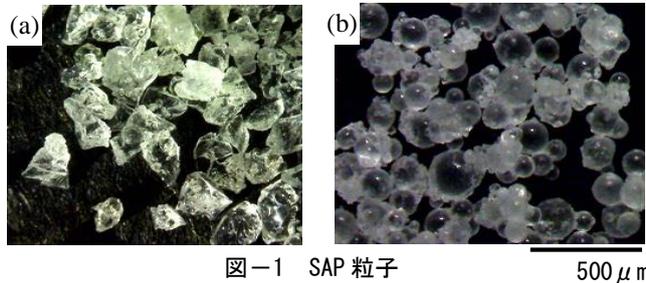


図-1 SAP粒子 500 μm

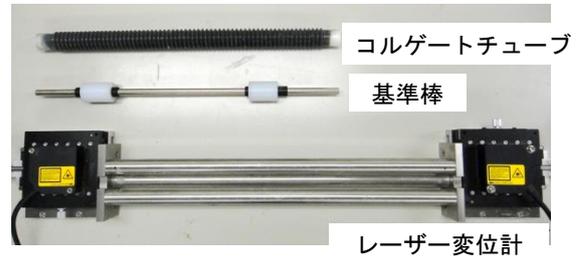


図-2 長さ変化測定装置

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，JIS R 5201 に準じて水セメント比0.28のセメントペーストを練り混ぜた。SAP には水溶液重合法により製造された SAP-A（図-1(a)）と逆相懸濁重合法により製造された SAP-B（図-1(b)）の2種類を使用し，乾燥状態からの吸水能（アルカリ性溶液使用時の公称値）は10.0g/g 及び13.3g/g である。SAP はその粒径によって吸水・脱水傾向が変化するため，SAP-A, B に対してはこれを直径300μm 以下（SAP-BS）と300μm から600μm（SAP-AL, BL）の2種類に分級して使用した。SAP はセメントペースト全体の水セメント比を変化させずに，練り混ぜ水の10%（SAP-BL(10%W)）あるいは20%（SAP-BL(20%W)）をSAP が保持するようにした供試体（ $W_{SAP}/W=0.1, 0.2$ ）とセメント質量に対して0.39%添加し，これに吸水能を見込んだ水量を余分に加えて，セメントペーストマトリックスの水セメント比が0.28となるようにした供試体（SAP-BL(0.39%C)）を作製した（表-1）。練り混ぜ時にはポリカルボン酸系の高性能減水剤（SP）を添加し，どの供試体もフロー値が同程度になるようにした。以上の配合をまとめると，SAP-BL(0.39%C) は従来の内部養生法の考え方に従った配合であるが，その他のSAP 混入配合は練り混ぜ水の一部がハイドロゲルとして存在する一方で，マトリックスの水セメント比はさらに低下することになる。したがって，従来の考え方によれば自己収縮が大きくなる側の要因を持った配合ということになる。

2.2 長さ変化試験

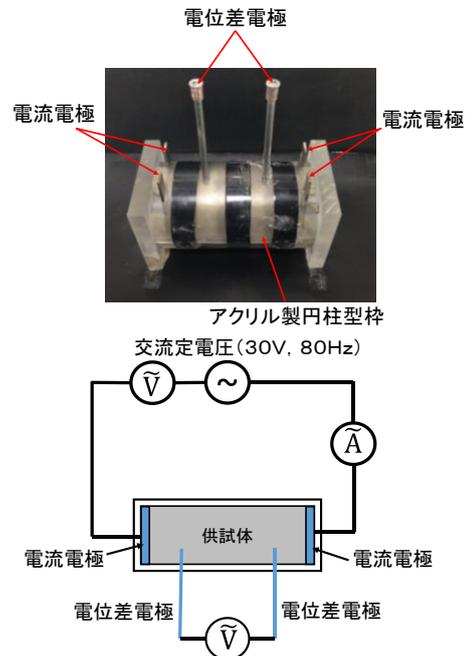


図-3 電気抵抗測定装置の模式図と供試体用型枠

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，密封養生下での長さ変化を測定した（図-2）。打ち込み後，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。打ち込み直後からの変形についてはレーザー変位計により測定した。硬化後の長さ変化は接触式のダイヤルゲージを用いて測定し，打ち込み直後から材齢7日までの長さ変化を記録した。

2.3 凝結試験

水セメント比が0.28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。

2.4 電気抵抗率測定

JISCE-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 時間までのセメントペーストの電気抵抗率を 5 分間隔で測定した。なお、**図-3** に示す型枠は直径 50mm、長さ 100mm、電位差電極間距離 50mm であり、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を測定し、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(m²)、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 0.28 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⁾。

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

2.6 反射電子像観察と画像解析

材齢 24 時間に達した試料をエタノールに 24 時間以上浸漬し内部水分との置換を行った。t-ブチルアルコールによる溶媒置換を行った後に凍結真空乾燥を行った。その後、真空樹脂含浸装置によりエポキシ樹脂を含浸させた。エポキシ樹脂の硬化後、砥粒の粗い耐水研磨紙で試料表面に付着した樹脂層を完全に除去するまで研磨し、その後、砥粒の細かい耐水研磨紙でセメント粒子と空隙相の境界が鮮明に観察できるまで注意深く研磨した。ダイヤモンドスラリーを用いて試料表面の仕上げ研磨を行

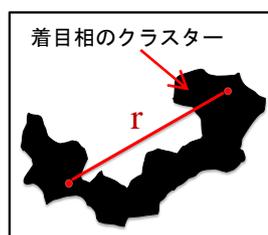


図-4 2点クラスター関数の概略図

い、表面にカーボン蒸着を施して反射電子像観察試料とした。走査型電子顕微鏡を用い、無作為に 1 試料に対し 15 箇所以上の反射電子像を取得した。取得した反射電子像に対してグレースケールに基づいた 2 値化処理を行い、未水和セメント粒子および粗大毛細管空隙を抽出した。

2.7 2点クラスター相関関数¹⁰⁾

2点クラスター相関関数とは、ある一定の長さを持った線分を画像上に落としたとき、線分の両端が着目相の同一クラスターに載る確率を表す (**図-4**)。距離 r が大きくなっても同一クラスターに載るということは、線分的一端から他端まで、そのクラスター内の経路を辿り移動が可能ということになり、連続経路の存在を定量的に評価できることになる。

2.8 SAP の吸水能試験

JIS K 7223 に準じて、ティーバッグ法により SAP 粒子の吸水試験を行い、式(4)により各測定時間における吸水能 W(g/g) を求めた。なお、吸水させる溶液として飽和希酸化カルシウム水溶液を用いた。

$$W = \frac{b - c - a}{a} \quad (4)$$

ここに、a は乾燥状態の SAP の質量、b は SAP を入れたティーバッグを所定時間浸漬し、水切りをした後の質量、c は試料を入れないティーバッグを所定時間浸漬し、水切りをした後の質量の平均値である。

2.9 圧縮強度試験

水セメント比が 0.28 のセメントペーストを 40×40×160mm の三連型枠に打ち込み、材齢 1 日にて脱型を行い、その後は水中養生を行った。そして、材齢 7 日にて JIS R 5201 に準じて圧縮強度試験を行った。

3. 結果および考察

3.1 若材齢における自己(収縮)ひずみ変化と水和度との関係性

図-5 は打ち込み直後からの長さ変化試験の結果を示したものである。SAP を混入していないセメントペーストについては打ち込み直後から強い収縮傾向を示し、始

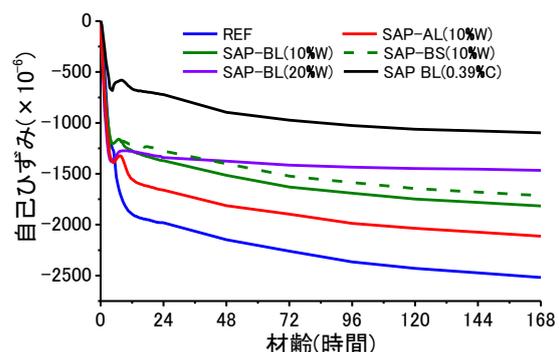


図-5 打ち込み直後からの自己ひずみ変化

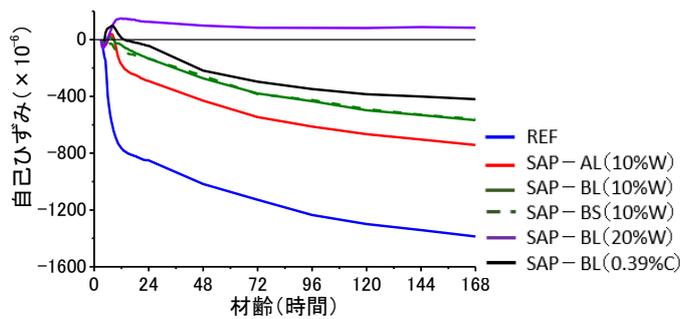


図-6 始発を始点とした自己ひずみ変化

発付近で一旦その傾向が弱まるが、その後、再び収縮傾向を示している。これに対して、SAPを混入すると、水量を余分に加えた供試体も、加えていない供試体も、始発付近までは無混入の供試体と同じ傾向を示すが、その後は緩やかな膨張が材齢6時間程度まで継続する。材齢6時間以降はSAP無混入の供試体と同じような収縮傾向を示す。収縮量は余分に水量を加えたSAP-BL(0.39%C)が最も小さく、全水量が増加したことによる影響がみられる。また、SAPの種類によっても収縮量が異なり、水溶液重合法で製造されたSAP-AL(10%W)は他のSAPを混入した供試体と比較すると収縮が大きくなっている。同じSAPを用いても収縮傾向は異なり、練り混ぜ水の20%をSAPに保水させてハイドロゲル化したSAP-BL(20%W)は10%をハイドロゲル化したSAP-BL(10%W)やSAP-BS(10%W)と比較すると、膨張後の収縮割合が小さくなっている。このSAP-BL(20%W)は始発が早期に現れており(表-1)、有効水セメント比の低下による初期組織形成への影響がみられる。

図-6は図-5のひずみ変化について、始発を始点として表したものである。SAP無混入のものは始発以降も急激な収縮傾向を示し、その傾向が材齢12時間程度まで継続するが、その後は緩やかに収縮し続ける。SAPを混入した供試体は製造方法や混入方法によらず、すべて始発から数時間の間に膨張傾向を示す。この場合も、SAPの製造方法や混入方法によって変化の傾向が若干相違する。練り混ぜ水の10%を貯水したSAP-AL(10%W)は材齢8時間程度までは膨張傾向を示すが、その後はSAP無混入の供試体と同様の急激な収縮が材齢12時間程度まで継続し、それ以降は緩やかになる。一方、SAP-Bを用いて10%を貯水させたSAP-BL(10%W)、BS(10%W)については、始発後材齢8時間程度まで膨張傾向を示すのはSAP-AL(10%W)と同様であるが、それ以降は急激な収縮を示すことなく、穏やかに収縮が進行している。特に大径の粒子を用いて多量に貯水させたSAP-BL(20%W)は大きな膨張を示し、材齢12時間以降の収縮は小さい。一方、吸水能相当の水を加えているSAP-BL(0.39%C)は練り混ぜ水の10%をSAP-Bで保持させたものと同様の变化傾向を示す。すなわち、自己乾燥を補

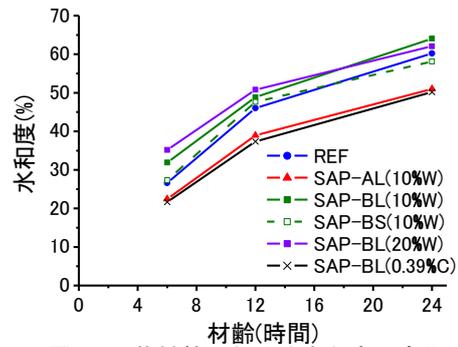


図-7 若材齢における水和水度の変化

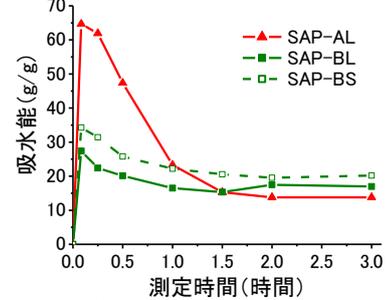


図-8 製造方法の異なるSAPの吸水能変化

償する分だけの水量を余分に加えなくても、それと同様の自己収縮低減効果をSAP-Bを使用して一部をゲル状の水分とした配合でも得られていることになる。

図-7は水和水度の変化を表したものである。材齢6時間においてはSAP-BLを使用して10%および20%の練り混ぜ水を貯水させた供試体が無混入の供試体よりも高い水和水度を示しているが、材齢が進むにつれその差は縮まり、材齢24時間においては同程度の水和水度を示している。しかし、同様に10%相当の練り混ぜ水をゲル化して貯水させたSAP-AL(10%W)の材齢6時間における水和水度は無混入のものよりも低く、材齢24時間においても低いままである。また、内部養生のための養生水を加えたSAP-BL(0.39%C)も、SAP-AL(10%W)と同様に水和水度は無混入のものよりも低い。

図-8はSAPに飽和水酸化カルシウムを吸水させたときの吸水能の変化を示したものである。SAPは製造方法によって吸水能およびその保持傾向が大きく異なり、水溶液重合法で製造されたSAP-Aは初期に大量の水分を吸収して、その水を1時間程度でかなり放出してしまっている。一方、逆相懸濁重合法で製造されたSAP-Bは初期における水分の吸収量はSAP-Aと比べると小さいが、その後は脱水を生ずることなく、数時間後にはSAP-Aよりも多くの水量を保持している。このような脱水傾向は誘導期以降の水和反応が活発化するときの水分供給に影響すると考えられる¹¹⁾。SAP-Bは内部貯水を安定的に保持し、長時間にわたって供給できたため、膨張後の収縮が緩やかになったと考えられる。また、このような吸水・脱水傾向の相違は水和水度変化にも影響したと考えられ、SAP-ALは水和反応の加速期において供試体断

面全体に十分な水分を安定的に供給できなかつたために、水和度が他の SAP-B 種を加えた供試体よりも低く、自己収縮も大きくなったと考えられる。

3.2 電気抵抗率の変化と組織形成過程との対応

図-9 は電気抵抗率の変化を示したものである。SAP 混入の有無に関わらず、電気抵抗率が増大し始める時間はいずれの供試体も同様であるが、増加割合は SAP の有無および混入方法の違いによって差が生じている。SAP 無混入の供試体は材齢 2 時間程度から電気抵抗率が増大し始め、終結付近である材齢 5 時間程度で増加傾向が弱まり、材齢 24 時間まで緩やかに増加し続ける。また、練り混ぜ水の 10% を保持させるようにした SAP-AL (10%W)、BL (10%W)、BS (10%W) は無混入の供試体とほぼ同じような変化傾向を示すが、材齢 24 時間における電気抵抗率はわずかではあるが無混入のものよりも高くなる。さらに、SAP の混入量を増やした SAP-BL (20%W) は、材齢 2 時間程度から電気抵抗率が急激に増加し、材齢 24 時間において、SAP 無混入の供試体よりもはるかに高い電気抵抗率を示す。図-7 に示したように、材齢 24 時間における水和度は練り混ぜ水の一部を SAP-B で保持させたものも無混入のものも同程度の水和度を示しているため、水和物量には相違はなく、また、細孔溶液の電気特性にも大きな差異はないと推察される。すなわち、図-9 の結果からは内部組織に相違があると考えられ、SAP によってより多くの水分を吸収させることで電気伝導の主たる経路となる毛細管空隙ネットワーク構造は変化していたと考えられる。その一方において、練り混ぜ水に自己乾燥を補償するための余分な水量を加えた SAP-BL (0.39%C) は、材齢 2 時間程度から電気抵抗率が増大し始めるのは同様であるが、その変化割合は小さい。材齢 24 時間における電気抵抗率も他の配合や SAP 無混入の供試体よりも低い。つまり、セメントペーストマトリックスの水セメント比はそのまま、さらに加水してゲル化した水分として存在することが新たな空隙の導入と同様の効果をもたらす、SAP 無混入の供試体

よりも疎な構造が形成されたと考えられる。

表-2 は圧縮強度試験の結果を示したものである。圧縮強度は SAP 無混入の供試体、練り混ぜ水の一部を SAP に保持させた SAP-BL (10%W)、SAP-BS (10%W)、SAP-BL (20%W)、SAP-AL (10%W)、余分に水量を加えた SAP-BL (0.39%C) の順に高い強度を示した。練り混ぜ水の 10% を貯水させた SAP-BL (10%W)、SAP-BS (10%W) は圧縮強度が無混入のものとは比べてわずかに強度が低下しただけである。また、SAP の混入量を増やした SAP-BL (20%W) や SAP の製造方法が違う SAP-AL (10%W) は他の練り混ぜ水の一部をゲル化させた供試体と比較して強度の低下割合が大きくなった。SAP の吸水能相当の水分を加えるという従来の内部養生法に基づいた配合である SAP-BL (0.39%C) は、大きな強度低下を生じている。自己収縮低減のために内部養生材として SAP を用いる場合の一つの大きな問題として強度への悪影響が指摘されてきたが、図-6 に示したように SAP-BL を用いて練り混ぜ水の 10% を貯水させた場合も内部養生水に相当する量の水分を加えて自己収縮の低減を図った場合も同程度の自己収縮を示している。これより、練り混ぜ水の一部をゲル状にして内在させることは強度への影響を低減した上での自己収縮低減法でもあると考えられる。また、図-9 に示したように、SAP に練り混ぜ水の 10% を貯水させたものはどれも SAP 無混入と同様の電気抵抗率を示していることから、少なくとも初期における組織形成においては、物質透過性上も問題のない毛細管空隙ネットワークが形成されていたことになる。よって、練り混ぜ時の水量を増やさずに一部をゲル化して内部貯水をさせることは有用な手段になりうるものと期待される。

図-10 は材齢 24 時間における粗大毛細管空隙の 2 点クラスター相関関数の変化を示したものである。ここに 2 点クラスター相関関数の y 切片は着目相である粗大毛細管空隙の体積率を表しており、SAP 無混入のものと同様に練り混ぜ水の一部を保持するように SAP を混入した供試

表-2 有効水セメント比の異なる供試体の圧縮強度 (材齢 7 日)

配合名	圧縮強度(N/mm ²)
REF	73.1
SAP-AL(10%W)	66.1
SAP-BL(10%W)	70.1
SAP-BS(10%W)	69.0
SAP-BL(20%W)	67.7
SAP-BL(0.39%C)	59.0

— REF — SAP-AL(10%W) — SAP-BL(10%W)
 - - - SAP-BS(10%W) — SAP-BL(20%W) — SAP-BL(0.39%C)

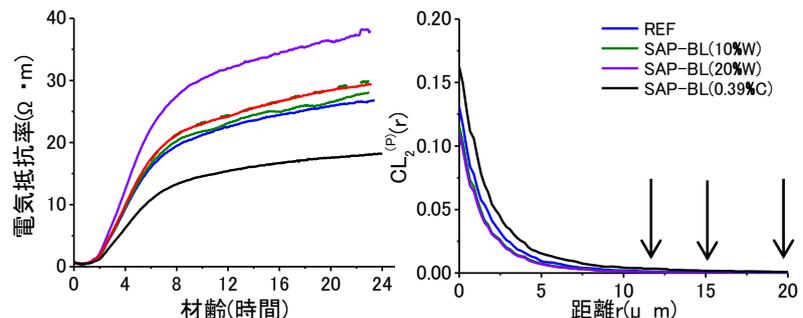


図-9 若材齢における電気抵抗率の変化

図-10 粗大毛細管空隙の 2 点クラスター相関関数 (↓: 収束距離)

体どちらも同程度の空隙量であることがわかる。それに対して、吸水能に相当する水量とともに SAP を混入した場合は空隙量が他の配合よりも大きくなった。また、関数は距離 r が大きくなると、そのようなクラスターが存在しなくなるため、0 に収束する性質があり、その収束する距離（図中矢印）は着目相である粗大毛細管空隙の最大径の目安となる値である。収束距離は無混入のものが $15\mu\text{m}$ 程度、SAP により練り混ぜ水の一部を置換したものが $12\mu\text{m}$ 程度であるが、余分に水量を加えたものは $20\mu\text{m}$ 程度であり、粗大毛細管空隙の最大径が無混入のものや練り混ぜ水の一部をゲル化させたものよりも大きい。このことから、SAP を吸水能相当の水量とともに混入させることにより毛細管空隙ネットワークの分断は遅延し、加速期以降に SAP が保持していた水分が移動することができたために収縮は低減されたと考えられる。一方、練り混ぜ水の一部をゲル化させたものは SAP 無混入のものよりも粗大毛細管空隙の最大径が小さく、水分移動経路の分断が活発に行われていると考えられる。それにも関わらず、練り混ぜ水の一部を SAP に保持させたものの方が SAP 無混入のものよりも収縮が低減されている。これについてはさらに検討を要すが、ゲル化した水分を存在させることにより水和反応がセメントペーストマトリックス内において均等に進行せず⁶⁾、SAP 近傍においては水分が移動できるような組織形成がされていたことが考えられる。

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 を添加し、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自己収縮特性を水和反応の進行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) 練り混ぜ水の一部を SAP によりゲル状にすることで、内部養生水として水量を加えなくても若材齢における自己収縮を低減することができる。
- (2) 若材齢における水和度は SAP の存在に影響されるが、材齢が経過するにつれ、その影響は小さくなる。
- (3) SAP の吸水・脱水特性の相違は加速期における水分供給量を変化させ、若材齢における体積変化や水和度に影響を与えると推察される。
- (4) SAP を添加すると圧縮強度は低下する。しかし、練り混ぜ水の一部を SAP に保持させることにより、圧縮強度の低下を小さくすることができる。
- (5) セメントペースト中のゲル化した水分は組織形成過程に影響を及ぼし、一様ではない水和反応の進行が自己収縮の低減に寄与していると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史: 軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.24, No.1, pp.399-404, 2002
- 3) 横田光一郎, 五十嵐心一: 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
- 4) 桑原寛司, 五十嵐心一: 超吸水性ポリマー混入モルタルのレオロジー特性に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.1378-1383, 2014
- 5) Mechtcherine, V., Secieru, E. and Schröfl, C.: Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars — Development of yield stress and plastic viscosity over time, *Cement and Concrete Research*, Vol.67, pp.52-65, 2015
- 6) 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
- 7) Justs, J. et al.: Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.76, pp.82-90, 2015
- 8) Ji, T. et al.: Effect of lightweight aggregate on early-age autogenous shrinkage of concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.112, No.3, pp.355-364, 2015
- 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) 内藤大輔, 五十嵐心一: 鉱物質混和材の混入による硬化体組織形成過程の変化がセメントペーストの電気伝導特性に及ぼす影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.32, No.1, pp.149-154, 2010
- 11) Schroefl, C. et al.: Sorption kinetics of superabsorbent polymers (SAPs) in fresh portland cement-based pastes visualized and quantified by neutron radiography and correlated to the progress of cement hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol.75, pp.1-13, 2015