

論文 空間分布特性から見た超吸水性ポリマーの内部養生効果

荒金 延明^{*1}・五十嵐 心一^{*2}・小池 祐輝^{*3}

要旨：自己収縮抑制を目的とした内部養生法に用いられる超吸水性ポリマー(SAP)に関して、セメントペースト中の分散性を空間統計量により評価した。また、SAP の水分到達距離を微小硬度測定により推定した。その結果、化学収縮を補償するのに十分な量の SAP を混入しても、内部水分が供給される距離は高々200 μ m程度であり、SAP の周囲には自己乾燥から保護されていない領域が存在するため、自己収縮は著しく低減されるが完全には抑制されないことが明らかとなった。

キーワード：自己収縮, 超吸水性ポリマー, 点過程, 空間分布特性, 水分到達距離, 微小硬度, 保護領域

1. 序論

コンクリート構造物の長大化にともない、近年では高強度コンクリートの使用が一般的になっている。しかし、高強度コンクリートにおいては自己収縮の発生が問題となりうる。この現象は、セメントの水和反応にともなう体積収縮に起因しており、養生条件、水セメント比、セメントの種類などにより収縮の程度は大きく変化する¹⁾。また、収縮拘束により生じるひび割れは、コンクリートの強度低下や有害物質の侵入経路となりうるものが懸念される。したがって、自己収縮の抑制を目的とする合理的な解決策の確立が必要とされている。

自己収縮を抑制する手法として、コンクリート打設時に保水性粒子を混入する内部養生法がある。この手法は、保水性粒子を貯水槽として内部に配置し、水和反応の進行にともない自己乾燥により空となりうる部分へ水分を供給することで、自己収縮を低減する効果を期待している。一般に、保水性粒子としては軽量骨材や超吸水性ポリマー：SAP (Super Absorbent Polymer) の使用が検討されている。軽量骨材については、飽水させた軽量骨材と普通骨材の一部を置換することによる自己収縮の低減効果が既に報告されている^{2), 3)}。また、Bentz ら⁴⁾により、軽量骨材からセメントペーストへ供給される水分の到達距離を、自己乾燥から保護された領域とみなし、その領域の連続性の観点から、自己収縮抑制機構を明らかにしようとする研究がなされている。これは、凍結融解作用に対する抵抗性において、気泡間の距離をある値以下にすれば、コンクリートが気泡により保護されるという保護領域の考え方に基づいている。この考え方に立つならば、内部養生材の空間的な配置が重要であり、内部養生効果を材料設計に組み込む場合には、保水性粒子の寸法や分散性を考慮しなければならないことになる。こ

の際、保水性能に優れた粒子をペースト全体に分散させようとするならば、寸法の小さな SAP の方が内部養生材としてより効果的であると考えられる。しかし、一方において SAP の混入は強度低下をもたらすことになり、特に吸水能の大きな SAP は膨張後の寸法が大きく、強度低下は避けられない^{5), 6), 7)}。したがって、SAP の使用に関しては、SAP 量、寸法、およびその空間配置の3点を最適化する必要があるが、コンクリート用に開発された SAP について、それら3つのパラメーターと自己収縮抑制効果の関係を詳細に検討した例は少ない⁴⁾。

本研究では、SAP の混入量を変化させたときの空間分布特性を空間統計量により評価する。さらに、SAP からセメントペースト中に供給される水分の到達距離、およびそれにとまなうセメントペースト保護領域を界面領域の微小硬度測定結果に基づいて考察し、自己収縮抑制効果と SAP の空間分布特性との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびセメントペーストの配合

セメントは普通ポルトランドセメント (密度：3.15g/cm³, 比較表面積：3310cm²/g) を使用した。使用した高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸系である。内部養

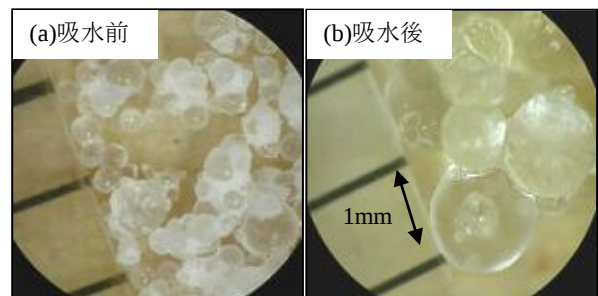


図-1 吸水前後のSAP

*1 金沢大学 工学部土木建設工学科 (正会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 教授 博(工) (正会員)

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

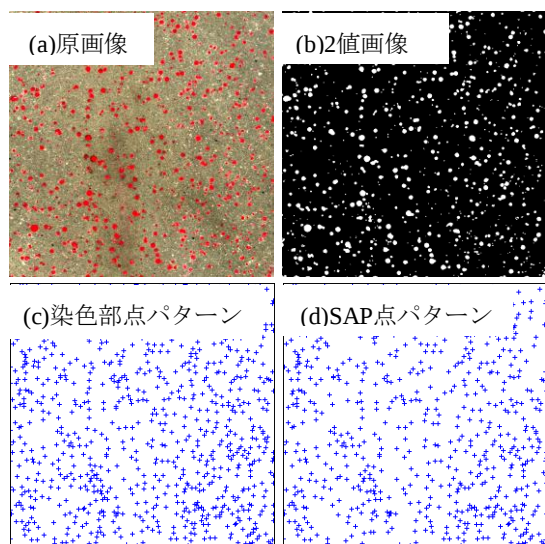


図-2 SAPおよび重心点抽出画像の例 10mm

生材として用いた SAP はコンクリートの内部養生用に開発されたアクリルアミド・アクリル酸共重合体（密度：1.25g/cm³）の粒子であり、ほぼ単一粒度を有する。この SAP は自重の約 13 倍の吸水能を持ち、平均径は吸水前が 200μm、練り混ぜ中に速やかに吸水して吸水後は約 500μm にまで膨潤する（図-1）。なお、SAP は図-1 に示すように凝集状態のものもあるため、事前に 0.3mm のふるいでふるい分けを行い、これを通過したものを使用した。

2.2 配合および供試体作製

水セメント比が 0.25 のセメントペースト供試体（直径 50mm、高さ 100mm）を、ホバート型ミキサを使用して、初めにセメントと SAP を同時に投入し、JIS R 5201 の練り混ぜ手順に準じて作製した。SAP 混入量は、水セメント比 0.25 で到達しうる最大水和度時に生じる自己乾燥にとまなう空の空隙に水分を補給するのに必要な量として計算されるが^{5), 8)}、本研究では Jensen らの提案⁹⁾にしたがって式(1)により計算し、SAP の混入量はセメント質量の 0.35%とした。ここに、(W/C)_eは SAP 保有する内部養生水/セメント比、(W/C)はセメントマトリックスの水セメント比である。

$$(W/C)_e = 0.18(W/C) \quad (1)$$

また、比較のために、必要水量の 2 倍の水量を保持した SAP 混入量 0.70%の供試体および SAP を使用しないセメントペースト供試体も作製した。なお、作製した供試体はすべて所定材齢まで密封養生を行った。

2.3 画像取得と SAP 粒子抽出

(1) 染色部画像の取得

打ち込み後 24 時間にて、円柱供試体から厚さ 10mm 程度の薄板を 10 枚切り出し、エタノールに浸漬して内

部水分との置換を行った。赤色染料含有エポキシ樹脂を含浸し、樹脂の硬化後に、耐水研磨紙を用いて表面を研磨して画像取得試料とした。

スキャナーを使用して解像度 800dpi で研磨断面のカラー画像を取得した（図-2 (a)）。1 画像は 1100×1102 画素からなり、1 画素は 31.75μm に相当する。画像解析ソフトウェアを用いて画像の明度と色度に基づいた色抽出を行い、赤色染色部を抽出した。原画像と色抽出画像を目視にて比較し、色抽出されていない部分のみに対して手動補正を行い、空隙および SAP が抽出された 2 値画像を取得した（図-2 (b)）。

(2) SAP 抽出

(1)にて抽出された染色部には、SAP 粒子の他に、気泡および毛細管空隙が染色された部分も含まれる。画像から SAP 粒子の空間分布特性を計測するためには、この全染色部から SAP 粒子の染色部のみを抽出する必要がある。しかし、これをスキャナー画像中の染色部の幾何学的特徴から個々に識別することはできない。そのため、本研究では、以下のように統計的な手順を用いて SAP の抽出を行うものとした。

初めに、SAP 粒子を含まないセメントペースト供試体の画像を取得し、抽出された染色部の面積率とその円相当径を求めた。個々の粒子を円相当径順に並べ替えて、空隙径分布を求めた。

SAP を含む供試体の染色部抽出画像について、同様に染色部面積率および円相当径の空隙分布を求めた。粒子径 100μm 以下の部分の粒径分布は SAP 混入の有無に関わらずほぼ一致していたことから、気泡もしくは毛細管空隙由来の染色部としてこれらを除去した。

100μm 以上の粒径範囲に関して、100μm の刻み幅で分割し、その刻み幅の中で気泡の占める個数割合に相当する粒子を、SAP を含む供試体の相当範囲から無作為に抽出し除去した。これを各粒径範囲にて繰り返し、残された染色部を SAP が抽出された画像とした。染色された抽出点の重心位置を求め（図-2 (d)）、これを点過程 $X=\{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。以上の手順を取得したすべての画像で実行し、SAP 抽出画像を統計的に決定した。

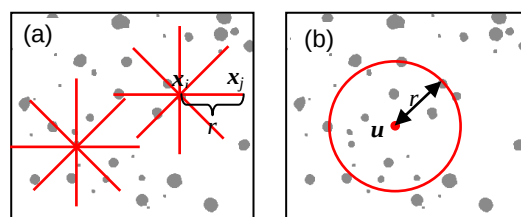


図-3 放射線テンプレート
および接触分布関数計算の模式図

2.4.2 点相関関数⁹⁾

(1) 定義

2 点相関関数とは、ある一定の長さの線分をランダムに画像上に落とした時、その線分の両端が同一相上に載る確率関数である。

着目相を P とし、任意の点 $(x_i=1,2,\dots,n)$ に関して次のような指示関数 $I(x_i)$ を定義する。

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i \in P) \\ 0 & (x_i \notin P) \end{cases} \quad (2)$$

$x_i \in P$ である確率を $P\{I(x_i=1)\}$ と書くことにすると、任意の線分 r の両端 x_i, x_j が同一相上に載るとは、同時確率 $P\{I^{(P)}(x_i)=1, I^{(P)}(x_j)=1\}$ が満たされることであり、2 点相関関数 $S_2^{(P)}(r)$ は式(3)で定義される。

$$\begin{aligned} S_2^{(P)}(r) &= \langle I^{(P)}(x_i) I^{(P)}(x_j) \rangle \\ &= P\{I^{(P)}(x_i)=1, I^{(P)}(x_j)=1\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $r=|x_j-x_i|$ であり、 $\langle \rangle$ は期待値を意味する。2 点相関関数は、 $r=0$ にて着目相の体積率を表わし、この点における勾配は着目相の比表面積に関係づけられる。2 点相関関数は距離の増大とともに減少し、理論上は体積率の自乗値に収束する性質を持つ。関数が最初に自乗値と交わるまでの距離は構造距離と呼ばれ、2 点の相関性がポアソン分布より大きな正の相関を示す範囲であり、粒子の空間分布を特徴づける距離となる。

(2) 計算方法

本研究においては、2 点相関関数を求めるため、放射線テンプレートを用いた。(図-3(a))。抽出した SAP 相の 2 値画像に対し、任意の位置に所定の長さを持ったテンプレートを載せ、原点と各方向の放射線の先端が SAP 相に載るか否かを判定した。この操作を画像上の任意の格子点で総点数が 10000 点となるまで繰り返した。放射線の長さを 0 から 350 画素まで変化させて、それぞれの距離に対応する 2 点相関関数を求めた。

2.5 点過程統計量

(1) 最近傍距離関数¹⁰⁾

最近傍距離関数は、任意の点 $x_i \in X$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在する確率を求める関数であり、式(4)より計算される。

$$\hat{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (4)$$

ここに、 s_i は最近傍距離、 b_i は各点 x_i から画像縁までの最短距離である。また、式(5)に示す $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、前述の s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数であり、観察視野 W の辺長を x, y とすると、次式により与えられる。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i)(y - 2s_i)\}^{-1} \quad (5)$$

(2) 接触分布関数¹¹⁾

接触分布関数は、点過程 $X=\{x_i; i=1,\dots,n\}$ が与えられたとき、画像内の任意の点 $u \in W \setminus X$ から最も近い点過程の点 $x_i \in X$ までの距離の確率関数であり、その定義は式(6)に示すとおりである。ここに、 $b(u, r)$ は点 u を中心とする半径 r の円であり (図-3(b))、 $N(B)$ は領域 $B \subset W$ 中にある X の点の数である。本研究においては、SAP 表面を点過程の点の集合とみなし、SAP 相を S として、画像上にランダムに点 $u \in S$ を落とし、その点から SAP 表面までの最短距離をそれぞれについて求め、接触分布関数を求めた。

$$\hat{H}(r) = P\{N(b(u, r)) > 0\} \quad (6)$$

2.6 セメントペーストの長さ変化試験^{5), 6)}

直径約 30mm、長さ約 400mm のポリエチレン製のコルゲートチューブを振動台の上に鉛直に保持し、振動を加えながら上部からセメントペーストを静かに注ぎ込んだ。十分に空気を追い出した後、テフロン製の栓をして、長さ変化測定用供試体とした。これを 20℃の恒温室にて水平にして保管し、図-4 に示す長さ変化測定装置を用いて所定材齢にて長さ測定を行った。供試体数は、それぞれの配合に対して 3 本であり、別途予備試験にて求めておいた凝結始発時を始点として、自己変形ひずみの平均値を求めた。

2.7 微小硬度試験

2.2 で作製した SAP 混入供試体の中央部から 20×20mm の試料を切り出した。耐水研磨紙を用いて供試体表面を注意深く研磨した後、JIS Z 2244 に従って微小硬度試験を行った。試験時の載荷荷重は 0.098N とし、同一距離における測定は 10 箇所にて行った。SAP 界面からバルクセメントペースト (界面の影響を受けないセメントペーストマトリックス) 方向に向かって 30μm 間隔で 270μm まで微小硬度測定を行い、SAP-セメントペーストマトリックス界面領域における微小硬度分布を求めた。

2.8 反射電子像観察および画像解析

2.2 にて作製した供試体の中央部を切り出し、エタノ



図-4 長さ変化測定装置

表-1 SAP面積率

SAP(%)	面積率(%)	
	理論値	実験値
0.35	7.3	5.5
0.7	13.7	10.5

ールに 24 時間浸漬して水分との置換を行った。さらに、 t -ブチルアルコールによる置換を行った後、凍結真空乾燥装置を用いて内部水を除去した。乾燥した試料に対して、真空樹脂含浸装置を用いて低粘度エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用いて観察面を注意深く研磨し、その表面に金-パラジウム蒸着処理を施し、電子顕微鏡観察試料とした。走査型電子顕微鏡を用いて、作製した試料から観察倍率 500 倍にて無作為に抽出した 10 断面の反射電子像をコンピュータに取り込んだ。1 画像は 1148×1000 画素からなり、1 画素は $0.22 \mu\text{m}$ に相当する。取得した反射電子像に対し、グレースケールに基づく 2 値化処理を行い、未水和セメントを抽出した 2 値画像を得た。

3. 結果および考察

3.1 SAP の空間分布特性

表-1 は染色部の面積率を比較して示したものである。SAP として抽出された部分の面積率は、個々の SAP 粒子が完全に膨潤したとして計算される値よりも 2-3% 程度小さい。これは、使用したコンクリート用に開発された SAP 中には貯水性を持たない破片状の部分(図-1)や練り混ぜ中に破壊する粒子も一部含まれていたためと考えられる。貯水されなかった水分によりマトリックスの有効水セメント比は増大することになるが、その増大は高々 1~2% である。

図-5 は、2.3 にて示した気泡および毛細管空隙に関する処理を行い、SAP を抽出した画像の重心点パターンの例を示したものである。混入量を増加させると SAP の点密度は明らかに増大するが、点数はステレオロジー量で

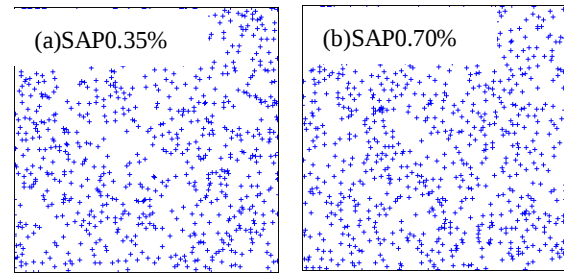


図-5 重心点抽出画像の例 10mm

はないため SAP 体積に比例しない。また、分散性に大きな差は見られず、2.3 にて述べた点の抽出法により、人為的な凝集性を導入することもなかったと判断される。

図-6 は、SAP 重心点に関する最近傍距離関数を示したものである。図中の破線は、点が完全ランダム分布を示すときの最近傍距離関数を表す。いずれの SAP 混入量においても、距離の小さい範囲にて関数値は破線に比べて小さく、SAP がセメントペースト中でランダム分布に比べてより規則的に分散していることを表わしている。点間距離に着目すると、いずれの SAP 混入量の場合も $250 \mu\text{m}$ 以下の距離で重心点が存在する確率はほとんどなく、互いに排他的であるハードコア領域が認められる。これらは、短距離領域においては SAP 自身が大きさを有するために互いに近接できず、同様の空間構造を形成することを示している。しかし、点間距離の増大にともない混入量による差が現れ、SAP 混入量 0.35% の場合は点間距離が $2000 \mu\text{m}$ 程度で、0.70% の場合は $1500 \mu\text{m}$ 程度で関数値が収束し、いずれの配合においても最大で 2mm 程度離れないうちに必ず他の点が見つかるような分布であることを示している。

図-7 は、SAP 粒子の 2 点相関関数を示したものである。SAP 混入量 0.35% の方が 0.70% のグラフよりも傾きが緩やかであり、混入量の増加によりセメントペースト単位体積中の SAP 比表面積に差があることを示している。また、SAP 混入量を 2 倍にすると構造距離が $200 \mu\text{m}$ 程度増大するが、概して SAP 粒子の空間的な分布の単位に大きな差はない。

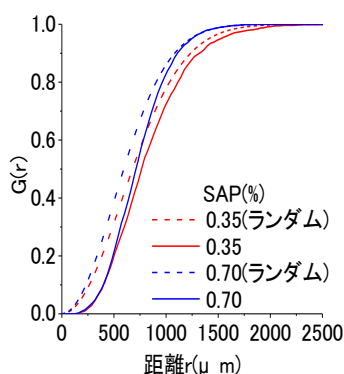


図-6 最近傍距離関数

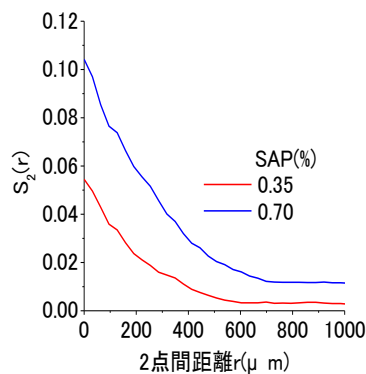


図-7 2点相関関数

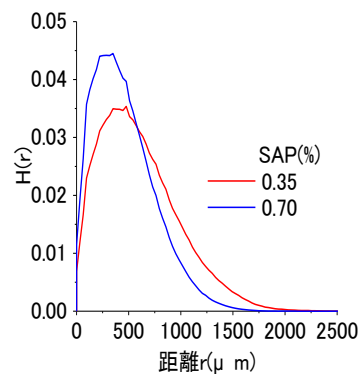


図-8 接触分布関数

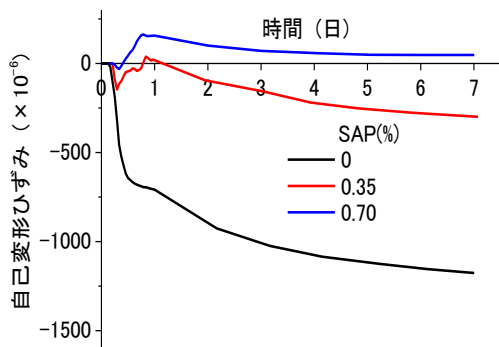


図-9 長さ変化試験結果

図-8 は、SAP 粒子表面に対する接触分布関数を示したものである。SAP 混入量 0.35% の場合、セメントペーストの任意の位置から 500 μ m 程度離れた距離において SAP 表面が存在する確率が高いことが分かる。一方、混入量を 0.70% と増大させた場合では SAP がより近接して存在するため、短い距離にて関数値のピークが表れており、300 μ m 付近に SAP 表面が存在する確率が高くなっている。

3.2 自己収縮特性

図-9 は、長さ変化試験の結果を示したものである。SAP を 0.35% 混入すると材齢初期にわずかな収縮を生じた後に膨潤を生じ、SAP 無混入に比べて自己収縮ひずみは著しく低減される。しかし、初期の膨潤以降に約 350×10^{-6} 程度の収縮を生じている。さらに、SAP を 0.70% 混入した場合は内部養生効果がより顕著に現れ、初期の収縮はほぼ抑制されて膨潤を生じる。しかし、この場合も材齢 1 日以降には収縮傾向が認められ、自己収縮は完全には抑制されていない。

3.3 セメントペーストの微視的構造

図-10 は、材齢 7 日における SAP 粒子-セメントペーストマトリックス界面領域の微小硬度分布を示したものである。いずれの混入量においても、SAP 界面付近の微小硬度がバルクセメントペーストに比べて大きくなっており、界面からの距離が 200 μ m 程度でバルクセメント

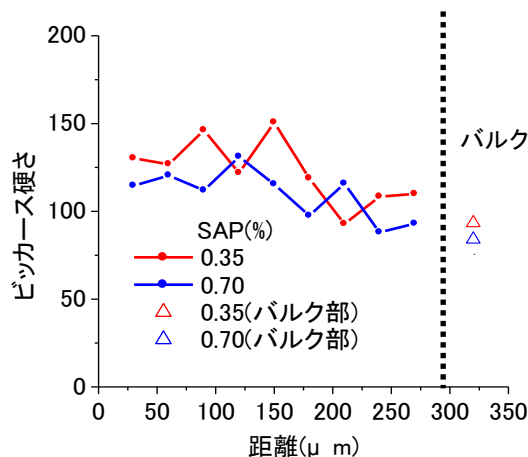


図-10 微小硬度試験結果

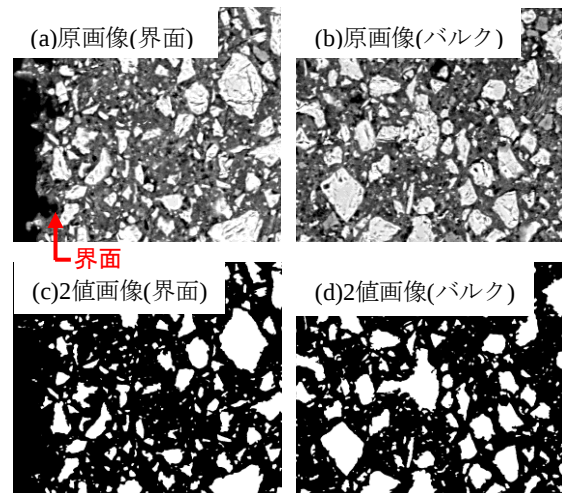


図-11 SAP混入試料の原画像および2値画像 50 μ m

ペーストと同程度の値にまで低下する。SAP から周囲のセメントペーストマトリックスに水分が供給されたことにより水和が進行し、微小硬度は増大したものと考えられる。SAP 混入量に関わらず、SAP 界面から 200 μ m 程度離れたところで微小硬度がバルクセメントペーストと同程度の値を示すのは、セメントペーストマトリックスの配合が同一であり、SAP 量が増しても互いに影響を及ぼさない距離だけ離れていたことを示し、両者において水分到達距離は 200 μ m 程度であったと考えられる。また、前述のようにマトリックス全体の有効 W/C は SAP 混入 0.70% の方が若干大きいので、微小硬度は SAP 混入 0.35% に比べて低い値を示している。

図-11 に、SAP を 0.35% 混入した普通ポルトランドセメントペーストの材齢 1 日における反射電子像および未水和セメントを抽出した 2 値画像を示す。バルクセメントペーストに比べ、SAP 界面付近では未水和セメント粒子が少なくなっていることが視覚的に理解される。界面領域においては大きなセメント粒子が接近できず、粒子充填性が低下する壁効果のため、未水和セメント粒子は少なくなる。しかし、図-10 に示したように材齢 7 日における界面近傍の微小硬度はバルクセメントペーストに比べて高くなっている。すなわち、未水和セメントが少ないにもかかわらず微小硬度が高かったことになり、界面における高い微小硬度は、水和の進行によってより緻密な組織が形成されたことを示している。すなわち、界面付近では SAP からの内部養生水分の供給を受け、バルク部に比べて水和反応がより進行し、セメント粒子は減少したものと考えられる⁴⁾。

SAP を 0.70% 混入した供試体において、任意のセメントペーストから SAP 表面までの平均距離が 300 μ m であったのに対し、SAP からの水分到達距離は 200 μ m 程度であった。このことより、化学収縮を補償する 2 倍量の SAP を添加しても、本供試体ではセメントペースト中に SAP

からの水分供給を受けない領域が存在していたことが推察され、自己収縮は完全には抑制できなかったものと考えられる。SAPによる内部養生効果は、周囲のセメントペーストマトリックスへの水分供給距離も重要な要因となる³⁾。Kovlerは¹²⁾、初期の材齢数日には数mmの水分移動も可能であり、これによって自己収縮は抑制しているとしている。本研究において、そのような水分の長距離移動が可能であったのは初期の自己収縮が抑制されていた材齢24時間程度までであり、それ以降はそのような移動は制限され、結果として水分到達距離が200 μ m程度に低下したと考えられる⁴⁾。しかし、完全には抑制されなくとも自己収縮は著しく低減されており、Kovlerが指摘するように¹²⁾、この部分的な低減効果を有効な効果として評価する体系が必要と考えられる。

4. 結論

空間統計量の導入により、セメントペーストマトリックス中のSAPの分散性を定量評価し、自己収縮抑制効果との関係性を考察した。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) SAP混入量の相違によるセメントペースト中における分散性の相違は認められず、いずれの混入量においても、SAPはランダム分布よりも規則的に分布し、全領域にわたって均質に分布していた。
- (2) SAP混入量を増大させてもSAPの空間分布の構造単位の大きさには大きな差はない。
- (3) 最大到達水和度時の自己乾燥を補償する量としてSAPを混入したとき、任意のSAP重心点から2mm以内には必ず他点が存在するような空間分布を示す。
- (4) SAP粒子表面に対する接触分布関数より、セメントペーストの任意の点から300~500 μ m付近にSAPを見つかる確率が最も大きいことが示された。
- (5) 微小硬度はSAP界面付近でバルク部よりも大きな値を示し、水和の進行が確認された。
- (6) 微小硬度から示唆される水分到達距離は200 μ m程度であり、本配合においてはSAPからの水分供給を受けない領域が存在し、自己収縮が完全には抑制されなかったと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究C, 課題番号: 21560482, 研究代表者: 五十嵐心一)の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, 日本コ

ンクリート工学協会, 2002

- 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) Henkensiefken, R. and Bentz, D. et al.: Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions, Cement & Concrete Composites, Vol.31, No.8, pp.427-437, 2009
- 4) Bentz, D. P. and Snyder, K. A.: Protected paste volume in concrete, Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.11, pp.1863-1867, 1999
- 5) Jensen, O. M. and Hansen, P. F.: Water-entrained cement-based materials, I .Principles and theoretical background, Cement and Concrete Research, Vol.31, No.4, pp.647-654, 2001
- 6) Jensen, O. M. and Hansen, P. F.: Water-entrained cement-based materials, II .Experimental observations, Cement and Concrete Research, Vol.32, No.6, pp.973-978, 2002
- 7) 五十嵐心一, 渡辺暁央: 超吸水性ポリマーの使用による自己収縮の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, Vol.59, pp109-116, 2005
- 8) Kovler, K. and Bentur, A.: Efficiency of internal curing with water-saturated lightweight aggregates in terms of autogenous shrinkage reduction, Proceedings of the international RILEM conference on Volume changes of hardening concrete: testing and mitigation., Denmark, pp.107-115, August, 2006
- 9) Coker, D. A. and Torquato, S.: Extraction of morphological quantities from a digitized medium, Journal of Applied Physics, Vol.77, No12, pp.6087-6099, 1995
- 10) Reed, M. G. and Howard, C. V.: Edge-corrected estimators of the nearest-neighbour distance distribution function for three-dimensional point patterns, Journal of Microscopy, Vol.186, Pt 2, pp.177-184, 1997
- 11) Stoyan, D., Kendall, W. S. and Mecke, J.: STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd ed., JOHN WILEY & SONS Ltd., Chichester, 1995
- 12) Kovler, K.: Effect of internal curing on autogenous deformation, RILEM Report 41, Internal curing of concrete, state of the Art Report of RILEM TC 196-ICC (eds. Kovler, K. and Jensen, O. M.), RILEM Publication S. A. R. L., pp.71~104, 2007