

論文 高吸水性ポリマーの吸水特性とコンクリートのスケーリング抵抗性の対応

五十嵐 心一*1・山下 総司*2

要旨: 種類の異なる高吸水性ポリマー (SAP) を一定割合で加えたコンクリートを作製し、表面を塩水に浸漬して凍結融解作用の繰り返しを行い、スケーリング抵抗性を評価した。また、セメント溶解液を浸漬液とするティーバッグ試験およびセメントペースト中の SAP 粒子断面観察を行い、SAP の吸水・保水特性を評価した。その結果、SAP を少量添加することによりスケーリング抵抗性は大きく改善されることが確認された。また、保水能は低くとも、コンクリート中にてティーバッグ試験結果以上の吸水能を持ちえると推察された SAP は、少ない粒子数で粒子間隔も大きくなるが、優れたスケーリング抵抗性をコンクリートに付与した。

キーワード: 高吸水性ポリマー, スケーリング, 吸水能, 放水性, 保水能, ティーバッグ試験

1. はじめに

高吸水性ポリマー (Superabsorbent Polymer:以下 SAP と称す) をコンクリート用混和材として開発、適用していることとする試みが国内外にて始められて久しい¹⁾。過去 20 年程度にわたって、RILEM に設置された研究委員会が研究を牽引し、その成果は State-of-the-Art レポートとして発刊されている²⁾。その報告のなかでも言及されていて、SAP のコンクリート用混和材としての有用性が確認され、有望視されているのが、自己収縮やプラスチック収縮を低減する内部養生材³⁾、およびフレッシュコンクリートのレオロジー調整材料⁴⁾としての利用である。これらはいずれも、練混ぜ直後のフレッシュ時および若材齢期のコンクリートの物性改善を目的としていて、SAP が吸水して最大の吸水能に達した後、周囲の環境条件に影響を受けながら内部の貯水を徐々に放水していく性質を利用している。一方、硬化コンクリートの性能改善に関してはというと、SAP を多量に混入することにより大きな強度低下を生じることが避けられない。このため、比較的少量の混入でありながら顕著な効果が認められる適用として、凍結融解抵抗性を改善する混和材としての利用が有望視されている^{5,6)}。

SAP を使用することによる凍結融解抵抗性の改善として、これまではスケーリング抵抗性に注目して検討が進められてきた。上述の RILEM の研究委員会でもその活動の一環として凍結融解抵抗性評価に関するラウンドロビン試験を実施して、その結果を報告している⁵⁾。著者らもラウンドロビン試験に参画する一方にて、SAP を混入したコンクリートのスケーリング試験を実施し、使用する SAP の種類によってスケーリング抵抗性が異なること、およびその相違は SAP 混入によるブリージング特性の相違に関係づけられることを指摘している⁷⁾。

以上の研究の進展にともない、近年では SAP の優れた吸水能自身よりも、いかにその内部貯水を維持しうるかという特性が注目されるようになってきている。すなわち、例えば内部養生材としての適用では、低水セメント比のコンクリートでは、水和反応の進行にともない自己乾燥状態に陥るが、SAP を使用すれば周囲に内部貯水を供給して内部相対湿度の低下を抑制するので、自己収縮が低減されると説明されてきた。しかし、その後、例えば X 線トモグラフィなどによって、セメントペースト中の SAP を直接観察することが可能になり⁸⁾、SAP は周囲の相対湿度に関わらず、SAP 自身の化学的性質に応じて放水し、自らは収縮していく性質があり、これが SAP によるコンクリートの性能改善にかかわると考えられるようになってきている^{9,10)}。このため、従来の関心の中心であった水セメント比が小さい場合の内部養生効果だけではなく、水セメント比に関わらず SAP がいったん吸水した貯水を、ある程度長時間保水し続ける場合と、速やかに放水しながら空隙を残す場合のコンクリートの物性への影響に関心が向けられている。そして SAP の使用目的に応じて、吸水や放水特性の異なる SAP を使い分けることの重要性も指摘されている⁹⁾。使用目的に応じた SAP の使い分けの根拠となる考え方を明確にすることができれば、コンクリート用混和材としての SAP の開発に方向性を与え、結果として用途に応じた製品の開発を促すものと期待される。

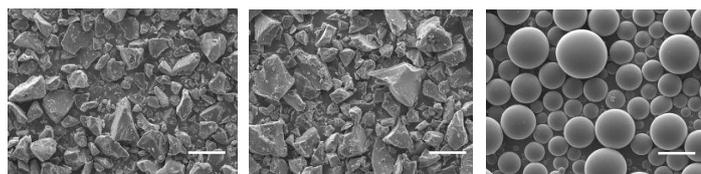
本研究においては、種類の異なる SAP の高アルカリ溶液中での吸水、保水特性と、セメントペースト中での吸水性能を実験的に明らかにする。そして、それらの SAP を使用したコンクリートのスケーリング抵抗性を、SAP の吸水・保水特性およびその粒度分布の変化に関連づけながら論ずることを目的とする。

*1 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類教授 博 (工) (正会員)

*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)

表-1 SAPの物理的性質

SAP名	密度	吸水能	乾燥時	吸水時
	(g/cm ³)	(g/g)	平均径 (μm)	平均径 (μm)
SAP-A	1.40	25	60	200
SAP-B	1.40	30	60	200
SAP-C	1.40	25	—	—



(a) SAP-A (b) SAP-B (c) SAP-C

図-1 SAPの顕微鏡像(スケールバー=100μm)

表-2 コンクリートの配合

配合名	Gmax (mm)	スラ ンプ (cm)	W/C (%)	空気 量 (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	S	G	Ad.1	Ad.2	SAP
基準	25	12±2	50	5.0	44.6	164	329	789	982	0.986	0.005	0
SAP-A	25	12±2	50	3.6	44.6	178	329	789	982	0.986	0.003	0.493
SAP-B	25	12±2	50	3.0	44.6	184	329	789	982	0.986	0.002	0.493
SAP-C	25	12±2	50	3.7	44.6	177	329	789	982	0.986	0.003	0.493

注) Ad.1 : AE 減水剤, Ad.2:AE 助剤, 水量 (W) には SAP の見込みの吸水量を含む。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³, 比表面積: 3310cm²/g)である。骨材には石川県手取川産の川砂(密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 2.05%), および川砂利(密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 1.81%, 最大骨材寸法 25mm)を使用した。

使用した SAP は水溶液重合法で製造された SAP 2 種類(それぞれ SAP-A, -B)と逆相懸濁重合法で製造された SAP (SAP-C) の 3 種類である。それぞれの SAP の製造メーカー提供の物理的性質を表-1 に、およびその顕微鏡像を図-1 に示す。図-1 より明らかのように、水溶液重合法で製造された SAP は不規則形状の粒子からなり、これに対して逆相懸濁重合法の SAP は整った球状粒子であるのが特徴的である。

2.1 コンクリートの配合

スケーリング試験を実施したコンクリートの配合を表-2 に示す。SAP を混入していない基準のコンクリート配合の水セメント比は 0.5 とした。目標スランブを 12±2cm とし、空気量は 5±1% とした。なお、SAP を混入している場合は、SAP が気泡と同様の役割を果たすという基本的な前提に立ち、SAP の膨潤後の体積を含めて 5±1% になるようにした。SAP の使用量は既往の研究²⁾を参考に、コンクリートの強度に大きな影響を与えない値として、セメント質量の 0.15% 一定とした。乾燥した SAP 粉体の体積は無視できるとし、SAP は吸水後には飽水したゲル状の水塊になると仮定した。SAP がコンクリート中にて吸水する水量を見込んで、その分水量を増やすことによってセメントペーストマトリックスの水セメント

比に変化は生じないようにした。SAP の吸水能に応じて加える水量は、後述のティーバッグ試験にて得られた値を考慮して決定し、試験練りにて混和剤量を調整しながら、ワーカブルなコンクリートであることを確認した。このため、同水セメント比で同量の SAP を加えながらも、全体の水量は異なることになる。表-2 の水量と空気量については後述する。

2.2 試験項目

(1) SAP の吸水能試験

RILEM TC260-RSC 提案法¹¹⁾に従って求めた。初めに水セメント比が 5 のセメント溶解液を作り、これを 24 時間連続して攪拌して、セメントを全量溶解させた溶液のろ過液を浸漬溶液とした。所定量の乾燥 SAP 粉体を量り、JIS K7223¹²⁾に準じて作成したティーバッグに入れた。これを先に作成しておいた水セメント比 5 のセメント溶解液に浸漬し、浸漬時間 1, 5, 10, 30, 60 分および 3 時間、24 時間にてティーバッグ全体の質量を計測し、式(1)により吸水率 AC を求めた。

$$AC = \frac{m_3 - m_2 - m_1}{m_1} \quad (1)$$

ここに、m₁: 乾燥 SAP 粉体の質量、m₂: 飽水したティーバッグの水切り後の質量、m₃: 所定の浸漬時間後の SAP 入りのティーバッグの水切り後の質量である。

(2) スケーリング試験

RILEM CDF 試験¹³⁾および JSCE-K 572-2012¹⁴⁾を参考にしてスケーリング試験を行った。立方体供試体(10cm×10cm×10cm, 各配合の供試体数=3 個)を作製し、打込 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生(20±2℃)を行った。その後、供試体を温度 20℃, 湿度 60%の実験

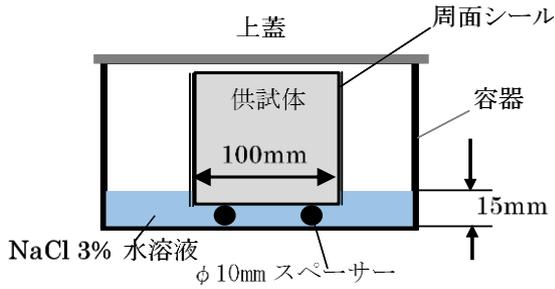


図-2 NaCl 溶液浸漬方法

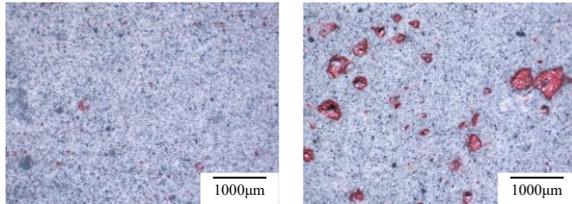


図-4 セメントペースト中の染色粒子
(a) 基準ペースト (b) SAP-B 混入ペースト

室にて材齢 28 日まで静置した。浸漬開始 3 日前にてコンクリートの打ち込み面とその対向面以外の 4 面をエポキシ樹脂塗材にてシールした。型枠面を浸漬面として下方に向けて、NaCl 水溶液（濃度 3%）にスパーサーから上方へ深さ 5mm 程度まで浸漬するようにした（図-2）。これを冷温槽（-22℃）に 18 時間静置した。その後、供試体を冷温槽から取り出して、20℃の室内にて 6 時間静置した。以上を凍結融解の 1 サイクルとして、凍結融解サイクルを与えた。凍結融解 5 サイクルごとにスケーリング量(μ_s)を計測し、累積スケーリング量を浸漬面積(A)で除して、単位面積当たりの累積スケーリング量(m_n)求めた (式(2))。

$$m_n = \frac{\sum \mu_s}{A} \quad (2)$$

(3) SAP 粒子の粒度分布の計測

1) 乾燥 SAP 粒子の粒度分布

顕微鏡法(乾式振りかけ法)¹⁵⁾を用いて乾燥状態の SAP の粒子径の計測を行った。少量の SAP を試料ホルダー上にふりかけ、電子顕微鏡を用いて分散状態の画像を取得した。一部接触している部分については個々に目視によって判断して、手動による分離補正を行った。画像解析を用いて、個々の粒子の円相当径を求めた。なお、この場合の粒子径は粒子の最大投影面積(図-3)を円に置き換えた時の直径(円相当径)に相当する。また、総観察粒子数はいずれの SAP も約 1100 個であった。

2) セメントペースト中の SAP の粒度分布

表-2 に示したコンクリートの配合のセメントペースト部分と同配合の SAP 混入小型セメントペースト供試体(30mm×30mm×20mm)を作製した。SAP 混入セメン

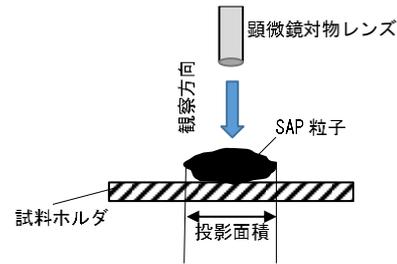


図-3 投影面積の取り方

トペースト打ち込み後 24 時間にて試料を脱型して、直ちに精密低速切断機を用いて試料を複数箇所切断して断面に SAP 粒子を露出させた。これをエタノールに 24 時間浸漬して、水分とエタノールの置換を行った。その後、断面に低粘度赤色エポキシ樹脂を塗布し、常温にて硬化させた。樹脂の十分な硬化を確認した後に耐水研磨紙を用いて表面を注意深く研磨し、断面の画像(4μm/画素)を取得した(図-4)。画像内にて赤色に染色された部分を 2 値化して抽出し、画像解析により赤色部の面積率、粒子数および円相当径を求めた。SAP を混入していない基準セメントペースト供試体についても同様の手順を適用して赤色部を評価し、これをセメントペーストマトリックス中の毛細管空隙およびその他の欠陥部の染色部とみなし、その粒子数および面積率を求めた。基準セメントペースト中には存在しないような大きな粒子をすべて SAP 粒子断面とし、基準セメントペースト中にて観察される微細な赤色粒子は毛細管空隙その他の欠陥部として、これに相当する赤色粒子を SAP 混入ペースト像から削除し、残された粒子を SAP 粒子断面とみなした¹⁶⁾。なお、2次元の粒度分布は 3次元の粒度分布と必ずしも一致するとは限らない。しかし、ランダムに分散している粒子群に対して多数の断面を切り出して、十分な数の粒子を観察した場合は、断面の 2次元の粒度分布は 3次元の粒度分布を反映すると仮定している¹⁷⁾。

(4) コンクリートの圧縮強度試験

直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を打ち込んだ。材齢 24 時間にて脱型して、水中養生(20℃±2℃)を行った。材齢 28 日にて圧縮強度試験を行った。

3. 結果および考察

3.1 SAP の吸水能試験

図-5 にティーバッグ試験結果を示す。水溶液重合法の SAP-A,B は浸漬開始直後の吸水時間 10 分にて、吸水量は急激に増大して最大の吸水能に達し、その後吸水時間 3 時間まで吸水量が低下している。SAP-A よりも SAP-B の低下割合が大きくなっており、最大吸水能の 15% 程度を失っている。また、SAP-A と B を比較すると、SAP-B の方が大きな吸水能を有し、これは製造者公称値(表

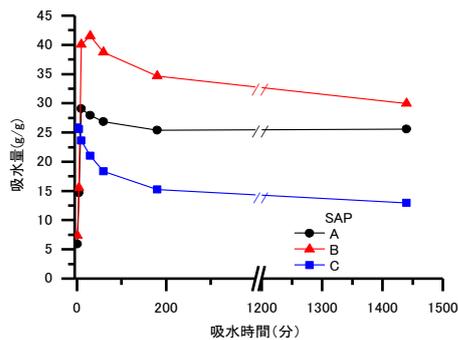


図-5 ティーバッグ試験結果

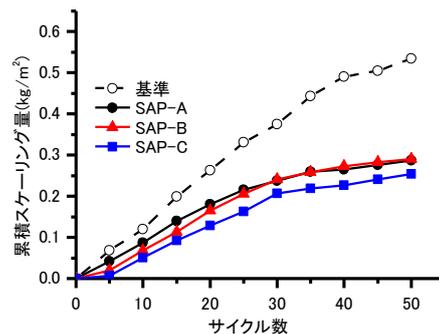


図-6 スケーリング試験結果

表-3 コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

基準	SAP-A	SAP-B	SAP-C
30.3	31.0	33.2	36.0

一1)とも一致する。吸水時間3時間以降は吸水能に大きな変化はなく、SAP-A, Bとも公称値とほぼ一致する吸水能を示している。一方、逆相懸濁重合合法で製造されたSAP-Cは浸漬直後に速やかに吸水し、吸水時間1分にて公称値と同程度の吸水量を示した。しかし、それ以後は吸水時間の経過とともに吸水量は急激に低下していく。吸水時間3時間までに吸水量が低下するのはSAP-A, Bと同様であるが、SAP-Cは3時間にて最大吸水量の60%程度にまで低下し、吸水24時間では最大吸水量の約1/2まで低下する。

ティーバッグ試験条件はセメントを溶解した高アルカリ性の溶液を浸漬液に使用して、セメントペースト中の環境をある程度反映した試験条件となっている。しかし、実際のコンクリート中では、練混ぜ水量に限りがあり、ティーバッグ試験のような十分な水量は供給されない。また、コンクリート内の周囲の細孔溶液(練混ぜ水)の組成は時間とともに変化し、SAP粒子の吸水能に特に影響を及ぼすと考えられるCa²⁺イオン濃度は10分程度で最大濃度に達するがその後は急激に低下するなど¹⁸⁾、ティーバッグ試験とは大きく異なる。このため、一般にはティーバッグ試験結果を参考にして、その吸水能を適当に低減した値を仮定して配合設計を行い、試験練りを繰返して最終的なコンクリートの配合を決定している。しかし、著者らはセメントペースト中のSAP粒子断面の

面積率(体積率)から、必ずしも吸水能は大きく低減するとは限らないことを指摘している¹⁹⁾。そこで本研究では、それぞれのSAPはその最大吸水能相当(SAP-A 29g/g, SAP-B 42g/g, SAP-C 26g/g)まで吸水すると仮定して、その吸水量に相当する分だけ加水することにした。表-2の配合に示した水量はその加水を含む。また、表-2では、SAP混入コンクリートの空気量が基準コンクリートに比べて小さくなっている。SAPがその内部貯水を全て放水した後はSAPが占めていた体積に相当する空隙が残され、これが気泡と同じ働きをして凍結融解抵抗性に寄与するとして、この空隙を含めた空気量相当量が5±1%になるように決定したためである。表-3にこの配合にて作製し、水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度を示す。SAP混入コンクリートは配合上の水量が増し、さらにはSAPによる比較的大きな空隙が残存することになる(図-4)。しかし、圧縮強度はSAPを使用していない基準コンクリートとほぼ同等か、それよりも大きな値を示し、本研究の混入量では強度上の欠陥にはなっていない。

3.2 コンクリートのスケーリング抵抗性

図-6にスケーリング試験結果を示す。基準コンクリートは凍結融解サイクル数の増大とともにほぼ直線的にスケーリング量が増大している。これに対して、SAPを混入したコンクリートのスケーリング量は明らかに基準コンクリートよりも小さい。また、表-2に示したように、フレッシュ時に計測された空気量をみると、SAP混入コンクリートの空気量は、基準コンクリートより小

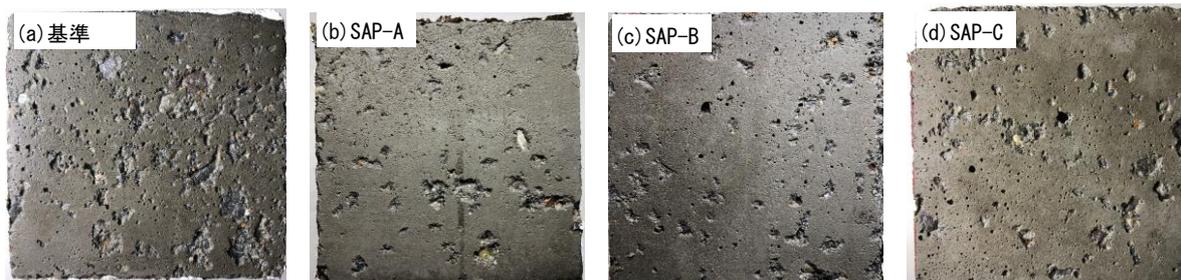


図-7 50サイクル終了後のスケーリング面(10×10cm²)の様子

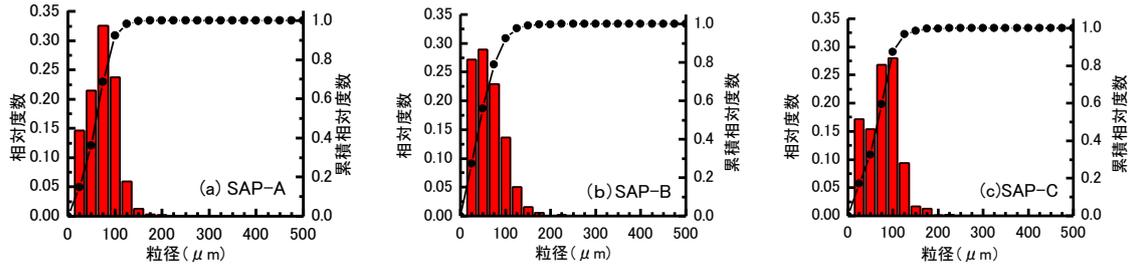


図-8 SAPの乾燥時の粒度分布（横軸目盛数字は階級の上限值）

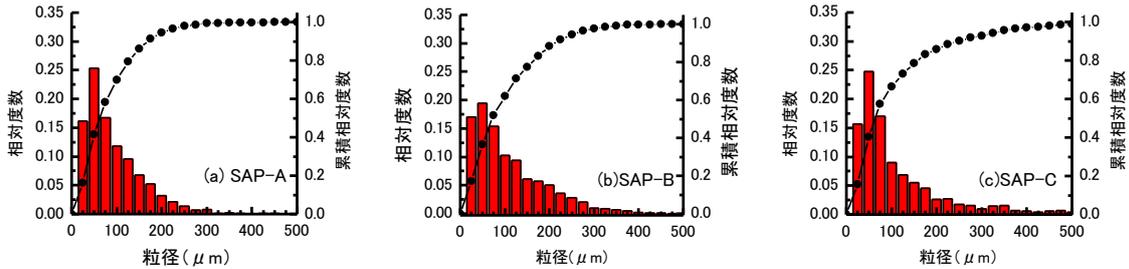


図-9 セメントペースト中のSAPの粒度分布（横軸目盛数字は階級の上限值）

い。したがって、観察されたスケーリング量の低減はSAPによるものであり、SAPの少量添加だけで残存した空隙は、スケーリング低減にきわめて効果的であることを示している。一方、SAPの種類によってスケーリング量が大きく異なる様子は認められない。しかし、ティーバッグ試験で最小の吸水量と評価され、保水性も低いSAP-Cが、凍結融解サイクル期間中、継続して最小のスケーリング量となっている。

図-7に50サイクル終了後の表面の様子を示す。基準コンクリートでは、スケーリング面積がSAP混入コンクリートよりも大きくなっていることが、目視でも確認できる。しかし、スケーリング深さに関しては、コンクリートの異なる配合間およびSAP間の相違は、目視では確認できなかった。

3.3 吸水にともなうSAPの粒度分布の変化

図-8に乾燥時の各SAPの個数基準の粒度分布を示す。SAP-Aは50 μm より大きく75 μm 以下の階級の粒子数が多く、150 μm 以上の粒子はほとんど存在しない。SAP-Bは粒度分布の範囲としてはSAP-Aと同様であるが、より小さな粒径の割合がSAP-Aよりも大きくなっている。SAP-CはSAP-A,Bに比べると、粒径の大きい側の粒子数割合が大きく、階級75~100 μm の径が最頻値となっている。同じく、図-9はセメントペースト断面に現れたSAP断面の個数基準の粒度分布を示したものである。吸水にともない図-8に比べて粒径範囲は広がっているが、最頻階級は大きくなってはいない。セメントペースト中の粒度分布もいずれのSAPとも最頻径は径の階級幅25~50 μm と同様である。製造法が同じで粒径の若干異なるSAP-A,Bに関しては、SAP-Bの粒径が小さくても径の

表-4 SAPの推定吸水能

セメントペースト中推定吸水能(g/g)	
SAP-A	26
SAP-B	34
SAP-C	44

大きい側の度数が高いことが、吸水能が若干高いことを反映している。また、SAP-Cの全体の粒度分布では、頻度は小さくともより広い粒径範囲にわたる粒度分布を示し、断面には500 μm を超えるような粒子も計測されていた。初期からSAP-A,Bよりも大きな粒子が多く、ティーバッグ試験浸漬開始直後の1分間に急激に吸水して、最大吸水量に達していることを考え合わせると、コンクリートの練混ぜ初期の細孔溶液（練混ぜ水）を多量に吸水できたと考えられる。実際、セメントペースト断面の染色粒子面積率から吸水能を計算すると、表-4の結果が得られ、SAP-Cはティーバッグ試験環境とは異なり、コンクリート中では最大の吸水能を持つと評価される。SAP-Cは密度と粒径を考慮すると、全体として粒子の数はSAP-A,Bに比べて少なくなる。気泡と同じ働きをする中空粒子（空隙）間隔という観点からは、SAP-Cではその粒子間隔は大きくなる。それにも関わらずSAP-A,Bと同等のスケーリング抵抗性を示したことになる。SAPによるスケーリング低減機構¹⁸⁾は必ずしも明らかではないが、本研究では型枠面を浸漬面としているのでブリージングの影響は大きくない⁷⁾。一方、SAPが残存させた粗大な空隙は概して気泡よりも大きいので、SAPは表層部に氷晶成長の大きな空間を提供し、それが気泡以上にスケーリングを緩和する機能を果たしたことが考えられる¹⁸⁾。この場合、そのSAPが残存させた空隙に向かう水分到達可能性と、前述のSAP-Cの特性に示されるように、

その空隙の大きさと存在確率が、低減効果に影響を及ぼすと思われる⁹⁾。よって、表層における SAP 粒子の分布や粒子間距離などとの関連から、スケーリング抵抗性の増大の機構を明らかにする必要があるが、これについては今後の課題である。

4. 結論

SAP の混入によるスケーリング抵抗性の変化を、SAP の吸水能および放水性に関連づけながら論じた。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) SAP の少量混入はスケーリング低減にきわめて有効で、SAP が放水後に残存させる粗大な空隙は、気泡以上に低減に寄与する。
- (2) 逆相懸濁重合法で作製された SAP は、練り混ぜ時の接水直後に急速に吸水し、ティーバッグ試験評価値以上の吸水能を示すが、その後速やかに放水して、大きな空隙を残すと考えられる。
- (3) SAP の保水能とスケーリング低減の間に明確な対応は認められなかった。しかし、保水性は低くてもコンクリート中で粗大な空隙を残存させる SAP は、スケーリング低減には有効であり、コンクリートの表層の SAP 粒子の空間的な分布を評価することの必要性が示唆された。

参考文献

- 1) Jensen, O.M. and Hansen, P.F.: Water-entrained cement-based materials: I. principals and theoretical background, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.4, pp.647-654, 2001
- 2) Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction, State of the Art Report Prepared by Technical Committee225-SAP (Eds. Mechtcherine, V. and Reinhardt, H.W), Springer, 2012
- 3) 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
- 4) Mechtcherine, V., Secrieru, E. and Schröfl, C.: Effect of superabsorbent polymers (SAP) 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
- 5) Mechtcherine, V. et al.: Effect of superabsorbent polymers (SAP) on the freeze-thaw resistance of high strength concrete; Results of a RILEM inter laboratory study, *Materials and Structures*, Vol.50, No.1, Article 14, 2017
- 6) Laustsen, S., Hasholt, M.T. and Jensen, O.M.: Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete, *Materials and Structures*, Vo.48, No.1-2, pp.357-368, 2015
- 7) 草山翔平,五十嵐心一: 異なる超吸水性ポリマーを用いたコンクリートのスケーリング抵抗性の比較, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.1042-1047, 2014
- 8) Trtik, P. et al.: Neutron tomography measurements of water release from superabsorbent polymers in cement paste, *Proc. Intl. RILEM Conference on Materials Science (MatSci)*, PRO77, RILEM, Vol.3, pp.175-185, 2010
- 9) Lee, H.X.D., Wong, H.S. and Buenfeld, N.R.: Effect of alkalinity and calcium concentration of pore solution on the swelling and ionic exchange of superabsorbent polymers in cement paste, *Cement and Concrete Composites*, Vol.88, pp.150-164, 2018
- 10) Zhang, P. et al.: Internal curing with superabsorbent polymers of different chemical structures, *Cement and Concrete Research*, Vol.123, Article 105789, 2019
- 11) Snoeck, D., Schröfl, C. and Mechtcherine, V.: Recommendation of RILEM TC 260-RSC: testing sorption by superabsorbent polymers (SAP) prior to implementation in cement-based materials, *Materials and Structures*, Vol.51, No.5, Article 116, 2018
- 12) JIS K7223: 高吸水性樹脂の吸水量試験方法, 1996
- 13) Setzer, M.J., Fanerlund, G. and Janssen, D.J.: CDF Test-Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-test with sodium chloride solution (CDF), *Materials and Structures*, Vol.29, No.9, pp.523-528, 1996
- 14) JSCE-K 572-2012 : けい酸塩系表面含浸の試験方法(案), 土木学会, 2012
- 15) 粉体工学便覧(粉体工学会編), 日刊工業新聞社, 1998
- 16) Yamashita, S. and Igarashi, S.: Evaluation of Absorption Capacity and Spacing of Superabsorbent Polymer Particles in Cement Paste, *Proc. 3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete*, pp.46-54, 2019
- 17) Mayercsik N. P. et al: A probabilistic technique for entrained air void analysis in hardened concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.59, No.1, pp.16-23, 2014.
- 18) Taylor, H.F. W: *Cement Chemistry*, 2nd edition, Thomas Telford, 1997
- 19) Valenza II, J.J. and Scherer, G.W.: A review of salt scaling II. Mechanisms, *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.7. pp.1022-1034, 2007