

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

技術本部	技術研究所	久徳貢大
技術本部	技術研究所	中瀬博一
技術本部	技術研究所	鈴木雅博
技術本部	技術研究所	小島利広

概要：凍結融解抵抗性確保の目的で AE コンクリートが用いられているが、その施工過程における空気量の変動は凍結融解抵抗性および強度発現性に影響を及ぼす。そこで、筆者らは安定した空隙間隔を確保するため、エントレインドエアの代わりに高吸水性樹脂をコンクリートに混合して凍結融解抵抗性を向上させる方法を試みた。実験ではプレキャスト部材を想定し、蒸気養生を施したコンクリートを用い、高吸水性樹脂の混和量や水セメント比などと凍結融解抵抗性との関係を調査した。その結果、高吸水性樹脂の添加は凍結融解抵抗性の向上に寄与し、その効果は水セメント比が小さいほど顕著となることが確認された。

Key Words：高吸水性樹脂，凍結融解試験，気泡間隔係数

1. はじめに

凍害に対する抵抗性の確保は AE 剤使用による空気連行によって行われているが、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、凍害による被害の多い地域においては空気量を増加して抵抗性の向上を目指す動きがある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。既往の研究では、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。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ものとして、高吸水性樹脂（以下、SAP と称する）が検討されている。SAP の粒子はコンクリートの練混ぜ時に膨潤し、凝結硬化時に水を放出した後は空隙となる。既に SAP を添加した凍害抵抗性調査の例⁴⁾があるが、蒸気養生が施されるコンクリート製品における有効性については明らかではない。

そこで、プレキャスト PC 部材を想定し、給熱養生を施したコンクリートで SAP の混和量や水セメント比などと凍結融解抵抗性との関係を調査した。なお、より微細な SAP の粒子の使用は凍結融解抵抗性を確保する際に空気量を過大としない点で有効と考えられたため、吸水後の平均粒子径が 50 μ m 程度と既往の文献よりも小さい SAP をコンクリートに添加した。



久徳貢大



中瀬博一



鈴木雅博



小島利広

2. 試験概要

試験水準は水セメント比とSAP添加量を変化させ、試験項目は表-1に示す内容とした。水セメント比35%の配合ではすべての試験項目を実施した。ここで、SAP添加量とはコンクリート中に占める膨潤したSAPの容積比である。

2.1 使用材料

使用材料および略号を表-2に示す。SAPには電解質を多量に含む水でも安定した吸水能を有する製品を選定した。吸水能は質量比で約40倍である。このSAPは破砕品で角張った形状をしている。

2.2 コンクリート配合

コンクリートの配合を表-3に示す。すべての配合で空気量と単位粗骨材量を一定とした。各水セメント比の配合では単位細骨材量を一定として単位ペースト容積を統一した。単位水量は160kg/m³を基本として、ペースト容積一定でSAP添加量を変化させ、それに応じて単位セメント量および単位水量を減じ、ペースト容積比を調整した。後述する試算により、気泡間隔が凍結融解に有効とされる200μm未満となるSAP添加量がコンクリート容積の1.0%と予測されたため、この添加量の基準とした。表中のW₂は添加したSAPが膨潤するに要する水量であり、配合上の単位水量はW₁とし、本検討における水セメント比はW₁/Cとなる。

目標スランプは水セメント比30%、35%の配合で18.0±2.5cm、40%の配合で12.0±2.5cmとし、高性能減水剤の添加量で練上がり時のスランプを調整した。目標空気量は2.0±0.5%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-1 試験水準と実施した試験項目

水セメント比 (%)	設計空気量 (%)	SAP添加量 (%)	試験項目		
			圧縮強度	凍結融解	気泡間隔
30	2.0	0.0	○	○	-
		1.0	○	○	-
35	2.0	0.0	○	○	○
		1.0	○	○	○
		2.0	○	○	○
40	2.0	0.0	○	○	-
		1.0	○	○	-

表-2 使用材料

材料	略号	特性および仕様
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 ₁ , W ₂	上水道水
細骨材	S	砕砂, 吸水率: 1.07%, 表乾密度: 2.63g/cm ³
粗骨材	G	砕石, 吸水率: 0.72%, 表乾密度: 2.65g/cm ³
高吸水性樹脂	SAP	破砕品, 吸水能: 約40倍, 吸水前の粒径: 約15μm, 吸水後の粒径: 約50μm
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸 エーテル系化合物
空気量調整剤	D	ポリアルキレン グリコール誘導体

表-3 コンクリート配合

配合名	目標スランプ (cm)	目標空気量 (vol%)	SAP添加量 (vol%)	W ₁ /C (%)	(W ₁ +W ₂)/C (%)	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	紛体樹脂 SAP
W/C30%-SAP0.0%	18.0	2.0	0.0	30.0	30.0	44.5	160	533	760	956	0	0
W/C30%-SAP1.0%	18.0	2.0	1.0	30.0	31.9	44.5	155	517	760	956	10	0.244
W/C35%-SAP0.0%	18.0	2.0	0.0	35.0	35.0	46.4	160	457	823	956	0	0
W/C35%-SAP1.0%	18.0	2.0	1.0	35.0	37.2	46.4	155	443	823	956	10	0.244
W/C35%-SAP2.0%	18.0	2.0	2.0	35.0	39.7	46.4	150	428	823	956	20	0.488
W/C35%-SAP3.0%	18.0	2.0	3.0	35.0	42.1	46.4	144	413	823	956	30	0.732
W/C40%-SAP0.0%	12.0	2.0	0.0	40.0	40.0	47.9	160	400	873	956	0	0
W/C40%-SAP1.0%	12.0	2.0	1.0	40.0	42.5	47.9	154	386	873	956	10	0.244

2.3 練混ぜ方法と養生方法

練混ぜは図-1に示す方法で、室温が20°Cの室内で行った。SAPが吸収するW₂は、練混ぜ水としてW₁と併せて計量した。SAPはセメントと事前に混合したうえで二軸強制練りミキサーに投入した。

養生方法は標準養生と給熱養生とした。給熱養生はプレキャスト製品の蒸気養生を模したもので、可変恒温恒湿槽を用いて図-2に示す温湿度で養生した。なお、給熱養生後の試験体は所定の試験材齢まで脱枠せず、封緘状態のまま温湿度が一定に管理された室内(室温20°C, 60%RH)で保管した。

2.4 試験方法

2.4.1 スランプ試験と空気量試験

コンクリートのスランプ試験はJIS A1101, 空気量試験はJIS A1128に準拠して行った。

2.4.2 圧縮強度試験と静弾性係数試験

圧縮強度試験はJIS A1108, 静弾性係数試験はJIS A1149に準拠して行った。試験にはφ10cm×20cmの円柱試験体を各水準で3本用いた。試験材齢は1日, 7日, 28日とした。

2.4.3 凍結融解試験

凍結融解試験はJIS A1148 (A法) に準拠して行った。試験には10cm×10cm×40cmの角柱試験体を各水準で3本用いた。試験体は給熱養生後に材齢6日まで封緘状態とし、試験サイクル開始前日から24時間の水中浸せきを行い、材齢7日目から凍結融解のサイクルを開始した。相対動弾性係数が測定不可能となった場合は試験サイクルを終了とした。

2.4.4 気泡間隔係数試験

気泡間隔係数の測定には硬化コンクリート気泡計測装置「HF-MAC011」を用い、ASTM C457-16に準じて測定した。試験には給熱養生せずに翌日脱枠後、材齢7日まで室温20°Cの室内で保管した円柱試験体から切り出した試料を用いた。

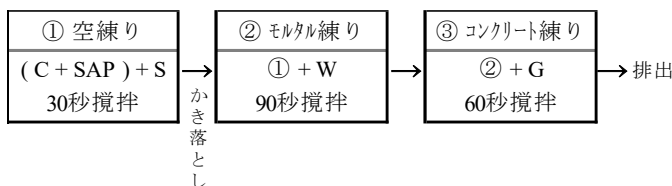


図-1 練混ぜ方法

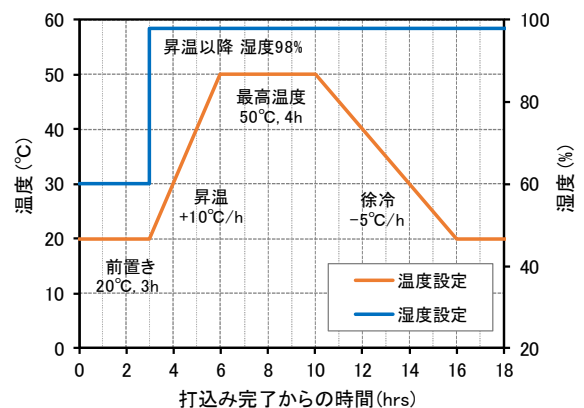


図-2 給熱養生の設定

3. 試験結果と考察

3.1 スランプと空気量

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。いずれの水セメント比でもSAP添加量が1.0%までならば同一スランプを得るために必要な高性能減水剤の添加量が同程度であったが、紛体であるSAPの添加量が2.0%以上になると粘性が高くなり、高性能減水剤の添加量が増加する傾向を示した。

表-4 フレッシュ性状

試験体名	SP添加量 (C×mass%)	D添加量 (C×mass%)	スランプ		空気量		温度	
			目標値 (±2.5cm)	実測値 (cm)	目標値 (±1.0%)	実測値 (%)	コンクリート (°C)	試験室 (°C)
W/C30%-SAP0.0%	1.15	0.004	18.0	19.0	2.0	1.5	22	18
W/C30%-SAP1.0%	1.05	0.004	18.0	19.0	2.0	1.9	22	20
W/C35%-SAP0.0%	1.20	0.004	18.0	17.5	2.0	1.6	22	21
W/C35%-SAP1.0%	1.20	0.004	18.0	15.5	2.0	1.9	22	21
W/C35%-SAP2.0%	1.40	0.004	18.0	16.5	2.0	1.6	22	20
W/C35%-SAP3.0%	1.40	0.004	18.0	15.5	2.0	1.8	22	20
W/C40%-SAP0.0%	1.20	0.004	12.0	10.5	2.0	1.9	22	19
W/C40%-SAP1.0%	1.20	0.004	12.0	10.0	2.0	2.0	22	20

3.2 圧縮強度と静弾性係数

材齢28日における各配合の圧縮強度を図-3に、W/C35%配合の圧縮強度を図-4に示す。いずれの水セメント比、養生方法でもSAP添加量の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向を示した。この傾向は空気量の変動による圧縮強度の増減と同様の挙動であり、強度低下はSAP添加量で制御可能であることが推察された。

給熱養生を施した試験体の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。図中の点線はコンクリート標準示方書^④中に示される推定値をプロットしている。SAPを添加したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数はおおむねこの推定線上にあり、相関関係にあることを確認した。

図-6はSAP無添加配合に対するSAP添加量1.0%あたりの圧縮強度低下率を示したものである。いずれの水セメント比においてもSAP1.0%は、材齢7日以降の強度低下率はほぼ一定である。それに対してW/C35%配合のSAP2.0%と3.0%に着目すると材齢7日以降も強度が増進している。これより、膨潤したSAP1.0%分の吸収水は材齢7日までに消費され、SAP添加量が2.0%以上の配合はそれ以降も残存するSAPの吸収水からの給水が継続して、SAP無添加配合よりもセメントの水和反応が進行したと考えられる。

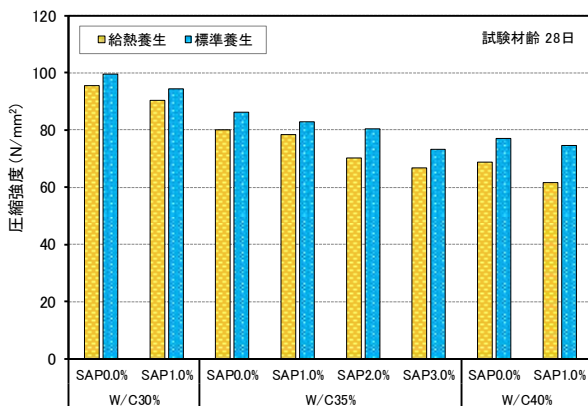


図-3 圧縮強度の比較(σ₂₈)

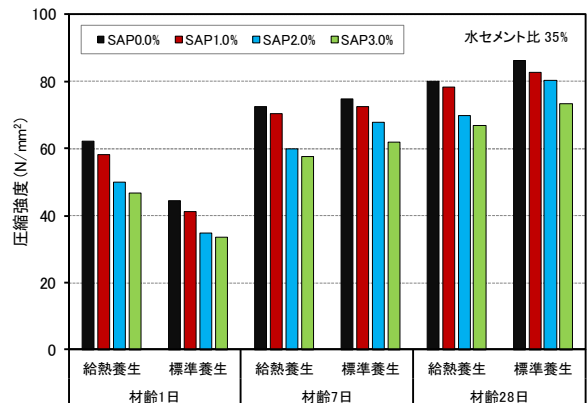


図-4 圧縮強度の比較(W/C35%)

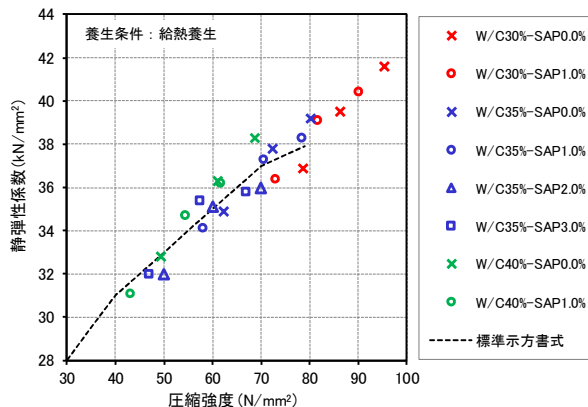


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

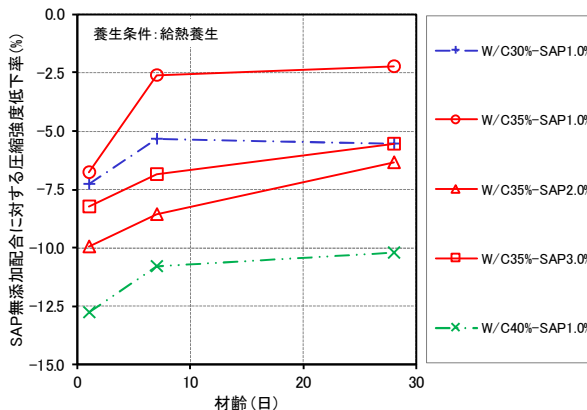


図-6 SAP無添加配合に対する圧縮強度低下率(SAP添加量1%あたり)

3.3 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果として耐久性指数を図-7に示す。水セメント比ごとにSAP添加と無添加の配合を比較すると、SAPの添加によって明らかに耐久性指数が向上している。また、SAP1.0%で水セメント比ごとの耐久性指数を比較すると水セメント比が小さいほど効果が高くなっている。図-8の相対動弾性係数の推移でも示すようにSAP添加量を変化させたW/C35%で比較するとSAP添加量の増加に伴って凍結融解抵抗性は向上している。ただし、試験体ごとの耐久性指数はSAP添加

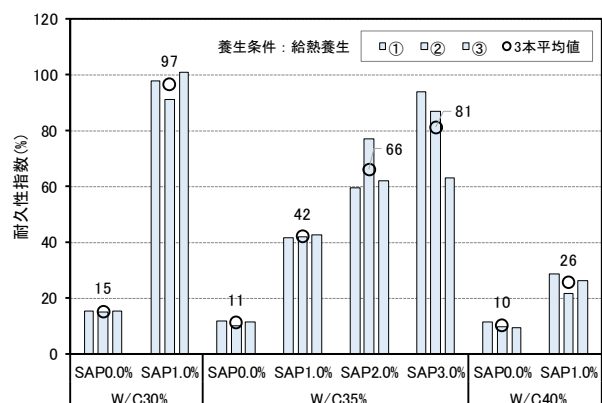


図-7 耐久性指数の比較

量が2.0%以上になると若干ばらつきが大きくなる傾向が見られた。

写真-1に示すように150サイクルにおいてW/C35%配合で試験体の外観を比較すると、SAP無添加配合に対してSAPを3.0%添加することでスケーリング量が減少することが確認できた。

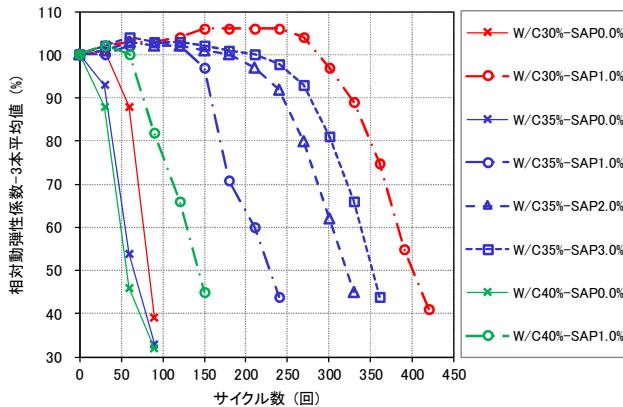


図-8 相対動弾性係数の推移

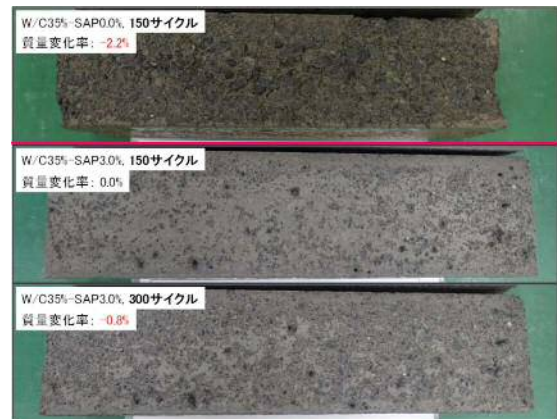


写真-1 凍結融解試験体の外観

3.4 気泡間隔係数

硬化コンクリート中に存在する微細な気泡は、自由水の凍結による膨張圧を緩和する働きがあるため、凍結融解抵抗性を著しく向上させる。図-9に示すように十分な凍結融解抵抗性を確保するためには、気泡間隔を200 μm 以下にすることが推奨されている⁷⁾。SAPを添加したコンクリートの内部には、写真-2に示すようにSAPの脱水によって形成された微細な空隙が多数存在することを確認しており、それらの空隙がエントレインドエアと等価の効果を示すと仮定すると、コンクリートの気泡間隔係数がSAP添加量によって設定可能となる。そこで、SAP添加量と気泡間隔係数との関係を検討した。

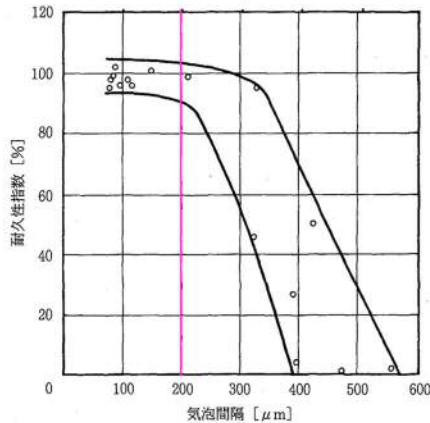


図-9 気泡間隔と耐久性指数の関係 (既往の文献⁷⁾から抜粋)

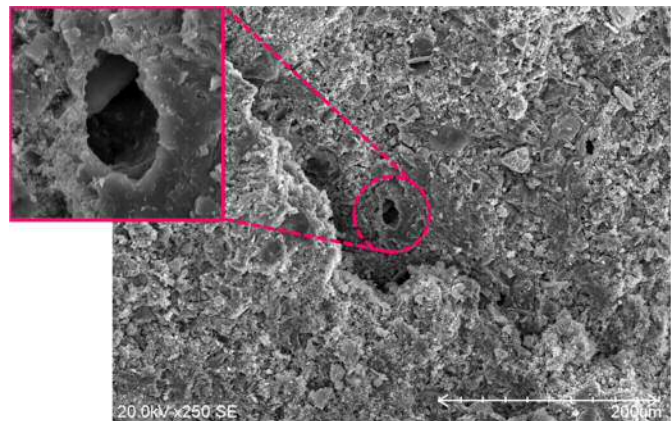


写真-2 コンクリート割裂面(SEM)

3.4.1 気泡間隔の算出方法

既往の文献⁸⁾を参考にペースト中に存在する気泡個数 n および気泡間隔 S_f を試算する。図-10に示すように気泡を直径 D の微小球とし、その周りのペーストを辺長 L の微小立方体として仮定する。コンクリート中の全ペースト容積が均等に配置された n 個の微小立方体から構成され、微小球が均一分散した状態を算出条件とする。この場合、気泡表面間の最大距離(ペーストの厚さ)を気泡間隔 S_f と定義したときの算出方法は式(1)~(5)による。

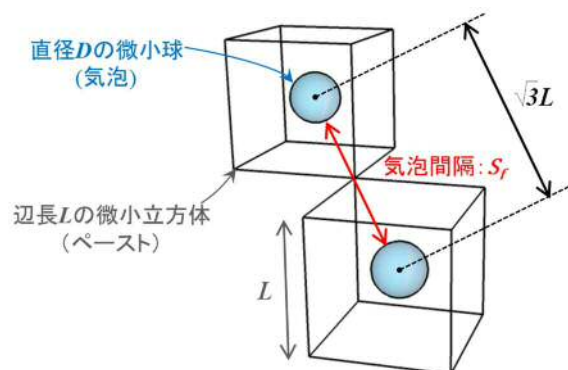


図-10 微小球とみなした気泡の概念図

① コンクリートの全ペースト容積 = 空気・水・セメントの合計容積 = 微小立方体の n 個分総容積

$$V_p = V_a + V_w + V_c = V_p' \times n$$

$$\rightarrow V_p' = V_p/n \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V_p : コンクリートの全ペースト容積

V_a : 空気の容積

V_w : 水の容積

V_c : セメントの容積

V_p' : 微小立方体 1 つあたりの容積

② 微小立方体 1 つあたりの容積 V_p' の定義から辺長 L を設定する.

$$V_p' = L^3$$

$$\rightarrow L = \sqrt[3]{V_p'} \dots\dots\dots (2)$$

③ 空気の容積 = 微小球の n 個分総容積

$$V_a = \frac{4\pi (D/2)^3}{3} \times n = \frac{\pi D^3}{6} \times n$$

$$\rightarrow n = \frac{6V_a}{\pi D^3} \dots\dots\dots (3)$$

④ 式(1)~(3)より、微小立方体の辺長 L を算出する.

$$L = \sqrt[3]{V_p'} = \sqrt[3]{V_p/n} = \sqrt[3]{\frac{V_p \pi D^3}{6V_a}} \dots\dots\dots (4)$$

⑤ 気泡間隔 S_f を算出する.

$$S_f = \sqrt{3}L - D = \sqrt{3} \times \sqrt[3]{\frac{V_p \pi D^3}{6V_a}} - D \dots\dots\dots (5)$$

以上より、コンクリート中に SAP を添加するとき、その添加量のすべてが粒径 $50\mu\text{m}$ の微小空隙球となつて均一分散したと仮定することで気泡間隔を算出可能である。すなわち、コンクリートの配合計画時に設定した SAP の添加量および SAP の粒径から気泡間隔を試算できる。W/C35%配合における各 SAP 添加量での気泡間隔算出結果を表-5 に示す。気泡間隔が凍結融解に有効とされる $200\mu\text{m}$ 未満となるためには SAP を 1.0%以上添加しなければならない。

表-5 気泡間隔試算値(W/C35%)

項目	略号	単位※	W/C35%配合					備考
			SAP0.0%	SAP0.5%	SAP1.0%	SAP2.0%	SAP3.0%	
空隙球の直径	D	μm	50	50	50	50	50	膨潤したSAPの粒径の仮定値
空隙球の総容積	V_a	vol%	0.0	0.5	1.0	2.0	3.0	コンクリート配合より (膨潤したSAPの占める容積)
		リットル	0.0	5.0	10.0	20.0	30.0	
		m^3	0.000	0.005	0.010	0.020	0.030	
水の容積	V_w	m^3	0.160	0.158	0.155	0.150	0.144	コンクリート配合より(単位水量)
セメントの容積	V_c	m^3	0.146	0.143	0.141	0.136	0.132	コンクリート配合より(単位セメント量)
全ペースト容積	V_p	m^3	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306	コンクリート配合より(一定)
空隙球の個数	n	個	0	0.76×10^{11}	1.53×10^{11}	3.06×10^{11}	4.58×10^{11}	計算値
微小立方体の辺長	L	μm	-	159	126	100	87	計算値
気泡間隔	S_f	μm	-	225	168	123	101	計算値

※容積、個数の単位はコンクリート 1m^3 あたりを表す

3.4.2 気泡間隔の計測結果

W/C35%-SAP3.0%における気泡間隔測定面の顕微鏡画像（研磨面を5.7mm×5.7mmに分割撮影したもの）を写真-3に示す。AE剤を用いていないため、縁が白く写る球形の輪郭はその形状と大きさからエントラップトエアと考えられる。それよりも小さく角張った輪郭が前述のSAPにより形成された空隙と考えられ、多く分布している。気泡間隔の実測値と計算値を図-11に示す。凍結融解試験ではSAP添加量の増加に伴い耐久性指数も向上したが、気泡間隔の実測値は計算値よりも大きく、さらにSAP添加量にかかわらず約200 μm の一定値を示した。気泡間隔係数測定時に検出された気泡径分布を図-12に示す。SAP添加の有無で比較すると明確な違いが認められたが、気泡径分布はSAP添加配合の間でその比率にほとんど変化が見られなかった。気泡間隔係数測定における試料を乾燥させる過程にて、全てのSAPが脱水されて空隙となるのが危惧されたが、測定結果ではむしろ空隙化した量が少なく、試料調製の影響は少なかったと考えられる。したがって、添加したSAPの全量が空隙化するのではなく、SAP添加量のうち一定量が空隙化することが示唆された。また、気泡間隔係数の算出時にはSAPが均一分散すると仮定したが、SAPの分散状態が十分でなく粒子が凝集していた場合、気泡間隔の確保ならびに空隙化の妨げとなったことで添加したSAPの全量が空隙化しなかった可能性があるかと推察された。

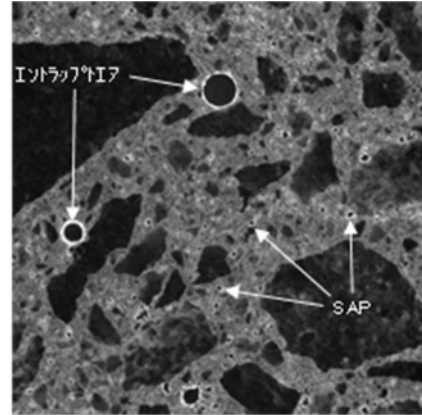


写真-3 気泡間隔測定面(顕微鏡)

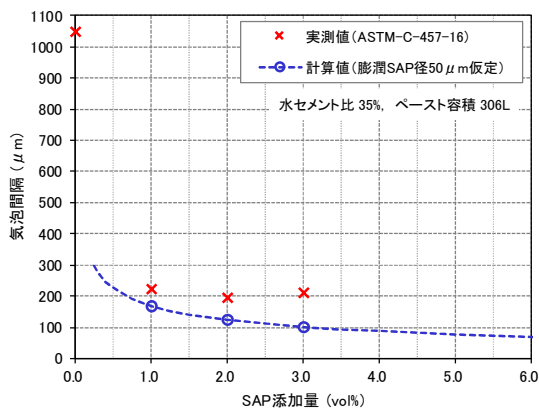


図-11 気泡間隔の実測値と計算値の比較 (W/C35%)

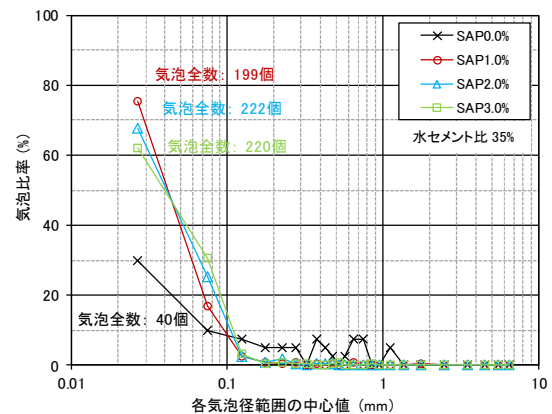


図-12 気泡径の個数分布 (W/C35%)

4. まとめ

圧縮強度試験の結果より、いずれの水セメント比および養生方法においてもSAP添加量の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が確認された。この傾向は空気量の変動に伴う圧縮強度の増減と同様であり、強度低下はSAP添加率で制御可能であると考えられた。また、静弾性係数試験の結果では、SAPを添加したコンクリートの静弾性係数は圧縮強度と相関関係にあることが確認された。

凍結融解試験の結果より、同一水セメント比の W/C35%配合では SAP 添加量の増加に伴い耐久性指数が向上する傾向が確認された。同一 SAP 添加量 1.0%で比較すると、水セメント比が小さいほど SAP 無添加に対して耐久性指数の向上が大きいことが確認された。

気泡間隔係数試験の結果より、W/C35%の SAP 無添加配合に対して SAP 添加配合は気泡間隔が明らかに小さかったものの、SAP 添加量の違いによる差が認められなかった。検出された気泡個数についても同様に SAP 添加量の違いによって気泡径比率に差が認められず、SAP 添加量のすべてが気泡として検出可能な空隙を形成しなかったことが推察された。

5. おわりに

既往の研究よりも比較的粒径の小さいSAPをコンクリートに添加して実施した実験的検討により、SAPの混和は凍結融解抵抗性の向上に寄与し、その効果は水セメント比が小さいほど顕著となる結果を得た。今回の試験範囲では、凍結融解抵抗性が向上する適用範囲は水セメント比30～35%とSAP添加量1.0～3.0%であった。これより、プレキャストPC部材のような水セメント比が小さく蒸気養生を施す材料でも、SAPを適量添加することで安定した空隙を導入でき、凍結融解抵抗性の確保が可能である。

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局：東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）2019年改訂版，2019年3月
- 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) 林大介，高木英知，橋本学，樋口隆行，寺崎聖一，五十嵐数馬：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) 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，コンクリート工学論文集，Vol.36，No.1，pp.1042-1047，2014年
- 5) 志藤暢哉，久田 真，一宮一夫：高吸水性ポリマーを添加したコンクリートの耐凍害性評価，土木学会第71回年次学術講演会，pp.537-538，2016年9月
- 6) 土木学会：「2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕」，p.43，2018年
- 7) 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.675-676，2004年
- 8) 室谷卓実，古東秀文，五十嵐心一：コンクリート中の気泡を点過程とみなした簡便法とASTM法によって評価した気泡分布特性の比較，コンクリート工学論文集，第28巻，pp.133-142，2017年