

報告 SBR を添加したコンクリートの力学特性と耐久性に関する検討

藤原 正佑*¹・三坂 岳広*²・井上 善彦*³・熊野 知司*⁴

要旨：筆者らは、コンクリートへのポリマーの添加を耐久性や乾燥収縮特性を改善するための技術の 1 つととらえ、セメントの質量比で 10%以下という比較的少ない添加量におけるポリマーセメントコンクリートの検討を行っている。しかし、これまでの検討では水セメント比を変化させた配合で行っており、ポリマーの添加による効果を確認できていない。本検討では水セメント比および単位セメント量を一定とし、ポリマーの添加によって得られる力学特性と耐久性について検証した。その結果、ポリマーの添加による強度の低下とひび割れ抵抗性の向上効果が確認でき、中性化や塩化物イオンの浸透に対する抑制効果も確認された。

キーワード：ポリマーセメントコンクリート, SBR, ひび割れ, 中性化, 耐久性

1. はじめに

セメント系材料へのポリマーの添加により、引張強度、曲げ強度、伸び能力、接着性、水密性、耐薬品性などの向上効果がある¹⁾。しかし、現在、その利用形態は構造物の表面被覆材、仕上材、補修材や断面修復材などでモルタルとしての利用が多く、ポリマーを構造物コンクリートに添加するという事例は多くない。大濱ら²⁾は、コンクリート中へのポリマーの添加による改質について検討を行っており、強度特性や乾燥収縮特性に対する結果について報告している。しかし、その後のポリマーの添加に関する研究開発の多くは、仕上材や断面修復材としての研究である。これらの原因として、高い付加価値を狙ったポリマーの添加の場合には、通常、セメント質量の 10~30%の添加量になるため、使用量が多くなるコンクリートへの添加ではコスト面での負荷が大きくなることが考えられる。

近年では、持続的発展が可能な社会の創成が急務とされており、構造物の長寿命化に関する検討が行われている。また、骨材事情の悪化などにより比較的品質な材料を用いる場合が増加している反面、日本建築学会においてはコンクリートの乾燥収縮ひずみに一定の基準を設けている。さらに、乾燥収縮対策としては、膨張材や乾燥収縮低減剤の使用、石灰岩骨材の使用が一般的である。しかし、耐久性の向上などの付加価値が期待できるポリマーの添加という方法も対策の 1 つとして考慮する余地がある。そこで筆者らは、コンクリートへのポリマーの添加を耐久性や乾燥収縮特性を改善するための改質技術の 1 つととらえ、セメントの質量比で 10%以下という比較的少ない添加量におけるポリマーセメントコンクリート (以下、PMC) の力学特性ならびに乾燥収縮ひび割れ

に関する検討を行っている^{2) 3) 4)}。しかし、これまでの検討では、ポリマーの添加によりコンクリートのフレッシュ性状が大きく変動するため、配合条件として単位セメント量一定、スランプ一定のものが主体となっている。したがって、ポリマーセメント比 (以下、P/C) が変化することにより W/C も変化することになり、ポリマーの添加による効果を確認できていない。そこで、本報告では配合条件として水セメント比および単位セメント量を一定とし、ポリマーの添加による効果について検討を行った。検討項目は圧縮強度やひび割れ抵抗性などの力学特性や中性化や塩化物イオンの浸透および凍結融解抵抗性などの耐久性とした。

2. 実験概要

使用セメントに OPC および BB を用いた力学特性を評価する実験 (シリーズ 1) と、セメントに OPC を用い W/C を 45, 50, 55 および 60%と変化させた耐久性を評価する実験 (シリーズ 2) の 2 種類の実験を行った。両シリーズとも P/C は一般的な値と比較して小さい 0~10%とした。また、シリーズ 1 に関しては養生条件についても検討を加えた。養生条件の概略を図-1 に示す。図

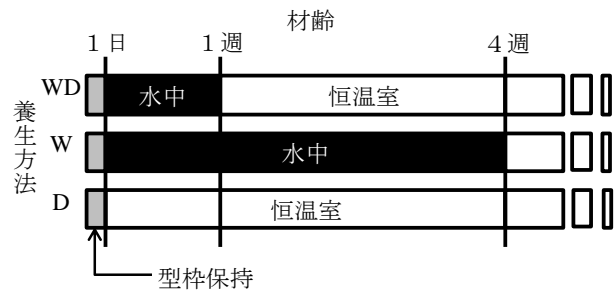


図-1 養生条件の概略

*1 摂南大学 工学部都市環境システム工学科 (学生会員)

*2 佐藤工業 (株) 技術研究所土木研究部 修(工) (正会員)

*3 前田工織 (株) 環境資材本部

*4 摂南大学 理工学部都市環境工学科教授 博(工) (正会員)

中の養生条件 WD は JIS A 1171 「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準拠した。養生条件 W は JIS A 1132 「コンクリート強度試験用供試体の作り方」に準拠した。養生条件 D は、脱型後に恒温恒湿室（室温 20±2℃，湿度 60±5%RH）に静置し乾燥させた。シリーズ 2 の供試体に用いた養生は WD とした。なお、供試体の脱型材齢はすべて 1 日とした。

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。ポリマーにはスチレン・ブタジエン・ゴムラテックス（以下、SBR）を用いた。使用した SBR はエマルジョン型である。したがって、配合においては、固形分を SBR として、その他を水として扱った。空気量の目標は 6% とし、混和剤は普通コンクリートに AE 減水剤と AE 助剤を用い、PMC にはシリコーン消泡剤を用いた。

2.2 配合

シリーズ 1 の配合およびフレッシュ性状を表-2 に示す。表は OPC をセメントに用いた場合を例として示している。配合は W/C を 51.5%，単位水量を 175kg/m³ とし、一般的なコンクリートの配合に近いものとした。各配合はスランプを一定とせず、W/C および W の配合条件をそろえ、ポリマーの添加や P/C の変化による影響を確認することを目標とした。

シリーズ 2 における配合は、使用セメントを OPC のみとし、W/C を 45、50、55 および 60% とした。W/C が 45% および 55% の配合を表-3 に示す。各配合の単位水量は 175kg/m³ を標準としているが、W/C が 45% の配合のみ単

表-1 使用材料

材料	詳細
SBR	密度 0.99g/cm ³ 固形分 45.3%
C	OPC 密度 3.16g/cm ³ 比表面積 3330cm ² /g
	BB 密度 3.04g/cm ³ 比表面積 3890cm ² /g
S	相模原市藤野町産陸砂 表乾密度 2.59g/cm ³
G	厚木市産砕石 表乾密度 2.61g/cm ³
Ad.1	AE 減水剤 リグニンスルホン酸系
	AE 剤 I 種 ロジン酸系
Ad.2	シリコーン消泡剤 エマルジョン型

表-4 試験項目および方法

試験項目	方法	供試体の種類
圧縮強度試験	JIS A1107	シリーズ 1
長さ変化試験	JIS A 1129-3	
拘束ひび割れ試験	JIS A 1151	
細孔径分布の測定	水銀圧入法	
促進中性化試験	JIS A 1153	シリーズ 2
凍結融解試験 (A 法)	JIS A 1148	
塩水浸せき試験	JSCE-K-571	

位水量を 180kg/m³ としている。表-2 および表-3 中のスランプと空気量は実測値である。

2.3 供試体の作製

PMC の練混ぜは、容量 50L のパン型強制練りミキサーを用いた。供試体は PMC を鋼製型枠に詰め込んだ後に、バイブレータを用いて締め固めた。

表-2 配合例およびフレッシュ性状（シリーズ 1）

Gmax (mm)	P/C (%)	W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	s/a (%)	(kg/m ³)					Ad.1 (g/m ³)	Ad.2 (g/m ³)
						W	C (OPC)	S	G	SBR		
20	0	51.5	12.5	6.5	44.5	175	340	756	950	—	3910	—
	5		1.0	5.0				738	927	17.0	—	2040
	7.5		4.0	6.6				728	914	25.5	—	4080
	10		8.5	6.0				717	903	34.0	—	7650

表-3 配合例およびフレッシュ性状（シリーズ 2）

Gmax (mm)	P/C (%)	W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	s/a (%)	(kg/m ³)					Ad.1 (g/m ³)	Ad.2 (g/m ³)
						W	C	S	G	SBR		
20	0	45.0	10.5	5.9	40.0	180	400	650	981	—	4080	—
	10		15.5	6.9				609	921	40.0	—	7800
	0	55.0	7.5	5.9	44.5	175	318	759	955	—	4296	—
	5		1.5	6.1				743	932	15.9	—	1432
	10		14.0	6.9				723	911	31.8	—	6905

2.4 試験項目および方法

表-4 に試験項目と方法を記す。各試験の試験方法は主に JIS に準拠して行った。水銀圧入試験は試料を乾燥させるために凍結乾燥した後に行った。塩水浸せき試験は土木学会の表面含浸材試験方法(案)を参考とし、浸せきする方法は木村らの促進塩水含浸試験⁵⁾を参考とした。試験は恒温恒湿室(温度 20°C, 相対湿度 60%RH)内で、供試体を塩分濃度 3%の NaCl 溶液に浸せきと乾燥を繰り返した(3 日間の浸せきと 4 日間の乾燥を 1 サイクルとして、26 サイクル)。塩分の計測方法は JIS A 1154-2012 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」の塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法に準じ全塩分量を計測した。試料は塩水浸せきから 3 ヶ月後、6 ヶ月後に供試体の表面から 10±5mm および 25±5mm の 2 箇所から採取した。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度試験結果(シリーズ 1)

圧縮強度試験は材齢 7 日と材齢 28 日に行った。養生条件が WD の供試体の圧縮強度試験結果を図-2 に示す。OPC を用いた供試体は P/C の増加により圧縮強度が低下している。この傾向は、熊野らの既往の研究²⁾で単位水量および水セメント比を一定とした配合の圧縮強度試験結果と同様の傾向である。これら強度低下の原因として PMC 内部ではセメントと水による水和反応と、乾燥によるポリマーフィルムの形成が同時進行で起こっており、ポリマーフィルムの形成によりセメントの水和反応が阻害されるためだと考えられる。BB を用いた供試体はポリマーの添加により圧縮強度が低下する傾向は確認できたが、P/C の変化による明確な差異は確認されなかった。養生条件が W の供試体の圧縮強度試験結果を図-3 に、養生条件が D の供試体の圧縮強度試験結果を図-4 に示す。各養生条件で圧縮強度を比較すると養生条件 WD の供試体の圧縮強度が大きくなっており、養生条件 D の圧縮強度は極端に低下した。原因として、本実験の供試体

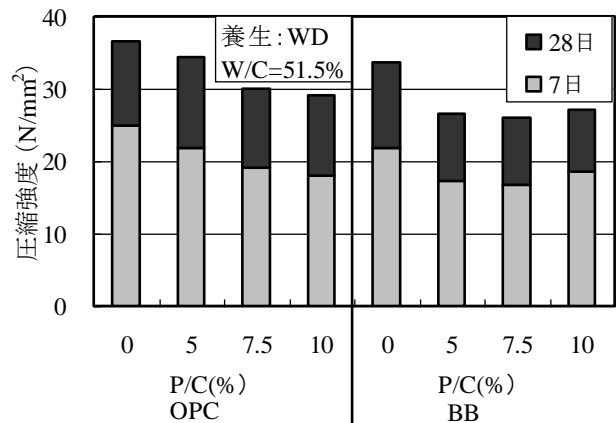


図-2 圧縮強度試験結果(養生条件:WD)

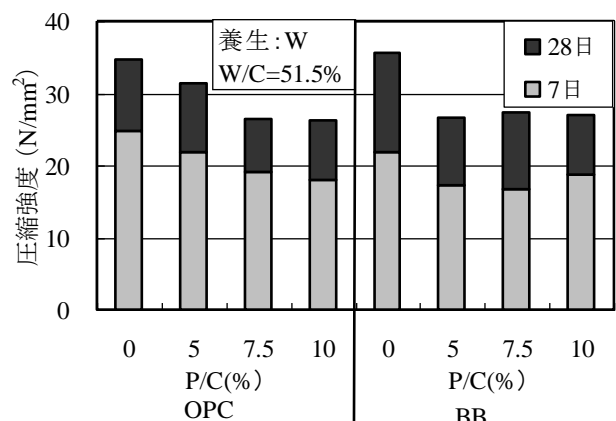


図-3 圧縮強度試験結果(養生条件:W)

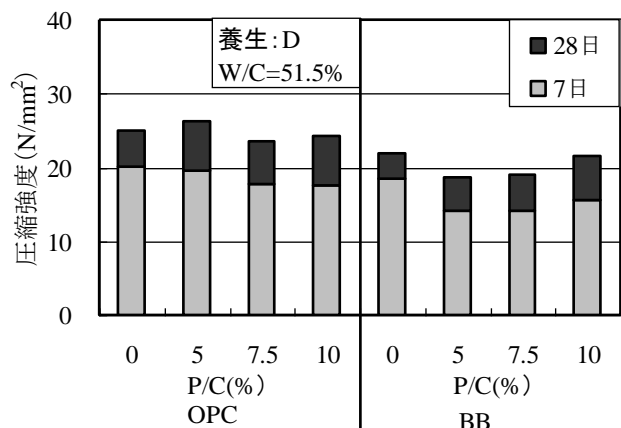


図-4 圧縮強度試験結果(養生条件:D)

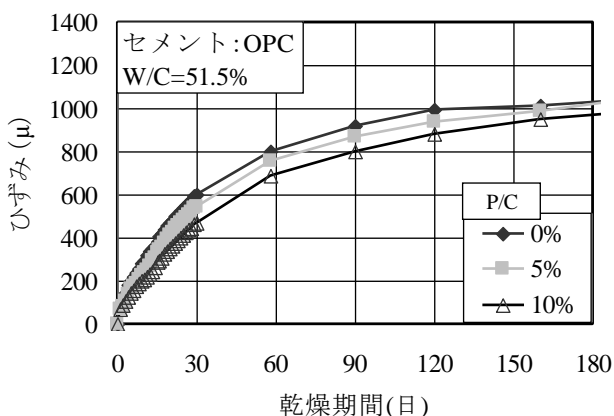


図-5 自由収縮ひずみと乾燥期間の関係(OPC)

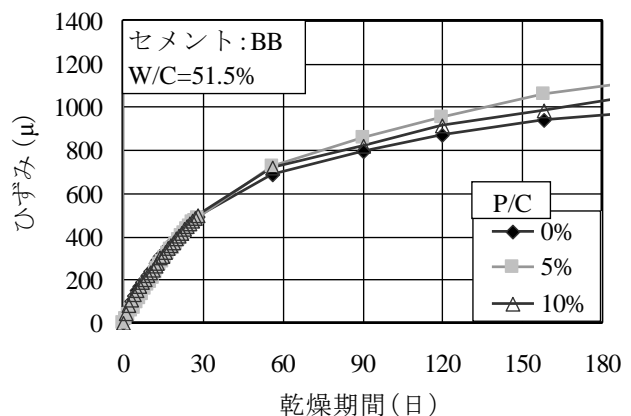


図-6 自由収縮ひずみと乾燥期間の関係(BB)

は P/C が 10% 以下という比較的小さい値であり、圧縮強度の増進には水和反応によるセメント硬化体組織の形成が大きく影響しているためと考えられる。

3.2 長さ変化試験結果 (シリーズ 1)

図-5 および図-6 に養生条件が WD の自由収縮ひずみと乾燥材齢の関係を示す。図中の乾燥材齢 0 日は材齢 1 週となっている。OPC を用いた供試体は、ポリマーの添加により自由収縮が低減し、P/C の増加により自由収縮ひずみが低減した。セメントに BB を用いた供試体の自由収縮ひずみはポリマーの添加や P/C による明確な差異は確認されなかった。また、全ての供試体において自由収縮量の絶対値が大きい。これは、使用した骨材が原因と考えられ、普通コンクリート供試体で自由収縮を計測した場合でも同様であった。

3.3 拘束ひび割れ試験結果 (シリーズ 1)

図-7~9 に OPC を用いた供試体の拘束ひび割れ試験結果を示す。P/C の増加により、ひび割れ発生材齢が遅れることがわかる。原因として、既往の研究²⁾と同様に、P/C が大きくなると引張伸び能力が向上することが挙げられる。表-5 に拘束ひび割れ試験結果を示す。セメントに BB を用いた供試体においては、長さ変化試験結果と同様にポリマーの添加によるひび割れ抵抗性の向上効果は確認されなかった。セメントに OPC を用いた供試体において確認されたひび割れ低減効果は、ポリマーの添加による自由収縮の低減によるものと、ポリマーの添加により引張り伸び能力が向上することが共に影響しているものと考えられる。

3.4 水銀圧入試験結果 (シリーズ 1)

図-10 にセメントに OPC を用いた供試体の細孔径分布を示す。ポリマーを添加しないコンクリートは $1\mu\text{m}$ 付近の比較的大きな細孔直径にピークを持つが、P/C が 5% および 10% の PMC は $1\mu\text{m}$ 付近の大きな細孔は減少し細孔直径 $0.1\mu\text{m}$ 以下の空隙が増えている。原因としてポリマーを添加した供試体は乾燥によりポリマーフィルムの形成することが考えられる。ポリマーフィルムの形成により比較的大きな細孔が塞がれ、細孔容量のピークが移動したのと考えられる。一般的に、コンクリートの強度は骨材とセメントペーストの界面部分に存在する遷

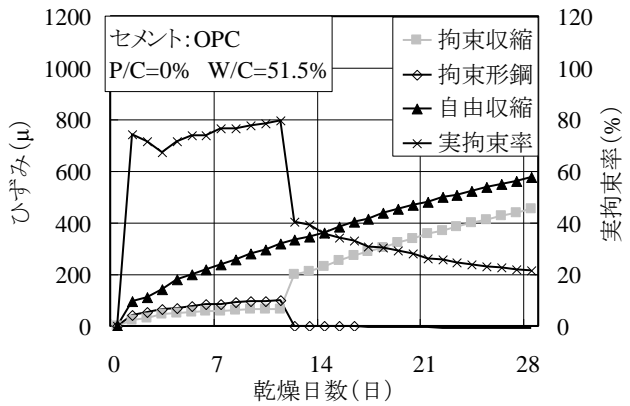


図-7 ひび割れ拘束ひび割れ試験結果 (P/C=0%)

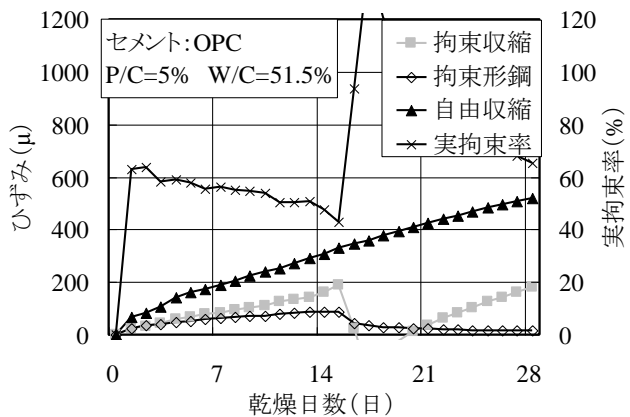


図-8 ひび割れ拘束ひび割れ試験結果 (P/C=5%)

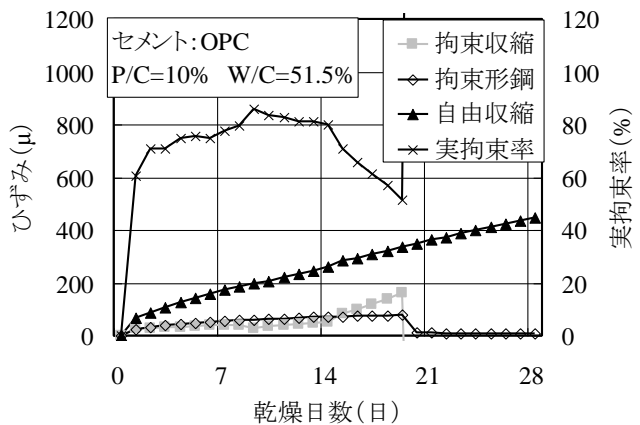


図-9 ひび割れ拘束ひび割れ試験結果 (P/C=10%)

移帯に依存する。遷移帯は粗大な空隙に富む不連続な領域で、硬化コンクリートの強度および物質透過性に大きな影響を及ぼす⁶⁾とされている。したがって、石橋らの既往の研究⁷⁾から $0.05\sim 2\mu\text{m}$ の範囲の細孔容量に着目し結果を整理した。細孔容量と供試体の種類の関係を図

表-5 拘束ひび割れ試験結果

		OPC			BB		
		0%	5%	10%	0%	5%	10%
ひび割れ発生時	乾燥期間(日)	12	16	20	15	28	9
	自由収縮ひずみ(μ)	318	330	336	307	471	218

-11 に示す。P/C の増加に伴って上記範囲の細孔容量が減少していることがわかる。また、その中でも比較的大きな細孔直径である $0.2 \sim 2.2 \mu\text{m}$ の細孔容量が P/C の増加により減少している。水銀圧入試験結果と圧縮強度試験結果から考察すると、PMC は乾燥によりポリマーフィルムを形成し緻密化するが、圧縮強度の向上に寄与していない。原因としてポリマーフィルムの弾性係数が小さく、強度も小さいため、外力には主にセメント硬化体組織が抵抗していると考えられる。

3.5 凍結融解試験結果 (シリーズ 2)

表-6 に凍結融解試験結果を示す。ポリマーを添加した供試体は凍結融解作用により劣化し、300 サイクルに達する前に動弾性係数を求めることが不可能となった。また、P/C が大きくなると計測可能サイクル数が減少する傾向も見てとれる。中川らの既往の研究⁸⁾には、AE 剤を混入した普通コンクリートと同程度の凍結融解抵抗性があるとされているが、本研究の範囲内において異なる傾向が得られた。原因としてポリマーの添加による強度の低下が考えられる。同じ W/C の供試体においても P/C の増加により圧縮強度が低下しており、強度の低下による影響が本試験結果に強く影響をおよぼしたためと考えられる。

3.6 促進中性化試験結果 (シリーズ 2)

セメントに OPC を用いた供試体の促進中性化試験結果を図-11 に示す。凡例は W/C-P/C となっている。P/C について比較してみると W/C ごとに異なる傾向を示しており、明確な傾向を見出せなかった。3.4 に示した水銀圧入試験結果からは、P/C の増加により PMC のセメント硬化体組織が緻密化していると考えられる。原因として、ポリマーの添加によるポリマーフィルムの形成と、水和反応の阻害によるセメント硬化体の粗雑化が影響をおよぼしあっていると考えられる。また、W/C が 45% のものに注目すると、材齢 1 週で P/C が 10% の方が中性化深さが大きくなり、材齢の進行にともなって P/C が 0% の方が大きくなる傾向を示した。原因として養生が挙げられる。供試体は養生条件が WD であり、材齢 1 週から乾燥の影響を受けている。P/C の大きな供試体ほど水和反応の進行度が低い段階で乾燥の影響を受け、表層コン

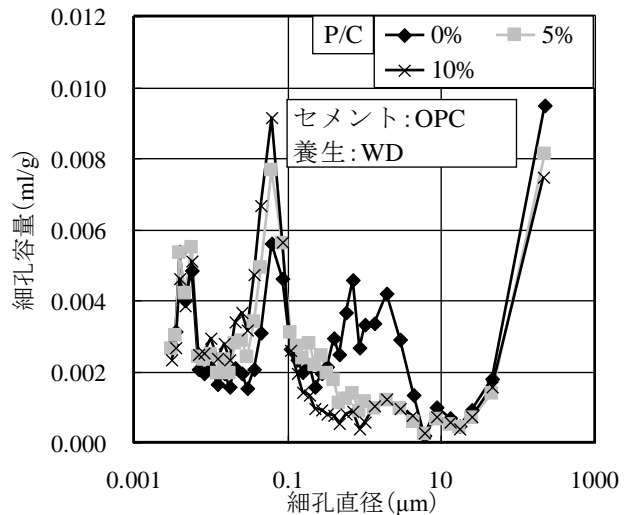


図-10 細孔径分布 (OPC)

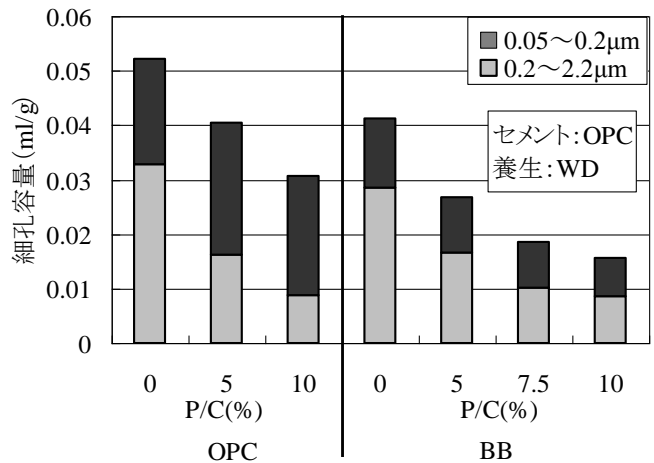


図-11 促進中性化試験結果

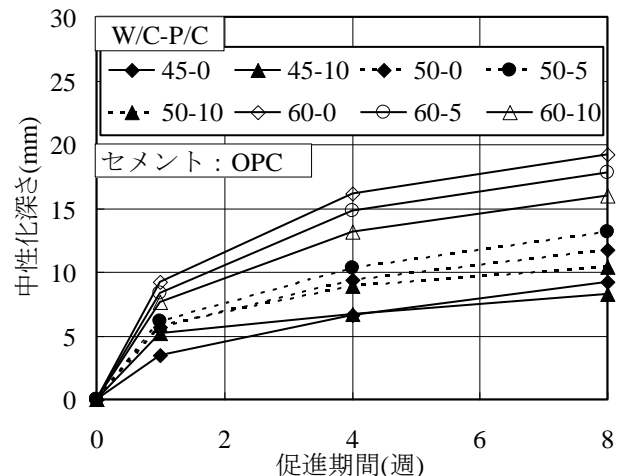


図-12 塩水浸せき試験結果

表-6 凍結融解試験結果

W/C (%)	45		50			55			60		
P/C (%)	0	10	0	5	10	0	5	10	0	5	10
Air (%)	5.9	6.9	5.4	4.7	6.2	5.9	6.1	6.9	6.9	5.4	7.0
28 日圧縮強度 (N/mm ²)	53.6	35.5	50.9	40.6	31.1	41.8	31.2	27.1	32.8	31.3	26.9
計測可能サイクル数 (回)	300	240	300	180	150	300	240	180	300	180	180

クリートの緻密さに差異が生じてしまった可能性がある。

3.7 塩水浸せき試験 (シリーズ 1)

図-12 に塩水浸せきおよび乾燥を繰り返した期間が 3 ヶ月と 6 ヶ月の供試体の塩水浸せき試験結果を示す。P/C が 10% の供試体に関しては、5~15mm および 20~30mm においても塩化物イオン濃度が低くなっており、外部から供試体内部に浸透する塩化物イオンの量が抑制されていると考えられる。3.5 で示した促進中性化試験結果では促進中性化期間の初期において P/C が大きい方が中性化深さが大きくなる傾向が得られた。しかし、本試験においてそのような傾向は得られなかった。原因として本試験の計測深さが浅いところでも 5~15mm だったため、表層コンクリートの影響を大きく受けなかったためと考えられる。

4. まとめ

コンクリートへのポリマーの添加を耐久性や乾燥収縮特性を改善するための技術の 1 つととらえ、セメントの質量比で 10% 以下という比較的少ない添加量におけるポリマーセメントコンクリートの検討を行った。本討の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) SBR を添加した PMC の圧縮強度が低下した。
- (2) OPC を用いた PMC の圧縮強度は、P/C の増加により圧縮強度が低下した。
- (3) SBR を添加した PMC は、OPC を用いた場合に P/C の増加により自由収縮量が小さくなった。
- (4) SBR を添加した PMC は、OPC を用いた場合にひび割れ低減効果が認められた。また、P/C の増加によりひび割れ低減効果が向上した。
- (5) SBR の添加により PMC 硬化体組織は緻密化した。この傾向は P/C に影響を受け、P/C の増加によりさらに緻密化した。
- (6) P/C を 10% とすることで PMC 内部に浸透する塩化物イオンの量が抑制された。

本技術の実用化に向けて、PMC に用いる混和剤の種類と量および適切な PMC の養生条件について検討の必要がある。また、BB を用いた PMC の結果については、さらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 大濱嘉彦, 出村克宣: ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート, シーエムシー出版,

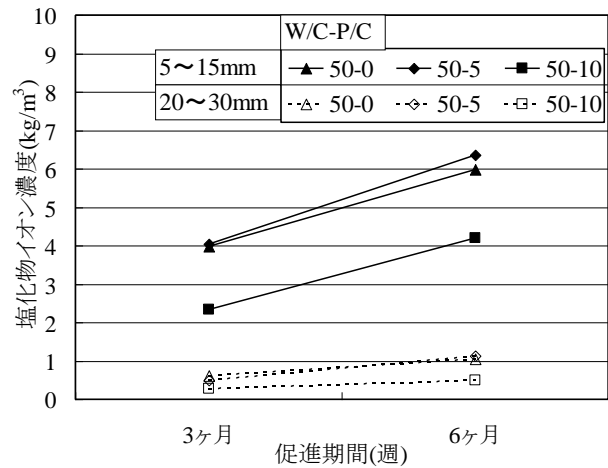


図-11 塩水浸せき試験結果

2002.9

- 2) 熊野知司, 井上善彦, 野口祐介, 矢村潔: SBR を添加したコンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1621-1626, 2009.6
- 3) 井上善彦, 三坂岳広, 宇野洋志城, 熊野知司: SBR を添加したコンクリートの力学特性に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-430, pp.859-860, 2012.9
- 4) 三坂岳広, 宇野洋志城, 井上善彦, 熊野知司: SBR を添加したコンクリートの乾燥収縮特性に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-431, pp.861-862, 2012.9
- 5) 木村定雄, 岡村直利, 宇野洋志城, 清水幸範, 小泉淳: シールド工用コンクリート系セグメントの耐久性能と耐火性能, 土木学会論文集, No.728/VI-58, pp.107-119, 2003.3
- 6) 大即信明ほか: 再生骨材コンクリートの物質透過性および強度評価とその結果にもとづく改善方法の提案, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp.1-12, 2001.5
- 7) 石橋昌史, 松下博通, 佐川康孝, 川端雄一郎: 再生骨材を用いたモルタルの細孔構造および強度・中性化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006.7
- 8) 中川佳祐, 熊野知司, 井上善彦, 高見新一: SBR を添加したコンクリートの耐久性に関する実験的検討, 材料, Vol.59, No.10, pp.763-768, 2010