

論文 収縮低減剤と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの性質

齊藤 和秀^{*1}・吉澤 千秋^{*2}・吉田 亮^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：収縮低減性材料として知られる収縮低減剤と高炉スラグ細骨材を、高性能 AE 減水剤を使用した普通強度のコンクリートに組合せて使用した場合の収縮低減効果やその他の性質を調べた。その結果、これら 2 つの材料を併用して使用することにより最大で約 42%の乾燥収縮低減効果が得られることが確認された。また、その他の性質では、フレッシュ性状や圧縮強度に与える影響は小さいこと、中性化抑制効果を示すこと、および空気量調整を適切に行うことで凍結融解抵抗性に問題がないことが確認された。

キーワード：収縮低減剤, 高炉スラグ細骨材, 高性能 AE 減水剤, 乾燥収縮, 耐久性, 凍結融解

1. はじめに

近年、コンクリート構造物のひび割れ抑制対策として、コンクリートの乾燥収縮を低減するための研究が盛んに行われている。収縮低減性材料としては収縮低減剤や石灰石等が一般に知られているが、最近では高炉水砕スラグ細骨材(以下、スラグ細骨材)を天然骨材に置換して使用することによりコンクリートの乾燥収縮を低減する効果があることが報告されている¹⁾²⁾。筆者らは既にスラグ細骨材を 25~50%置換することにより乾燥収縮を約 6~19%低減できることを確認した¹⁾。収縮低減剤は添加量を変化させて収縮低減量を調節できるため、10 kg/m³以上添加することで50%以上の乾燥収縮低減効果を得ることも可能である。しかし、多量に使用すると、強度低下や凍結融解抵抗性が低下する場合があるため、一般的には 3~6 kg/m³程度で使用されるケースが多い。

最近、複数の収縮低減性材料を組合せてより大きな収縮低減効果を得るための研究が行われるようになってきているが、本研究では収縮低減剤とスラグ細骨材に着目し、高性能 AE 減水剤を使用した普通強度レベルのコンクリートを対象として、これら 2 つの収縮低減性材料を併用した場合の収縮低減効果とその他の物性に与える影響を調べた結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

収縮低減剤は、ポリエーテル誘導体を主成分とし、日本建築学会 JASS 5 M-402 : 2009 コンクリート用収縮低減剤の性能判定基準 附属書 1 コンクリート用収縮低減剤の品質基準³⁾に適合するもの(以下、SRA)を使用した。

スラグ細骨材は JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第 1 部 : 高炉スラグ骨材に適合するもの(以下、SG)を使用した。各使用材料の産地、成分および物性を表-1 に示す。

2.2 試験方法

実験の因子と水準を表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)と高炉セメント B 種(以下、高炉 B 種)の 2 種類とした。SRA の添加量は 0.3 および 6 kg/m³とした。SG は天然骨材に容積置換して使用することとした。既往の研究¹⁾により、置換率が 50%を超えると高性能 AE 減水剤(以下、HP)の添加量が増加し、ブリーディング量の増加や凝結時間の遅延等

表-1 使用材料

種類	記号	産地・性質・成分
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm ³ ,ブレン値 3300 cm ² /g)
	BB	高炉セメント B 種 (密度 3.14 g/cm ³ ,ブレン値 3850 cm ² /g)
細骨材	S	大井川水系産陸砂(表乾密度 2.58 g/cm ³ , 吸水率 2.31%,F.M.2.87)
	SG	福山産高炉スラグ細骨材 (区分 BFS5,表乾密度 2.73 g/cm ³ ,吸水率 0.45%,F.M.2.56)
粗骨材	G	岡崎産碎石(表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水 率 0.78% , 実積率 60.0%)
混和剤	HP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
収縮低減剤	SRA	ポリエーテル誘導体

表-2 実験の因子と水準

因子	水準
セメント	N, BB
水セメント比 (%)	45
SG 置換率 (%)	0.25,50
SRA 添加量 (kg/m ³)	0.3,6

*1 竹本油脂(株)第三事業部 研究開発部 グループリーダー (正会員)

*2 JFE ミネラル(株)製鉄関連事業部 技術サービス部長 博(工) (正会員)

*3 名古屋工業大学 社会工学専攻 助教 (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 創成シミュレーション工学専攻 教授 (正会員)

の影響が見られたため本研究では置換率を0,25,50%とした。ただし、SRA 6kg/m³については、0,50%とした。

2.3 コンクリートの配合

設計基準強度が36 N/mm²程度の普通強度の高性能AE減水剤を使用したコンクリートを想定し、水セメント比(以下、W/C)は45%とした。コンクリートの配合を表-3に示す。配合は3N25のようにSRA添加量、セメント種別、SG置換率を組合せた記号で示した。SGを置換する場合は単位水量と単位粗骨材かさ容積を一定とした。目標スランブは10±1 cm、目標空気量は4.5±1%、コンクリート温度は20±2℃とした。HPとSRAは水の一部として添加した。空気量調整は、ポリエーテル系の消泡剤とアルキルリン酸エステル系のAE調整剤を組合せて行った。3N50、6N0、6N50および6B50の配合については同一配合で目標空気量を6.0±0.5%としたコンクリートも試験し、凍結融解試験および気泡間隔係数を測定した。

2.4 試験方法

練混ぜは、強制パン型ミキサ(容量55 L)を用いて、全材料投入後90秒練り混ぜ後排出した。練り量は40 Lとした。試験項目と試験方法を表-4に示す。

表-3 コンクリートの配合

記号	セメント	SRA (kg/m ³)	SG (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	SG	G
0N0	N	0	0	150	333	812	0	1029
0N25			25			609	216	
0N50			50			406	431	
3N0		3	0			812	0	
3N25			25			609	216	
3N50			50			406	431	
6N0		6	0			812	0	
6N50			50			406	431	
0B0			BB			0	0	
0B25	25	599		213				
0B50	50	401		426				
3B0	3	0		799	0			
3B25		25		599	213			
3B50		50		401	426			
6B0	6	0		799	0			
6B50		50		401	426			

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
ブリーディング量	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108, 標準養生, 材齢 7, 28, 91 日
乾燥収縮	JIS A 1129-3 : 24 時間後脱型, 材齢 7 日まで水中養生後基長, 20℃, 60%RH で乾燥期間 52 週まで測定
促進中性化	JIS A 1153
凍結融解	JIS A 1148
気泡間隔係数	ASTM C457-98, リニアトラバース法

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5に示す。

(1) 高性能 AE 減水剤(HP)の添加量

SRA 添加量と HP 添加量の関係を図-1に示す。収縮低減剤は界面活性剤の一種であり若干減水性を持つため、HP の添加量は、SRA 添加量の増加に伴い0~5%程度減少した。SG 置換率と HP 添加量の関係を図-2に示す。HP の添加量は、普通セメントでは SG 置換率の増加に伴い10~15%程度増加したが、高炉 B 種では0~5%程度減少した。SG と SRA を併用した場合は、普通セメントでは無添加に比べて同等かわずかに増加し、高炉 B 種では0~5%程度減少した。

(2) ブリーディング量

SRA 添加量とブリーディング量の関係を図-3、SG 置換率とブリーディング量の関係を図-4に示す。SRA および SG の添加によりブリーディング量は0.01~0.03 cm³/cm²程度増加した。これは SRA の添加により凝結が遅延したため、および SG 表面がガラス質であること⁴⁾などによるが、SRA 添加量6 kg/m³程度、SG 置換率50%程度までであれば影響は小さい。SG と SRA を併用した場合は、普通セメントでは無添加に比較して0.01~0.03 cm³/cm²程度、高炉 B 種では0.02~0.06 cm³/cm²程度増加したが、本研究では、高性能 AE 減水剤を使用して単位水量を低減したことや W/C の設定を比較的小さい45%としたことなどによりブリーディング量は最大でも0.10 cm³/cm²以下であり、全体的に小さい傾向であった。

(3) 凝結時間

SRA 添加量と凝結始発時間の関係を図-5に、SG 置換

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

記号	HP 添加量 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	凝結(h)		ブリーディング 量 (cm ³ /cm ²)
					始発	終結	
0N0	0.70	10.5	4.4	21	5.3	7.4	0.04
0N25	0.75	10.0	4.6	21	5.4	7.6	0.04
0N50	0.80	9.0	4.8	21	5.7	7.8	0.05
3N0	0.65	11.0	5.3	21	5.8	7.8	0.05
3N25	0.70	9.5	5.2	21	6.0	8.0	0.05
3N50	0.75	9.5	5.1	21	6.2	8.2	0.06
6N0	0.60	11.0	4.9	21	6.3	8.3	0.06
6N50	0.75	10.0	5.0	21	6.7	8.7	0.07
0B0	0.65	10.0	3.9	21	5.8	8.6	0.03
0B25	0.65	10.5	3.8	21	6.0	8.5	0.04
0B50	0.60	11.0	4.1	21	6.2	8.8	0.06
3B0	0.65	11.0	4.2	21	6.6	9.3	0.04
3B25	0.60	10.0	4.3	21	6.7	9.5	0.05
3B50	0.60	10.5	4.8	21	7.0	10.0	0.07
6B0	0.60	10.0	4.9	21	7.1	10.0	0.06
6B50	0.55	10.5	4.7	21	7.5	10.8	0.09

率と凝結始発時間の関係を図-6に示す。SRAの添加により凝結時間は30~60分程度、SGの添加により約25分遅延した。これはSRAの場合は、SRAがセメントの水和を遅延させるため⁵⁾であり、SGの場合はSGに含まれる固結防止剤⁶⁾の影響である。SGとSRAを併用した場合は、普通セメントでは無添加に比較して40~100分程度、高炉B種では60~120分程度遅延し、併用により若干遅延傾向が大きくなった。

3.2 乾燥収縮

乾燥収縮試験結果を図-7、SRA添加量と乾燥収縮率

の関係を図-8およびSRA添加量と収縮低減率の関係を図-9に示す。SRA添加量の増加に伴い乾燥収縮率は減少し、6 kg/m³の添加で普通セメントでは約200×10⁻⁶、高炉B種では約133×10⁻⁶低減した。無添加に対する収縮低減率はそれぞれ約29%および約20%であった。

SG置換率と乾燥収縮率の関係を図-10、SG置換率と収縮低減率の関係を図-11に示す。SG置換率の増加に伴い乾燥収縮率は減少し、50%置換で普通セメントでは

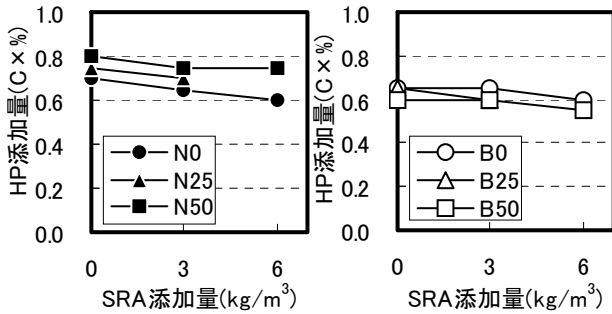


図-1 SRA添加量とHP添加量の関係

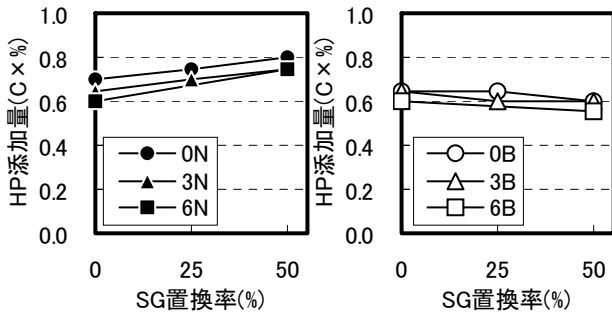


図-2 SG置換率とHP添加量の関係

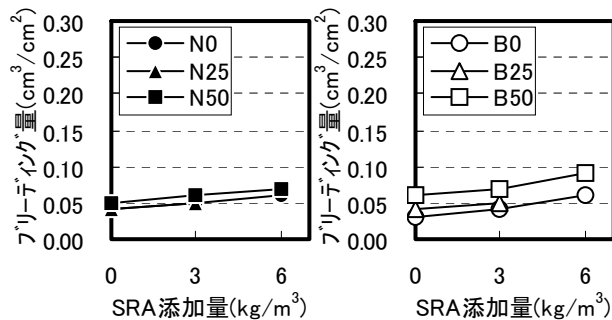


図-3 SRA添加量とブリーディング量の関係

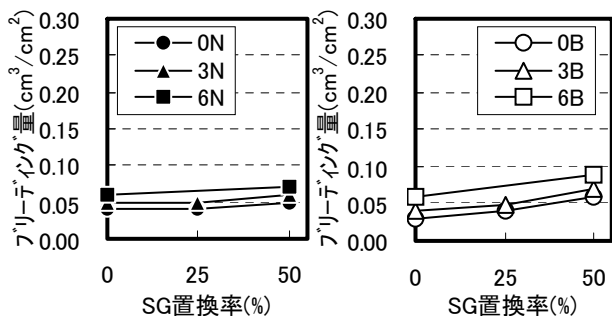


図-4 SG置換率とブリーディング量の関係

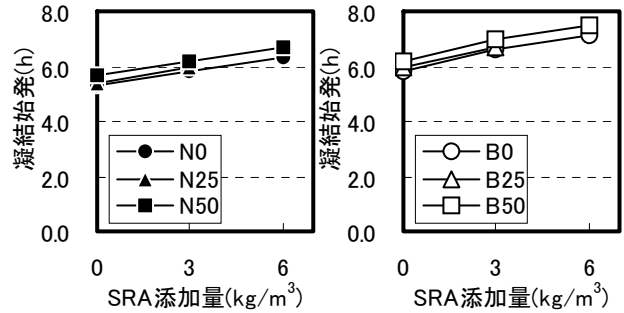


図-5 SRA添加量と凝結始発時間の関係

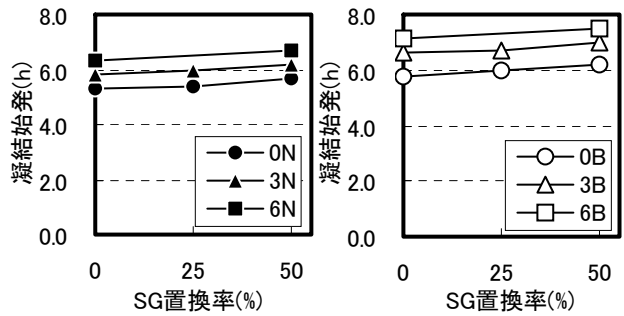


図-6 SG置換率と凝結始発時間の関係

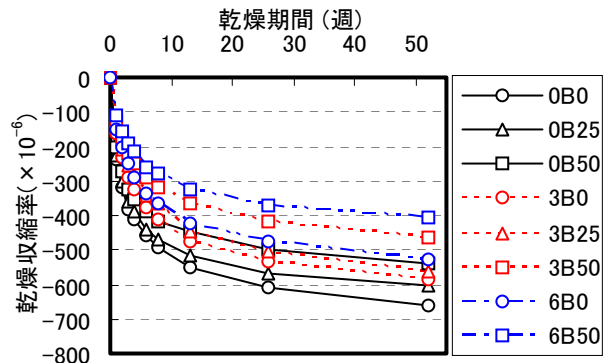
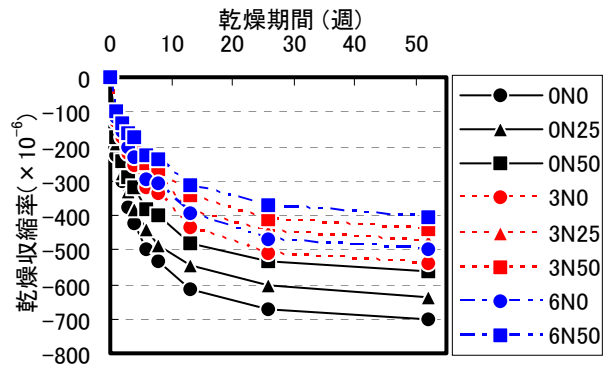


図-7 乾燥収縮試験結果

約 140×10^{-6} 、高炉 B 種では約 120×10^{-6} 低減した。無添加に対する収縮低減率はそれぞれ約 20% および約 18% であった。SRA では高炉 B 種に対する収縮低減効果が普通セメントに比較してやや小さい傾向であったが、SG ではセメントの違いによる収縮低減効果に大きな差はなかった。SG と SRA を併用した場合は、それぞれ単独で添加した場合よりも大きな収縮低減効果が得られており、普通セメントでは最大で約 300×10^{-6} 低減、約 42% の低減効果、高炉 B 種では最大で約 250×10^{-6} 低減、約 35% の低減効果が得られた。

SRA 添加量と質量減少率の関係を図-12、SG 置換率と質量減少率の関係を図-13 に示す。いずれのセメントにおいても SG の置換率の増加に伴い質量減少率は減少するが、SRA の添加による質量減少率の変化はほとんど認められなかった。また、SG と SRA の併用は、SG のみの場合と同様に質量減少率が減少した。

収縮低減剤の収縮低減メカニズムについては、収縮低減剤が表面張力を低下させ毛細管張力を低減させる⁷⁾と考えられているが、最近では、分離圧曲線の変化⁸⁾や比表面積の減少⁸⁾などが関係しているとの報告もある。スラグ細骨材の収縮低減メカニズムについては、(1)スラグ細骨材表面の組織が潜在水硬性による水和反応により緻密化した^{9),10),11)}、(2)スラグ細骨材の吸水率が小さいためもともとコンクリート中の水分が少なく乾燥水分量(質量減少率)が小さい、等が考えられる。従って、本研究で SRA と SG を併用した時に、それぞれを単独で使用した場合の効果足を足し合わせた低減率に近い効果が得られたのは、SRA と SG の収縮低減メカニズムが異なるからと

考えられる。

3.3 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-14 に示す。いずれのケースも想定した強度を十分に満足する強度が得られた。SRA の添加により強度が若干低い傾向にあり、材齢によらず無添加の約 95~98% 程度の強度であった。SG の添加により普通セメントでは初期強度がやや低い傾向があるが材齢 91 日では無添加と同等以上となった。高炉 B 種では強度低下は見られなかった。SG と SRA を併用した場合は、SRA の影響で初期強度が約 90% 程度に低下したが、

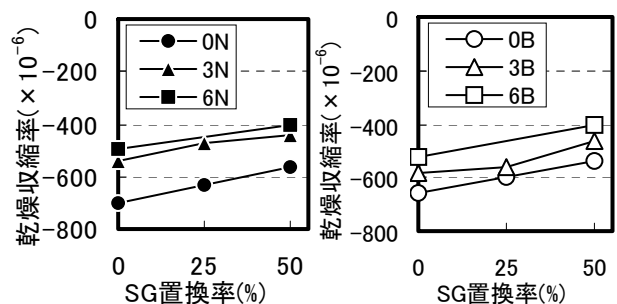


図-10 SG 置換率と乾燥収縮率の関係

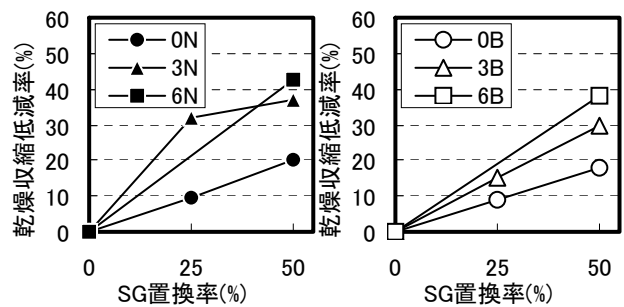


図-11 SG 置換率と乾燥収縮低減率の関係

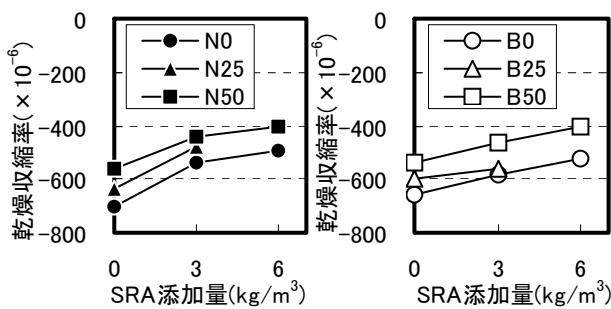


図-8 SRA 添加量と乾燥収縮率の関係

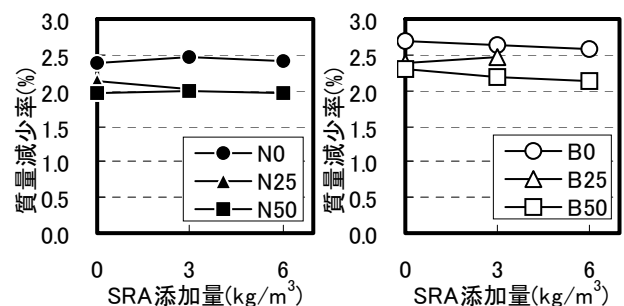


図-12 SRA 添加量と質量減少率の関係

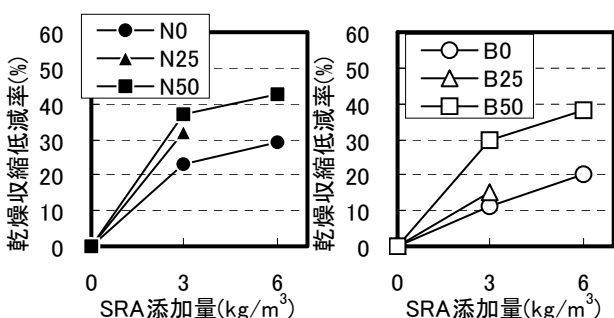


図-9 SRA 添加量と乾燥収縮低減率の関係

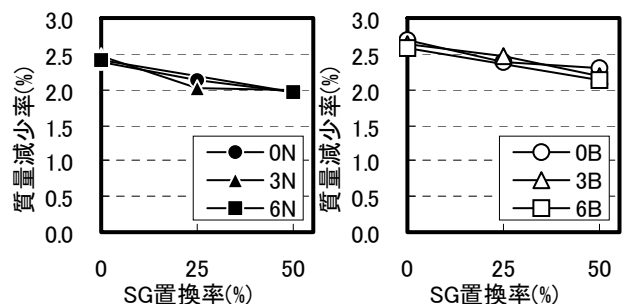


図-13 SG 置換率と質量減少率の関係

材齢 91 日では SG の潜在水硬性による強度増進⁹⁾により無添加とほぼ同等の強度となった。

3.4 中性化抵抗性

促進中性化試験結果を図-15 に示す。いずれのケースにおいても、促進期間 26 週における中性化深さが 15 mm 以下であり十分な中性化抵抗性を示した。SRA および SG を添加したものは無添加に比較して中性化深さが小さく、また併用によりさらに小さくなった。

SRA の中性化抑制効果は既往の研究¹²⁾でも報告されており、そのメカニズムについては収縮低減剤の収縮低減効果により微細なひび割れが減少し CO₂ の侵入が抑制されたためと考えられるが十分に解明されておらず今後検討が必要である。SG については、既往の研究¹⁰⁾においてスラグ細骨材を使用したコンクリートの透気係数や塩化物イオン実効拡散係数が天然細骨材を使用したコンクリートに比較して小さいことが報告されていることなどから、スラグ細骨材の潜在水硬性により組織が緻密化し、CO₂ の侵入を抑制するため¹³⁾と考えられる。

3.5 凍結融解抵抗性および気泡間隔係数

凍結融解試験結果を図-16 に示す。SRA および SG を添加したもののうち 3N50, 6N0, 6N50 および 6B50 は 300 サイクル前に相対動弾性係数が 60% を下回る結果となり、SRA や SG を多めに添加したものは凍結融解抵抗性が低下する結果となった。そこで、3N50, 6N0, 6N50 および 6B50 については、目標空気量を 6±0.5% に調整したコンクリート供試体(3N50-6%, 6N0-6%, 6N50-6% および 6B50-6%) を作製し凍結融解試験と気泡間隔係数測定を行った。その結果、いずれも耐久性指数が 60% 以上となり、SRA や SG を併用しても空気量を 6% 程度に設定することにより凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。気泡間隔係数測定結果を図-17 に示す。SRA や SG の添加により気泡間隔係数は増大する傾向にあり、

特に耐久性指数が 60% を下回った 3N50, 6N0, 6N50 および 6B50 については気泡間隔係数が 400 μ を超えていることがわかる。気泡間隔係数が増大した理由として、SRA については、SRA が表面張力を低下させることにより気泡径の大きな気泡が多く存在するためであり¹⁴⁾、SG についても、SG の添加により比較的大きな気泡が多く連行され、凍結融解抵抗性を向上させるのに有効な 100 μ m 以下の気泡の数が減少したため^{4),15)}と考えられる。空気量を 6% とした 3N50-6%, 6N0-6%, 6N50-6% および 6B50-6% については気泡間隔係数が 300~330 μ 程度に低下しており、凍結融解試験結果とも整合する。大きな収縮低減効果を得るために SG と SRA を多めに使用する場合には、空気量を 6% 程度に設定することで凍結融解抵抗性を確保することが可能と考えられる。

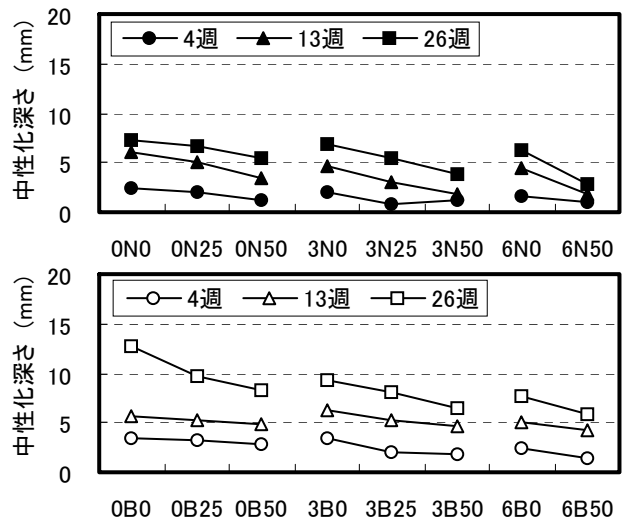


図-15 促進中性化試験結果

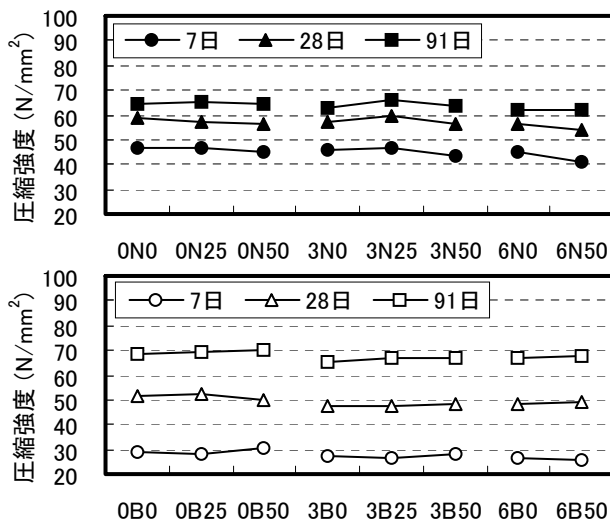


図-14 圧縮強度試験結果

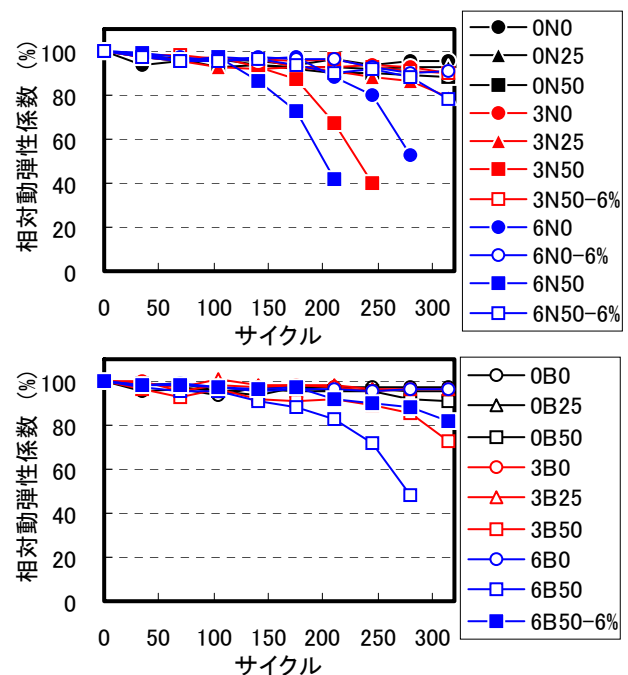


図-16 凍結融解試験結果

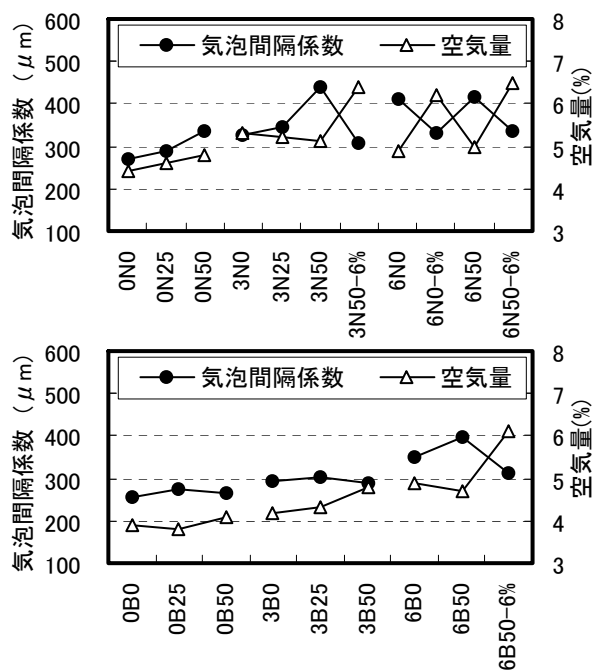


図-17 気泡間隔係数試験結果

4. まとめ

収縮低減剤(SRA)と高炉スラグ細骨材(SG)を組合せて高性能 AE 減水剤を使用した普通強度のコンクリートに適用した場合の収縮低減効果やその他の性質を調べた結果、本研究の範囲で以下の知見を得た。

- (1) SRA と SG を併用して使用しても、無添加およびそれぞれを単独で使用した場合に比較してフレッシュ性状(ワーカビリティ、凝結時間、ブリーディング)に大きな違いはない。
- (2) SG と SRA を併用することにより、それぞれ単独で添加した場合よりも大きな乾燥収縮低減効果が得られる。本研究では無添加に対して、普通セメントでは最大で約 300×10^{-6} 、高炉 B 種では最大で約 250×10^{-6} 、乾燥収縮率が低減し、それぞれ約 42%および約 35%の収縮低減効果が得られた。
- (3) SRA と SG を併用して使用すると無添加に比較して初期強度が約 90%程度に低下するが長期ではほぼ同等となる。
- (4) SRA と SG を使用することにより中性化速度は小さくなる。
- (5) SRA と SG を併用して使用する場合、添加量が多い場合に凍結融解抵抗性が低下する場合があるが、空気量を 6%程度に設定することで十分な凍結融解抵抗性を確保できる。

参考文献

- 1) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 梅原秀哲: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質(その 1,2), 土木学会第 64 回年次学術講演会,

V-238-239, pp.473-476, 2009

- 2) 泉田裕介, 梶田佳寛, 杉山央, 石東昇: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.394-399, 2012
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2009
- 4) 山崎舞, 千歩修, 長谷川拓哉: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性におよぼすブリーディングの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.898-903, 2012
- 5) コンクリート混和剤の開発と最新技術, シーエムシー, pp.152-153, 1995
- 6) 高橋智雄, 木之下光男, 光藤浩之, 吉澤千秋: 高炉スラグ用固結防止剤の開発, コンクリート工学, Vol.40, No.11, pp.19-25, 2002.11
- 7) 富田六郎, 後藤孝治, 酒井公式, 茂庭孝司: 収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮およびひびわれに関する実験研究, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.5, pp.181-184, 1983
- 8) 丸山一平, 岸直哉: 収縮低減剤の作用機構, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.645, pp.1895-1903, 2009
- 9) 長滝重義, 米山紘一, 高田誠: 高炉スラグ水砕砂を用いたコンクリートの諸性状について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.1, pp.193-196, 1979
- 10) 鶴飼貴史, 佐藤寛之, 吉田亮, 齊藤和秀, 梅原秀哲: 寸法の異なるスラグ細骨材を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する一考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会, V-270, pp.539-540, 2011
- 11) 齊藤和秀, 吉澤千秋, 木之下光男, 小林竜平, 露木尚光, 吉田亮: 高炉スラグ細骨材と高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの特性, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-520, pp.1039-1040, 2012
- 12) 井上和政, 三井健郎, 見澤大介, 木之下光男: 乾燥収縮 200 μ クラスの超低収縮コンクリートのひび割れ抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.515-520, 2011
- 13) 依田彰彦: 高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について, セメント技術年報, No.34, pp.133-136, 1980
- 14) 藤原浩巳, 富田六郎, 下山善秀: 収縮低減剤を用いたコンクリートの耐久性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.37-42, 1988
- 15) 小林正凡, 田中弘: 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡組織について, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.2, pp.41-44, 1980