論文　乾燥スラッジ微粉末と混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートに関する研究

大川　憲[*1]・百瀬　晴基[*2]・閑田　徹志[*3]・笠井　哲郎[*4]

要旨：本研究は，環境負荷低減の観点から戻りコンクリート（以下，戻りコンと称す）等の再生利用対策と，CO_2 排出量の削減を目的とし，コンクリート施工時に生ずる戻りコンや生コンプラントおよびアジテータ車の洗浄時に発生する生コンスラッジを脱水後，乾燥粉砕処理した微粉末と副産物混和材（高炉スラグ微粉末，フライアッシュ）を併用し，主たる結合材とした環境負荷低減型コンクリートを開発するため，モルタルのフレッシュおよび硬化性状について検討した。その結果，乾燥粉砕処理した微粉末と副産物混和材を併用することにより，普通ポルトランドセメントを用いたものと比べ，フレッシュ性状は混和剤添加量が大きくなり，長期材齢では同程度の強度と中性化抵抗性が得られ，収縮量は大きくなることがわかった。

キーワード：戻りコンクリート，スラッジ微粉末，高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，圧縮強度，中性化

1. はじめに

現在，建設産業に関わる主要な建設副産物である生コンクリート工場で発生する戻りコンクリート（以下，戻りコンと称す）は，国土交通省の調査によると，平成 17 年時点で生コンクリート出荷量の約 1.6%と報告され，再生利用がほとんど進んでいないのが現状である[1)]。また，地球温暖化の抑制対策として，CO_2 の排出量削減が求められ，副産物の有効利用を含めた環境負荷低減型コンクリートの開発が多数報告されている[2), 3)]。これらは，普通ポルトランドセメントよりも CO_2 排出量が少ない高炉スラグ微粉末（以下，BFS と称す）やフライアッシュ（以下，FA と称す）などの混和材を高置換させたものや，セメントを使用せず各種アルカリ刺激材やジオポリマーと副産物混和材を併用したコンクリートである。これらのコンクリートは十分な強度発現が得られるものの，コンクリート硬化体の高アルカリ性を保持することは困難である。著者らは[4)]，これまでにコンクリート施工時に生ずる戻りコンや生コンプラントおよびアジテータ車の洗浄時に発生する生コンスラッジを脱水後，乾燥粉砕処理した微粉末（以下，DSP と称す）が普通ポルトランドセメントの 4～5 割の強度発現を有し，CO_2 排出量は ISO14040，ISO14044 に準拠し算出した結果，普通ポルトランドセメントの約 1/8 であることを確認した。

そこで本研究では，戻りコン等から製造した DSP と BFS や FA 等の副産物混和材を結合材とし，設計基準強度 24N/mm^2 以上のプレキャスト製造による鉄筋コンクリート部材の環境負荷低減型クリンカーフリーコンクリート（以下，RCCF コンクリート）を開発することを目的とした。RCCF コンクリートは，戻りコン等の有効な再生利用対策であるとともに，アルカリ性を硬化体にて保持可能なため鉄筋腐食抵抗性に優れ，CO_2 排出量を大幅に低減できるコンクリートであると考えられる。本報告では，2 つの検討を行っており，シリーズ 1 では，主な混和材を BFS とし，DSP との最適な混合割合を，シリーズ 2 では，主な混和材を FA にした配合で最適混合割合や DSP の種類による影響を，それぞれモルタルによるフレッシュおよび硬化性状により検討した。

なお，本研究の戻りコン等はコンクリート施工時に残ったもの，荷卸し時に不合格となったもの，生コンプラントおよびアジテータ車の洗浄時に発生したものを対象とした。

2. シリーズ 1 の実験概要

2.1 使用材料および配合

シリーズ 1 の使用材料を**表－1** に，モルタルの配合を**表－2** に示す。結合材は，普通ポルトランドセメント（記号：N），BFS は高炉スラグ微粉末 4000，FA はフライアッシュⅡ種を使用し，DSP は比表面積 6070cm^2/g（低ブレーン品（記号：DSP-L））のものおよび比表面積 11260cm^2/g（高ブレーン品（記号：DSP-H））の 2 種類を

表－1　使用材料（シリーズ 1）

項目	記号	材料名	密度 g/cm^3	比表面積 cm^2/g
結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3310
	DSP-L	低ブレーン品乾燥スラッジ微粉末	2.82	6070
	DSP-H	高ブレーン品乾燥スラッジ微粉末	2.45	11260
	BFS	高炉スラグ微粉末4000	2.91	4310
	FA	フライアッシュⅡ種	2.31	3880
細骨材	S1	大船渡産石灰砕砂	2.67	－
	S2	富津産山砂	2.58	－
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤	－	－
	AE	AE剤	－	－
	DF	空気量調整剤（消泡剤）	－	－

*1 三和石産㈱　テスティング事業部品質管理課長　(正会員)
*2 鹿島建設㈱ 技術研究所　建築生産グループ　主任研究員　博士　(工学)　(正会員)
*3 鹿島建設㈱ 技術研究所　建築生産グループ　上席研究員　Ph.D　(正会員)
*4 東海大学　工学部土木工学科教授　工博　(正会員)

表－2　モルタル配合一覧表（シリーズ 1）

No	記号	W/B(%)	DSP 置換率	単位量(kg)								混和剤(B×%)		
				水	結合材(B)					細骨材				
				W	N	BFS	FA	DSP-L	DSP-H	S1	S2	SP	AE	DF
1	30-BFS40-DSP-L60	30	B×60%	255	－	340	－	510	－	581	476	1.60%	－	0.40%
2	30-BFS40-DSP-H60		B×60%	255	－	340	－	－	510	542	444	4.70%	－	0.30%
3	30-BFS70-DSP-L30		B×30%	255	－	595	－	255	－	587	481	0.65%	－	0.20%
4	30-FA40-DSP-L60		B×60%	255	－	－	340	510	－	538	440	1.50%	0.15%	－
5	30-N100		－	255	850	－	－	－	－	623	510	0.45%	0.05%	－
6	40-BFS40-DSP-L60	40	B×60%	240	－	240	－	360	－	730	598	1.40%	－	0.20%
7	40-BFS40-DSP-H60		B×60%	240	－	240	－	－	360	703	575	3.40%	－	0.15%
8	40-BFS70-DSP-L30		B×30%	240	－	420	－	180	－	733	600	0.55%	－	0.15%
9	40-FA40-DSP-L60		B×60%	240	－	－	240	360	－	699	572	1.25%	0.05%	0.15%
10	40-N100		－	240	600	－	－	－	－	759	621	0.30%	0.03%	－
11	50-BFS40-DSP-L60	50	B×60%	225	－	180	－	270	－	827	677	0.95%	－	0.25%
12	50-BFS40-DSP-H60		B×60%	225	－	180	－	－	270	807	660	3.20%	－	0.75%
13	50-BFS70-DSP-L30		B×30%	225	－	315	－	135	－	830	679	0.50%	－	0.75%
14	50-FA40-DSP-L60		B×60%	225	－	－	180	270	－	804	658	1.15%	0.10%	0.75%
15	50-N100		－	225	450	－	－	－	－	850	696	0.25%	0.20%	0.75%
16	60-N100	60	－	225	375	－	－	－	－	884	723	0.30%	0.05%	0.75%

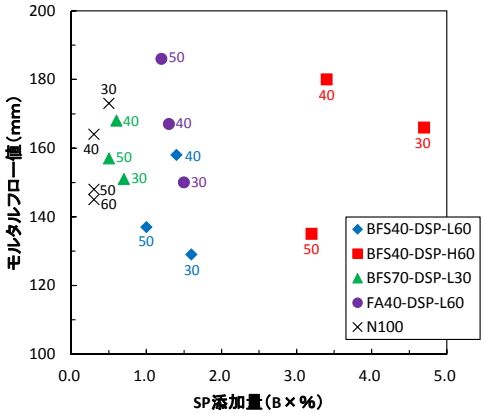
使用した。なお，DSP-L は主にスラッジを発生当日粉砕処理したもので，セメントの反応の程度が比較的小さいため未水和セメント鉱物の残存量が多い。一方，DSP-H は主に翌日処理したもので DSP-L より未水和セメント鉱物の残存量が少なく，比表面積が大きい [4]。モルタルの配合は，W/B＝30，40，50%とし，比較対象の普通ポルトランドセメントの場合のみ 60%についても実施した。DSP 置換率は，B×30%と 60%の 2 水準とした。

2.2 練混ぜ方法

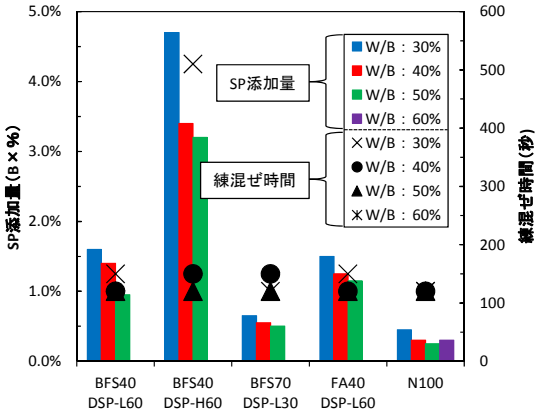
モルタルの練混ぜは，ホバート型モルタルミキサー（公称容量 8L）を使用し，結合材と細骨材を投入し，空練りを 30 秒間後，水と混和剤を投入して練混ぜを行った。練混ぜ時間に関しては，適切な練混ぜ時間（モルタルの流動性が安定する最短時間）が結合材の種類や量によって異なるため，各配合の所要の練混ぜ時間についても検討した。

2.3 モルタルのフレッシュおよび硬化性状

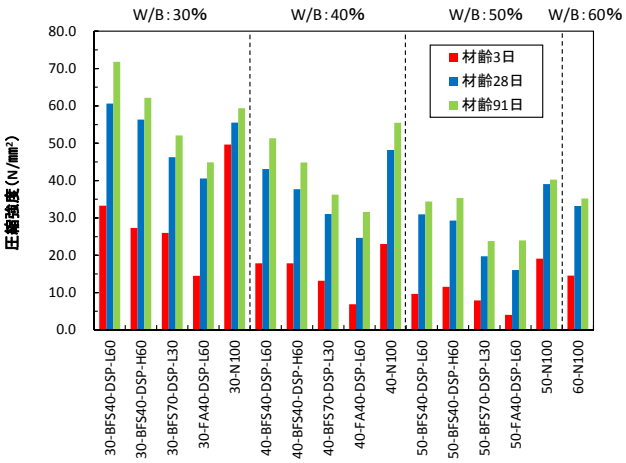
モルタルのフレッシュ性状に関する試験として，モルタルフロー試験（JIS R 5201）および空気量試験（JIS R 1128）をそれぞれ練混ぜ直後で実施した。なお，フロー値は 150±30 ㎜程度とし，この範囲となるように SP 添加量を定めた。また，空気量は 4.5±1.5%程度とした。硬化性状に関する試験は，材齢 3 日，28 日および 91 日について圧縮強度試験（JIS A 1108）を行った。試験体はφ50×100 ㎜の円柱供試体を作製し，打設直後から 20℃封かん養生とした。材齢 3 日で脱型後，試験材齢まで標準養生とした。促進中性化試験（JIS A 1153 準拠）は，φ50×100 ㎜の円柱供試体を 4 体作製し，20℃封かん養生とし，材齢 3 日で脱型後，材齢 28 日まで標準養生して供試体を作製した。その後 28 日間は 20±2℃，湿度 60±5%，CO_2 濃度 5%の促進中性化槽に入れ，促進期間 7 日，28 日，91 日，182 日で 2 面ずつ試験体をカットし，断面の中性化深さを測定した。自由収縮試験は，φ100×200 ㎜の円柱供試体を 2 体作製し，内部に埋込みひずみゲージを配し，材齢 7 日まで 20℃封かん養生とした。供試体作製直後を基点（基長）とし，材齢 7 日で脱型後，



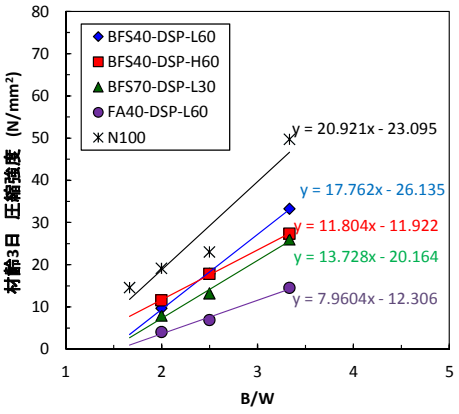
図－1　SP 添加量とモルタルフロー値



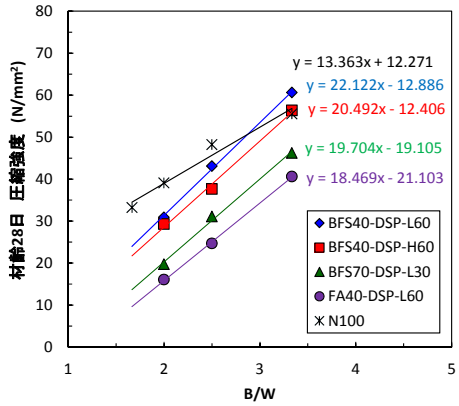
図－2　各配合の SP 添加量と練混ぜ時間



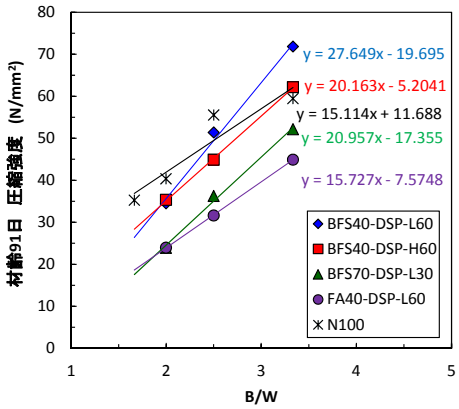
図－3　圧縮強度試験結果



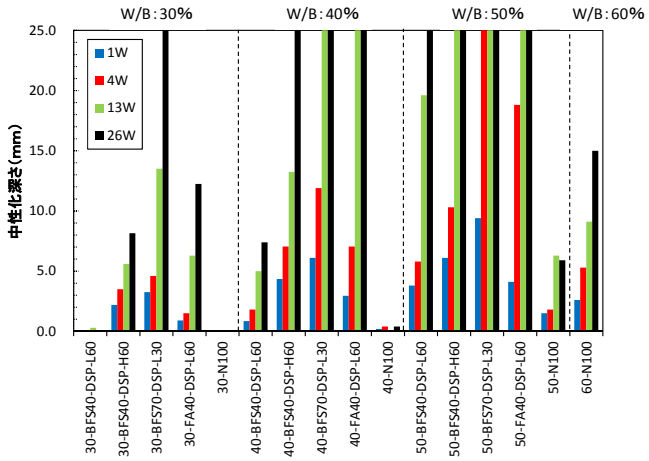
図－4　B/W と圧縮強度（材齢 3 日）



図－5　B/W と圧縮強度（材齢 28 日）



図－6　B/W と圧縮強度（材齢 91 日）



図－7　促進中性化試験結果

20±2℃，湿度 60±5%の気乾養生とし，乾燥材齢 182 日まで長さ変化の測定を行った。

3. シリーズ 1 の実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

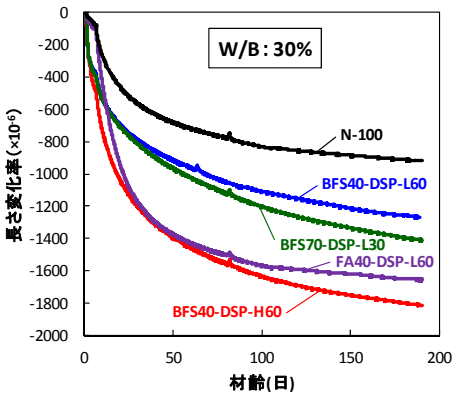
図－1 は SP 添加量とモルタルフロー値の関係を，**図－2** は各配合の SP 添加量と練混ぜ時間の関係を示したものである。なお，**図－1** の図中の数値は，W/B の値を示している。各図より SP 添加量を 0.25～4.70（B×%）の範囲とし，練混ぜ直後のフロー値を 150±30 ㎜程度としたが，DSP-H を使用した配合は，SP 添加量が大きくなり，練混ぜ時間が長くなった。また DSP 置換率を大きくすると，SP 添加量が大きくなり，DSP 置換率が同等の場合，BFS と FA で SP 添加量は同程度であったが，普通セメントに比べ添加量が大きくなった。空気量は，AE 剤の添加量を 0.00～0.20（B×%）の範囲とし，全ての配合で同程度となり，配合による差は見られなかった。

3.2 硬化性状

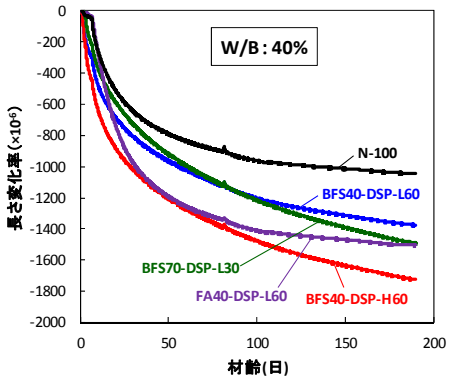
図－3 はモルタルの圧縮強度試験結果である。DSP を用いた配合は初期材齢で，普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ全ての配合で強度は小さいが，長期材齢では BFS で DSP-L 置換率 60%は，ほぼ同程度の強度となった。BFS と FA を用いた配合を比較すると，DSP 置換率が同等の場合，水結合材比によらず BFS を用いた配合は強度が大きくなった。また DSP 置換率を大きくすると，強度が大きくなり，DSP の種類の影響では，DSP-L を用いた配合の方が強度が大きくなった。

図－4～6 に材齢 3，28，91 日における B/W と圧縮強度の関係を示す。いずれの配合も B/W の増加に伴い，強度は大きくなっている。材齢 3 日においては，普通ポルトランドセメントを用いたものの傾きが大きく，BFS，FA の順となっている。材齢 28 日，91 日においては，BFS，FA，普通ポルトランドセメントの順になっている。また，DSP 置換率に関し，添加率 60%が 30%に比べ，各材齢において傾きが大きくなった。DSP の種類では，DSP-L が DSP-H よりも各材齢で傾きは大きくなった。また，BFS で DSP 置換率 30%と FA で DSP 置換率 60%では，各材齢で BFS で DSP 置換率 30%の傾きが大きくなった。これらの傾きの変化は，普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ，BFS や FA を用いたものは長期材齢におけるポゾラン反応等により，B/W が大きくなるほど，組織が緻密化していることが影響したと考えられる。

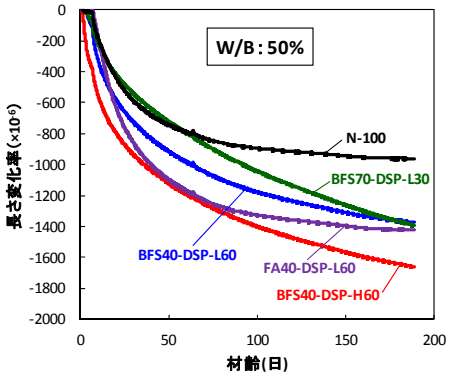
図－7 はモルタルの促進中性化試験結果である。図より，DSP を用いた配合は最適な混合割合で W/B を低減することで，普通ポルトランドセメントを用いたものと同程度の中性化抵抗性を付与できることが示唆された。また，BFS と FA を用いた配合で比較すると，FA を用いた



図－8　自由収縮試験結果（W/B：30%）



図－9　自由収縮試験結果（W/B：40%）



図－10　自由収縮試験結果（W/B：50%）

配合が中性化深さが大きくなった。更に，DSP 置換率が小さいほど，中性化深さが大きくなり，DSP の種類は DSP-H を用いた配合は，中性化深さが大きくなった。これらは，普通ポルトランドセメントの配合では材齢が経過するに伴い生成する $Ca(OH)_2$ の量が増加するが，BFS や FA では，材齢の経過に伴い $Ca(OH)_2$ の量がポゾラン反応等により消費したこと [5]と圧縮強度の低下により，緻密な硬化体組織が形成されていないことにより，二酸化炭素が拡散しやすくなることが影響したものと考えられる。

図－8～10 は，各 W/B ごとの自由収縮試験結果である。図より，全ての W/B において，普通ポルトランドセメントの配合は収縮量が最も小さい結果となった。BFS と FA を用いた場合では，DSP 置換率が同一の場合，FA を用いた配合の収縮量が大きくなった。また，DSP 置換率が大きいほど，収縮量は小さくなり，DSP 比表面積が大きいほど，収縮量は大きくなった。更に BFS で DSP 置換率 30%と FA で DSP 置換率 60%では，FA で DSP 置換率 60%の収縮量が大きくなった。これらは各コンクリートの圧縮強度および結合材容積の差による影響と考えられ，今後さらなる検討が必要である。

4.　シリーズ 2 の実験概要

4.1 使用材料および配合

シリーズ 2 の使用材料を**表－3** に，配合を**表－4** に示す。結合材は，シリーズ 1 と同様のものを使用し，DSP は DSP-A～D までの比表面積が異なる 4 種類を使用した。モルタルの配合は，W/B＝30，40%とし，比較対象の普通ポルトランドセメントの場合のみ 60%についても実施した。DSP 置換率は，B×60%と 80%の 2 水準とした。

4.2 養生条件

供試体の作製および各種試験はシリーズ 1 と同様とし，シリーズ 2 では，プレキャスト製造を想定し，蒸気養生も行った。蒸気養生条件は練混ぜ終了から，2～6 時間の前養生を行い，20℃/h の勾配で昇温し，65℃で 3.5 時間保持した後，20℃/h の勾配で降温した。なお，蒸気養生は配合 No.12～19（**表－4** 記載）についてのみ実施した。

5. シリーズ 2 の実験結果および考察

5.1 フレッシュ性状

図－11 はモルタルのフレッシュ試験時の DSP 比表面積と SP 添加量の関係を，**図－12** は各配合における SP 添加量と練混ぜ時間の関係を示したものである。各図より，DSP の比表面積が大きくなるほど，SP 添加量が大きくなっている。また DSP 置換率が大きいほど，SP 添加量が大きく，DSP が同一添加率の場合，FA と BFS では，BFS を用いた配合の添加率が若干大きくなった。

5.2 硬化性状

図－13 に各配合におけるモルタルの圧縮強度試験の結果を示す。図より，W/B 一定の場合，普通ポルトランドセメントの配合に比べ，FA を用いた配合は長期材齢に

表－3　使用材料（シリーズ 2）

項目	記号	材料名	密度 g/cm³	比表面積 cm²/g
結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3310
	DSP-A	乾燥スラッジ微粉末A	2.75	7200
	DSP-B	乾燥スラッジ微粉末B	2.45	8580
	DSP-C	乾燥スラッジ微粉末C	2.35	11640
	DSP-D	乾燥スラッジ微粉末D	2.08	13290
	BFS	高炉スラグ微粉末4000	2.91	4310
	FA	フライアッシュⅡ種	2.31	3880
細骨材	S1	大船渡産石灰砕砂	2.67	－
	S2	富津産山砂	2.58	－
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤	－	－
	AE	AE剤	－	－
	DF	空気量調整剤（消泡剤）	－	－

表－4　モルタル配合一覧表（シリーズ 2）

No	記号	W/B(%)	DSP置換率	単位量(kg)										混和剤(B×%)		
				水	結合材(B)							細骨材				
				W	N	DSP-A	DSP-B	DSP-C	DSP-D	BFS	FA	S1	S2	SP	AE	DF
1	30-FA40-DSP-A60	30	B×60%	255	–	510	–	–	–	–	340	532	436	1.45%	0.10%	–
2	30-FA20-DSP-A80		B×80%	255	–	680	–	–	–	–	170	548	449	2.40%	0.02%	0.08%
3	40-FA40-DSP-A60	40	B×60%	240	–	360	–	–	–	–	240	694	568	1.20%	0.03%	0.15%
4	40-FA20-DSP-A80		B×80%	240	–	480	–	–	–	–	120	706	577	1.70%	0.03%	0.20%
5	40-FA40-DSP-B60		B×60%	240	–	–	360	–	–	–	240	671	549	2.50%	0.05%	0.15%
6	40-FA40-DSP-C60		B×60%	240	–	–	–	360	–	–	240	662	542	6.00%	0.15%	0.15%
7	40-FA40-DSP-D60		B×60%	240	–	–	–	–	360	–	240	634	518	8.50%	0.03%	0.15%
8	40-BFS40-DSP-B60		B×60%	240	–	–	360	–	–	–	240	703	575	3.00%	0.03%	0.20%
9	40-BFS40-DSP-D60		B×60%	240	–	–	–	–	360	–	240	666	545	10.00%	0.03%	0.20%
10	40-N100		–	240	600	–	–	–	–	–	–	759	621	0.30%	0.09%	–
11	60-N100	60	–	225	375	–	–	–	–	–	–	884	723	0.30%	0.06%	0.50%
12	30-FA40-DSP-A60+	30	B×60%	255	–	510	–	–	–	–	340	532	436	1.45%	0.10%	–
13	30-FA20-DSP-A80+		B×80%	255	–	680	–	–	–	–	170	548	449	2.40%	0.02%	0.08%
14	40-FA40-DSP-A60+	40	B×60%	240	–	360	–	–	–	–	240	694	568	1.20%	0.03%	0.15%
15	40-FA20-DSP-A80+		B×80%	240	–	480	–	–	–	–	120	706	577	1.70%	0.03%	0.20%
16	40-FA40-DSP-B60+		B×60%	240	–	–	360	–	–	–	240	671	549	3.20%	0.05%	0.15%
17	40-BFS40-DSP-B60+		B×60%	240	–	–	360	–	–	240	–	703	575	3.00%	0.03%	0.20%
18	40-N100+		–	240	600	–	–	–	–	–	–	759	621	0.30%	0.09%	–
19	60-N100+	60	–	225	375	–	–	–	–	–	–	884	723	0.30%	0.06%	0.50%

おいても強度が小さくなった。また，全ての配合で標準養生と蒸気養生による強度の差は見られなかった。DSP 置換率を大きくすると，強度が大きくなり，FA と BFS では，同一 W/B において BFS を用いたものが強度が大きくなった。

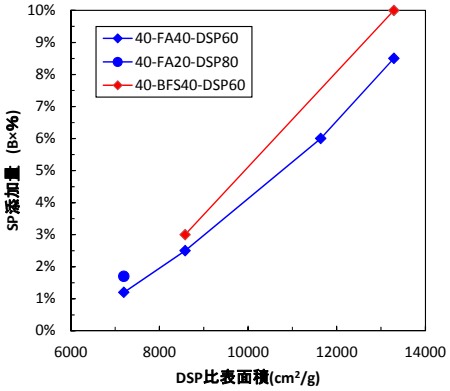
図－14～16 は各材齢における圧縮強度と DSP の比表面積の関係を示したものである。図より，全ての配合で材齢に伴う強度増加が見られた。また，FA および BFS を用いた配合に関し比較すると，FA および BFS とも材齢 3 日では DSP の比表面積の強度に及ぼす影響は小さいが，材齢 28 日，91 日において，FA では DSP 比表面積が大きいほど強度が小さく，BFS では逆に DSP 比表面積が大きくなると，強度が大きくなった。標準養生と蒸気養生においては，全ての配合で初期，長期材齢ともにほとんど差が見られなかった。

図－17 はモルタルの促進中性化試験の結果である。図より，W/B60%の普通ポルトランドセメントの配合に比べ，配合 No.2，9（表－4 記載）は同程度の中性化抵抗性を付与できる可能性が見出された。また，BFS と FA では，FA を用いた配合が中性化深さが大きくなり，DSP 置換率が小さいほど，中性化深さが大きくなった。DSP の比表面積による影響では，大きな差は見られず，ほぼ同様な値であることがわかった。更に標準養生と蒸気養生でも同様に大きな差は見られなかった。

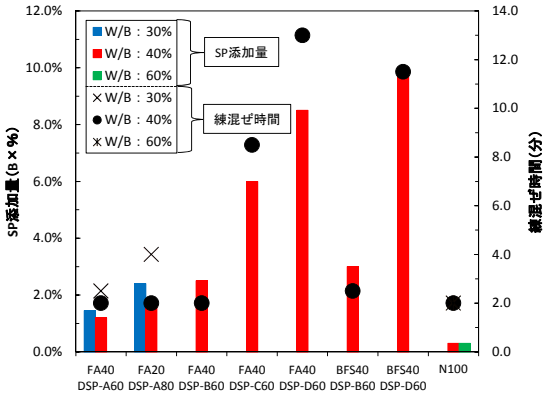
6. まとめ

(1) DSP と BFS，FA を用いたモルタルのフレッシュ性状は，普通ポルトランドセメントを用いたものと比べ同程度のフロー値を得るのに必要な SP 添加量が大きくなった。また DSP 置換率が大きく，DSP 比表面積が大きくなるほど，必要な SP 添加量が大きくなった。

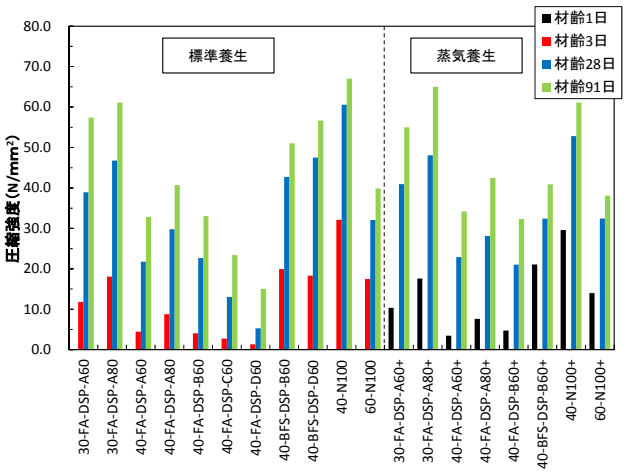
(2) DSP と BFS，FA を用いたモルタルの圧縮強度は，初期材齢では普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ低く，長期材齢では BFS を用いた場合は



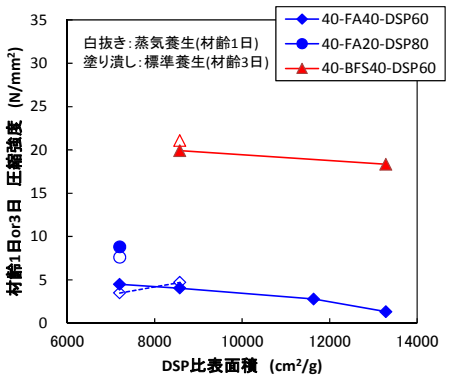
図－11　DSP 比表面積と SP 添加量



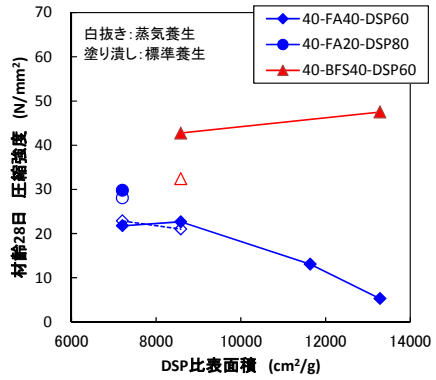
図－12　各配合の SP 添加量と練混ぜ時間



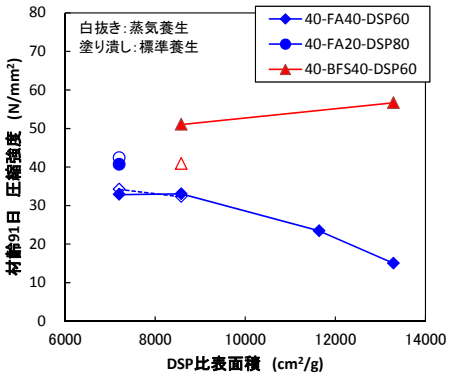
図－13　圧縮強度試験結果



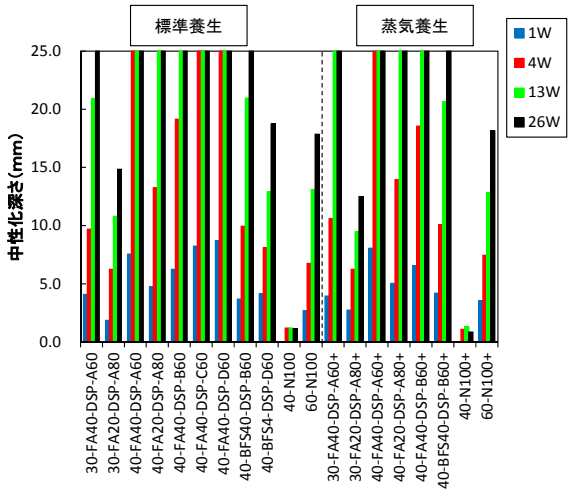
図－14　圧縮強度と DSP 比表面積
（材齢 1 日および材齢 3 日）



図－15　圧縮強度と DSP 比表面積
（材齢 28 日）



図－16　圧縮強度と DSP 比表面積
（材齢 91 日）



図－17　促進中性化試験結果

ほぼ同程度，FA では若干低下した。また，DSP 置換率が大きく，DSP 比表面積が小さいほど，圧縮強度は大きくなった。

(3) DSP と BFS, FA を用いたモルタルの中性化深さは，普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ，強度レベルが同じ場合，同程度の中性化抵抗性を付与できる可能性が見出された。また，BFS を用いた配合は FA に比べ，中性化深さが小さく，DSP 置換率が大きいほど，中性化深さは小さくなり，DSP 比表面積による影響はほとんど見られなかった。

(4) DSP と BFS，FA を用いたモルタルの収縮量は，普通ポルトランドセメントを用いたものに比べ，大きくなった。また，BFS を用いた配合は FA に比べ，収縮量は小さくなった。更に DSP 置換率が大きいほど，収縮量は小さくなり，DSP 比表面積が大きいほど，収縮量は大きくなった。今後これらについては検討する必要がある。

(5) 標準養生と蒸気養生では，圧縮強度，中性化深さ等の物性には差が見られなかった。

謝辞

本研究は，平成 24-26 年度環境研究総合推進費課題 K123015「スラッジ再生セメントと産業副産物混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートによる鉄筋コンクリート部材の開発研究」の一環として実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 大川裕，山宮浩信，桧垣誠：戻りコンクリートの再利用に関する研究，「残コン・戻りコンの発生抑制と有効利用」に関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会，pp.19-24，2010.2

2) 小林利充，溝渕麻子，近松竜一，一瀬賢一：混和材を高含有したコンクリートの強度発現および促進中性化に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.118-123，2012.7

3) 原田耕司，一宮一夫，津郷俊二，池田攻：ジオポリマーの諸特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1894-1899, 2012.7

4) 大川憲，川名正嗣，笠井哲郎：戻りコンクリートから回収したスラッジ微粉末と骨材の諸特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1564-1569，2012.7

5) 小早川真，黄光律，羽原俊祐，友澤史紀：フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.739-744，1998.