

報告 戻りコンクリートから回収したスラッジ水および上澄水と副産物混和材を用いたモルタルの基礎物性

大川 憲*1・宮本 勇馬*2・笠井 哲郎*3

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）等から回収したスラッジ水および上澄水の有効利用対策として、高炉スラグ微粉末などの混和材を用いた環境負荷低減型コンクリートへの有効性を評価するため、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。また上澄水は養生水としての有効利用に関しても検討した。その結果、練混ぜ水に水道水を用いた場合に比べ、スラッジ水および上澄水は副産物混和材と用いると最適な混和材置換率において、強度が大きくなることがわかった。また養生水の検討では、上澄水を用いることで水道水に比べ、若干強度が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, スラッジ水, 上澄水, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 圧縮強度

1. はじめに

国内のレディーミクストコンクリート工場が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 年時点でレディーミクストコンクリート出荷量の約 1.6%発生していると言われており¹⁾、有効利用が喫緊の課題である。近年、産業廃棄物処分場が逼迫し、レディーミクストコンクリート業界においても廃棄物削減とリサイクル促進が必要不可欠である。また水資源に関しては、世界的に有効利用が求められており、人口増、急激な都市化の進展により、2050 年には世界人口の 1/3 が飲用水に困窮するとも予測されており²⁾、コンクリート分野でも大量消費している水資源に関し、今後有効に活用していくことが望まれる。

これらの環境問題に対して、戻りコンの有効利用はこれまでに様々な方法で行われており、特にスラッジ水の利用に関しては多数報告されている^{3),4)}。また 2011 年に JIS A 5308 (追補)において、スラッジ水の規定が緩和され、有効利用を促進するための規格が盛り込まれたが、その普及に関してはあまり進んでいないのが現状である。さらに戻りコンの骨材を回収し、残余のスラッジ水を脱水時に回収した上澄水は、レディーミクストコンクリートの練混ぜ水、アジテータ車の洗浄水および戻りコンから回収する骨材の洗浄水として有効利用されていることが多いが、一部は中和処理後、排水しているのが現状である。これらのことより、スラッジ水と上澄水の有効活用は、レディーミクストコンクリート業界にとって今後さらに推進していく必要がある。

一方で、地球温暖化の抑制対策として、CO₂ 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。これら

は、普通ポルトランドセメント（以下、N と称す）よりも CO₂ 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コンクリートである^{5),6)}。これらのコンクリートは十分な強度発現が得られる一方で、初期強度や中性化抵抗性の確保が課題となる。またスラッジ水および上澄水は、これらの混和材（BFS および FA）のアルカリ刺激材としての作用が期待できるが、これに関する報告はあまり多くはない⁷⁾。

そこで本研究では、戻りコンから回収したスラッジ水および上澄水の有効利用として、BFS や FA を用いた環境負荷低減型コンクリートへの適用について評価することを目的とし、スラッジ水および上澄水のさらなる有効利用を進めるため、それらを用いたモルタルの基礎物性について検討した。

2. シリーズ 1 (模擬スラッジ水および模擬上澄水)

2.1 実験の目的

シリーズ 1 では、BFS や FA の混合割合による影響と、試験室内で作製した模擬スラッジ水および模擬上澄水を練混ぜ水として用い、その影響を明らかにすることを目的とし、モルタルのフレッシュおよび硬化性状について

表-1 使用材料 (全シリーズ)

項目	記号	シリーズ区分け	材料名	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g
結合材	N	全シリーズ	普通ポルトランドセメント	3.16	3330
	BFS		高炉スラグ微粉末4000	2.89	4310
	FA		フライアッシュII種	2.31	4440
細骨材	S		菊川産砕砂	2.59	-
練混ぜ水	W1	シリーズ1	水道水		-
	W2		模擬スラッジ水	スラッジ濃度5.9%、pH12.4	
	W3		模擬上澄水	pH12.4	
	W4	シリーズ2	スラッジ水(実機プラント採取)	スラッジ濃度5.9%、pH12.7	
	W5		上澄水(実機プラント採取)	pH12.5	
	W6	シリーズ3	スラッジ水(実機プラント採取)	スラッジ濃度5.9%、pH12.7	
	W7		上澄水(実機プラント採取)	pH12.8	

*1 三和石産(株) テスティング事業部品質管理課長 (正会員)

*2 三和石産(株) テスティング事業部

*3 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

検討した。

2.2 実験概要

(1) 使用材料および配合

シリーズ1の使用材料を表-1に示す。結合材は、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、練混ぜ水は水道水、模擬スラッジ水および模擬上澄水を使用した。なお模擬スラッジ水は、Nと水道水をスラッジ濃度5.9%となるように計量し、傾動ミキサーにて4時間練り混ぜ後、使用した。また模擬上澄水は上記の方法で模擬スラッジ水を作製後、すぐに吸引ろ過したものである。モルタルの強度発現性の試験は「モルタルの圧縮強度比による回収水の品質試験方法(ZKT-102)」に準拠して行い、配合条件は、W/B=50%、S/C=2.5とした。結合材はBFSをNに対して0、40、60、80%、FAをNに対して0、20、40、60%置換した。

(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、結合材と練混ぜ水を投入し、低速で30秒間練り混ぜ後、細骨材を30秒間で投入し、高速で30秒間練混ぜを行った。90秒間休止後、高速で60秒間練混ぜを行った。

(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、フロー試験(JIS R 5201)および空気量試験(JIS A 1128に準拠(空気室圧力法))をそれぞれ練混ぜ直後で実施した。硬化性状に関する試験は、材齢3日、7日、28日および91日について圧縮強度試験(JIS A 1108)に準拠して行った。試験体はφ50×100mmの円柱供試体を作製し、打込み直後から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。

2.3 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ試験結果一覧表を表-2に、各種練混ぜ水における混和材置換率とフロー値の関係を図-1に示す。図より混和材にBFSを用いたものは、BFSの置換率によらずほぼ同程度のフロー値であった。また水道水に比べ、模擬スラッジ水および模擬上澄水を練混ぜ水として用いた場合、フロー値が小さくなった。一方、混和材にFAを用いたものは、FAの置換率が大きくなるにつれ、フロー値が大きくなった。これはFAのボールベアリング効果によるものと考えられる。また練混ぜ水は水道水に比べ、模擬スラッジ水および模擬上澄水のフロー値が小さくなった。

各種練混ぜ水における混和材置換率と空気量の関係を図-2に示す。図より混和材にBFSを用いたものは、空気量が2.0~3.5%の範囲となり、BFS置換率や練混ぜ水による影響はほとんど見られなかった。一方、混和材に

表-2 フレッシュ試験結果一覧表(シリーズ1)

配合名	混和材置換率	フロー値(15打)(mm)		空気量(%)	CT(°C)
N100-W1	0%	182	× 180	3.2	21.0
N60-BFS40-W1	40%	188	× 187	2.9	20.5
N40-BFS60-W1	60%	189	× 187	2.9	20.0
N20-BFS80-W1	80%	189	× 184	3.2	20.0
N100-W2	0%	189	× 185	2.2	25.5
N60-BFS40-W2	40%	180	× 179	2.9	25.0
N40-BFS60-W2	60%	180	× 175	3.4	24.0
N20-BFS80-W2	80%	177	× 174	3.0	23.5
N100-W3	0%	179	× 177	2.4	27.0
N60-BFS40-W3	40%	178	× 176	2.2	26.0
N40-BFS60-W3	60%	183	× 181	2.5	25.0
N20-BFS80-W3	80%	183	× 180	3.5	25.0
N80-FA20-W1	20%	192	× 190	1.5	21.0
N60-FA40-W1	40%	199	× 198	1.5	21.0
N40-FA60-W1	60%	213	× 211	1.7	20.0
N80-FA20-W2	20%	183	× 182	2.1	26.0
N60-FA40-W2	40%	195	× 192	2.0	25.5
N40-FA60-W2	60%	200	× 199	1.9	25.0
N80-FA20-W3	20%	189	× 186	1.9	26.0
N60-FA40-W3	40%	197	× 195	1.2	26.0
N40-FA60-W3	60%	207	× 200	1.1	25.0

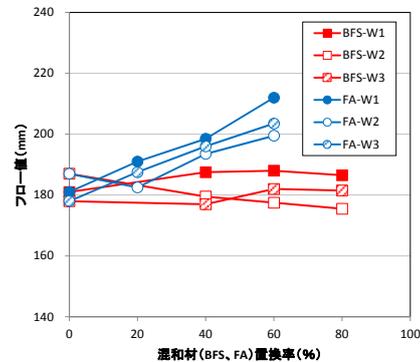


図-1 混和材置換率とフロー値の関係

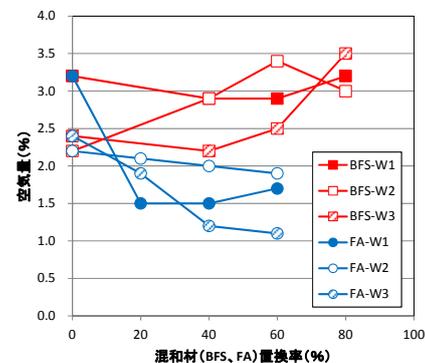


図-2 混和材置換率と空気量の関係

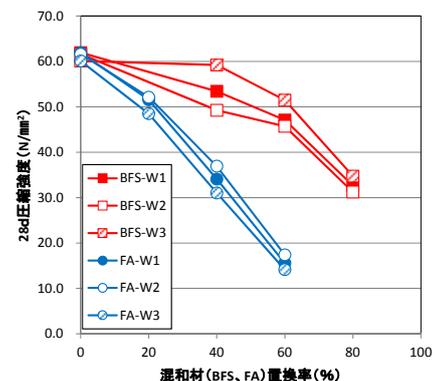


図-3 混和材置換率と28日圧縮強度

FA を用いたものは、FA 置換率が大きくなるにつれ、空気量は小さくなった。また練混ぜ水による影響はほとんど見られなかった。

(2) 硬化性状

各種練混ぜ水における混和材置換率と 28 日圧縮強度の関係を図-3 に示す。図より混和材に BFS を用いた配合は置換率が大きくなるにつれて、強度が小さくなった。また練混ぜ水による影響では、模擬上澄水、水道水、模擬スラッジ水の順に強度が小さくなった。混和材に FA を用いた配合は置換率が大きくなるにつれて、強度は小さくなった。また練混ぜ水による影響では、模擬スラッジ水、水道水、模擬上澄水の順に強度が小さくなった。

試験材齢別に BFS 置換率と模擬スラッジ水および模擬上澄水と水道水の強度比の関係を図-4, 5 に示す。図より模擬スラッジ水と水道水の強度比では、材齢 7 日で BFS 置換率 60% の配合は強度比が大きくなった。模擬上澄水と水道水の強度比では、BFS 置換率が大きくなるほど、強度比が大きくなった。特に材齢 7 日で強度比が大きく、長期材齢の強度比は大きくなかった。これらは模擬スラッジ水および模擬上澄水が BFS の潜在水硬性に寄与したものと考えられ、特に模擬上澄水の効果が大きくなった。

試験材齢別に FA 置換率と模擬スラッジ水および模擬上澄水と水道水の強度比の関係を図-6, 7 に示す。図より模擬スラッジ水と水道水の強度比では、FA 置換率が大きく、長期材齢になるほど強度比が大きくなった。模擬上澄水と水道水の強度比では、模擬スラッジ水のような傾向は特に見られず、全体的に強度比も大きくなかった。これらは FA のポズラン反応によるものと考えられるが、特に模擬スラッジ水の効果が大きくなった。

3. シリーズ 2 (実機によるスラッジ水および上澄水)

3.1 実験の目的

シリーズ 2 では、シリーズ 1 と同様の結合材、細骨材を使用し、練混ぜ水は実機プラントから採取したスラッジ水および上澄水を用い、その影響を明らかにすることを目的とし、モルタルによるフレッシュおよび硬化性状について検討した。

3.2 実験概要

(1) 使用材料および配合

シリーズ 2 の使用材料を表-1 に示す。結合材と細骨材は、シリーズ 1 と同様のものを使用した。練混ぜ水は、実機プラントで戻りコンから回収したスラッジ水と上澄水を使用した。スラッジ水はスラッジ濃度を 5.9% に調整し、pH12.7 であった。なお、実機プラントから採取したスラッジ水には微砂分が含まれていることから、「スラッジ固形分中の砂含有率試験方法 (ZKT-103)」により測

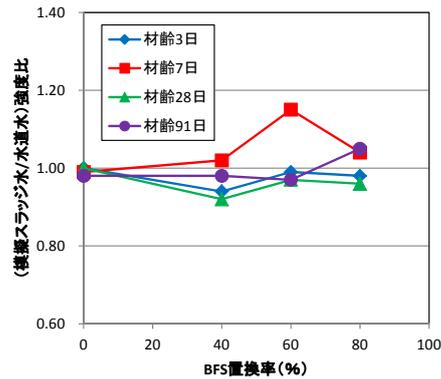


図-4 BFS 置換率と各材齢における強度比の関係

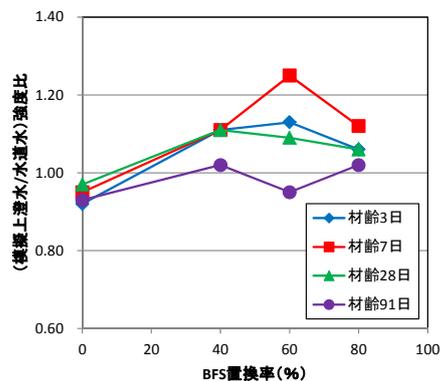


図-5 BFS 置換率と各材齢における強度比の関係

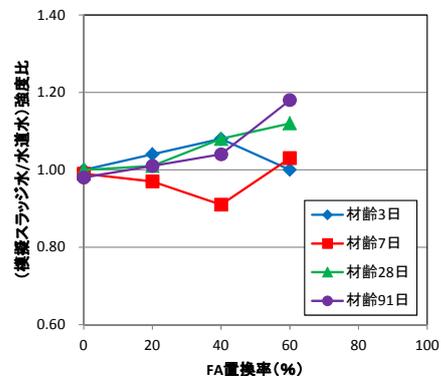


図-6 FA 置換率と各材齢における強度比の関係

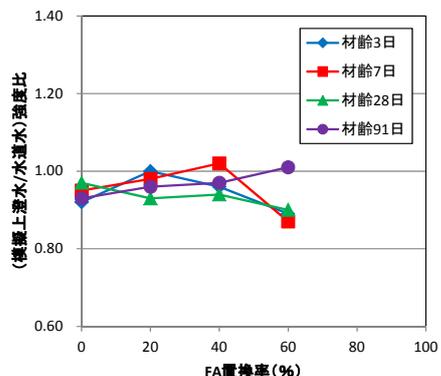


図-7 FA 置換率と各材齢における強度比の関係

定したところ、スラッジ固形分に含まれる微砂分は4.76%であった。上澄水はpH12.5であった。モルタルの配合条件および練混ぜ方法は、シリーズ1と同様とした。結合材はBFSをNに対して0, 40, 60, 100%, FAをNに対して0, 20, 40, 100%置換した。

(2) 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および硬化性状の試験方法については、シリーズ1と同様とした。ただし、混和材(BFSおよびFA)置換率100%の配合(表-3記載)については、脱型を材齢3日ではなく、供試体打込み直後から試験材齢まで20°C封かん養生とした。なお、W1を用いた配合は、シリーズ1の結果を併用したものである。

3.3 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ試験結果一覧表を表-3に示す。BFSおよびFAのフロー、空気量ともにシリーズ1と同様な傾向となった。また模擬スラッジ水と実機プラントから採取したスラッジ水では、実機プラントのスラッジ水を用いた配合はフロー値が小さくなった。さらに模擬上澄水と、実機プラントから採取した上澄水では、実機プラントのものがフロー値が大きくなった。

(2) 硬化性状

各種練混ぜ水における混和材置換率と28日圧縮強度の関係を図-8に示す。図より、混和材にBFSを用いた場合、BFS置換率が大きくなると、強度は小さくなった。練混ぜ水による影響では、スラッジ水および上澄水を用いた場合、若干強度が大きくなった。またBFS置換率100%で練混ぜ水にスラッジ水を用いた配合は、材齢28日で30.1N/mm²であった。さらに図には示されていないが、BFS置換率100%で練混ぜ水に上澄水を用いた配合は、材齢28日で0.70N/mm²であったが、材齢91日では24.6N/mm²となった。混和材にFAを用いた場合、FA置換率が大きくなると、強度は小さくなった。練混ぜ水による影響では、スラッジ水、上澄水、水道水の順に強度は小さくなった。またFA置換率100%で練混ぜ水にスラッジ水を用いた配合は材齢91日でも0.26N/mm²であった。さらにFA置換率100%で練混ぜ水に上澄水を用いた配合は、材齢28日で0.15N/mm²であり、材齢91日で0.18N/mm²であった。

試験材齢別にBFS置換率とスラッジ水および上澄水と水道水使用の場合の強度比の関係を図-9, 10に示す。図よりスラッジ水および上澄水ともに、BFS置換率が大きくなると、強度比が大きくなった。またスラッジ水に関しては初期材齢(3日, 7日)で強度比が大きくなった。練混ぜ水による影響では、スラッジ水を用いた配合は上澄水に比べ、強度比が大きくなった。

試験材齢別にFA置換率とスラッジ水および上澄水と

表-3 フレッシュ試験結果一覧表(シリーズ2)

配合名	混和材置換率	フロー値(15打)(mm)	空気量(%)	CT(°C)
BFS100-W1	100%	188 × 186	3.0	18.0
N100-W4	0%	168 × 167	5.9	23.0
N60-BFS40-W4	40%	163 × 162	4.6	22.0
N40-BFS60-W4	60%	163 × 161	2.9	19.0
BFS100-W4	100%	161 × 158	1.9	21.0
N100-W5	0%	191 × 189	4.4	26.0
N60-BFS40-W5	40%	190 × 189	2.7	26.0
N40-BFS60-W5	60%	188 × 186	3.4	25.0
BFS100-W5	100%	192 × 191	2.7	24.0
FA100-W1	100%	239 × 238	1.7	18.0
N80-FA20-W4	20%	177 × 176	1.4	22.5
N60-FA40-W4	40%	185 × 182	1.2	23.0
FA100-W4	100%	195 × 193	1.5	22.0
N80-FA20-W5	20%	205 × 202	1.8	26.0
N60-FA40-W5	40%	213 × 212	2.0	25.0
FA100-W5	100%	250 × 247	0.7	23.0

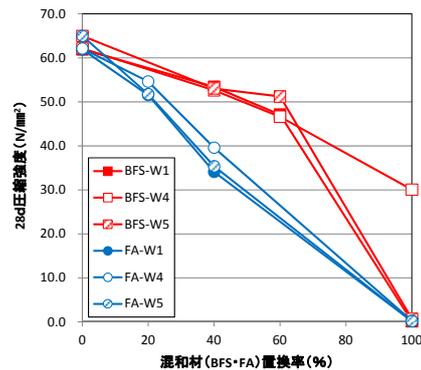


図-8 混和材置換率と28日圧縮強度

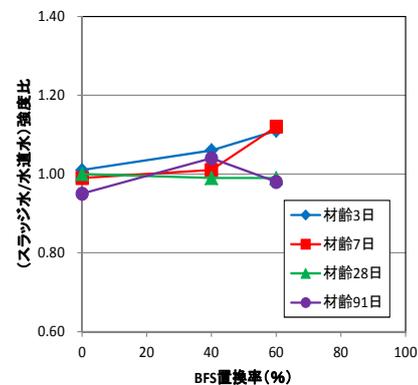


図-9 BFS置換率と各材齢における強度比の関係

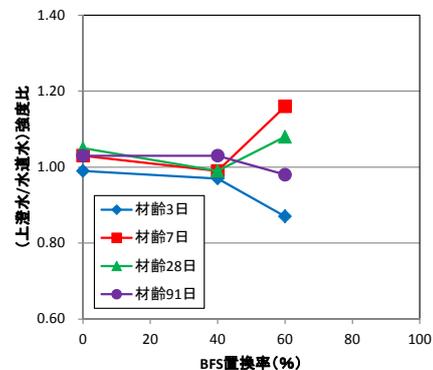


図-10 BFS置換率と各材齢における強度比の関係

水道水の強度比の関係を図-11, 12に示す。図よりスラッジ水および上澄水ともにFA置換率が大きくなると強

度比が大きくなり、長期材齢（28日，91日）で強度比が大きくなった。練混ぜ水による影響では，スラッジ水と上澄水は同様な強度比であった。

4. シリーズ3（養生水）

4.1 実験の目的

シリーズ3では，BFSのみを使用し，練混ぜ水は実機プラントから採取したスラッジ水および上澄水を用い，試験材齢までの養生水に水道水と上澄水を用いた場合の影響を明らかにすることを目的とし，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。

4.2 実験概要

(1) 使用材料および配合

シリーズ3の使用材料を表-1に示す。結合材と細骨材は，シリーズ1，2と同様のものを使用した。なお，シリーズ3では混和材はBFSのみについて検討した。練混ぜ水は，実機プラントで戻りコンから回収したスラッジ水と上澄水を使用した。スラッジ水はスラッジ濃度を5.9%に調整し，pH12.7であった。なお，ここで用いたスラッジ水の微砂分は5.61%であった。また上澄水のpHは12.8であった。モルタルの配合条件および練混ぜ方法は，シリーズ1，2と同様とした。

(2) フレッシュおよび硬化性状

モルタルのフレッシュおよび硬化性状の試験方法については，シリーズ1，2と同様とした。ただし，養生方法に関しては，室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ で同一寸法の容器に水道水と上澄水をそれぞれ同一量入れ，そこで試験材齢まで養生した。なお，ここで用いた上澄水はシリーズ3のモルタルの練混ぜ水で使用した上澄水と同ロットのものを用いた。また容器は密封状態とした。

4.3 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ試験結果一覧表を表-4に，各種練混ぜ水におけるBFS置換率とフロー値の関係を図-13に示す。図より，実機プラントから採取したスラッジ水はシリーズ2と比べ，シリーズ3はフロー値が大きくなることから，使用するスラッジ水のロットにより，スラッジ濃度が同一でもフロー値に影響することがわかった。これはスラッジ水中に含まれる微砂分量が影響したものと考えられる。上澄水はシリーズ2とシリーズ3でロットが異なるが，ほぼ同程度となった。また空気量はシリーズ1，2と同様な傾向となった。

(2) 硬化性状

養生水の違いによるBFS置換率と28日圧縮強度の関係を図-14に示す。図より，養生水に上澄水を用いた配合は，養生水に水道水を用いた配合に比べ，BFS置換率が大きくなると，若干強度が大きくなった。またBFS置

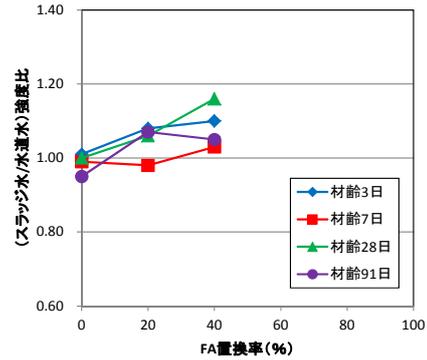


図-11 FA置換率と各材齢における強度比の関係

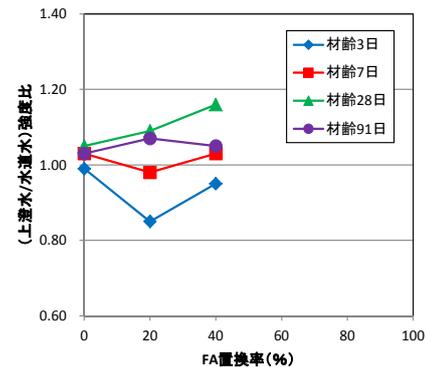


図-12 FA置換率と各材齢における強度比の関係

表-4 フレッシュ試験結果一覧表（シリーズ3）

配合名	混和材置換率	フロー値(15打)(mm)	空気量(%)	CT(°C)
N100-W1	0%	196 × 194	4.0	20.5
N60-BFS40-W1	40%	195 × 194	4.2	19.5
N40-BFS60-W1	60%	189 × 187	2.0	17.0
BFS100-W1	100%	197 × 197	2.6	18.5
N100-W6	0%	180 × 179	4.5	20.0
N60-BFS40-W6	40%	180 × 179	3.5	19.5
N40-BFS60-W6	60%	179 × 175	2.5	19.0
BFS100-W6	100%	170 × 169	3.1	18.0
N100-W7	0%	196 × 192	4.6	26.0
N60-BFS40-W7	40%	195 × 193	3.3	25.5
N40-BFS60-W7	60%	191 × 188	3.4	25.0
BFS100-W7	100%	196 × 196	3.5	24.0

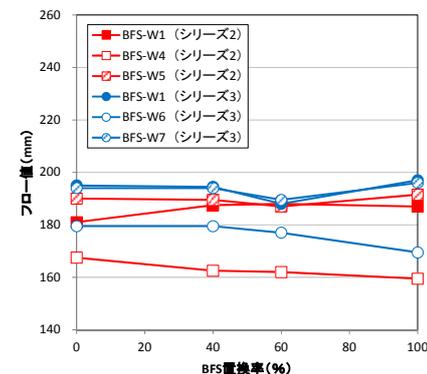


図-13 BFS置換率とフロー値の関係

換率100%で練混ぜ水にスラッジ水を用いたものは材齢28日（上澄水養生）で 30.7N/mm^2 ，材齢28日（水道水養生）で 28.3N/mm^2 であった。

養生水の違いによるBFS置換率と（28d/7d）強度比の関係を図-15に示す。図より，BFS置換率が大きいほど，

強度比は大きくなっている。養生水に上澄水を用いた条件では、養生水に水道水を用いた場合に比べ、BFS置換率が大きいほど、(28d/7d)強度比が大きくなった。これらは、上澄水が高炉スラグ微粉末のアルカリ刺激材として強度に寄与したものと考えられる。

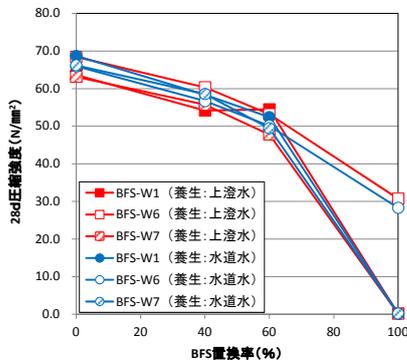


図-14 BFS置換率と28日圧縮強度

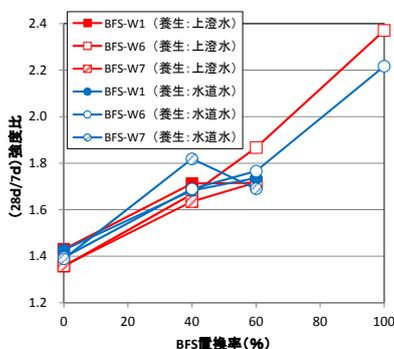


図-15 BFS置換率と(28d/7d)強度比の関係

5. まとめ

本実験では、戻りコンから回収したスラッジ水および上澄水の有効利用として、BFSやFAを用いた環境負荷低減型コンクリートへの適用について評価することを目的とし、それらを用いたモルタルの基礎物性について検討し、下記の結論を得た。

- (1) 混和材にBFSを用いた配合は、BFSの置換率によらずほぼ同程度のフロー値であり、混和材にFAを用いた配合は、FAの置換率が大きくなるにつれ、フロー値が大きくなった。また練混ぜ水は水道水に比べ、模擬スラッジ水および模擬上澄水のフロー値がわずかながら小さくなった。
- (2) 混和材にBFSを用いた配合は、BFS置換率が大きくなると、強度比(模擬スラッジ水および模擬上澄水/水道水)が大きくなった。また初期材齢ほどこの強度比が大きくなった。
- (3) 混和材にFAを用いた配合は、FA置換率が大きくなると、強度比(模擬スラッジ水/水道水)が大きくなった。また長期材齢ではこの強度比が大きくなった。

- (4) BFS置換率100%で練混ぜ水にスラッジ水を用いた配合は材齢28日で 30.1N/mm^2 であった。BFS置換率100%で練混ぜ水に上澄水を用いた配合は、材齢28日で 0.70N/mm^2 であったが、材齢91日では 24.6N/mm^2 となった。
- (5) FA置換率100%で練混ぜ水にスラッジ水を用いた配合は材齢91日で 0.26N/mm^2 であった。FA置換率100%で練混ぜ水に上澄水を用いた配合は、材齢91日で 0.18N/mm^2 であった。
- (6) 養生水に上澄水を用いた配合は、養生水に水道水を用いた配合に比べ、BFS置換率が大きくなると、若干強度が大きくなった。養生水に上澄水を用いたものは水道水を用いたものに比べ、BFS置換率が大きくなるほど、(28d/7d)強度比が大きくなった。

以上より、BFSやFAを用いた環境負荷低減型コンクリートの練混ぜ水にスラッジ水および上澄水を用いることは若干の強度改善に寄与することが示唆された。今後さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局建設振興課労働資材対策局：残コン・戻りコンの発生抑制，有効利用に関するアンケート調査の結果概要について，国土交通省，p.5，2006
- 2) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート分野における海水の有効利用に関する研究委員会報告書，公益社団法人日本コンクリート工学会，p.1，2014.9
- 3) 佐藤嘉昭，竹田吉紹，薬師寺照夫，田口茂久：スラッジ水を積極的に使用したコンクリートの特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1123-1128，1997.7
- 4) 新大軌ほか：グルコン酸ナトリウムを用いたセメントリサイクルに関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.66，pp.22-27，2012
- 5) 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
- 6) 大澤友宏，平田隆祥，二戸信和，人見尚：種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性とCO₂削減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.179-184，2010.7
- 7) 久米里沙，横井克則，原田隆敏，田中光浩：スラッジ水及び上澄水を用いたフライアッシュコンクリートの特性，土木学会第64回年次学術講演会，V-285，pp.567-568，2009.9