

論文 一般廃棄物溶融スラグ微粉末を混和材として用いたモルタルおよびコンクリートの諸特性

木村 亨*1・沼尾 達弥*2・阿倍 智己*3・山下 悠貴*3

要旨：一般廃棄物溶融スラグ微粉末をコンクリート用混和材として用いることができるか検討するとともに，その微粉末を混和材として用いたコンクリートの諸特性を検討した。コンクリートの発泡および膨張の原因となる金属アルミニウムが少なく，塩基度が高い一般廃棄物溶融スラグ微粉末は，水中養生において潜在水硬性を有することを確認した。また，コンクリートの静弾性係数および引張強度は，得られる圧縮強度により決定され，混和材の有無にはよらないこと見いだした。

キーワード：一般廃棄物溶融スラグ微粉末，混和材，潜在水硬性，塩基度，金属アルミニウム含有率

1. はじめに

一般廃棄物は，溶融固化し，一般廃棄物溶融スラグ(以下，SL とする)にすることで，体積を大幅に減少させることが可能である。最終処分場の残余年数の延長を図るため，一般廃棄物の溶融化を行っている自治体も多い。SL の生成量は，2001 年の「ダイオキシン類対策特別措置法」施行に伴い急激に増加し，ここ数年は年間 85 万 t で推移している。2006 年には，JIS A 5031(一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材)と JIS A 5032(一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ骨材)が規定された。しかし，SL の骨材としての利用は，停滞している^{1),2)}。

SL の製造時には，高温溶融処理が必要なことから，多大な費用が消費されているため，骨材よりも付加価値がある高価な材料との代替品としての利用が望まれる。

SL のほとんどは水砕処理にて急冷され製造されるため，非晶質となり潜在水硬性を有すると考えられる^{3),4)}。その特徴を活かして，SL 微粉末をジオポリマーの活性フィラーの一部に用いる研究が行われ，安定した強度が得られることも報告されている^{5),6),7),8)}。

本論文は，SL 微粉末をコンクリート用混和材(以下，混和材とする)として利用できるか可能性を検討するものである。しかし，SL 微粉末の塩基度は，高炉スラグ(以下，BFS とする)微粉末より低く，十分な潜在水硬性が発揮されるか明確ではない。更に，SL は原料が一般廃棄物であるため，製造地および製造方法の変化に伴い化学成分や塩基度が変化しする^{9),10),11)}。そのため，十分な圧縮強度が得られないことも考えられる。

そこで本研究は，製造地および製造方法を変えることで化学成分および塩基度が異なる SL 微粉末を混和材に用い，セメントへの置換率と養生方法を変化させたモルタルおよびコンクリートの圧縮強度，静弾性係数，引張強度に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 SL の製造方法・物理的性質

表-1 に SL の製造方法および物理的性質を示す。実験には，製造地および製造方法を変化させた計 6 種類の SL を比較した。SL の原材料は一般廃棄物のみであり，いずれも冷却方法は水砕処理である。なお，溶融炉の形式の分類は，JIS A 5031 によった。

表-1 SL の製造方法および物理的性質

記号	一般廃棄物の 溶融固化方式の分類		製造地	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	金属アルミ ニウム含有率 (%)
A-a	交流アーク式灰熔融炉(A)		a	2.80	2880	0.054
A-b			b	2.76	3650	0.018
B-c	シャフト炉式 ガス化熔融炉(B)	コークスベット方式	c	2.86	3110	0.013
B-d		酸素式	d	2.89	3590	0.140
C-e	キルン式ガス化熔融炉(C)		e	2.73	3410	0.010
D-f	流動床式ガス化熔融炉(D)		f	2.78	3380	0.008

*1 茨城大学 技術専門職員 工学部 工博 (正会員)

*2 茨城大学 教授 工学部都市システム工学科 工博 (正会員)

*3 茨城大学 元学生 工学部都市システム工学科

2.2 実験概要

(1) SL の種類および置換率の影響

表-2 に実験の要因と水準を示す。6 種類の SL 微粉末を混和材に用いたモルタルについて、SL の種類および置換率が圧縮強度に及ぼす影響を検討した。SL 微粉末の置換率を 0, 10, 20, 30, 50% の 5 水準とし、試験材齢まで水中養生を行い比較した。

(2) 養生方法の影響

表-3 に実験の要因と水準を示す。使用した SL の中で塩基度の高いスラグ B-c 微粉末を混和材に用いたモルタルについて、置換率および養生条件の違いが圧縮強度に及ぼす影響を検討した。置換率を 0, 30, 40, 50, 60% の 5 水準とし、水中養生および蒸気養生を行い比較した。

(3) コンクリートの諸特性に及ぼす影響

表-4 に実験の要因と水準を示す。B-c 微粉末を混和材に用いたコンクリートについて、置換率が圧縮強度、静弾性係数、引張強度に及ぼす影響について検討した。置換率を 0, 10, 30, 50% の 4 水準とし、試験材齢まで水中養生を行い比較した。

2.3 SL の粉碎方法

SL の微粉碎方法は、製造後 3 日の SL を 100℃ の乾燥炉内で 24 時間以上炉乾燥した後、ポッドミルにて比表面積が 3000cm²/g を目標に粉碎した。

2.4 使用材料およびモルタル・コンクリートの配(調)合

表-5 に実験に用いた使用材料を示す。すべての試験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメント(以下、OPC とする)を用いるとともに、SL 微粉末との比較のため、BFS 微粉末も用いた。

表-6 に混和材を用いない場合のモルタルの配(調)合を、表-7 に混和材を用いない場合のコンクリートの示方配(調)合を示す。混和材は OPC を質量で置換した。混和材を置換すると、SL 微粉末あるいは BFS 微粉末の密度が OPC の密度よりも若干低いことから、練り混ぜ量が

OPC のみを用いたものより多少増加することとなる。

2.5 モルタル・コンクリートの成形および養生方法

モルタルおよびコンクリートに用いる全ての材料は、事前に恒温恒湿室(20±1℃, 65±5%RH)にて 24 時間以上保管し、材料温度を一定にしたものを用いるとともに、同室にて練り混ぜおよび成形を行った。モルタルは、直径 50mm, 高さ 100mm の円柱供試体を用い、コンクリートは、直径 100mm, 高さ 200mm の円柱供試体を用いた。

水中養生は、モルタルおよびコンクリートを打ち込んだ円柱供試体を 24 時間後に脱型し、恒温恒湿室の水槽に所定材齢まで静置した。蒸気養生は、コンクリート製品工場の蒸気養生を模擬するため、モルタルを打ち込んだ円柱供試体を湿度 85%RH の高温高湿槽にて、30℃で 2 時間置き、その後毎時 15℃で最高温度 65℃まで昇温させ、その温度のまま 5 時間保持した後自然放冷した。蒸気養生後は、恒温恒湿室にて所定材齢まで静置した。

表-2 要因と水準(SL の種類および置換率の影響)

要因	水準
混和材料	A-a, A-b, B-c, B-d, C-e, D-f, BFS(比較用)
置換率 (%)	0, 10, 20, 30, 50

表-3 要因と水準(養生方法の影響)

要因	水準
混和材料	B-c, BFS(比較用)
置換率 (%)	0, 30, 40, 50, 60
養生方法	水中養生, 蒸気養生

表-4 要因と水準(コンクリートの諸特性に及ぼす影響)

要因	水準
混和材料	B-c, BFS(比較用)
置換率 (%)	0, 10, 30, 50

表-5 実験に用いた使用材料

材料名	記号	種類	物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント(OPC) (H 社製)	密度:3.15g/cm ³ 比表面積:3820cm ² /g
混和材(比較用)	BFS	高炉水砕スラグ(BFS)微粉末 (S 社製)	密度:2.91g/cm ³ 比表面積:4030cm ² /g
細骨材	S	砕砂 (茨城県筑西市産)	粗粒率(F.M.):2.46 表乾密度:2.58g/cm ³ 吸水率:2.72%
粗骨材	G	碎石(最大寸法:25mm) (茨城県筑西市産)	最大寸法:25mm 表乾密度:2.68g/cm ³ 吸水率:2.64%

表-6 モルタルの配(調)合(OPC の場合)

W/C (%)	W (g)	C (g)	S (g)
40	300	750	1200

表-7 コンクリートの示方配(調)合(OPC の場合)

空気量 (%)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
3.0±1	10±2	50	48	180	360	864	969

表－8 SL の化学成分

記号	含有率(%)												塩基度
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	ZnO	その他	
A-a	40.01	21.55	4.08	1.46	0.23	23.11	2.98	0.89	3.45	1.52	0.17	0.55	1.19
A-b	44.39	20.09	2.93	1.68	0.17	21.00	3.29	1.18	3.15	1.04	0.07	1.01	1.00
B-c	37.78	19.26	1.78	1.32	0.32	32.47	2.93	0.40	2.39	0.49	0.02	0.84	1.45
B-d	35.11	23.45	6.19	1.76	0.34	23.73	3.51	0.76	2.16	2.14	0.08	0.77	1.44
C-e	49.28	16.05	3.62	1.35	0.15	19.32	2.73	1.81	3.12	1.53	0.27	0.77	0.77
D-f	45.30	18.61	4.38	1.55	0.27	19.49	3.08	1.45	3.23	1.67	0.22	0.75	0.91

2.6 各種試験方法

SL の化学成分を蛍光 X 線元素分析法 (XRF)により、SL 内の金属 Al の含有量測定を臭素化メチル分離-プラズマ発光分析法により測定した。

圧縮強度は、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に、引張強度は、JIS A 1113(コンクリートの割裂引張強度試験方法)に、静弾性係数は、JIS A 1149(コンクリートの静弾性係数試験方法)に従い材齢ごとに測定した。なお、静弾性係数試験のひずみ測定には、ゲージレンジス 60mm のワイヤストレーンゲージを用いた。

3. 実験結果

3.1 SL の種類および置換率の影響

(1) 化学成分に及ぼす影響

表－8 に実験に用いた SL の化学成分を示す。なお、表中の塩基度は、 $(CaO+Al_2O_3+MgO)/SiO_2$ で算出した。スラグ A-a およびスラグ A-b はどちらも同じ交流アーク式灰溶融炉で、製造した企業も同じである。化学成分や塩基度はほぼ同じ値を示したが、金属アルミニウム含有率は、スラグ A-a が 0.018%，スラグ A-b が 0.054%と大きく異なっている。スラグ B-c およびスラグ B-d はどちらもシャフト炉式ガス化溶融炉であるが、製造した企業は異なっており、溶融方式の詳細もスラグ B-c はコークスベットの方式、スラグ B-d は酸素式と異なる。塩基度はスラグ B-c が 1.45，スラグ B-d が 1.44 と他の SL の塩基度より高い値を示したものの、化学成分は大きな差が生じた。スラグ B-c は、一般廃棄物の溶融時に助燃剤としてコークスを、副原料として石灰石を投入して製造される。そのため、CaO が 32.47%と多く、SiO₂ が 37.78%と少ないことで高い塩基度を示した。また、スラグ B-d は、一般廃棄物の溶融時に助燃剤として液化ガスを使用するが、副原料は使用することはない。しかし、Al₂O₃ が 23.45%と多く、SiO₂ が 35.11%と少ないことで高い塩基度を示した。なお、スラグ B-d の金属アルミニウム含有率は 0.140%と他の SL に比べ非常に高い。スラグ D-f は、流

動床式ガス化溶融であるため、溶融時に珪砂を投入して製造される影響から SiO₂ が 49.28%と高いことで他の SL よりも低い塩基度を示した。

以上のことから、SL の化学成分、塩基度、金属アルミニウム含有率は、同じ溶融固化方式であっても差が生じ、製造地によって異なることが分かる。

(2) 圧縮強度に及ぼす影響

図－1 に置換率 30%におけるモルタルの圧縮強度と材齢の関係を示す。混和材の種類に関わらず、材齢 28 日までの圧縮強度は、OPC のみを用いたモルタルより低い。しかし、BFS 微粉末および SL 微粉末を混和材に用いたモルタルの場合、材齢 28 日以降の強度増進率は高い。そのため、BFS 微粉末を混和材に用いたモルタル場合、材齢 91 日における圧縮強度は、OPC のみを用いたモルタルより高い値を示した。一方、SL 微粉末を混和材に用いた場合、SL 微粉末の種類により圧縮強度は大きく変化するが、スラグ B-c 微粉末の材齢 91 日の圧縮強度は、OPC のみを用いたモルタルとほぼ同等の値を示した。

図－2 に材齢 91 日におけるモルタルの圧縮強度と置換率の関係を示す。SL 微粉末の種類により、置換に伴う圧縮強度は大きく変化した。SL 微粉末の中で、スラグ B-c 微粉末を用いた場合、置換率 30%までほとんど圧縮強度は低下しなかった。スラグ B-c 微粉末以外の SL 微粉末を用いたモルタルの場合、置換率の増加に伴い圧縮強度は低下した。なお、BFS 微粉末を混和材に用いたモルタル場合、置換率に関わらず OPC のみを用いたモルタルよりも圧縮強度が高い値を示した。

(3) 単位体積質量比に及ぼす影響

SL 微粉末の密度は、OPC より低いため、モルタルの単位体積質量は、置換率の増加に伴い減少する。そこで、置換率の増加に伴う混和材量の増加が単位体積質量へ及ぼす影響を取り除くため、単位体積質量の実測値をモルタル配(調)合から求めた単位体積質量で除した単位体積質量比で比較した。なお、混和材を用いない場合のモルタル配(調)合から求めた単位体積質量は、表－7 の配(調)

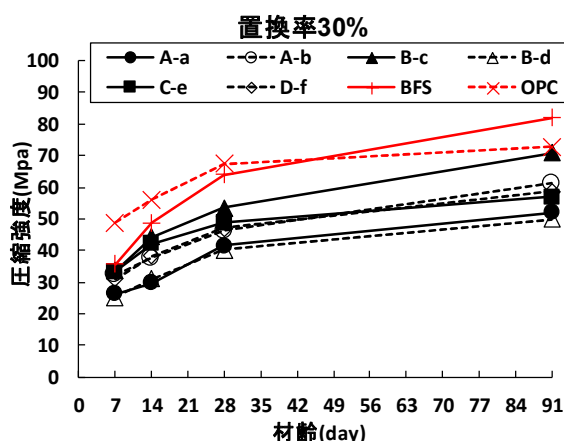


図-1 置換率 30%におけるモルタルの圧縮強度と材齢の関係

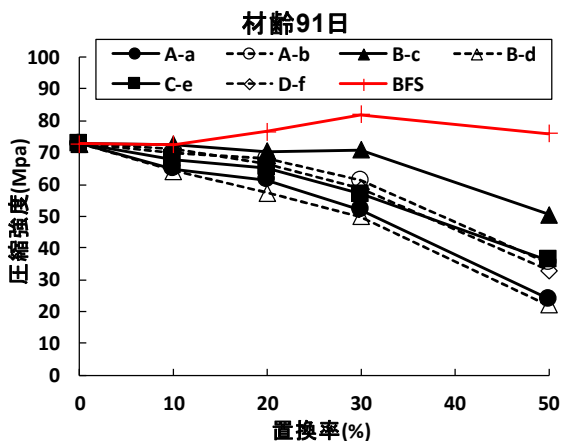


図-2 材齢 91 日におけるモルタルの圧縮強度と置換率の関係

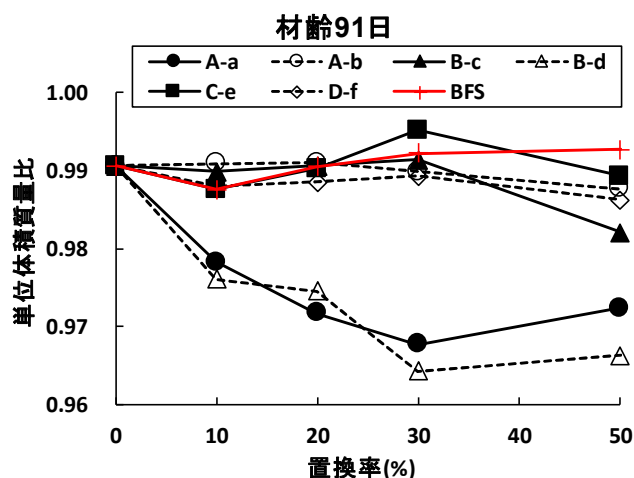


図-3 材齢 91 日におけるモルタルの単位体積質量比と置換率の関係

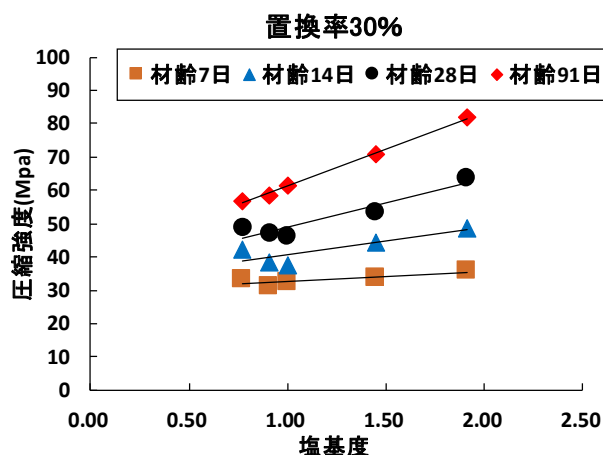


図-4 モルタルの圧縮強度と塩基度の関係

合では空気量を無視したため 1.00 より小さい値を示す。

図-3 に材齢 91 日におけるモルタルの単位体積質量比と置換率の関係を示す。スラグ A-a 微粉末およびスラグ B-d 微粉末以外を用いたモルタルの単位体積質量比は、置換率が増加しても大きく変化しない。しかし、スラグ A-a 微粉末およびスラグ B-d 微粉末を用いたモルタルの単位体積質量比は、置換率の増加に伴い低下した。これは、前述したとおり、他の SL 微粉末に比べスラグ A-a 微粉末およびスラグ B-d 微粉末の金属アルミニウム含有率が多い。そのため、金属アルミニウムと OPC の反応に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とが反応し、練混ぜ時の発泡による空気量の増加あるいは成形後の膨張が起き、単位体積質量比が低下したものと考えられる。このことが、圧縮強度が低下した要因と考えられる。

また、置換率が 30% を超えると単位体積質量比の更なる低下は確認できない。これは、置換率が 50% になると、セメント量が少なくなるため生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が少なく、発泡および膨張が抑制され、単位体積質量比の低下も抑制されたものと考えられる。

以上のことから、金属アルミニウム含有率が 0.02% 以下なら単位体積質量比への影響は小さいものと推測する。

(4) 圧縮強度と塩基度(JIS)の関係

図-4 に置換率 30% におけるモルタルの圧縮強度と塩基度の関係を示す。なお、前述したとおり、スラグ A-a 微粉末およびスラグ B-d 微粉末を用いると、練り混ぜ中の発泡および成形後の膨張による影響が大きくなるため、図-4 から除外した。塩基度の増加に伴い圧縮強度が増加し、この傾向は、材齢経過とともに明確になった。これは、SL 微粉末を混和材に用いた場合も、潜在水硬性による圧縮強度増加が起きることを示し、その効果は、塩基度が高いほど大きいことを示している。

3.2 養生方法の影響

図-5 に置換率 30% におけるモルタルの圧縮強度と材齢の関係を示す。水中養生を行った場合、OPC のみを用いたモルタルの圧縮強度は、材齢 28 日以降の増加は小さい。BFS 微粉末およびスラグ B-c 微粉末を混和材に用いたモルタルの圧縮強度は、OPC のみを用いたモルタルよりも材齢 28 日以降の増加が大きく、材齢 365 日において OPC のみを用いたモルタルより高い値を示した。蒸気養生を行った場合、モルタルの圧縮強度は、混和材の有無に関わらず、材齢 14 日以降の増加はほとんど無く、BFS 微粉末およびスラグ B-c 微粉末を混和材に用いたモルタ

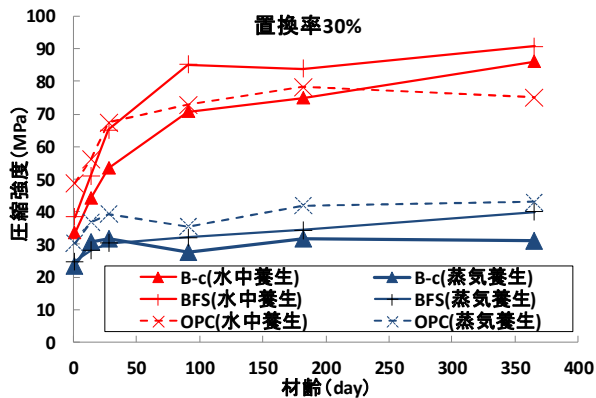


図-5 置換率 30%におけるモルタルの圧縮強度と材齢の関係

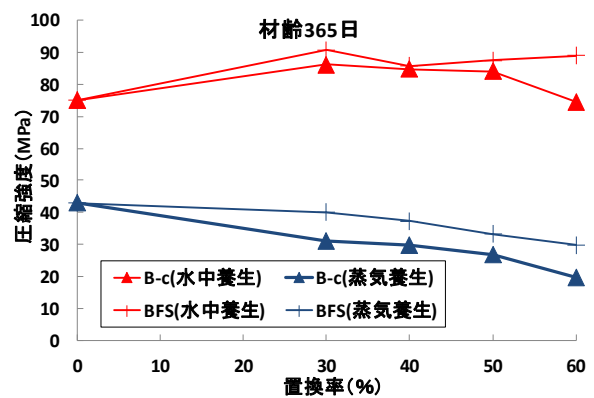


図-6 材齢 365 日におけるモルタルの圧縮強度と置換率の関係

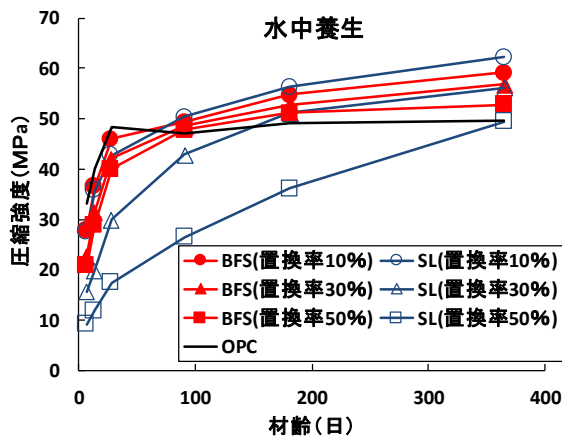


図-7 各置換率におけるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係

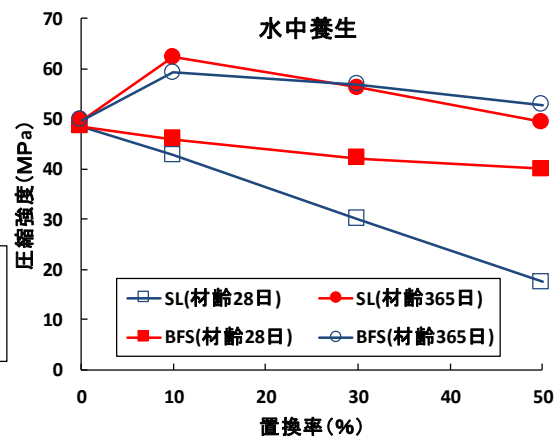


図-8 コンクリートの圧縮強度と置換率の関係

ルの圧縮強度は、OPCのみを用いたモルタルより低い値を示した。また、蒸気養生の圧縮強度は、水中養生の圧縮強度より著しく低い値を示した。

図-6に材齢365日におけるモルタルの圧縮強度と置換率の関係を示す。水中養生を行った場合、BFS微粉末およびスラグB-c微粉末を混和材に用いたモルタルの圧縮強度は、ほぼ同等の値を示し、OPCのみを用いたモルタルより高い値を示した。蒸気養生を行った場合、BFS微粉末およびスラグB-c微粉末を混和材に用いたモルタルの圧縮強度は、OPCのみを用いたモルタルより低い値を示すとともに、置換率の増加に伴い低下した。

本実験ではコンクリート製品工場の蒸気養生を模擬するため、蒸気養生の最高温度および湿度が低く設定した。そのため、OPCの水和反応が十分に起きず圧縮強度が低くなったと考えられる。また、潜在水硬性による反応は、OPCの水和反応より緩慢なため、BFS微粉末およびスラグB-c微粉末を用いたものは、十分に潜在水硬性を発揮する前に蒸気養生は終了したと考えられる。その後、蒸気養生中の湿度が低いことから、供試体内に水分が少なく、蒸気養生後の水分供給もないため、圧縮強度が増加しなかったと考えられる。

3.3 コンクリートの諸特性に及ぼす影響

図-7に各置換率におけるコンクリートの圧縮強度と

材齢の関係を示す。モルタルの実験同様、スラグB-c微粉末を混和材に用いたコンクリートの圧縮強度は、材齢28日まではOPCのみを用いたコンクリートより低く、BFS微粉末を混和材に用いたコンクリートよりも強度増進率が遅いものの、材齢365日では置換率50%であってもOPCのみを用いたものと同等以上の値を示した。

図-8に材齢28日および材齢365日におけるコンクリートの圧縮強度と置換率の関係を示す。材齢28日の圧縮強度は、置換率の増加に伴い低下するとともに、スラグB-c微粉末を混和材に用いたコンクリートの方が、BFS微粉末を混和材に用いたコンクリートよりも著しく低い。しかし、材齢365日の場合、置換率50%においてもOPCのみを用いたコンクリートの値よりも高い。スラグB-c微粉末を混和材に用いたコンクリートとBFS微粉末を混和材に用いたコンクリートは、ほぼ同等の値を示した。

図-9に各材齢における静弾性係数と圧縮強度の関係を、図-10に各材齢における引張強度と圧縮強度の関係を示す。SL微粉末およびBSF微粉末を混和材に用いたコンクリートの静弾性係数および引張強度は、圧縮強度の増加に伴い増加している。このことから、スラグB-c微粉末を混和材に用いる場合も圧縮強度を確保すれば、それに伴い静弾性係数および引張強度も確保できることが分かる。

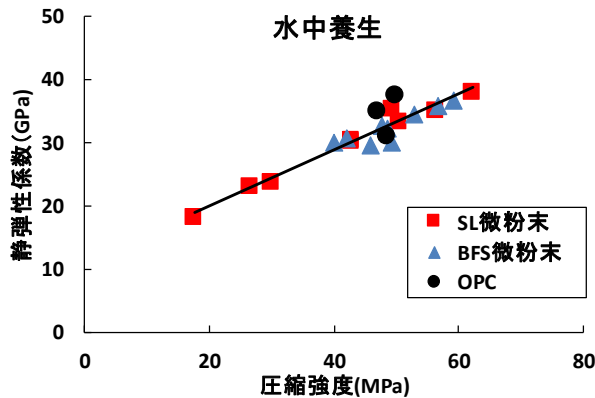


図-9 各材齢における圧縮強度と静弾性係数の関係

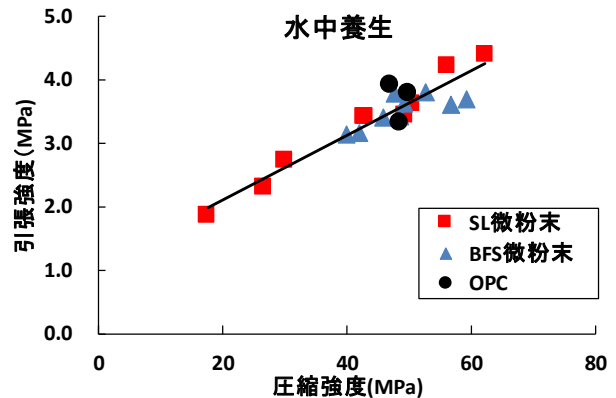


図-10 各材齢における圧縮強度と引張強度の関係

4. 結論

得られた結果は以下のとおりである。

- 1) SL 微粉末中の金属アルミニウムは、練り混ぜ直後から発泡し、硬化中の膨張を引き起こす。そのため、金属アルミニウムを多量に含有する SL 微粉末を混和材に用いたモルタルの単位体積質量比が小さくなる。その結果、モルタルの圧縮強度を低下させる。
- 2) 実験に用いた SL 微粉末の中で金属アルミニウム含有率が多い SL 微粉末を除外した場合、SL 微粉末を混和材に用いたモルタルの圧縮強度は、塩基度が増加するほど増加した。これは、材齢が長いほど顕著に見られた。このことから、SL 微粉末の塩基度が高いほど潜在水硬性を発揮するものと考えられる。
- 3) SL 微粉末を混和材に用いたモルタルに水中養生を行った場合、材齢 91 日における圧縮強度は、置換率の増加に伴い低下した。しかし、実験に用いた SL 微粉末の中で塩基度が高い SL 微粉末を用いたモルタルの圧縮強度は、置換率 30%までは OPC のみを用いたモルタルとほぼ同等の値を示した。
- 4) 塩基度の高い SL 微粉末を混和材に用いたコンクリートに水中養生を行った場合、材齢 365 日における圧縮強度は、置換率に関わらず OPC のみを用いたコンクリートと同等以上の値を示し、BFS 微粉末を混和材に用いたコンクリートと同等の値を示した。また、圧縮強度が増加するほど静弾性係数および引張強度が高くなる傾向を示した。

参考文献

- 1) エコスラグ利用普及委員会：http://www.jsim.or.jp/ecoslag/index.html(閲覧日：2016 年 11 月 11 日)
- 2) 斉藤丈士，中田善久，大塚秀三，串田真基：一般廃棄物溶融処理施設の実態に関するアンケート調査：コンクリート工学年次論文集，Vol. 37, No.1, pp. 91-96, 2015.
- 3) Fukuzawa, K., Kwak, D., Abe, O., Ojima, H. and

- Yoshida, H. : Strength of mortar and concrete using fine powder of molten slag made from municipal waste as a cementitious material, Sustainable Construction Techno., pp. 333-337, 2007.
- 4) 三井雅一，福澤公夫，宮坂洋介，小島均：都市ごみ溶融スラグ微粉末を用いた硬化体に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.1451-1456, 2003.
- 5) 池田攻：ジオポリマーバインダーによる鉱物質粉体の常温固化と材料化，資源と素材，Vol.114, pp.497-500, 1998.
- 6) Norio, Y. and Ko, I. : Preparation of geopolymetric materials from sewage slag with special emphasis the matrix compositions, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.118, pp.107-112, 2010.
- 7) 木村亨，沼尾達弥，小沼遥佑：酸化カルシウム含有率が異なる活性フィラーを用いたジオポリマーモルタルの各種諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, 2016, pp.2289-2294
- 8) 木村亨，沼尾達弥，徳元智尋，山下悠貴：保管方法を変化させた一般廃棄物溶融スラグ微粉末を用いたジオポリマーモルタルの流動性および圧縮強度に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.72, No.4, 2016, pp.400-410
- 9) 鳥居和之，山戸博晃，野口陽輔，鍵本広之：溶融炉スラグの物理・化学的性質とアルカリシリカ反応性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.623-628, 2003.
- 10) 北辻政文：未反応石灰石と金属アルミニウムがコンクリートの膨張に及ぼす影響，環境浄化技術，Vol.12, No.1, pp.35-42, 2013
- 11) 木村亨，沼尾達弥，城所朋輝，蒔田裕紀：簡易改質処理を施した一般廃棄物溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状改善効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.85-90, 2015.