論文　ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの品質改善に関する研究

竹中　寛[*1]・末岡　英二[*2]・安田　正雪[*3]・笠井　哲郎[*4]

要旨：ごみ溶融スラグをコンクリート用細骨材として有効利用する際に，ブリーディング増加や凝結遅延などが問題となる。本研究では，ごみ溶融スラグの置換率を変化させたコンクリートの物性確認実験を行い，置換率が 50%を超える配合でブリーディングの増大と凝結遅延が生じることを把握し，その抑制方法について検討するため，それらコンクリートから粗骨材を除いた配合のモルタルで基礎実験を行った。その結果，ごみ溶融スラグの置換に伴うモルタルのブリーディング率の増加や凝結時間の遅延は，練混ぜにダブルミキシングの適用や増粘剤の添加により，抑制できることが分かった。

キーワード：ごみ溶融スラグ，ブリーディング，凝結時間，ダブルミキシング，増粘剤

1. はじめに

日常生活から排出される一般廃棄物の量は，年々増加する傾向にあり，平成 15 年度には約 5,200 万 t もの量が排出された。この一般廃棄物のほとんどは焼却処理された後，焼却残渣として埋立処分されていたが，近年，減容化による埋立処分場の延命や環境負荷低減の観点から，一般廃棄物の焼却残渣を溶融固化したもの（以下，ごみ溶融スラグと称す）を，資源として有効利用する傾向が高まり，建設用材料としても多く利用されつつある。しかし，その用途のほとんどは埋戻材や道路用路盤材としての利用であり，利用量拡大の目的から，コンクリート用細骨材としての利用検討が多くなされ，一部で実用化もされているものの，本格的な利用拡大にはつながっていない。これは流通の問題も一部であるが，一方でコンクリートの品質低下が懸念されていることが問題であると思われる。ごみ溶融スラグは，表面がガラス質であることから，細骨材として多量に用いた場合，コンクリートのブリーディング増加や，凝結遅延，また強度低下等，コンクリートの品質低下を引き起こすことが指摘されているためである[1)]。

そこで本研究では，ごみ溶融スラグをコンクリート用細骨材として利用した場合，その置換率がコンクリートの品質に及ぼす影響を明らかにするとともに，品質低下を抑制しうる練混ぜ方法や混和剤の添加について，それらコンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタルを用い，基礎的な検討を行った。

2. ごみ溶融スラグの置換率がコンクリートに及ぼす影響

2.1 実験概要

(1) 使用材料

使用材料を**表－1** に示す。細骨材は陸砂と砕砂を 7:3 で混合した混合砂を用い，ごみ溶融スラグを内割で置換した。

(2) コンクリートの配合

コンクリートの配合表を**表－2** に示す。コンクリートの配合は，目標スランプ 8cm，目標空気量 4.5%とし，水セメント比は，64%，57%，50%の 3 水準とした。

ごみ溶融スラグの細骨材中における質量置換

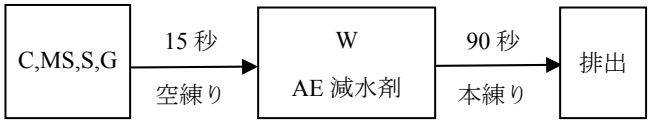
*1 東洋建設（株）　技術本部　美浦研究所　材料研究室　工修　(正会員)
*2 東洋建設（株）　技術本部　美浦研究所　材料研究室　室長　工修　(正会員)
*3 東洋建設（株）　技術本部　美浦研究所　材料研究室　主任研究員　(正会員)
*4 東海大学　工学部土木工学科教授　工博　(正会員)

表－1　使用材料

種類 (記号)	産地・仕様
セメント (C)	高炉セメント B 種 密度 3.02g/cm^3 比表面積 3880cm^2/g
細骨材 1 (S1)	茨城県鹿島産陸砂 表乾密度 2.57g/cm^3 吸水率 1.96% 粗粒率 2.32
細骨材 2 (S2)	茨城県笠間産砕砂 表乾密度 2.60g/cm^3 吸水率 1.53% 粗粒率 3.26
ごみ溶融 スラグ (MS)	表乾密度 2.81g/cm^3 吸水率 0.74% 粗粒率 2.46 交流アーク式溶融炉
粗骨材 (G)	茨城県岩瀬産砕石 表乾密度 2.65g/cm^3 吸水率 0.64% 粗粒率 6.73
AE 減水剤	リグニンスルホン酸系

表－2　コンクリートの配合表

No.	細骨材比率		F.M.	配合									混和剤
								単位量(kg/m^3)					
	MS	混合砂		W/C	s/a	Gvol	空気量	W	C	S	MS	G	AE 減水剤
	(%)	(%)		(%)	(%)	(ℓ/m^3)	(%)						(C*%)
№1-1	0	100	2.60	64	46.8	383	4.5	155	242	839	0	1015	0.25
№1-2				57	45.3	388		155	272	801	0	1028	
№1-3				50	43.8	392		155	310	762	0	1039	
№2-1	25	75	2.56	64	46.8	382		156	244	646	216	1012	
№3-1	50	50	2.53	64	46.3	384		158	247	437	438	1018	
№3-2				57	44.8	389		158	277	418	418	1031	
№3-3				50	43.3	393		158	316	396	397	1041	
№4-1	75	25	2.49	64	46.3	383		159	248	225	676	1015	
№5-1	100	0	2.46	64	45.8	386		160	250	0	913	1023	
№5-2				57	44.3	391		160	281	0	871	1036	
№5-3				50	42.8	394		160	320	0	826	1044	



図－1　練混ぜ方法

率は 0%，25%，50%，75%，100%の 5 水準とした。ただし，水セメント比が 57%，50%の配合は，ごみ溶融スラグの置換率が 0%，50%，100%の 3 水準とした。

(3) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは，強制 2 軸ミキサ（公称容量 100 リットル）を用いて練混ぜ容量 55 リットルとし，**図－1** に示すとおり行った。なお，混和剤は練混ぜ水に内割で添加した。

(4) 試験項目および方法

コンクリートの試験項目および方法を**表－3** に示す。凝結時間試験は水セメント比 64%の配合についてのみ実施した。

表－3　試験項目および方法

試験項目		試験方法
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	凝結時間	JIS A 1147
	ブリーディング	JIS A 1123
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 材齢 1 日脱型 標準水中養生 材齢：7,28,91 日

表－4　実験結果一覧表

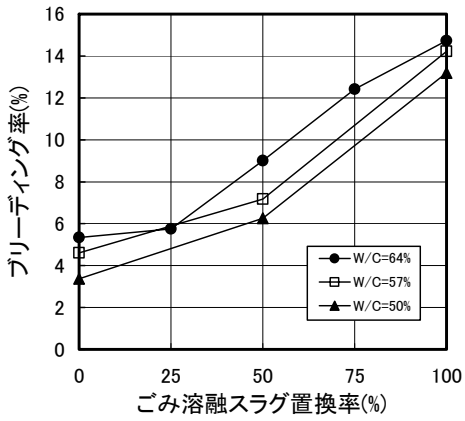
No.	W/C	MS 置換率	試験結果								
			フレッシュ性状						硬化性状		
			スランプ	空気量	ブリーディング		凝結時間(時間)		圧縮強度(N/mm^2)		
					量	率	始発時間	終結時間	材齢 7日	材齢 28日	材齢 91日
	(%)	(%)	(cm)	(%)	(cm^3/cm^2)	(%)					
№1-1	64	0	8.5	4.5	0.213	5.34	7.82	12.41	14.7	26.2	34.7
№1-2	57		9.0	3.8	0.178	4.61	—	—	18.6	33.3	41.1
№1-3	50		9.0	4.1	0.148	3.37	—	—	23.3	39.9	47.5
№2-1	64	25	8.5	4.4	0.240	5.75	8.24	11.83	12.9	24.1	35.0
№3-1	64	50	8.0	4.9	0.378	9.00	8.97	12.61	13.9	23.3	32.4
№3-2	57		9.0	4.8	0.296	7.18	—	—	16.1	28.9	41.6
№3-3	50		9.0	4.2	0.263	6.26	—	—	20.7	36.5	50.0
№4-1	64	75	9.5	4.9	0.505	12.4	9.59	12.97	11.4	20.2	29.9
№5-1	64	100	8.0	3.8	0.585	14.7	11.95	15.23	11.7	20.4	34.5
№5-2	57		8.5	5.0	0.571	14.2	—	—	16.7	29.2	42.8
№5-3	50		8.5	3.7	0.539	13.2	—	—	19.7	33.3	48.1

2.2 実験結果および考察

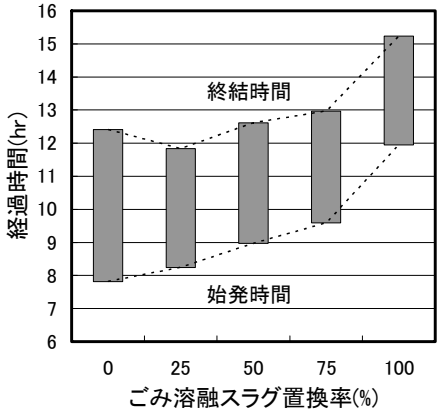
実験結果一覧表を**表－4** に示す。

(1) ブリーディング率

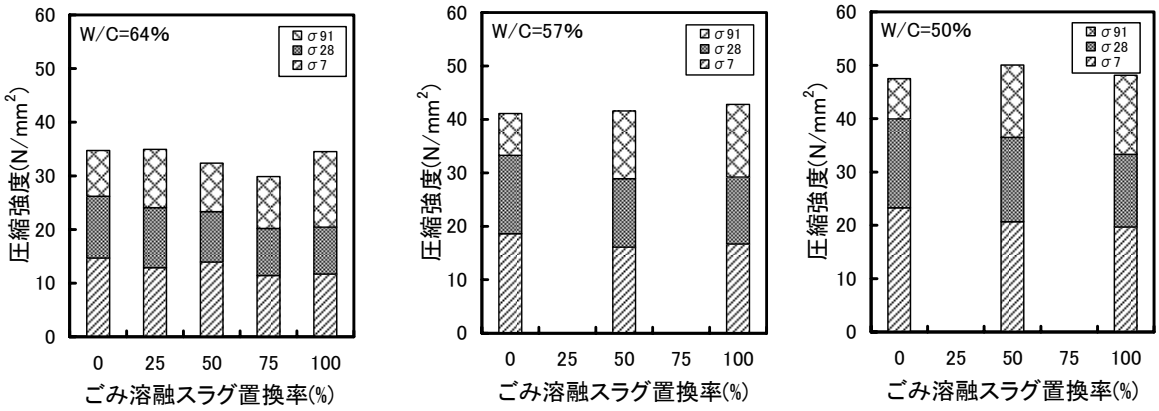
ごみ溶融スラグ置換率とブリーディング率の関係を**図－2** に示す。ブリーディング率は，水セメント比の違いにかかわらず，ごみ溶融スラグの置換率の増加に伴い大きくなる傾向を示し，特に置換率が 50%を超えると急激に増加した。これは，ごみ溶融スラグは密度が比較的大きく，また材料の表面がガラス質でペーストの保持能力が低くなることより，ごみ溶融スラグの置換率が 50%以上と高い配合では，コンクリートの材料分離が助長されたためであると考えられる。



図－2　ごみ溶融スラグ置換率と
ブリーディング率の関係



図－3　ごみ溶融スラグ置換率と
凝結時間の関係（W/C=64%）



図－4　ごみ溶融スラグ置換率と圧縮強度の関係

(2) 凝結時間

ごみ溶融スラグ置換率と凝結時間の関係を**図－3** に示す。ごみ溶融スラグの置換率の増加に伴い，始発時間の遅延が確認され，置換率が 0%のものに比べ 50%で 1 時間，100%で 4 時間，それぞれ遅くなった。これは，ごみ溶融スラグを多く置換した配合では，ブリーディング水が多くなることが主な原因であると考えられる。

(3) 圧縮強度

ごみ溶融スラグ置換率と圧縮強度の関係を**図－4** に示す。水セメント比を変化させた全ての配合において，材齢 28 日までは，ごみ溶融スラグの置換率の増加に伴い，圧縮強度は若干低下する傾向を示した。水セメント比が 64%の配合では，置換率が 0%の時に比べ，置換率が 25%，50%，75%，100%の配合の強度低下率は，それぞれ 8%，11%，23%，22%となった。その他の水セメントでも同様の傾向を示した。しかし，材齢 91 日では，ごみ溶融スラグの置換率に関わらず，圧縮強度に違いがみられなくなることより，若干，ごみ溶融スラグの潜在水硬性が寄与したと考えられる [2)]。

以上のコンクリートによる物性確認実験により，ごみ溶融スラグの 50%以上の置換では，ブリーディングの増加，および凝結遅延等の傾向があることが分かった。そこで，これらのコンクリートの品質を改善するため，次にコンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタルを用い，基礎実験を行った。

3. ごみ溶融スラグ骨材コンクリートの品質改善のための検討

基礎実験は，ブリーディングを低減し，硬化体の強度等を向上するとされる分割混練法（ダブルミキシング [3)]）を用いた検討（CASE1），およびセメントペーストの保水性を向上させ，ブ

表－5　使用材料

種類 (記号)	産地・仕様
セメント 1 (BB)	高炉セメント B 種 密度 3.04g/cm^3 比表面積3880cm^2/g
セメント 2 (N)	普通ポルトランド セメント 密度 3.16g/cm^3 比表面積3280cm^2/g
増粘剤 (MC)	低界面活性型 水溶性セルロース エーテル

表－6　モルタルの配合

CASE	練混ぜ方法	細骨材比率		配合										
						単位量(kg/m^3)							混和剤	
		MS	混合砂	W/C	W1/C	W	W1	W2	C1 (BB)	C2 (N)	S	MS	AE 減水剤	増粘剤
		(%)	(%)	(%)	(%)								(C*%)	(W*%)
CASE1	SM/DM	0	100	64	24	259	97	162	404	－	1401	0	0.25	－
		50	50			264	99	165	413		731	733		
		100	0			296	101	195	420		0	1532		
		0	100			259	100	159	－	421	1401	0		－
		50	50			264	104	160		430	731	733		
		100	0			296	104	192		436	0	1532		
CASE2	SM	0	100		－	259	－	－	404	－	1401	0		0.2
		50	50			264			413		731	733		
		100	0			296			420		0	1532		

※W＝W1+W2

リーディングを低減させるために，増粘剤を添加した配合での検討（CASE2）の 2 ケースについて実施した。

3.1 実験概要

(1) 使用材料

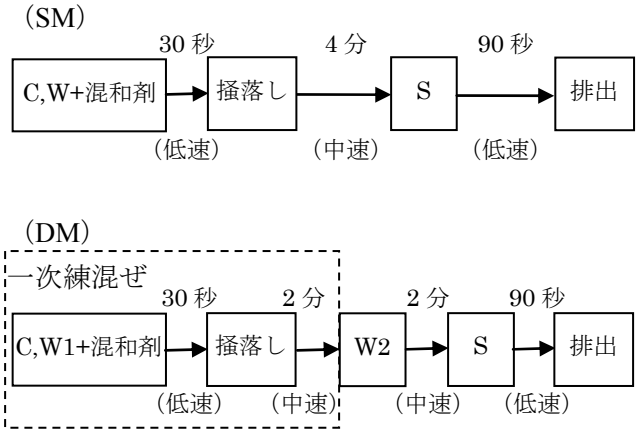
使用材料を**表－5** に示す。CASE1 では，セメントの種類による性状の違いを確認するため，高炉セメント B 種と普通ポルトランドセメントの 2 種類，CASE2 では高炉セメント B 種の 1 種類で検討した。また，CASE2 の増粘剤は，セルロース系のものを練混ぜ水に対し 0.2%を外割で添加した。他の材料については，前述したコンクリートの物性確認実験に使用したものと同様とした。

(2) モルタルの配合

モルタルの配合を**表－6** に示す。このモルタルの配合は，**表－2** のコンクリートの配合から粗骨材を除いたものとした。

水セメント比は 64%と一定とし，ごみ溶融スラグの細骨材中における質量置換率を 0%，50%，100%の 3 水準とした。また練混ぜ方法を，CASE1 は練混ぜ水を一度に加えるシングルミキシング（以下，SM と称す）と，練混ぜ水を二度に分割（一次水：W1，二次水：W2）して加えるダブルミキシング（以下，DM と称す）の 2 水準（CASE1 の SM を基本配合とする），CASE2 は SM の 1 水準で検討した。

DM において，一次練混ぜ時の攪拌トルクが最大となる W1 で算出した水セメント比，すなわち W1/C に設定することで，ブリーディングが最小となることが示されており [4]，本研究では，ミキサに電流計を取り付け，一次練混ぜ時にミキサに流れる電流が最大（攪拌トルクが最大）となった W1/C＝24%の値を用いた。



図－5　練混ぜ方法

(3) 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（公称容量 10 ﾘｯﾄﾙ）を用い，練混ぜ容量は 8 リットルとした。練混ぜ時間は，SM と DM でそれぞれの合計時間が等しくなるよう設定した。なお，混和剤は全て一次水に外割で添加した。SM と DM の詳細な練混ぜ方法を**図－5** に示す。

(4) 試験項目および方法

コンクリートの試験項目および方法を**表－7** に示す。試験項目は，モルタルフロー試験，ブリーディング試験，および圧縮強度試験とし，ブリーディング試験は「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張量試験（JSCE-F 522）」に準拠して行った。

表－7　試験項目および方法

試験項目		試験方法
フレッシュモルタル	モルタルフロー	JIS R 5201
	凝結時間	JIS A 1147
	ブリーディング	JSCE - F 522
硬化モルタル	圧縮強度	JIS A 1108 材齢 1 日脱型 標準水中養生 材齢：28 日

なお，CASE1 の配合のうち，高炉セメント B 種を SM で練り混ぜた配合と，普通ポルトランドセメントを DM で練り混ぜた配合については凝結時間試験も行った。

3.2 実験結果および考察

実験結果の一覧表を**表－8** に示す。

(1) モルタルフロー

ごみ溶融スラグ置換率とモルタルフローの関係を**図－6** に示す。高炉セメント B 種を用いた配合（CASE1-BB（SM），CASE1-BB（DM）），および普通ポルトランドセメントを用い，SM で練り混ぜた CASE1-N（SM）は，ごみ溶融スラグの置換率の変化に伴い，モルタルフローが若干変動する傾向がみられた。特にごみ溶融スラグの置換率が 100%においては，材料分離が生じてモルタルフローが大きくなり，モルタルの品質は不安定であった。一方，普通ポルトランドセメントを用い，DM で練り混ぜた CASE1-N（DM）や増粘剤を添加した CASE2 の配合では，材料分離もなく，モルタルフローは 201～219mm の範囲にあり，ごみ溶融スラグの置換率の違いによる変動はほとんどなかった。

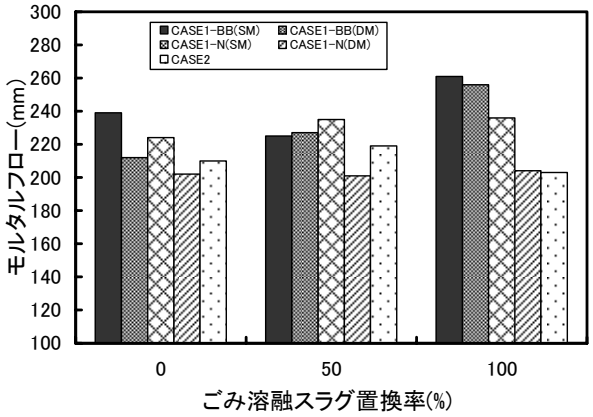
(2) ブリーディング

ごみ溶融スラグ置換率とブリーディング率の関係を**図－7** に示す。高炉セメント B 種を用いた配合（CASE1-BB（SM），CASE1-BB（DM）），および普通ポルトランドセメントを用いて SM で練り混ぜた CASE1-N（SM）は，ごみ溶融スラグの置換率の変化に伴いブリーディング率が増加し，置換率が 100%では 0%のモルタルの 5 倍程度となったのに対し，普通ポルトランドセメントを用いて DM で練り混ぜた CASE1-N（DM）や増粘剤を添加した CASE2 の配合では，ブリーディング率は小さく，100%でもそれほど増加しなかった。

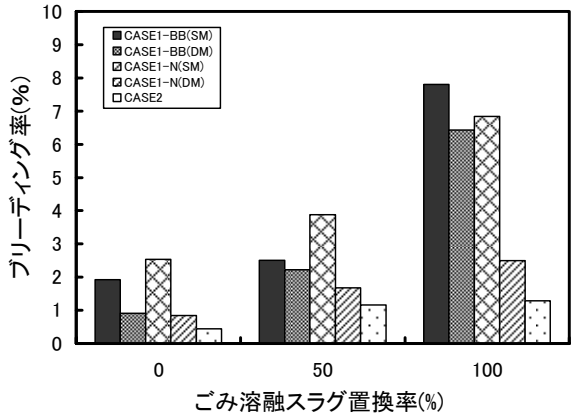
また，DM で練り混ぜたモルタルや，増粘剤を添加したモルタルにおいては，基本配合である CASE1 の SM と比較すると，ブリーディングが

表－8　実験結果一覧表

CASE	練混ぜ方法	セメント種類	W/C (%)	MS置換率 (%)	フレッシュ性状 モルタルフロー (mm)	フレッシュ性状 ブリーディング率 (%)	フレッシュ性状 凝結時間（時間） 始発時間	フレッシュ性状 凝結時間（時間） 終結時間	硬化性状 圧縮強度 (N/mm^2) 材齢28日	硬化性状 単位容積質量 (t/m^3)
CASE1	SM	BB	64	0	239	1.92	7.18	11.06	21.2	2.172
				50	225	2.51	—		21.3	2.239
				100	261	7.80	11.87	16.64	9.9	2.319
	DM			0	212	0.91	—		26.6	2.186
				50	227	2.22			22.8	2.232
				100	256	6.43			11.1	2.281
	SM	N		0	224	2.53	—		25.9	2.208
				50	235	3.88			21.6	2.210
				100	236	6.84			18.7	2.224
	DM			0	202	0.84	7.08	10.40	27.3	2.155
				50	201	1.67	—		24.0	2.123
				100	204	2.50	9.53	13.01	15.9	2.233
CASE2	SM	BB		0	210	0.44	—		20.0	2.182
				50	219	1.16			16.9	2.140
				100	203	1.28			11.7	2.191



図－6　ごみ溶融スラグ置換率とモルタルフローの関係



図－7　ごみ溶融スラグ置換率とブリーディング率の関係

低減することが分かる。普通ポルトランドセメントを用い，DM で練り混ぜたモルタルや，増粘剤を添加したモルタルではその効果が大きく，ごみ溶融スラグの置換率が 100%の場合においても，ブリーディング率は 50%程度まで低減可能であることが分かった。これは，DM によるブリーディング低減効果や，増粘剤の添加により，セメントペーストの保水性が向上し，ブリーディングの発生を抑制したためであると思われる。

(3) 凝結時間

ブリーディング率の低減効果が大きい，普通ポルトランドセメントを用いて DM で練り混ぜた CASE1-N（DM）と基本配合との，ごみ溶融スラグ置換率と凝結時間の関係を**図－8** に示す。この図より，CASE1-N（DM）の配合では，基本配合に対し，始発で 2 時間，終結で 3 時間程度早まり，遅延の抑制が可能であると判断できる。

(4) 圧縮強度

ごみ溶融スラグ置換率と圧縮強度の関係を**図－9** に示す。増粘剤を添加した CASE2 に関しては，ごみ溶融スラグの置換率が 50%のときに若干強度低下がみられたが，基本配合とほぼ同等の値を示した。また，置換率が 50%までの範囲内であれば, DM により強度が若干大きくなる傾向がみられたが，圧縮強度に対する DM 効果の優位性は明らかではなかった。

4. まとめ

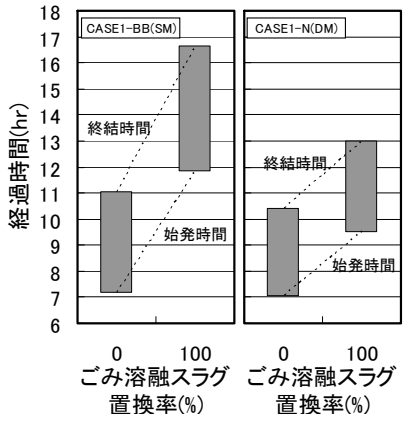
本研究の範囲で，以下の結論が得られた。

(1) ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートは, ごみ溶融スラグの置換率が 50%を超えると, ブリーディングが急激に増加し，凝結時間が大幅に遅延する。

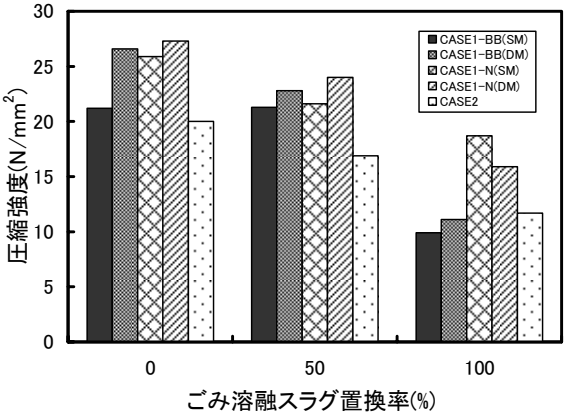
(2) ごみ溶融スラグの置換率の増加に伴う, モルタルのブリーディングの増加や凝結遅延は，DM で練り混ぜることで抑制可能である。

(3) 増粘剤の添加による強度増加は期待できないが, ブリーディング低減措置としては効果的である。

今後，上記のモルタルの品質改善策を，ごみ溶融スラグの置換率の高いコンクリートへ適用し，さらにごみ溶融スラグの有効利用量を向上させるとともに，そのコンクリートの用途開発をはかってゆきたい。



図－8　ごみ溶融スラグ置換率と凝結時間の関係



図－9　ごみ溶融スラグ置換率と圧縮強度の関係

参考文献

1) 斉藤丈士・池永博威・根本明：ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集第 584 号，2004.10

2) 北辻政文・遠藤孝夫：ごみ溶融スラグ微粉末の混和材としての利用，土木学会第 56 回年次学術講演回第 5 部，pp.252-253，2001.10

3) 田澤栄一・笠井哲郎ほか：ダブルミキシングで製造したコンクリートの圧縮強度，土木学会論文集，No.402/V-10，pp.43-51，1989.

4) 田澤栄一・笠井哲郎：フレッシュセメントペーストのダブルミキシング効果，土木学会論文集，No.396/V-9，pp.134-142，1988.