

論文 ごみ溶融スラグの混合率向上に関する実験的検討

竹中 寛^{*1}・磯貝 寛幸^{*2}・笠井 哲郎^{*3}

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、ブリーディング増加や凝結遅延等の品質低下が問題となる。本研究では、ごみ溶融スラグの多量混合の際に生じる品質低下の抑制手法について実験的検討を行い、練混ぜ方法にダブルミキシングを適用することや、増粘剤、石炭灰等の混和材を添加することで抑制できることを明らかにした。また、使用範囲の拡大を指向して、粘性を付与させた水中不分離性コンクリートへの適用検討を行った結果、多量混合した場合においても、天然骨材と同等以上の品質を有することがわかった。

キーワード：ごみ溶融スラグ、ダブルミキシング、石炭灰、増粘剤、水中不分離性コンクリート

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17年度には約5,273万t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）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が、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る。そこで利用量拡大の目的から、コンクリート用骨材としての利用についても多くの検討が行われ、2006年度にはコンクリート用溶融スラグ骨材としてJIS公布されたものの、利用にあたっては混合率の規制等の課題も多く、本格的な利用拡大にはつながっていないのが現状である。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。すなわち、ごみ溶融スラグは、表面がガラス質であることから、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。

そこで本研究では、ごみ溶融スラグの混合率が高い配合におけるコンクリートの品質低下を抑制しうる手法として、練混ぜ方法や増粘剤、石炭灰等の混和材料の添加、再生骨材との併用による効果について検討を行った。また、ごみ溶融スラグ使用範囲の拡大を指向して、粘性を付与させた水中不分離性コンクリート用骨材へ適用し、ごみ溶融スラグの高混合配合における使用の可否について実験的検討を行った。

2. コンクリートの品質改善手法に関する検討

2.1 実験概要

本研究は、コンクリートの品質改善手法を見出すことを目的とし、加地らの研究¹⁾において、品質低減効果が期待されている石炭灰をごみ溶融スラグと事前に混合させて使用する手法の検討(CASE 1)、増粘剤を添加した場合の検討(CASE 2)、および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練混法（ダブルミキシング(以下、DM)²⁾）を用いた検討(CASE 3)の3ケースを実施した。

(1)使用材料

CASE 3では、セメントの種類によるダブルミキシングの効果を確認するため、高炉セメントB種(記号:BB, 密度3.04g/cm³)、普通ポルトランドセメント(記号:N 密度3.16g/cm³)の2種類、CASE 1および2ではBBの1種類で検討した。細骨材は鹿島産陸砂(表乾密度2.54g/cm³, 吸水率1.27%)と笠間産砕砂(表乾密度2.57g/cm³, 吸水率2.50%)を7:3の割合で混合した混合砂(記号:S)、および交流アーク式溶融炉で製造したごみ溶融スラグ(記号:MS, 区分A, 表乾密度2.73g/cm³, 吸水率1.12%, 粒形判定実積率66.1%, 微粒分量3.5%, FM2.66)を用い、粗骨材は岩瀬産砕石(記号:G, 表乾密度2.66g/cm³, 吸水率0.62%)を用いた。混和剤はリグニンスルホン酸系のAE減水剤(記号:AE)を練混ぜ水に内割で添加した。また、CASE 1の石炭灰(記号:FA, 密度2.18g/cm³, 強熱減量4.30%, MB吸着量0.57mg/g)はJIS規定のⅡ種灰に近い品質を有するJIS外品を用い、全細骨材に対して容積比で13%を内割で置換した。CASE 2の増粘剤(記号:VA)は低界面活性型水溶性セルロースエーテル系のものを用い、練混ぜ水に対して0.2%を外割で添加した。

*1 東洋建設(株) 技術本部 美浦研究所 工修(正会員)

*2 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*3 東海大学 工学部土木工学科教授 工博(正会員)

表-1 コンクリートの配合

CASE	配合	W/C (%)	W1/C (%)	s/a (%)	MS (Vol%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤		実測値	
							W	C	S	MS	FA	G	VA (w×wt%)	AE (c×wt%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
—	A	MS0-BB-SM	—	—	0	—	—	—	780	0	0	1043	0	—	9.5	3.1
—	B	MS100-BB-SM	—	—	—	—	—	—	—	835	0	1043	0	—	9.5	3.8
—	C	MS100-N-SM	—	—	—	—	—	—	—	838	0	1048	0	—	11.0	3.5
CASE1	D	MS100-BB-SM-FA	—	43.8	100	4.5	155	310	0	726	89	1043	0	0.2	11.5	3.0
CASE2	E	MS100-BB-SM-VA	—	—	—	—	—	—	—	835	0	1043	0.25	—	11.0	3.2
CASE3	F	MS100-BB-DM	24	—	—	—	155	—	—	835	0	1043	0	—	7.0	3.9
	G	MS100-N-DM					(74) [*]			838	0	1048	0		6.0	3.2

※():W1

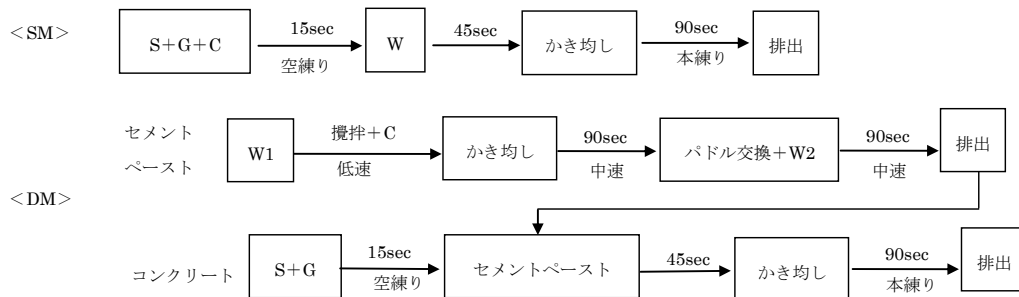


図-1 コンクリートの練混ぜ方法

(2)コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は50%で一定とし、スラグ混合率を0%，100%の2水準とした。また練混ぜ方法は、CASE3 で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 DM の2水準，CASE 2，3 は SM の1水準とした。なお DM における一次水セメント比（W1/C）は、一次練混ぜ時の攪拌トルクが最大となる値とした。田澤ら³⁾によると、この W1/C で練り混ぜ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、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。

(3)練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を図-1 に示す。コンクリートの練混ぜはパン型ミキサ（公称容量 55ℓ）を用いて練混ぜ容量を 40ℓで行った。CASE 1 では、ごみ溶融スラグに石炭灰を塗す目的で、練混ぜ直前にごみ溶融スラグと石炭灰のみで空練りを行った後、他の材料を投入して練混ぜを行った。また CASE 3 の DM は、ホバート型モルタルミキサ（公称容量 10ℓ）を用い、練混ぜ容量を 8ℓで先行してセメントペーストを練り混ぜ、その後セメントペーストを上記パン型ミキサに投入して骨材と混合し、コンクリートを製造した。なお、混和剤は全て W1 に内割で置換した。

表-2 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	ブリーディング率	JIS A 1123
	凝結時間	JIS A 1147
硬化コンクリート	骨材界面観察	EPMA による
	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
	促進中性化深さ	JIS A 1153
	長さ変化率	JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) 材齢 7 日まで 標準水中養生 材齢 7 日から乾燥開始 (20℃, 60%RH 環境)

(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-2 に示す。促進中性化試験についてはセメント BB の配合のみ実施した。

2.2 実験結果および考察

(1)ブリーディング率

各配合におけるブリーディング率を図-2 に示す。セメント BB において、普通コンクリートに比べ、細骨材にごみ溶融スラグを用い、SM で練り混ぜたコンクリートのブリーディング率は約 6 倍と大幅に増加するのに対し、練混ぜ方法に DM を適用した場合や、石炭灰および増粘剤を添加した場合は、ブリーディング率の増加が

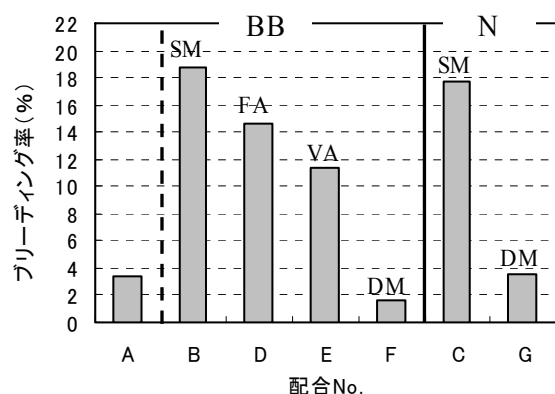


図-2 フリーディング率

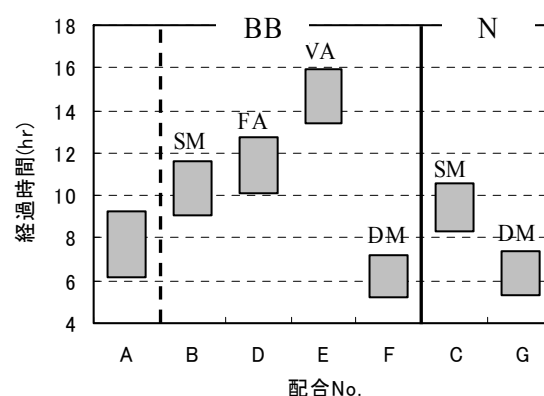


図-3 凝結時間

抑制された。特に DM で練り混ぜた場合での効果は顕著であり、SM で練り混ぜた場合の 10%程度まで減少した。これは、DM によりセメント粒子が保水性の高い凝集構造を形成し、間隙水を凝集構造内部に拘束し、コンクリートのフリーディングが低減したことが要因であると推察される。なお、DM で練り混ぜた場合は、表-1 に示すとおり若干スランプも小さくなった。また、DM による効果についてはセメント N の場合も同様の傾向を示した。

(2)凝結時間

各配合における凝結時間を図-3 に示す。セメント BB において、普通コンクリートに比べ、細骨材にごみ溶解スラグを用い、SM で練り混ぜたコンクリートの凝結時間は始発で約 3 時間、終結で約 2 時間遅延しているが、DM を適用した場合は、凝結時間の遅延は生じなかった。これに関し中川ら⁴⁾によると、DM によりセメントの初期水化和が促進されることが指摘されており、この促進効果により凝結時間が短縮されたものと推察される。なお、DM による効果についてはセメント N の場合も同様の傾向を示した。一方、石炭灰および増粘剤を添加した場合については凝結時間が更に遅延する傾向を示し、特に増粘剤を添加したことによる影響が大きく現われた。

(3)骨材界面観察

配合 A, B, および F の粗骨材および細骨材界面の電子線マイクロアナライザ (EPMA) による観察像を写真-1 に示す。配合 A の普通コンクリートでは、細骨材、粗骨材共に骨材下面に若干の遷移帯が確認される程度であるのに対し、細骨材にごみ溶解スラグを用い、SM で練り混ぜた配合 B においては、粗骨材下面に空隙が生じていることがわかる。これは、フリーディングが多量に生じたため、その水道が空隙となって残存したためであると考えられる。一方、練混ぜ方法に DM を適用した配合 F については遷移帯も殆んど確認されず、非常に緻密な組織が形成されており、骨材とセメントペーストの付着は良好であると想定される。配合 B, F の細骨材と

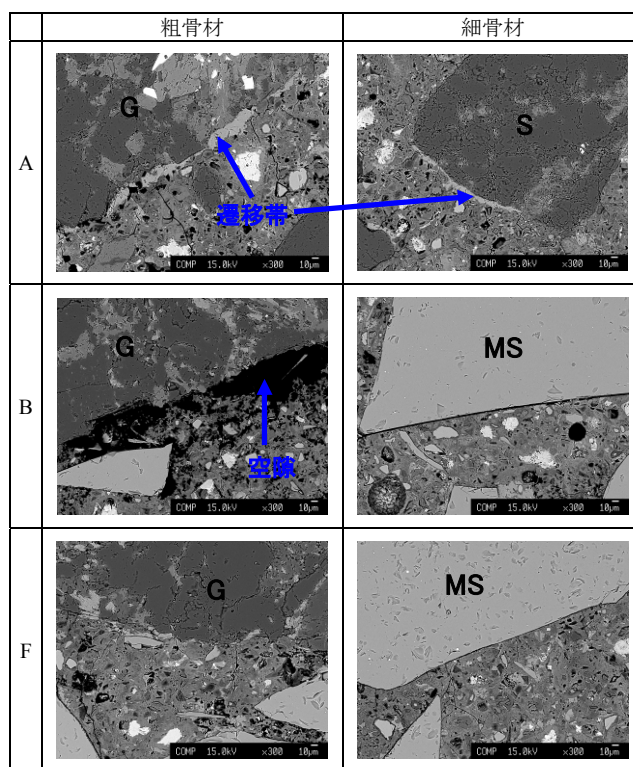


写真-1 骨材界面観察像

して用いたごみ溶解スラグの界面には、天然骨材に比べて遷移帯や空隙等の脆弱部が形成されていないが、これは骨材表面がガラス質であり水の保水性に劣るため、余剰水が残留しないことが起因していると考えられる。

(4)圧縮強度

各配合における圧縮強度を図-4 に示す。セメント BB において、普通コンクリートに比べ、細骨材にごみ溶解スラグを用い、SM で練り混ぜたコンクリートは 25%程度の強度低下が生じるのに対し、練混ぜ方法に DM を適用した場合、石炭灰および増粘剤を添加した場合、強度低下が抑制された。これは、前述したとおりフリーディングが低減されたことにより、粗骨材下面の遷移帯や空隙の形成量が少なくなったためであると推察される。また、セメント N でも DM により若干の強度増加が見られた。

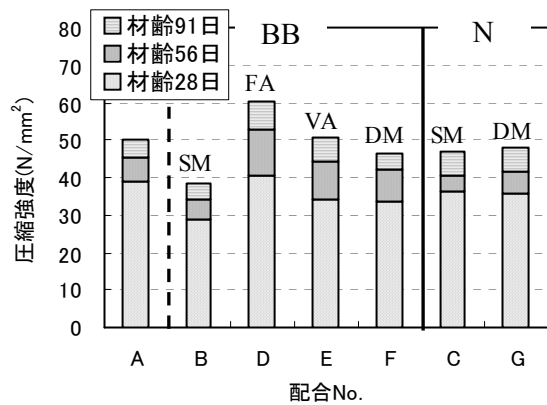


図-4 圧縮強度

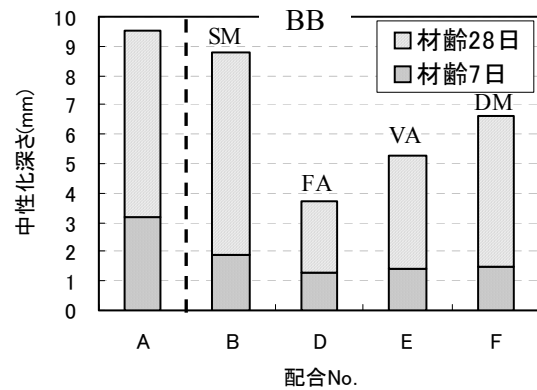


図-5 促進中性化深さ

(5)促進中性化深さ

各配合における促進中性化深さを図-5に示す。普通コンクリートに比べ、細骨材にごみ溶融スラグを用い、SMで練り混ぜたコンクリートの中性化深さは、若干小さくなる傾向を示した。これは細骨材として用いたごみ溶融スラグの界面付近においてセメントペーストの組織が緻密化し、コンクリートの中性化を抑制したことが一要因であると推察される。また、練混ぜ方法にDMを適用した場合や、石炭灰および増粘剤を添加した場合には、更に中性化が抑制された。

(6)長さ変化率

各配合における長さ変化率を図-6に示す。普通コンクリートの配合Aに対し、細骨材にごみ溶融スラグを用い、SMで練り混ぜた配合B、Cの長さ変化率には殆んど差違がみられなかったが、DMでの練混ぜやFAおよび増粘剤の添加によりブリーディングが低減した配合については小さくなる傾向を示した。また、セメントNに比べBBの長さ変化率の方が小さくなる傾向となった。

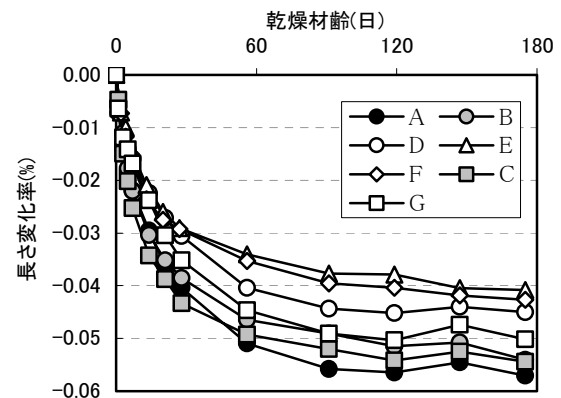


図-6 長さ変化率

では、ポリカルボン酸系の分散剤(A剤(記号:VQ-A)), 粘性付与剤(B剤(記号:VQ-B)), ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(記号:SP)の混和剤を使用し、CASE 5では、水溶性セルロースエーテル系水中不分離性混和剤(記号:AUA), 高縮合トリアジン系助剤(記号:SA), リグニンスルホン酸系AE減水剤(記号:AE)の混和剤を使用した。

2)モルタルの配合

モルタルの配合は表-3に示す配合から粗骨材を除いたものとし、水セメント比はCASE 4では35%, 45%, 55%の3水準、CASE 5では55%の1水準、スラグ混合率はCASE 4, 5ともに0%, 50%, 100%の3水準で検討を行った。混和剤の添加量はケース毎で一定とした。

3)練混ぜ方法

モルタルの練混ぜ方法を図-7に示す。モルタルの練混ぜはホバート型のモルタルミキサ(公称容量100)を用い、練混ぜ容量を70で行った。混和剤は全て練混ぜ水に内割で添加し、CASE 4のVQ-Bのみ後添加とした。

4)試験項目および方法

モルタルの試験項目および方法を表-4に示す。

(2)実験結果および考察

1)モルタルフロー

各配合におけるモルタルフローを図-8に示す。

3.水中不分離性コンクリートへの適用検討

3.1 モルタルレベルでの基礎的検討

(1)実験概要

前述したとおり、コンクリートの品質低下を抑制させる一手法として、増粘剤を添加することにより、ごみ溶融スラグの混合率を大幅に向上することが明らかとなった。そこで本章では、更なる利用範囲の拡大を指向し、ごみ溶融スラグ細骨材の水中不分離性コンクリート用骨材としての高混合利用の可否について、モルタルを用いた基礎的検討を行った。検討ケースとしては2液タイプの液体系の特殊増粘剤を用いた検討(CASE 4)、および分体系の水中不分離性混和剤を用いた検討(CASE 5)の2ケースについて実施した。

1)使用材料

セメントはBBの1水準とし、細骨材は2.で使用した3種類(S1, S2, MS)と同様のものを使用した。CASE 4

表-3 モルタル（コンクリート）の配合

CASE	配合	W/C (%)	空 気 量 (%)	MS (Vol%)	单 位 量(kg/m ³)					混 和 剂				
					W	C	MS	S	(G)	VQ (W×%)	SP (C×%)	AUA (W×%)	SA (C×%)	AE (C×%)
CASE4	A V35-0	35	4.5	0	195	557	0	665	838	4.0	0.9	—	—	—
	B V35-50			50			358	331						
	C V35-100			100			713	0						
	D V45-0	45		0		0	770							
	E V45-50			50		412	385							
	F V45-100			100		824	0							
	G V55-0	55		0		0	836							
	H V55-50			50		355	448	418						
	I V55-100			100		895	0							
CASE5	J A55-0	55	4.0	0	220	400	0	665	931	—	—	2.5	8.0	0.9
	K A55-50			50			352	331						
	L A55-100			100			704	0						

※モルタルの配合は(G)を除いたものとする

図より経過時間に伴うモルタルフローの変化傾向に差異は殆どみられなかったが、スラグ混合率が高いほど、若干ではあるが値が大きくなる傾向を示した。これは、ごみ熔融スラグを混合することによるモルタルの密度増加が一要因であると推察される。

2)懸濁物質量

各配合における懸濁物質量を図-9 に示す。懸濁物質量は全ての配合で概ね 50mg/l以下となり、ごみ熔融スラグの混合率による影響は殆んど確認されなかった。

3)圧縮強度

各配合における圧縮強度を図-10 に示す。スラグ混合率の増加により強度低下が見られるが、水中気中強度比は全ての配合で概ね 80%以上と高く、ごみ熔融スラグを高混合した場合でも、水中における材料分離抵抗性に影響を及ぼさないといえる。

3.2 コンクリートによる流動性

試験

(1)実験概要

モルタルによる基礎検討において、ごみ熔融スラグを用いた場合、骨材の密度が流動性に影響を及ぼすことが示唆されたため、表-3 に示す配合 (W/C=35% (A, C), W/C=55% (G, I)) について流動性試験を行った。使用材料は 3.1 に示す材料に 2.1 の粗骨材を加えたものとする。練混ぜは図-7 に示す練混ぜ方法に準拠し、強制二軸ミキサ（公称容量 500）を用い、練混ぜ容量を 40lで行った。コンクリートのスランプフローは 600mm±50mm、空気量は 4.5±1.5%とした。コンクリートの試験項目および方法を表-5 に示す。

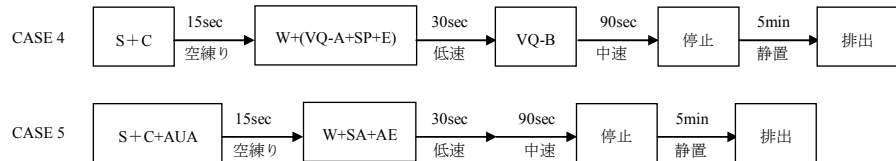


図-7 モルタルの練混ぜ方法

表-4 試験項目および方法

試験項目および方法		
フレッシュモルタル	モルタルフロー	JIS R 5201(0 打)
	水中分離度(懸濁物質量)	水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)付属書 2 に準拠
硬化モルタル	圧縮強度	φ50×100mm 100mm 水中落下 (水中供試体作製) JIS A 1108(圧縮強度) 材齢 7, 28 日 (水中養生)

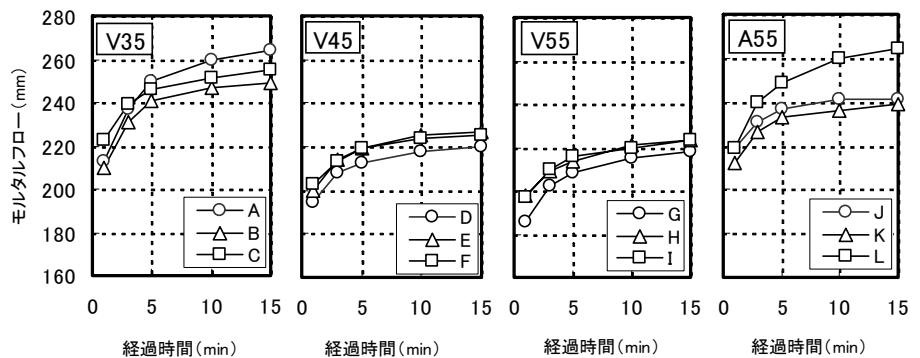


図-8 モルタルフローの経時変化

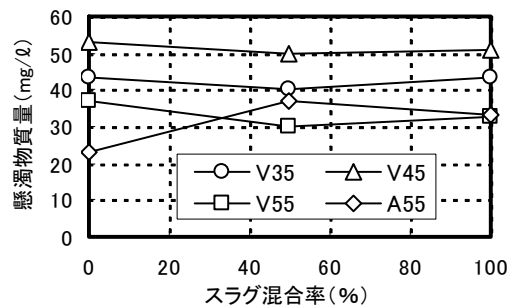


図-9 スラグ混合率と懸濁物質量の関係

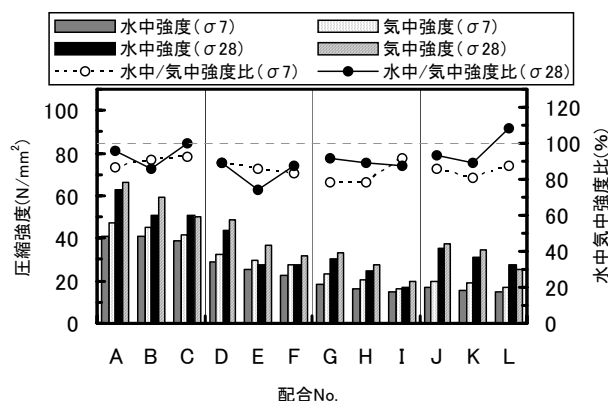


図-10 圧縮強度および水中気中強度比

表-5 試験項目および方法

試験項目および方法		試験配合
U形充填試験	JSCE-F511 (流動障害：R2)	配合 A, C, G, I
水中流動試験	図-11 参照	配合 G, I

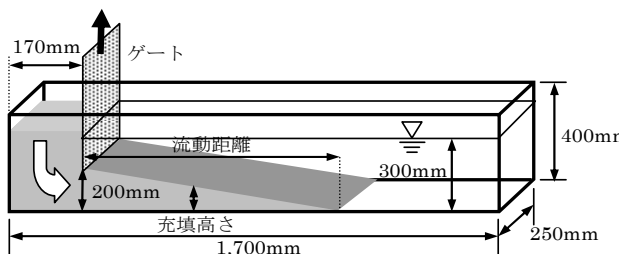


図-11 水中流動試験機

(2)実験結果および考察

U形充填高さの経時変化を図-12に示す。ごみ溶解スラグを100%混合したコンクリートの充填性は、水セメント比が35%の場合は天然骨材と比べ、骨材の違いによる充填高さおよび速度は殆んど同じ傾向を示したのに対し、55%の場合は天然骨材と比べ、充填高さおよび速度が大きくなった。水セメント比が35%の場合は単位セメント量が多く、粉体による粘性付与効果が顕著となり、骨材の違いによる差違が小さかったものと考えられる。

水中流動距離と高さの関係を図-13に示す。水中における流動性に関しても、ごみ溶解スラグを100%混合したコンクリートは天然骨材を用いたものに比べて同等以上に優れ、高いセルフレベリング性を有することがわかった。

4.まとめ

本研究の範囲では、以下の結論が得られた。

- (1) ごみ溶解スラグ混合率の増加に伴うコンクリート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。
- (2) 石炭灰や増粘剤を添加することにより、ごみ溶解スラグ混合率の増加に伴うコンクリートのブリーデ

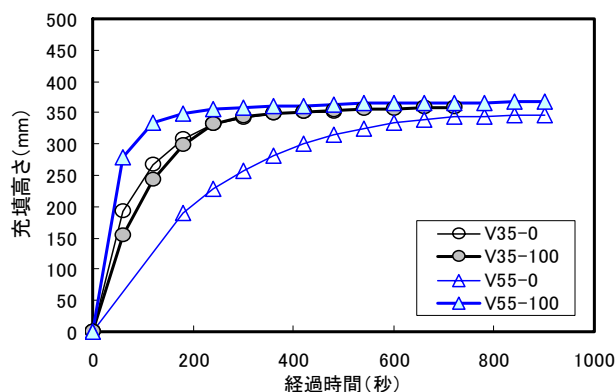


図-12 U形充填高さの経時変化

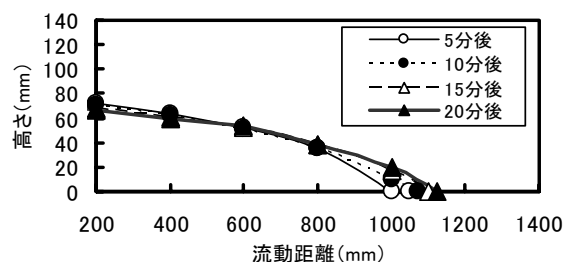
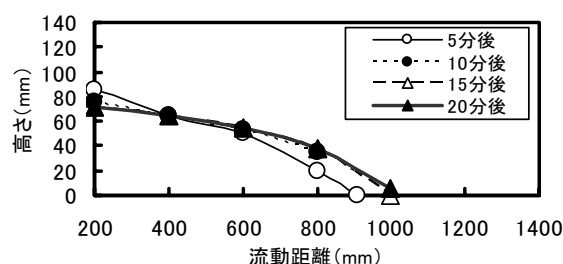


図-13 水中流動距離と高さの関係

イングの増加を抑制することが可能である。

- (3) 水中不分離性コンクリート用骨材として、ごみ溶解スラグを高混合率で用いた場合、水中不分離性、自己充填性、およびセルフレベリング性は天然骨材と同等以上の性能を有する。

参考文献：

- 1) 加地貴ほか：産業廃棄物溶解スラグを細骨材として使用したコンクリートへのフライアッシュの利用，土木学会第59回年次学術講演会第5部，pp.383-384(2004)
- 2) 田澤栄一ほか：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.408/V-11，pp.139-146(1989)
- 3) 田澤栄一ほか：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)
- 4) 中川好正ほか：ダブルミキシングがセメントの初期水和反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.51-56(2007)