論文　溶融スラグのコンクリート用材料としての有効利用に関する研究

高田　聡恵[*1]・糸山　豊[*2]・上原　匠[*3]・梅原　秀哲[*4]

要旨：溶融スラグを骨材の一部と置換したコンクリートの基本的な物性を把握することを目的に，愛知県内のごみ焼却施設から排出された異なる７種類の溶融スラグを対象に，置換率，水セメント比を変化させて実験を行った。また，溶融スラグの使用時の状態（乾燥・湿潤状態）による影響を比較するとともに，数種類の溶融スラグを混合して用いた配合に対しても実験を実施し，骨材としての有効利用に関する知見を得た。

キーワード：溶融スラグ，膨張，スラグ置換率，水セメント比，金属アルミニウム

1.　はじめに

溶融スラグ（以下，スラグと記述）とは，各家庭からの生活廃棄物や企業からの事業系廃棄物を，間接または直接 1200℃以上の高温の下，溶融炉で溶融処理した残渣である[1)]。平成 14 年 7 月の溶融スラグの TR A0016 の公表[2)]を受け，コンクリート用骨材としての一層の利用が期待されている。しかし，一部のスラグでは膨張する性状も確認される[3)]など，多種多様なスラグを対象に，スラグを混入したコンクリートについての膨張性を含む物性を把握し，コンクリート用骨材としての適用性を検討することが必要である。

そこで本研究では，異なる７種類のスラグを用いて置換率，水セメント比を変化させ，膨張量試験を含めた物性試験を行うとともに，スラグを事前に絶乾状態及び湿潤状態とし，保管状態の違いによる影響についても検討を行った。

更に，有効利用の観点から，数種類のスラグを混合して用いた配合に対しても，フレッシュ及び硬化後の物性について実験を基に検討した。

2.　使用材料

本研究で用いたスラグの物性値を**表－１**に示す。いずれも愛知県内のごみ焼却施設で排出されたものであり，一部のスラグは TR の適用範囲[2)]を外れているが，今回の実験では搬入時の状態での有効利用を想定し，粒度調整等の事前処理は行わなかった。なお，重金属についてはいずれのスラグも環境庁告示 46 号の溶出基準を満たしている。

他の使用材料は，水道水，普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm^3），豊田産山砂（表乾密度 2.57g/cm^3，吸水率 1.55%，微粒分量 1.40%，

表－１　使用したスラグ

スラグ	溶融方式区分	炉の形式	粒径	密度 (g/cm^3)	粗粒率 (%)	吸水率 (%)
A	直接溶融炉	内部溶融方式	5mm以下 92%，5mm以上 8%	2.16	3.83	7.88
B	灰溶融炉	コークスベッド式溶融炉	5mm以下 99%，5mm以上 1%	2.68	3.76	0.63
C	直接溶融炉	コークスベッド式溶融炉	5mm以下100%，5mm以上0%	2.84	2.77	1.01
D	灰溶融炉	プラズマ式溶融炉	5mm以下 98%，5mm以上 2%	2.83	3.61	0.94
E	灰溶融炉	電気抵抗式溶融炉	5mm以下60%，5mm以上40%	2.70	5.16	0.52
F	灰溶融炉	交流電気抵抗式灰溶融炉	5mm以下100%，5mm以上0%	2.78	2.54	0.34
G	熱分解ガス化溶融炉	熱分解高温燃焼溶融炉	5mm以下100%，5mm以上0%	2.83	2.30	0.23

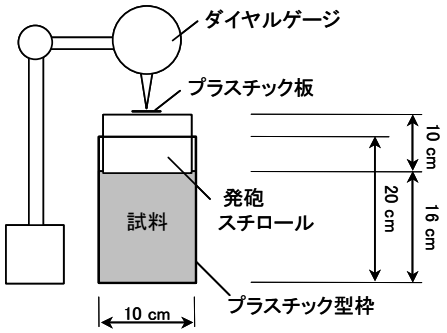
※1 名古屋工業大学大学院　工学研究科都市循環システム工学専攻（正会員）
※2 名古屋工業大学大学院　工学研究科社会工学専攻助手 修(工)（正会員）
※3 名古屋工業大学大学院　工学研究科社会工学専攻助教授 工博（正会員）
※4 名古屋工業大学大学院　工学研究科都市循環システム工学専攻教授 Ph.D.（正会員）

F.M=2.67），瀬戸産砕石（硬質砂岩，表乾密度 2.73g/cm^3，吸水率 0.38%，微粒分量 1.28%，G_{max}=20mm，F.M=6.65）である。混和剤には高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）と AE 助剤を使用した。

3. スラグを混入したコンクリートの物性

3.1 実験概要

対象にした７種類のスラグについて，それぞれを骨材と容積置換してコンクリートに混入し，膨張量試験を含む物性試験を行った。試験項目は，スランプ試験（JIS A 1101-1998），空気量試験（JIS A 1118-1997），ブリーディング試験（JIS A 1123-1997），圧縮強度試験（JIS A 1108-1999），割裂引張強度試験（JIS A 1113-1999），静弾性係数試験（JSCE-G 502-1999），膨張量試験（**図－１**）である。



図－１　膨張量試験方法

図－１に膨張量試験の方法を示す。この試験は，φ10×20cm の市販されているプラスチック型枠に高さ 16 cm 程度まで試料を充填し，上部にφ10×10cm の発泡スチロール製フロートを載せ，フロートの上下移動量をダイヤルゲージによって計測することで，直接フレッシュコンクリートの膨張を確認するものである。[3)]

3.2 配合および結果・考察

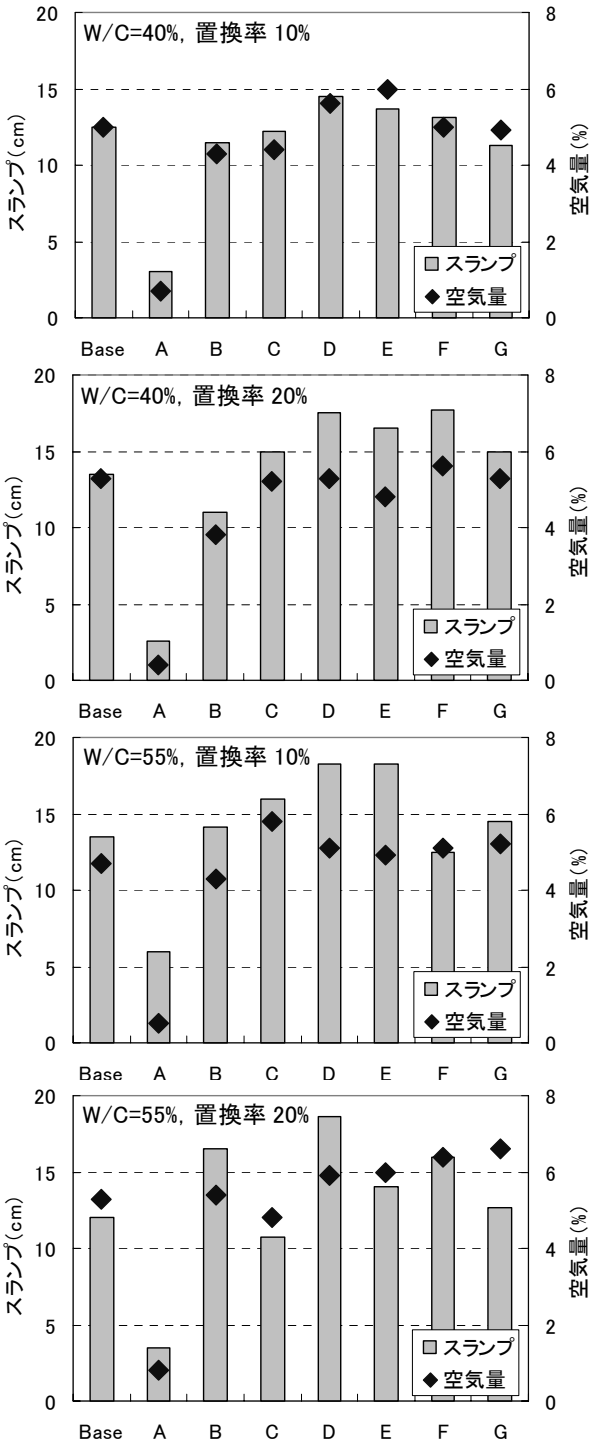
表－２　実験配合

種類	シリーズ	W/C	スラグ置換率(%)	単位量(kg/m^3)					混和剤(%)	
				W	C	S	G	Sg	SP	AE
Base	Base-40	40		170	438	689	1018		C×0.4	C×0.004
									C×0.3	C×0.0025
	Base-55	55			309	791	1035		C×0.27	C×0.0025
									C×0.4	C×0.004
A	A-40-10	40	10		438	537	1004	138	C×0.4	C×0.004
	A-40-20		20			386	990	277	C×0.3	C×0.0025
	A-55-10	55	10		309	629	1020	148	C×0.27	C×0.0025
	A-55-20		20			466	1005	297	C×0.4	C×0.004
B	B-40-10	40	10		438	526	1017	172	C×0.4	C×0.004
	B-40-20		20			363	1015	344	C×0.3	C×0.0025
	B-55-10	55	10		309	616	1033	184	C×0.27	C×0.0025
	B-55-20		20			441	1031	368	C×0.4	C×0.004
C	C-40-10	40	10		438	524	1018	182	C×0.4	C×0.004
	C-40-20		20			359		364	C×0.3	C×0.0025
	C-55-10	55	10		309	614	1035	195	C×0.27	C×0.0025
	C-55-20		20			438		390	C×0.4	C×0.004
D	D-40-10	40	10		438	527	1015	181	C×0.4	C×0.004
	D-40-20		20			366	1011	363	C×0.3	C×0.0025
	D-55-10	55	10		309	618	1031	194	C×0.27	C×0.0025
	D-55-20		20			445	1027	389	C×0.4	C×0.004
E	E-40-10	40	10		438	590	948	173	C×0.4	C×0.004
	E-40-20		20			491	878	346	C×0.3	C×0.0025
	E-55-10	55	10		309	685	960	185	C×0.27	C×0.0025
	E-55-20		20			579	885	371	C×0.4	C×0.004
F	F-40-10	40	10		438	524	1018	178	C×0.4	C×0.004
	F-40-20		20			359		356	C×0.3	C×0.0025
	F-55-10	55	10		309	614	1035	191	C×0.27	C×0.0025
	F-55-20		20			438		382	C×0.4	C×0.004
G	G-40-10	40	10		438	524	1018	181	C×0.4	C×0.004
	G-40-20		20			359		363	C×0.3	C×0.0025
	G-55-10	55	10		309	614	1035	194	C×0.27	C×0.0025
	G-55-20		20			438		389	C×0.4	C×0.004

配合を**表－２**に示す。水セメント比は40%と55%の２水準，スラグ置換率は10%と20%の２水準設定した。骨材との置換量は，各スラグを5mmを境に２種類に分けて考え，それぞれを粗骨材と細骨材とに置換することとし，総量が骨材容積に対して10%，20%となるように配合を算定した。今回の実験では，有効利用の観点から，実現され得る配合として置換率を20%以下と設定した。練混ぜは水セメント比，置換率一定の下で行い，混和剤の使用量はその都度Baseでの適正値とした。Base の目標スランプは12±2.5cm，目標空気量は4.5±1.5%に設定し，スラグを混入したシリーズにおいては，許容範囲を外れても調整は行わなかった。

表－３にフレッシュ時の試験結果を示す。ブリーディング試験において，スラグAのブリーディング率は水セメント比40%，スラグ置換率20%の配合を除き，他と比べて低い値を示した。これはスラグAの吸水率が他のスラグに比べ高いためと考えられる。また，Aを除くいずれのスラグを混入した場合も水セメント比40%の下ではBaseとほぼ同じブリーディング率を示し，置換率の影響は見られなかった。水セメント比55%の下では置換率の増加に伴い現象に差が見られたが，データ数が少なく，各シリーズでの有意な傾向は確認出来なかった。

図－２にスランプおよび空気量試験結果を示す。スラグAは他のシリーズに比べ，水セメント比及びスラグ置換率に関係なく，スランプ，空気量共に著しく低い値となった。これはスラグAの吸水率が他のスラグと比較して高いため



図－２　スランプおよび空気量試験結果

表－３　フレッシュ試験結果

種類	W/C40% 置換率10%			W/C40% 置換率20%			W/C55% 置換率10%			W/C55% 置換率20%		
	Sl(cm)	Air(%)	Br(%)	Sl(cm)	Air(%)	Br(%)	Sl(cm)	Air(%)	Br(%)	Sl(cm)	Air(%)	Br(%)
Base	12.5	5.0	1.2	13.5	5.3	1.2	13.5	4.7	3.4	12.0	5.3	2.8
A	3.0	0.7	0.4	2.6	0.4	1.1	6.0	0.5	2.1	3.5	0.8	1.2
B	11.5	4.3	1.1	11.0	3.8	0.7	14.1	4.3	3.2	16.5	5.4	3.9
C	12.2	4.4	1.0	15.0	5.2	1.1	16.0	5.8	3.6	10.7	4.8	6.7
D	14.5	5.6	1.4	17.5	5.3	0.9	18.3	5.1	4.5	18.6	5.9	5.3
E	13.7	6.0	1.1	16.5	4.8	1.1	18.3	4.9	5.1	14.0	6.0	3.8
F	13.1	5.0	1.0	17.7	5.6	1.2	12.5	5.1	3.5	16.0	6.4	3.3
G	11.3	4.9	1.0	15.0	5.3	1.1	14.5	5.2	3.1	12.7	6.6	3.5

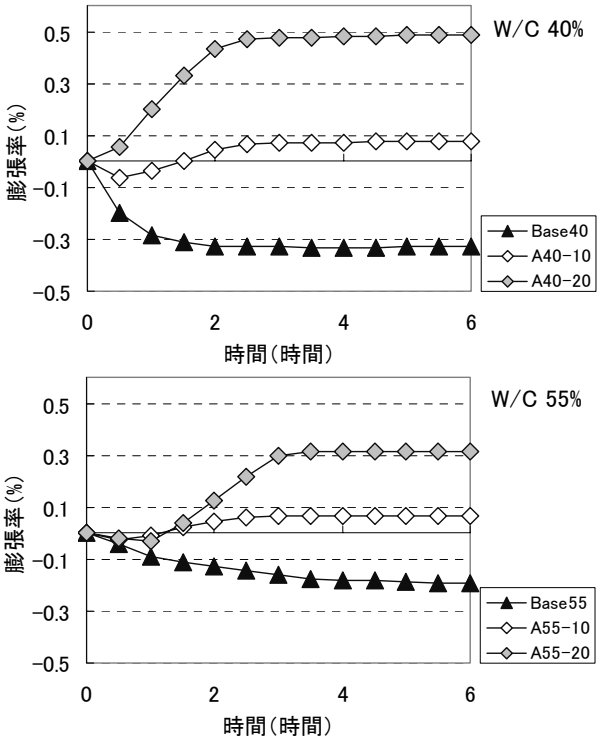
Sl:スランプ，Air:空気量，Br:ブリーディング率

と考えられる。また，W/C=40%の場合にスラグA以外のシリーズにおいて置換率の増加に伴うスランプの増加が確認された。これは，各スラグの練混ぜ水の吸着能力の差によるものと推測される。

今回，同一の配合において，スラグの種類によりスランプや空気量に差は見られたが，混和剤により制御可能であると判断される。

図－３に膨張量試験結果（Base，A のみ）を示す。水セメント比，スラグ置換率に関係なく，スラグ A のみ膨張し，他のシリーズはばらつきがあるものの，15～70×0.01mm 程度収縮した。スラグ A については，水セメント比一定の下で，スラグ置換率の増加に伴い膨張率が大きく増加する傾向がみられた。このことから，今回使用したスラグ A には金属アルミニウムが多く含まれていると考えられる。また，置換率 10%の場合，水セメント比の増加に伴う膨張率の変化はほとんど確認されなかったのに対し，置換率 20%の場合は，水セメント比の増加に伴う膨張率の低下が確認された。これは，単位セメント量とスラグ混入量の組合せによる金属アルミニウムとアルカリとの反応量が影響したと考えられる。

表－４に材齢 28 日での圧縮強度試験，静弾性係数試験，割裂引張強度試験結果を示す。圧縮強度については，スラグ置換率 10%の場合は Base とほぼ同程度であり，置換率 20%の場合は，Base と比較して 20%程度低い値を示すものも見られた。スラグ A については，W/C の低下と置換率の増加に伴い強度低下が顕著になり，Base と比較して半分以下の場合も見られた。このことから，スラグ A を除き，20%までの置換であれば強度への影響は問題ない程度であると判断される。弾性係数は，スラグ A を除き，通常のコンクリートとほぼ同じ傾向を示した。引張強度については，Base を含め全てのシリーズでほぼ同程度の強度を示し，圧縮強度の低下がみられるシリーズ（スラグ A）においても顕著な強度低下は確認されなかった。



図－３　膨張量試験結果

表－４　28 日強度・静弾性係数試験結果

シリーズ	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (×10^{4}N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
Base-40	44.5	3.83	3.2
A-40-10	30.8	3.37	3.6
B-40-10	46.0	3.87	3.4
C-40-10	45.3	3.77	3.8
D-40-10	43.3	3.70	3.5
E-40-10	42.8	3.60	3.7
F-40-10	43.6	3.47	4.1
G-40-10	44.4	3.70	4.0
Base-40	45.9	3.87	3.5
A-40-20	21.7	2.85	3.3
B-40-20	46.6	3.80	3.8
C-40-20	46.2	4.07	4.1
D-40-20	43.1	3.23	3.4
E-40-20	42.7	3.43	3.5
F-40-20	42.5	3.77	3.7
G-40-20	45.8	3.90	3.9
Base-55	36.6	3.33	3.4
A-55-10	32.4	2.97	3.1
B-55-10	37.3	3.67	2.9
C-55-10	34.9	3.33	3.2
D-55-10	35.0	3.63	3.2
E-55-10	32.1	3.83	3.0
F-55-10	34.2	3.30	3.0
G-55-10	36.3	3.33	3.2
Base-55	35.9	3.03	3.2
A-55-20	19.6	2.92	2.6
B-55-20	32.7	3.20	3.0
C-55-20	34.1	3.20	3.4
D-55-20	29.1	3.10	3.2
E-55-20	28.2	2.87	3.0
F-55-20	29.4	2.70	2.8
G-55-20	31.9	3.47	2.9

表－５　配合およびフレッシュ試験結果

シリーズ	配合量								フレッシュ試験結果		
	W/C	単位量(kg/m^3)					混和剤(%)		スランプ	空気量	Br率
		W	C	S	G	Sg	SP	AE	(cm)	(%)	(%)
Base	40	170	438	689	1018		C×0.4	C×0.004	13.0	4.7	0.54
D(乾)				366	1011	363			20.3	7.3	0.94
D(湿)				366	1011	363			20.7	6.5	1.35
F(乾)				359	1018	356			19.0	6.0	0.76
F(湿)				359	1018	356			20.7	6.4	1.16
C+F+G				359	1018	C:121 F:119 G:121			18.5	5.9	1.07
B+D				364	1013	B:172 D:181			20.3	6.8	1.28
D+F				363	1015	D:172 F:178			20.5	6.8	1.06
E+F				425	948	E:170 F:178			20.2	6.5	1.62

以上の試験結果より，スラグ A においては，Base と著しく異なる物性を示したが，他の６種類についてはほぼ同じ性状を示し，混入による影響はわずかであると考えられる。

4.　スラグを混合使用したコンクリート

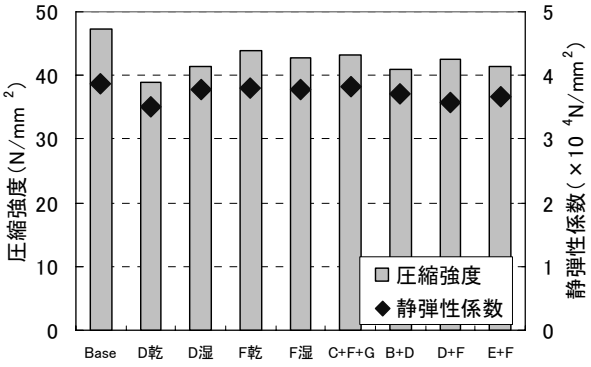
4.1　実験概要

スラグを事前に絶乾状態及び湿潤状態とし，保管状態の違いによる影響を検討するとともに，数種類のスラグを混合して用いた配合に対しても同様に実験を行った。試験項目は，割裂引張強度試験を除き，3.1 と同じである。

4.2　配合および結果・考察

表－５に配合およびフレッシュ時の試験結果を示す。保管状態の違いに関しては，溶融方式が同じで 5mm 以下の粒径が多く，吸水率の異なる D と F を対象とした。混合使用の対象としたスラグは，膨張現象の確認されなかった B，C，D，E，F，G とし，混合するスラグの組合せに際しては，実現され得る配合として，磨砕処理を施したスラグ同士（C+F+G），ごみ焼却施設の近いスラグ同士（B+D，D+F，E+F）を設定した。水セメント比と置換率は，スラグの影響が最も大きいと考えられる水セメント比 40%，置換率 20%とした。

Base と比較して，スラグを混入したシリーズはいずれもスランプ，空気量ともに高い値となった。保管状態及び混合使用によるスランプ，空気量への影響はほとんどみられなかった。また，湿潤状態では絶乾状態よりブリーディング率がわずかに大きくなる傾向を示した。スランプおよび空気量は，混合する種類によって化学混和剤による調整が必要であるといえる。



図－４　圧縮強度および静弾性係数試験結果

膨張量試験においては，いずれの供試体も膨張現象は確認されなかった。このことから，単独の使用で膨張現象が確認されないスラグは，混合使用時においても膨張しないことが明らかとなった。

図－４に材齢 28 日における圧縮強度試験および静弾性試験結果を示す。スラグを混入した場合，Base に比べて圧縮強度がわずかに低くなったが，ばらつきはみられなかった。各スラグを単独で用いた場合と比較し，保管状態，混合使用のいずれもその影響はみられなかった。

以上の試験結果より，使用時の状態（湿潤，絶乾）による硬化コンクリートへの影響はないと判断される。また，各スラグがコンクリート用骨材として適用可能であると判断される場合は，混合使用においても問題は無いと考えられる。但し，混合使用による相乗効果は，今回の試験結果からは確認されなかった。

5. 骨材資源としての適用性

本研究において使用したスラグは，スラグ A を除き，普通コンクリートと同程度の圧縮強度を発揮し，スランプ，空気量ともに Base と比較して高い値が得られるなど，ワーカビリティーも良好であることが確認された。このことから，用途に合わせて水セメント比や混和剤を調整することにより，骨材として使用可能であると考えられる。実際の使用に際しては，更に配合の水準を増やして実験を行うとともに，耐久性等についても検討を行う必要があるといえよう。

但し，スラグ A に関しては，低スランプ，低空気量であり，膨張現象も確認されるなど，Base とは異なる物性を示した。また，圧縮強度の著しい低下に関係なく，引張強度は他のシリーズと同程度発揮したことから，膨張により供試体下部と上部に強度のばらつきが生じていることが予測される[3)]。このことから，スラグ A は通常のコンクリート用骨材としての使用に適さないと考えられる。

6. まとめ

(1) スラグ A を除く 6 種類については，スラグの種類によりスランプや空気量に差が見られたが，混和剤により制御可能であると判断される。また，20%までの置換であれば強度への影響は問題ないと判断される。

(2) スラグ A については，低スランプ，低空気量を示し，ブリーディング率も他と比較して低い値となった。また，膨張現象も顕著に現れたことから，金属アルミニウムが多く含まれていると考えられる。硬化後は，W/C の低下と置換率の増加に伴い，圧縮強度の低下が確認されたものの，引張強度については Base と同程度の強度を示した。

(3) 保管状態（湿潤，絶乾）によるフレッシュコンクリート及び硬化コンクリートへの影響はないと判断される。

(4) 混合使用と単独使用の結果を比較したところ，強度及び弾性係数については特に大きな差はないと判断される。また，各スラグがコンクリート用骨材として適用可能であると判断される場合は，混合使用においても問題は無いと考えられる。ただし，スランプ，空気量は混合する種類によって化学混和剤による調整が必要であるといえる。

(5) 本研究において使用したスラグは，スラグ A を除き，用途に合わせて水セメント比や混和剤を調整することにより，骨材として使用可能であると考えられる。但し，スラグ A は通常のコンクリート用骨材としての使用に適さないと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり，愛知県溶融スラグ有効利用研究会のご協力を頂きました。ここに記して，会員各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

1) 建設省土木研究所材料施工部新材料開発研究官：公共工事における試験施工のための他産業再生資材評価マニュアル案，土木研究所資料第 3667 号，1999.9

2) 日本工業標準調査会：「TR A 0016 一般廃棄物，下水汚泥等の溶融固化物を用いたコンクリート用細骨材（コンクリート用溶融スラグ細骨材）」，2002.7.20

3) 高田聡恵，糸山豊，上原匠，梅原秀哲：都市ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの物性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1409~1414，2003.7