

論文 溶融スラグ細骨材と建設汚泥固化物を補充材として用いたコンクリートの基礎的性質

宮崎 健治^{*1}・天羽 和夫^{*2}・横井 克則^{*3}・水口 裕之^{*4}

要旨：廃棄処分場の延命化や天然骨材の枯渇などの面から、都市ゴミや産業廃棄物を高温溶融の適正処理した溶融スラグをコンクリート用骨材として有効利用する研究が行われているが、溶融スラグをコンクリートに用いた際に、ブリーディングが増加して凍結融解などの耐久性が劣ることが問題となっている。そこで本研究では、溶融スラグを多量に混入する場合のブリーディング抑制策として、微細粒分の建設汚泥固化物を細骨材補充材として普通細骨材とともに用い、これらの混合比率を変化させたコンクリートの特性を調査した。その結果、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質に改善効果がみられた。

キーワード：溶融スラグ、建設汚泥固化物、ブリーディング、強度、凍結融解抵抗性

1. はじめに

近年、生活環境において発生する一般ゴミを高温溶融して固化した一般ゴミ焼却灰溶融スラグ（以下、溶融スラグという）の産出量が増加しており、天然骨材の枯渇や廃棄処分場の不足など環境負荷低減の面からも付加価値の高いコンクリート用骨材として有効利用する研究が行われている。しかし、溶融スラグはガラス質で角張っているため細骨材として用いると単位水量やブリーディングが増加し、また溶融スラグ自体も微細ひび割れを有していることから強度や耐久性の低下が一般的に指摘¹⁾されており、単位細骨材量に対する溶融スラグの混入率を50%以下とした報告²⁾が多い。

そこで本研究では、溶融スラグの利用拡大を図る目的で細骨材中に占める溶融スラグの混入率を40%以上として、このときにブリーディングによる品質低下を改善するために建設汚泥固化物の微細粒分を普通細骨材と共に用い、これらの混合比率を変化させたときのフレッシュ性状、強度特性、長さ変化などの基本的な性質を普通コンクリートのもものと比較検討し、コンクリートの耐久性指標の一つである凍結融解抵抗性についても一部の配合を用いて調査を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究に使用した材料を表-1にまとめて示す。また、実験に用いた溶融スラグと建設汚泥固化物の粒度分布曲線を図-1に示す。

溶融スラグは、一般都市ゴミを高温溶融した後、水砕・磁選したものである。粒度は粗粒率が3.47と大きく、

表-1 使用材料と主な特性

セメント	普通ポルトランドセメント： 密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3260cm ² /g
細骨材	徳島県那賀川産川砂： 密度 2.61g/cm ³ ，吸水率 1.61% 粗粒率 2.81
	一般ゴミ焼却灰溶融スラグ： 密度 2.65g/cm ³ ，吸水率 0.81% 粗粒率 3.47
補充材	建設汚泥固化物： 密度 2.11g/cm ³ ，吸水率 19.1%
粗骨材	徳島県大麻産砕石： 最大寸法 20mm，密度 2.58g/cm ³ 吸水率 1.90%
混和剤	高性能 AE 減水剤：ポリカルボン酸系 消泡剤：非イオン系ポリエーテル

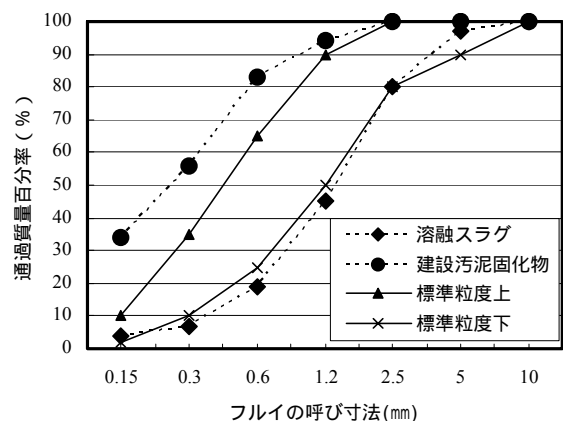


図-1 溶融スラグと建設汚泥固化物の粒度分布

*1 宮崎基礎建設（株）（正会員）

*2 阿南工業高等専門学校 建設システム工学科教授 博（工学）（正会員）

*3 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科准教授 博（工学）（正会員）

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部教授 工博（正会員）

表 - 2 コンクリートの配合とスランプおよび空気量

No.	配合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						混和剤(ml/m ³)		スランプ (cm)	空気量 (%)	
				水 W	セメント C	普通細骨材 F	溶融スラグ S	建設汚泥固化物 M	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤	消泡剤 (5倍希釈)			
1	F10-60	60	46.0	172	287	831	0	0	964	1000	0	9.0	4.5	
2	S10M0-60		48.0			0	880	67	929	3750	120	110	1.5	5.0
3	S9M1-60		46.0				759		1000	4000	8.5		5.0	
4	S8M2-60		44.0			646	129	4250	10.0	3.8				
5	F2.5S7.5M0-60		48.0			217	660	0	929	2750	105	8.5	4.5	
6	F2.5S6.8M0.7-60		45.5			205	563	50	973			7.5	5.0	
7	F2.5S6M1.5-60		43.5			197	479	95	1008	2250	100	12.0	3.9	
8	F5S5M0-60		47.0			425	431	0	947			80	10.0	3.9
9	F5S4.5M0.5-60		45.0			407	371	33	982	1026	75	12.0	4.8	
10	F5S4M1-60		43.0			388	316	63	1018			11.0	3.2	
11	F10-50	50	44.0	344	774	0	0	974	1250	0	11.0	5.5		
12	S8M2-50		42.0		0	600	120	1009	3400	80	12.5	3.9		
13	F2.5S6M1.5-50		41.0		180	439	87	1026	2500	65	11.0	4.8		
14	F5S4M1-50				361	293	58		2000	30	11.0	4.8		

記号例

F 2.5 S 6.8 M 0.7 - 60

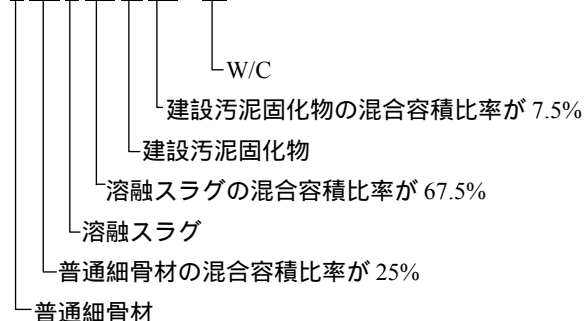


写真 - 1 一般ゴミ焼却 写真 - 2 建設汚泥固化物 融灰溶融スラグ

表 - 3 細骨材の混合容積比率

配合名	普通細骨材 F (%)	溶融スラグ S (%)	建設汚泥固化物 M (%)
F10-60	100	0	0
S10M0-60	0	100	
S9M1-60		90	10
S8M2-60		80	20
F2.5S7.5M0-60		25	75
F2.5S6.8M0.7-60	67.5		7.5
F2.5S6M1.5-60	60		15
F5S5M0-60	50	50	0
F5S4.5M0.5-60		45	5
F5S4M1-60		40	10
F10-50	100	0	0
S8M2-50	0	80	20
F2.5S6M1.5-50	25	60	15
F5S4M1-50	50	40	10

図 - 1 で示したように粒度分布はJIS A 5005「コンクリート用砕石および砕砂」の標準粒度の範囲外となっており、微粒な 0.15mm 以下も約 2% と少ない。この溶融スラグの主成分はシリカが 40~42%、石灰が 32~34%、アルミナが 16~19% で、塩基度 (CaO/SiO₂) は 0.8 程度に調整されている。写真 - 1 に示すように、表面は滑らかで光沢

があり、形状は角張っている。また、この溶融スラグの有害物質の溶出試験結果は、環境庁告示の基準値以下となっている。

建設汚泥固化物 (写真 - 2) は路盤材として使用するために、含水比 50% の汚泥を高炉セメント B 種のみで固化し、これをクラッシュランで粉碎したもので、実験に

は粒径が 1.2mm 以下の細粒を使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合とスランプおよび空気量を表 - 2 に示す。全ての配合の単位水量と粗骨材の最大寸法 20mm の一定とし、水セメント比を 60 および 50% に変えた。細骨材の混合容積比率をまとめて表 - 3 に示す。溶融スラグの細骨材中の容積混入率は最大で 100%、最小で 40% とし、普通細骨材および建設汚泥固化物の容積混入率を変化させて用いた。いずれの配合も目標スランプ 10cm、空気量 4% とし、高性能 AE 減水剤と消泡剤により所要のスランプと空気量になるように調整した。

2.3 供試体の作製および試験方法

(1) 供試体の作製

コンクリートの練混ぜにはパン型ミキサを使用し、細骨材、セメント、汚泥、溶融スラグ、粗骨材および混和剤を混入した水を投入し、2 分間練り混ぜを行った。その後、硬化性状を調べる供試体は JIS A 1132 に準じて作製し、24 時間恒温室に静置したあと脱型を行い、所定の材齢まで標準養生を行った。

(2) 試験方法

本研究で取り上げたフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの検討項目と試験方法をまとめて表 - 4 に示す。

ブリーディング試験は JIS A 1123 に準じ、また、凝結時間試験はフレッシュコンクリートを 5mm ふるいでウエットスクリーニングした試料を用いて JIS A 1147 に準拠して行った。

表 - 4 検討項目と試験方法

検討項目	試験方法
ブリーディング率	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147 5mm ふるいでウエットスクリーニング
圧縮強度	JIS A 1108 100×200mm, 測定材齢 28 日
引張強度	JIS A 1113 100×200mm, 測定材齢 28 日
動弾性係数	JIS A 1127 100×200mm, 測定材齢 28 日
静弾性係数	JIS A 1149, コンプレッソメータ法 100×200mm, 測定材齢 28 日
長さ変化率	JIS A 1129, コンタクトゲージ方法 100×100×400mm, 測定開始材齢 7 日
凍結融解抵抗性	JIS A 1148, 水中凍結融解方法 (A 法), 100×100×400mm, 測定開始材齢 28 日

硬化コンクリートの圧縮強度および引張強度は 100×200mm 円柱供試体を材齢 28 日まで標準養生した後で測定した。弾性係数は、静弾性係数、動弾性係数ともに材齢 28 日における値を求めた。長さ変化試験は、100×100×400mm はり供試体を材齢 7 日まで標準養生を行い、その後、温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室に静置し、所定の材齢ごとにコンタクトゲージ方法により長さ変化を測定した。凍結融解抵抗性は、100×100×400mm はり供試体を材齢 7 日まで標準養生した後、凍結融解条件として凍結温度 -18±2℃、融解温度 5±2℃ とし、水中凍結融解 1 サイクルに要する時間を 3 時間以上 4 時間以内にし、30 サイクル終了ごとに動弾性係数を計測し、相対動弾性係数を算出した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート

(1) ブリーディング率

図 - 2 に経過時間に伴うブリーディング率の結果を配合別に示す。図からみられるように、溶融スラグの混入率が大きいものほどブリーディング率が高く、特に細骨材として溶融スラグのみを用いた S10M0-60 の最終ブリーディング率は他の配合のものに比べて約 7 倍の高い値となっている。また、ブリーディングが終了するまでの時間も短くなる傾向となっている。これらは、従来から指摘されているように、溶融スラグがガラス質で保水性が少ないためと考えられる。一方、建設汚泥固化物を組み合わせて混入したものは、いずれの配合のものも 1% 以下のブリーディング率となっており、ブリーディング改善に建設汚泥固化物の効果がみられている。

(2) 凝結時間

溶融スラグの成分によっては凝結を遅延させるとの

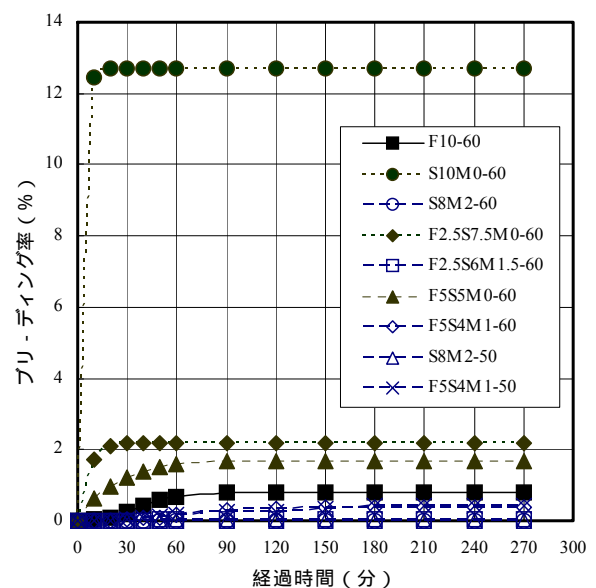


図 - 2 ブリーディング率試験

指摘³⁾があるため、本実験でも凝結時間試験を実施した。横軸に経過時間、縦軸に貫入針の抵抗値である貫入抵抗とし、その関係を図 - 3 に示す。建設汚泥を混入していない配合のもの(M0のもの)では、溶融スラグの混入率が大きくなるほど貫入抵抗が $3.5\text{N}/\text{mm}^2$ となる始発時間、および $28.0\text{N}/\text{mm}^2$ となる終結時間が長くなっており、溶融スラグ100%混入したものは経過時間が10時間になっても貫入抵抗がほとんど発生していない。建設汚泥を混入したものの凝結過程は普通コンクリートとほぼ同様の傾向となっている。

3.2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

材齢28日における各配合の圧縮強度を図 - 4 に示す。水セメント比が60%の場合、溶融スラグを混入したものは普通コンクリートのものに比べて $5\sim 20\text{N}/\text{mm}^2$ の強度低下がみられているが、溶融スラグ混入による圧縮強度への影響はスラグ混入率100%のものを除いて少なく、水セメント比60%の配合のものでは約 $25\text{N}/\text{mm}^2$ 、50%では $30\text{N}/\text{mm}^2$ 前後の大差ない値となっている。また、建設汚泥の強度改善に対する効果は多少みられたが、用いない場合に比べて $2\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の強度増加と小さい。なお、溶融スラグの混入率が同じであると、水セメント比を小さくすることより圧縮強度が $6\text{N}/\text{mm}^2$ ほど増加しており、強度低下が懸念されている溶融スラグを用いても、水セメント比を小さくすることにより強度の大きいコンクリートにすることができると思われる。

(2) 引張強度

図 - 5 に示す引張強度の結果も全体的に圧縮強度の結果と同様、溶融スラグを用いると強度が低下し、普通コンクリートの約70%程度の引張強度となり、建設汚泥の強度に対する混入効果も小さい。ただし、脆度係数(=圧縮強度/引張強度)の値は、約10~13となっており、一般的なコンクリートの値とほぼ同じ傾向がみられる。

(3) 弾性係数

材齢28日における動弾性係数と圧縮強度との関係を図 - 6 に示す。また、同様に材齢28日における静弾性係数と圧縮強度との関係を図 - 7 に示す。

細骨材に溶融スラグのみを用いたもの以外の動弾性係数は圧縮強度の大きさに関係なく、ほぼ一定の値となっている。この理由として、溶融スラグの混入率を大きくすると強度は小さくなるが単位容積質量が大きくなるのが原因と考えられる。

一方、静弾性係数は、圧縮強度が増加するのに伴い大きくなっており、普通コンクリートで静弾性係数と圧縮強度の関係を示す設計式(1)⁴⁾と比較すると、ばらつきがあるもののほぼ同様の傾向がみられるが、溶融スラグを多量に混入したコンクリートの静弾性係数は普通コン

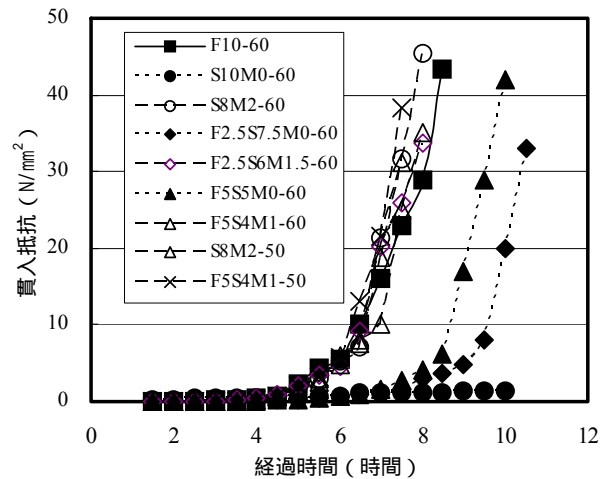


図 - 3 凝結時間試験

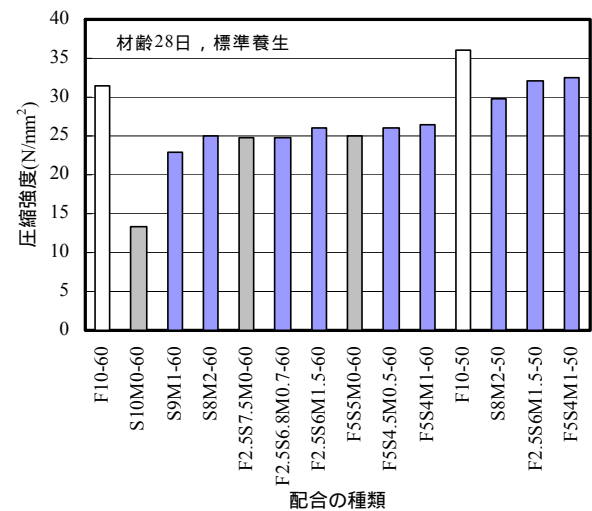


図 - 4 圧縮強度

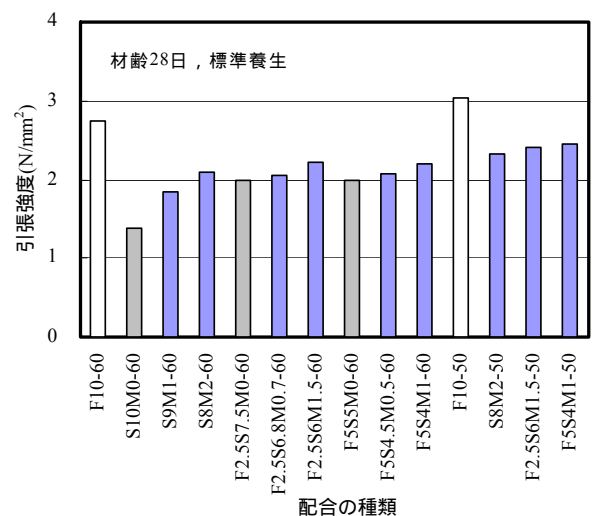


図 - 5 引張強度

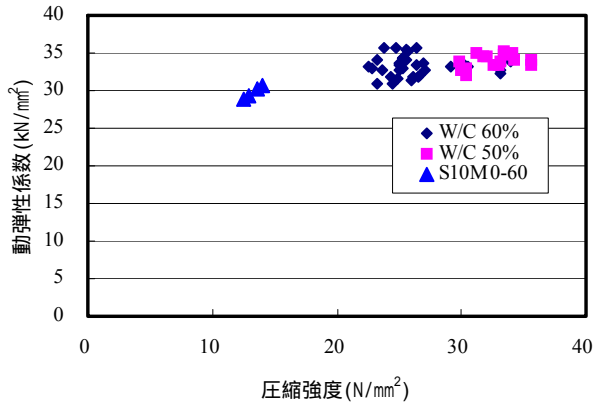


図 - 6 動弾性係数と圧縮強度

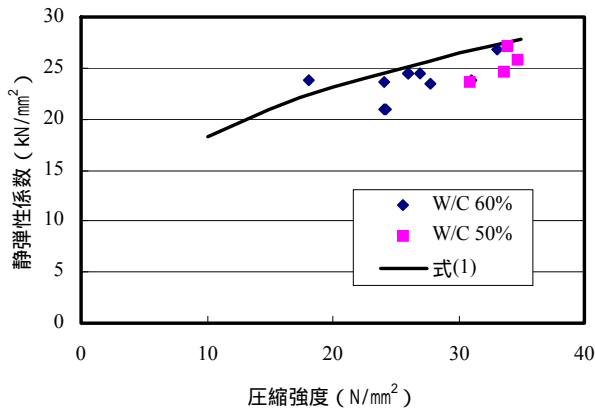


図 - 7 静弾性係数と圧縮強度

クリートに比べて、若干小さくなる傾向がみられた。

$$E_c = 8500 f_c^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 E_c ：静弾性係数(N/mm²)

f_c ：圧縮強度(N/mm²)

(4) 長さ変化

長さ変化試験結果を図 - 8 に示す。この図より、溶融スラグ混入率が大きくなると、F2.5S7.5M0-60を除いて、建設汚泥混入の有無にかかわらず長さ変化率が大きくなる傾向となった。水セメント比が同じ場合で混入率が小さい場合は普通コンクリートのもよりも変化率が小さくなる傾向が報告⁵⁾されているが、本結果は逆の傾向となっており、今後の検討課題となる。

(5) 凍結融解抵抗性

凍結融解サイクルと相対動弾性係数との関係を図 - 9 に示す。溶融スラグ混入率を 75%、普通細骨材 25% 混合使用した配合(F2.5S7.5M0-60)のもの以外は、溶融スラグの混入率を 40%以上としても 300 サイクル終了時において相対動弾性係数は 60%以上の値となっており、耐凍害性を有しているといえる。

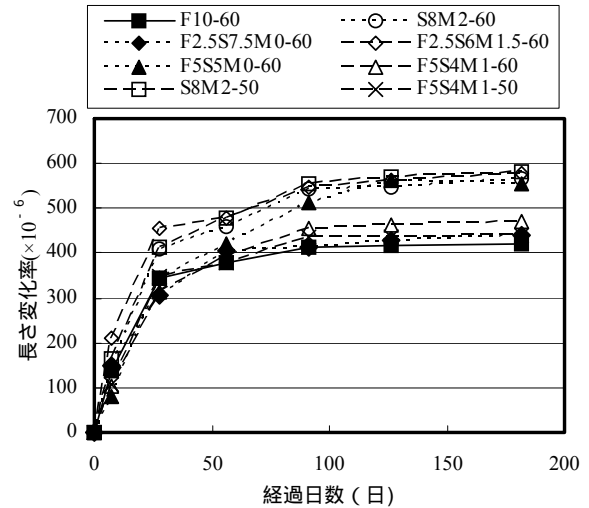


図 - 8 長さ変化率試験

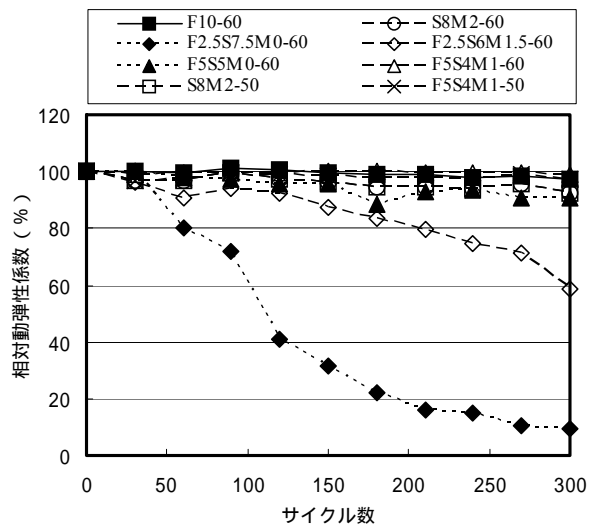


図 - 9 凍結融解試験

4. まとめ

本実験結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 建設汚泥固化物を混入することで、溶融スラグを多量に混入したコンクリートのブリーディングを低減することが可能である。
- (2) 溶融スラグと普通細骨材とを用いた場合には、これに建設汚泥固化物を混和しないものより凝結時間が遅くなった。
- (3) 細骨材中の溶融スラグ混入率 40%以上としたコンクリートの圧縮強度および引張強度は、水セメント比が同じ普通コンクリートの約 70%となった。
- (4) 溶融スラグを細骨材の 40%以上に混和したコンクリートの動弾性係数は、圧縮強度が同じであれば普通コンクリートとほぼ同等の値となった。静弾性係数は、普通コンクリートの設計値に比べて若干小さく

なる傾向になった。

- (5) 溶融スラグのみを細骨材として用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は低いですが、建設汚泥固化物を混入することにより十分な抵抗性を得ることができた。

参考文献

- 1) 竹中 寛, 末岡英二, 安田正雪, 笠井哲郎: ゴミ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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1565-1560, 2006.6
- 2) 例えば, 松家武樹, 浅野伸隆, 堺 孝司, 荻田耕助: 一般・産業廃棄物溶融スラグを用いたコンクリート

の諸特性, 土木学会第 62 回年次学術講演概要集, 第V部, pp.1097-1098, 2007.9

- 3) 日本工業標準調査会標準部会: 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) TR A 0016, (財)日本規格協会, 2002
- 4) 岡村 甫, 前田詔一: 鉄筋コンクリート工学, 市ヶ谷出版, 1987
- 5) 松山哲也, 堺 孝司, 吉田秀典, 高木茂: 都市ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp73-78, 2001.