

論文 溶融スラグとフライアッシュを混入したコンクリートの物性

平野 敏宏*1・高田 聡恵*1・上原 匠*2・梅原 秀哲*3

要旨：本研究では産業副産物の有効利用を目的に、溶融スラグを骨材，フライアッシュを粉体増量材として使用し，普通および高流動コンクリートについての基礎物性の把握を試みた。その結果，普通および高流動コンクリートにおいて溶融スラグとフライアッシュを同時に用いても特に問題は見られなかった。また，フレッシュ性状を確保する上で溶融スラグとフライアッシュの目安となる単位量を明らかにすることができた。

キーワード：溶融スラグ，フライアッシュ，体積変化，高流動コンクリート

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℃以上の高温のもと，溶融炉で溶融処理した残渣である¹⁾。各廃棄物は溶融処理され減量化が図られるものの，今後はスラグの排出量の増加が見込まれることから，コンクリートへの利用が期待されている。また，産業副産物であるフライアッシュも現在コンクリート用混和材としての一層の利用が望まれている。したがって，種々の産業副産物の同時利用が想定されるが，異なる産業副産物を同時に用いたコンクリートに関する研究例は少なく，環境に配慮し，資源の有効利用を図る上でも産業副産物を混合使用したコンクリートの基礎物性を明らかにする必要があるといえる。

そこで本研究では，フライアッシュの有する流動性の改善効果を生かし，スラグを骨材，フライアッシュを粉体増量材として使用した普通コンクリート（i シリーズ：低品質コンクリート）および高流動コンクリート（ii シリーズ：二次製品）について，フレッシュ性状および硬化後の物性の把握を試みた。

2. 使用材料

スラグを含む使用材料を表-1に示す。スラ

グは，愛知県内の7箇所の処理場で製造された7種類のスラグを対象に高田らが実施したコンクリートの諸物性に関する研究結果を参考に，表-1に示すSgB～SgGの6種類のスラグとした²⁾。この6種類のスラグはコンクリート用骨材として使用してもフレッシュ性状，硬化性状ともに与える影響は大差ないと報告を受けている²⁾。また，これらのスラグを混合してコンクリートに混入しても問題ないとの判断がなされている。

図-1に各スラグの粒度曲線を示す。一部のスラグはTRの適用範囲³⁾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，アルカリ骨材反応（ASR）は無害であることが確認されている²⁾。フライアッシュはJIS A 6201 II 種品を使用した。

3. スラグとフライアッシュを混入した普通コンクリートの物性（i シリーズ）

3.1 実験概要

配合を表-2に示す。水セメント比60%のスラグおよびフライアッシュ無混入の配合1を基本配合に，細骨材全量をスラグに置換（等容積）

※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教授 工博（正会員）

※3 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）

した。なお、スラグは 5mm 以上の粒径を多く含む SgE を除く 5 種類を対象とした。フライアッシュは単位量を 0, 100, 150, 200kg/m³ の 4 水準とし、産業副産物の影響を把握する目的から、粗骨材で容積置換した。さらに、フライアッシュ無混入に対してはペーストを増やす目的で単位水量、単位セメント量を増量した配合 6 も対象とした。混和剤の使用量は配合毎の適正值とした。目標スランプは 8±2.0cm, 目標空気量は 4.5±1.5% である。

試験項目は、スランプ試験 (JIS A 1101-1998), 空気量試験 (JIS A 1118-1997), 圧縮強度試験 (JIS A 1108-1999), 静弾性係数試験 (JSCE-G 502-1999) とし、配合 1~4 に対してはブリーディング試験 (JIS A 1123-1997) ならびに膨張量試験も実施した。なお、膨張量試験は、プラスチック製型枠に試料を充填し、その上部に載せ

た円筒形の発泡スチロール製フロートの上下移動量をダイヤルゲージで計測することにより、フレッシュコンクリートの膨張を確認するものである⁴⁾。

3.2 結果および考察

フレッシュ試験結果を表-3に、スランプ、空気量試験結果を図-2に示す。基本となる配合 1 では、通常の AE 減水剤で目標スランプお

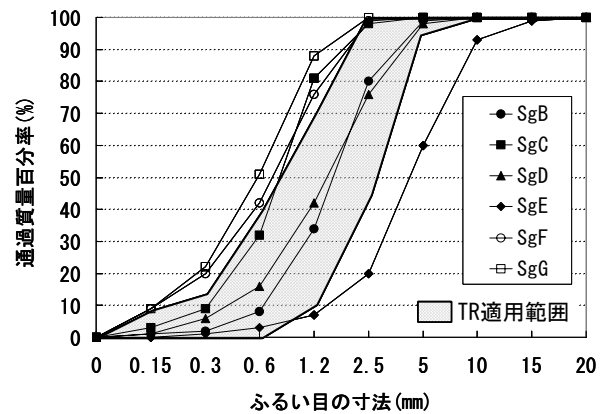


表-1 使用材料

図-1 各スラグの粒度曲線

使用材料	種類	記号	物性または成分	
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.15g/cm ³	
細骨材	山砂 (豊田産)	S	密度: 2.57g/cm ³ , 吸水率: 1.55%, 粗粒率: 2.67	
粗骨材	砕石 (瀬戸産: 2005)	G	密度: 2.73g/cm ³ , 吸水率: 0.38%, 粗粒率: 6.65	
溶融スラグ	コークスベット式	SgB	密度: 2.68g/cm ³ , 吸水率: 0.63%, 粗粒率: 3.76	
	コークスベット式	SgC	密度: 2.84g/cm ³ , 吸水率: 1.01%, 粗粒率: 2.77	
	プラズマ式溶融炉	SgD	密度: 2.83g/cm ³ , 吸水率: 0.94%, 粗粒率: 3.16	
	電気抵抗式溶融炉	SgE	密度: 2.70g/cm ³ , 吸水率: 0.52%, 粗粒率: 5.16	
	交流電気抵抗式灰溶融炉	SgF	密度: 2.78g/cm ³ , 吸水率: 0.34%, 粗粒率: 2.54	
	熱分解高温燃焼溶融炉	SgG	密度: 2.83g/cm ³ , 吸水率: 0.23%, 粗粒率: 2.30	
フライアッシュ	JIS A 6201 II種	FA	密度2.18g/cm ³	
混和剤	i シリーズ	AE減水剤	F1	主成分: オキシカルボン酸塩
		AE助剤	F2	主成分: ロジン系界面活性剤
		高性能AE減水剤	F3	主成分: ポリカルボン酸
		フライアッシュ用AE助剤	F4	主成分: 多価アルコール系特殊非イオン界面活性剤
	ii シリーズ	高性能AE減水剤	T1	主成分: ポリカルボン酸
		抑泡剤	T2	主成分: ポリエーテル系

表-2 実験配合: i シリーズ

配合 No.	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	配合量 (kg/m ³)											F1・3** (%)	F2・4** (%)	
				W	C	FA	S	Sg						G			
								[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]				
1	20	60	45.8	162	270	0	833	0	0	0	0	0	0	0	1047	0.540	0.135
2			0			0							1062	0.540	0.135		
3			100			0							932	0.740	0.370		
4			150			0	171	181	180	0	177	180	867	0.840	0.420		
5			200			0							802	0.940	0.705		
6			0			0	175	292	0	0				1008	0.584	0.146	

※配合1は混和剤F1およびF2を、その他の配合ではF3およびF4を使用した。

よび空気量を確保できたが、スラグを混入した配合2~6では、AE減水剤の添加量を増やすと材料分離が生じ所定の性状を得ることが困難であったことから、高性能AE減水剤を用いることとした。スラグを細骨材に利用したコンクリートの配合では、高性能AE減水剤を使用する必要があると判断される。

配合2より、単位水量162kg、水セメント比60%の条件では、フライアッシュを用いずに細骨材を全てスラグに置換した配合では微粒分が少なく材料分離の観点からスランプ8cmを確保するのは困難と判断された。ただし、配合6では所定の性状が確保されている。また、配合3, 4, 5のようにフライアッシュを加えることでも所定の性状が確保できている。したがって、スラグを細骨材と全量置換して使用する場合には、単位水量を増やすことや、フライアッシュなどの微細な粉体を増やすなどの対応で通常のコンクリートと同様なフレッシュ性状の制御が可能と判断される。空気量の制御に関しては通常のコンクリートと同様に化学混和剤による制御が有効と推察される。

ブリーディング率は配合1と比較して、スラグおよびフライアッシュを混入した配合ではブリーディング率が小さくなる傾向が確認された。特にフライアッシュを多量に用いた配合4においては配合1の1/10以下の値となった。ところで、フレッシュコンクリートの施工性に関しては、配合5ではフライアッシュの単位量が多過ぎて粘性が高く不良であった。今回の試験では、仕上げの作業性を考慮すると細骨材の全量をスラグ置換する場合の単位フライアッシュ量の目安は100~150kg/m³程度と推察される。

膨張率試験結果を図-3に示す。スラグを用いても通常の普通コンクリート(配合1)と同様に、膨張は生じず収縮現象が見られた。スラグのみを使用した配合2の収縮量が最も小さく、フライアッシュを加えた配合では、配合1よりは小さいが、配合2に比べると収縮量は大きい結果となった。フライアッシュを混入すること

表-3 フレッシュ試験結果：iシリーズ

配合No.	スランプ (cm)	空気量 (%)	膨張率 (%)	ブリーディング率 (%)
1	8.5	4.7	-0.30	5.75
2	4.5	6.2	-0.06	4.85
3	9.5	4.0	-0.30	4.54
4	9.0	4.0	-0.17	0.42
5	8.0	4.5	-	-
6	7.0	5.1	-	-

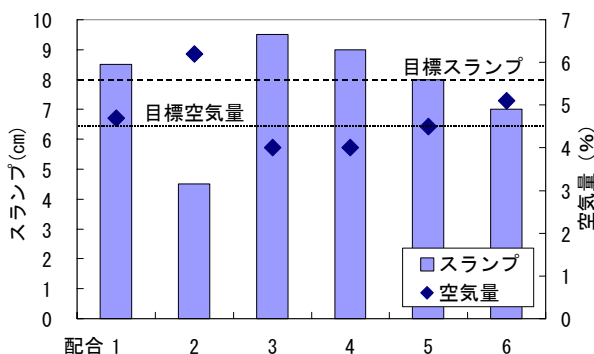


図-2 スランプ、空気量試験結果：iシリーズ

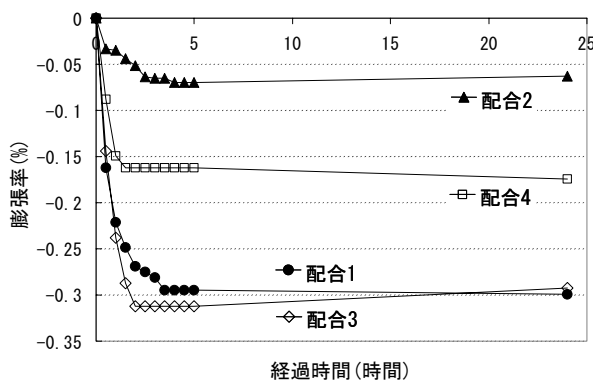


図-3 膨張率試験結果：iシリーズ

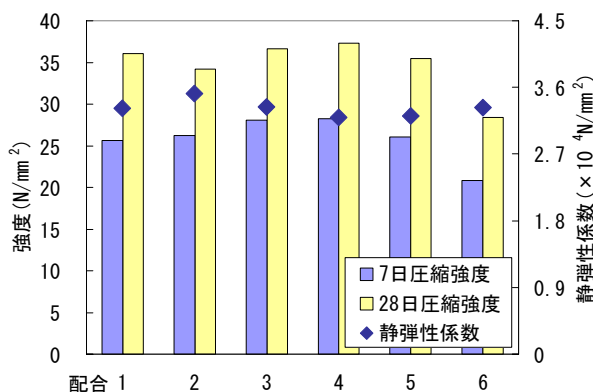


図-4 圧縮強度、静弾性係数試験結果：iシリーズ

で、スラグに起因する膨張作用を抑制する結果となったが、要因説明はデータ不足のため今後の課題とした。

圧縮強度、静弾性係数試験結果を図-4に示す。配合1と比較して細骨材の全量をスラグで置換した配合2、さらにフライアッシュを加えた配合2,3および4はともに強度については特に大きな問題はないと判断される。静弾性係数についても同様である。ただし、配合2と配合6の比較から、水セメント比およびスラグ量が同じでも、単位水量およびセメント量が多く粗骨材が減少すると一般的な現象とは異なり、強度の低下が見られる。したがって、強度の制御には水セメント比に加え、単位水量等も考慮する必要があると思われる。

4. スラグとフライアッシュを混入した高流動コンクリートの物性 (ii シリーズ)

4.1 実験概要

配合を表-4に示す。水セメント比50%のスラグ無置換、フライアッシュの単位量150kg/m³の配合を基本配合とした。スラグは5mmを境に粗骨材と細骨材の2種類に分け、それぞれを容積置換して用いた。スラグの置換率は全骨材容量に対する0, 10, 20, 30%の4水準に加えて、細骨材全量を置換した計5水準とした。単位水量は175kg/m³とし、高性能AE減水剤の使用量は配合毎の適正值とした。目標スランプフローは65.0±5.0cm、目標空気量は2.0±1.5%である。ただし、細骨材の全量をスラグに置換した配合5においては、許容範囲を外れても調

表-4 実験配合: ii シリーズ

配合 No.	W/C (%)	スラグ置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)										T1 (%)	T2 (%)	
			W	C	FA	S	Sg								G
							[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]			
1	50	0	175	350	150	831	0	0	0	0	0	0	816	0.8	0.1
2		683				28	29	29	28	29	29	804	0.8	0.1	
3		534				56	59	59	56	58	59	792	0.75	0.1	
4		386				83	88	88	84	87	88	780	0.7	0.1	
5		0				156	165	164	157	162	164	748	0.6	0.1	

※細骨材全量に対する置換率

表-5 試験結果: ii シリーズ

配合 No.	スランプ (cm)	スランプフロー (cm*cm)	50cmフロー時間 (秒)	最終フロー時間 (秒)	空気量 (%)	膨張率 (%)	ブリーディング率 (%)	7日圧縮強度 (N/mm ²)	28日圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
1	26.5	62.0*62.0	3.6	29	1.9	-0.292	0.16	44.3	66	3.64
2	26.8	64.0*60.4	4.8	29.3	2.1	-	-	42.5	60.3	3.67
3	28.0	62.0*60.0	5.4	29.45	2.5	-0.177	0.14	42.9	59.1	3.8
4	27.3	64.0*60.5	5.0	42	1.8	-	-	41	55.5	3.56
5	24.0	46.5*44.5	-	13	3.8	-	-	37.3	47.6	3.96

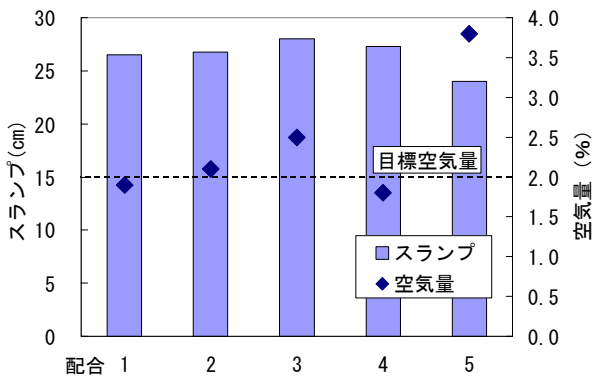


図-5 スランプ、空気量試験結果: ii シリーズ

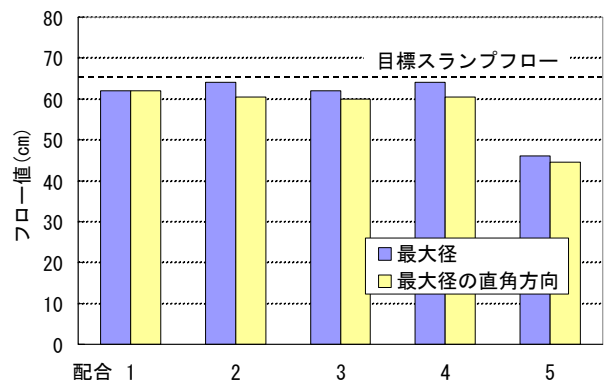


図-6 フロー試験結果: ii シリーズ

整は行わなかった。試験項目は 3.1 と同様である。

4.2 結果および考察

試験結果を表-5 に、スランプ、空気量試験結果を図-5 に、フロー試験結果を図-6 に示す。配合 1, 2, 3, 4 では目標スランプフロー、空気量を得ることができ、細骨材の一部をスラグで置換する場合、全骨材容積置換率 30% までは化学混和剤によりフレッシュ性状の制御は可能であると推察される。

配合 5 (細骨材全量をスラグに置換、フライアッシュ混入) はフロー値が 45.0cm 程度と小さく、空気量が 3.8% と大きな結果となり、所定のフレッシュ性状を確保できなかった。細骨材全量置換に対する化学混和剤による制御については、データ不足であることから今後の課題としたい。

ブリーディング率は、配合 1, 3 共に小さく、i シリーズの配合 4 と同様な結果となった。これは、フライアッシュの混入により粉体量が増加し、ブリーディングを抑制したことが原因であると思われる。

膨張率試験結果を図-7 に示す。スラグを混入した配合 3 の収縮量が配合 1 に比べ小さく現れた。しかし、スラグを混入した配合 3 も、普通コンクリートと同様に、収縮となったことから、今回の配合においては、スラグを使用する上での問題はないと推察される。

圧縮強度、静弾性係数試験結果を図-8 に示す。材齢 7 日での圧縮強度の差は殆ど見られないが、材齢 28 日ではスラグ置換率の増加に伴い強度低下が顕著となった。今回、単位体積あたりのフライアッシュ量が一定であることから、スラグの物性が影響したと考えられる。

水セメント比、単位水量、単位セメント量および単位フライアッシュ量が同じでも、全骨材容積に対するスラグ置換率が増加し、細骨材が減少すると、強度の低下が見られる。したがって強度の制御には水セメント比に加え、全骨材容積に対するスラグ置換率も考慮する必要があ

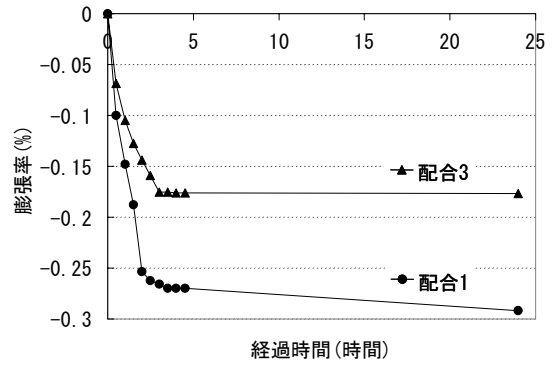


図-7 膨張率試験結果：ii シリーズ

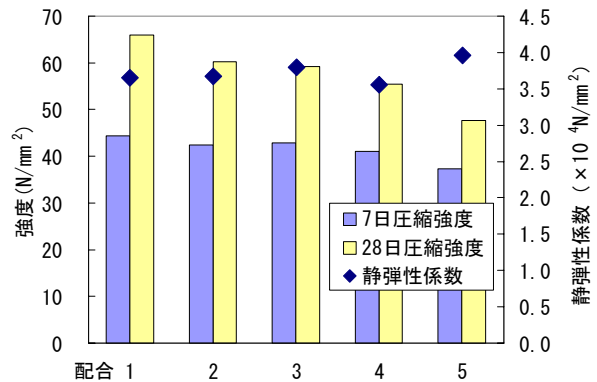


図-8 圧縮強度、静弾性係数試験結果
：ii シリーズ

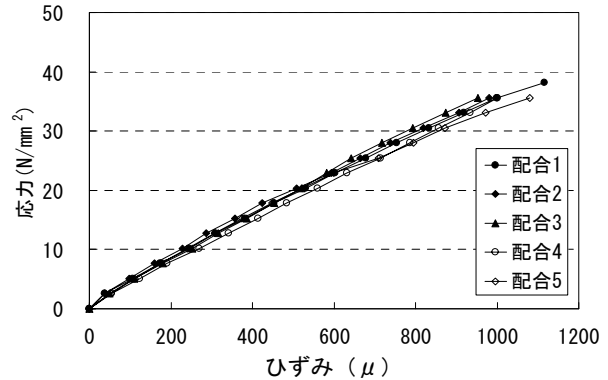


図-9 応力-ひずみ関係：ii シリーズ

ると思われる。

応力-ひずみ関係を図-9 に示す。静弾性係数は配合 5 が最も大きな結果となったが、応力-ひずみ関係の傾向からは、各配合の差異は小さいと判断される。スラグを混入したコンクリートの材齢 28 日の圧縮強度がスラグ無混入の配合 1 に比べ低く示されたのに対し、静弾性係数はほぼ同じ値を示した。圧縮強度の低下に伴い静弾性係数も低下すると考えられるが、一般的な現象とは異なる結果となった。この原因に

関しては、データ数の不足から判断は困難であるが、強度と同様にスラグの物性が影響していると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

5.1 普通コンクリート：i シリーズ

- (1)スラグを多量に使用する場合は、流動性の改善を目的にフライアッシュを加えることで通常のコンクリートと同様なフレッシュ性状の制御が可能と判断される。
- (2)空気量の制御に関しては化学混和剤により対応可能であると判断される。
- (3)仕上げの作業性を考慮すると細骨材の全量をスラグに置換した場合にフレッシュ性状を確保する目的で加えるフライアッシュの単位の目安は 100kg 程度～150kg 程度と推察される。
- (4)細骨材全量をスラグで置換した場合、さらにフライアッシュを加えた場合、ともに強度については特に大きな問題はないと判断される。弾性係数についても同様である。
- (5)水セメント比およびスラグ量が同じでも、単位水量およびセメント量が多く粗骨材が減少すると強度の低下が見られる。したがって強度の制御には水セメント比に加え、単位水量等も考慮する必要があるが、今回の実験より、溶融スラグとフライアッシュを組み合わせた普通コンクリートの製造が可能であると言えよう。

5.2 高流動コンクリート：ii シリーズ

- (1)細骨材の一部をスラグで置換する場合、全骨材容積置換率 30%までは、化学混和剤によりフレッシュ性状の制御は可能であると判断される。
- (2)空気量の制御に関しては化学混和剤により対応可能であると判断される。
- (3)材齢 7 日での圧縮強度の差はほとんど見られないが、材齢 28 日ではスラグの置換率が大きくなるにしたがって、強度低下が顕著となった。本研究での配合では、単位

フライアッシュ量が一定であることから、スラグの物性が影響していると推察される。

- (4)弾性係数に関しては、スラグの置換率に関わらずスラグ無混入の配合とほぼ同じ値を示し、圧縮強度とは異なり、スラグの混入が及ぼす影響は見られなかった。
- (5)水セメント比、単位水量、単位セメント量および単位フライアッシュ量が同じでも、全骨材容積に対するスラグ置換率が増加し、細骨材が減少すると、強度の低下が見られる。したがって強度の制御には水セメント比に加え、全骨材容積に対するスラグ置換率も考慮する必要があるが、今回の実験によりスラグとフライアッシュを組み合わせた高流動コンクリートの製造が可能であると言えよう。

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) 高田聡恵，糸山豊，上原匠，梅原秀哲：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.1629~1634，2004.6
- 3) 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
- 4) 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