

論文 廃コンクリートの溶融スラグ化の検討

廣瀬裕之^{*1}・羽原俊祐^{*2}・小山田哲也^{*3}・藤原一成^{*4}

要旨：コンクリートから再生粗骨材を取り出した後に残る 5mm 以下の廃コンクリートを主原料に、フライアッシュおよび石灰石を副原料として低融点で溶融できる溶融スラグ製造の検討を行った。目標とする化学組成は、石英 - ワラストナイト - アノーサイトの共晶点である組成点 e およびワラストナイト - アノーサイト - ゲーレナイトの共晶点である組成点 p とした。1,350 で焼成した溶融スラグの骨材試験を行ったところ、JIS A 5031 に規定されるコンクリート用溶融スラグの性能（密度・吸水率など）を満足したことから、廃コンクリートからコンクリート用骨材として適した溶融スラグを製造できることが確認できた。

キーワード：再生骨材，廃コンクリート，溶融スラグ，密度，吸水率

1. はじめに

建物解体時に発生する解体コンクリートを積極的に再利用することは、環境保全や資源の節約の観点から非常に重要である。従来、コンクリート廃材の再利用方法としては、路盤材などへの利用に限定されていたが、近年、コンクリートから再生骨材を製造する技術開発が盛んに行われており、再生粗骨材の製造において確立された技術もいくつか紹介されている。¹⁾ しかし、問題となるのは、コンクリートから再生粗骨材を取り出した後に残る粒径が 5mm 以下の廃コンクリートである。これを、コンクリート用細骨材として使用した場合、単位セメント量を一定とすると、コンクリートの単位水量の増加による、強度の低下、乾燥収縮の増大など、コンクリートの性能に悪影響を及ぼすことも知られている。¹⁾

本研究では、この廃コンクリートの新しい活用方法に着目し、再生骨材製造時に発生する 5mm 以下の廃コンクリートを主原料に、フライアッシュおよび石灰石を副原料として成分調整し、焼成して溶融スラグを製造し、このスラグをコンクリート用骨材（細骨材・粗骨材）として再利用することを目的に検討を行った。

2. 再生骨材の製造方法と問題点

コンクリートから再生骨材を製造する技術は、粗骨材、細骨材ともに存在するが、主に粗骨材のみを取り出す方法が一般的である。コンクリートの成分は図 - 1 に示すように、水、セメント、5mm 以下の細骨材、5mm 以上の粗骨材からなり、質量割合は、水・セメントが 20～25%、細骨材が 30～40%、粗骨材が 35～45% となっているため、コンクリートから粗骨材部分を全量取り出しても、55% 以上は細骨材とセメントペーストからなるモルタル

部分である。再生骨材の製造方法としてはスクリー磨砕方式や加熱すりもみ方式が採用されている。²⁾ スクリー磨砕方式によりコンクリートから粗骨材を取り出す工程の一例を図 - 2 に、スクリー磨砕式の再生骨材製造プラント³⁾ を図 - 3 に示す。この方式は、解体コンクリートの最大径が 40mm 程度になるまで破碎したものを再生骨材製造プラントに投入し、繰り返し処理することにより、吸水率の小さい 5mm 以上の再生粗骨材を得るというプロセスである。スクリー磨砕処理回数と吸水率の関係の一例を図 - 4 に示す。³⁾ 処理回数の増加

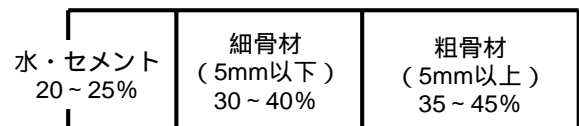


図 - 1 コンクリート成分の質量割合

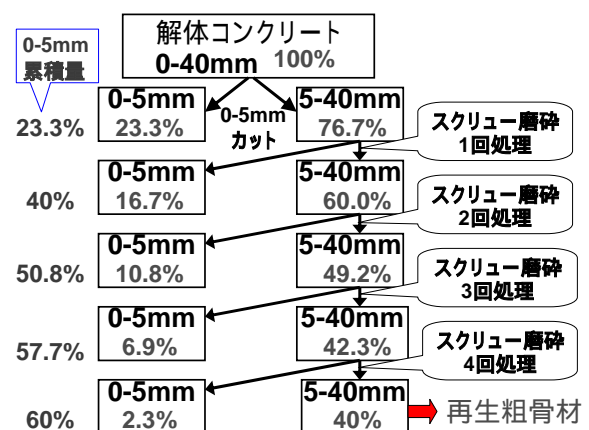


図 - 2 5mm 以下の廃コンクリート発生フロー³⁾
(例：TRASS システム)

*1 岩手大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻 (正会員)

*2 岩手大学 工学部建設環境工学科准教授 工博 (正会員)

*3 岩手大学 工学部建設環境工学科助教 工博 (正会員)

*4 日本原子力発電(株) 開発計画室 建築工事・保守グループ (非会員)

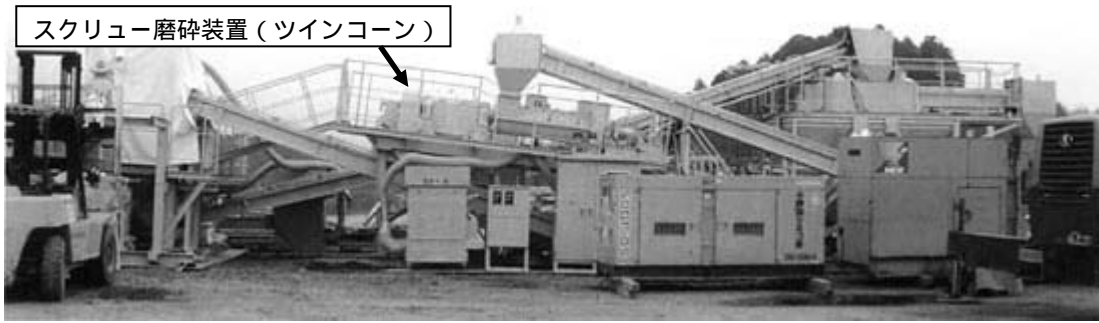


図 - 3 スクリュー磨砕方式の再生骨材製造プラント (TRASS) 外観³⁾

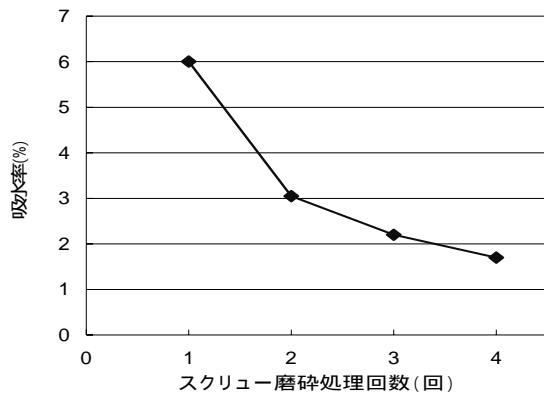


図 - 4 スクリュー磨砕処理回数と吸水率の関係³⁾
(例: TRASS システム)

に伴い、より吸水率の少ない良質な粗骨材を得ることができるが、一方で、発生する 5mm 以下の廃コンクリートの割合は大きくなり、処理回数 4 回では全体の 60% を超える。この廃コンクリートの有効利用が大きな問題となっている。

3. 実験方法

3.1 溶融スラグ原料

5mm 以下の廃コンクリートだけを溶融してスラグ化

することは、溶融温度が高い、粘度が高いなどの問題点があるため、化学成分を溶融しやすい組成にする必要がある。本実験では、主原料として 5mm 以下の廃コンクリート、副原料としてフライアッシュと石灰石を用いて溶融スラグ原料とした。これらの化学組成を表 - 1 に示す。廃コンクリートは、粒径が 1.2mm 以下の廃コンクリート (以下、廃コン A)、粒径が 5.0mm 以下の廃コンクリート (以下、廃コン B) の 2 種類を使用した。廃コン A は、廃コン B に比べ、CaO 量が約 8% 多いが、廃コン A、廃コン B ともに CaO、SiO₂、Al₂O₃ の 3 成分の合計が全体の 80% 以上を占めている。

3.2 溶融スラグの化学組成

三つの原料の混合により目標とする化学組成を図 - 5 の CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三成分状態図⁴⁾に示す。廃コン A および廃コン B の組成をそれぞれ組成点 X_A、組成点 X_B 点にプロットした。組成点 X_A、組成点 X_B は共にトリジマイトの初晶域に位置し、溶融温度は状態図から 1,400 以上となる。本実験では、廃コンクリートにフライアッシュ (図 - 5 上、組成点 Y) と石灰石 (図 - 5 上、組成点 Z) を加えて成分調整し、低融点組成である石英 - ワラストナイト - アノーサイトの共晶点である組成点 e およびワラストナイト - アノーサイト - ゲーレンタイトの共晶点である組成点 p を目標組成とした。組成点 e およ

表 - 1 実験で使用した廃コンクリートおよび副原料の化学組成

	化学成分 (%)											
	ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ti ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	S
廃コン A (1.2mm 以下)	8.71	56.8	10.8	5.8	18.7	2.7	1.64	1.19	0.54	0.07	0.11	1.4
廃コン B (5.0mm 以下)	6.78	70.2	10.1	3.2	11	1.1	1.73	1.74	0.34	0.03	0.06	0.3
フライアッシュ	1.80	52.1	30.7	5.7	4.5	0.7	0.43	0.72	1.83	0.41	0.02	0.3
石灰石	44.2	-	-	-	53.9	0.5	-	-	-	-	-	-

表 - 2 原料粉末使用割合

	混合原料の組成比 (%)					
	混合原料 A			混合原料 B		
	廃コン A	フライアッシュ	石灰石	廃コン B	フライアッシュ	石灰石
e	78.88	12.22	8.90	61.00	17.26	21.74
p	15.36	42.64	42.0	11.80	43.63	44.57

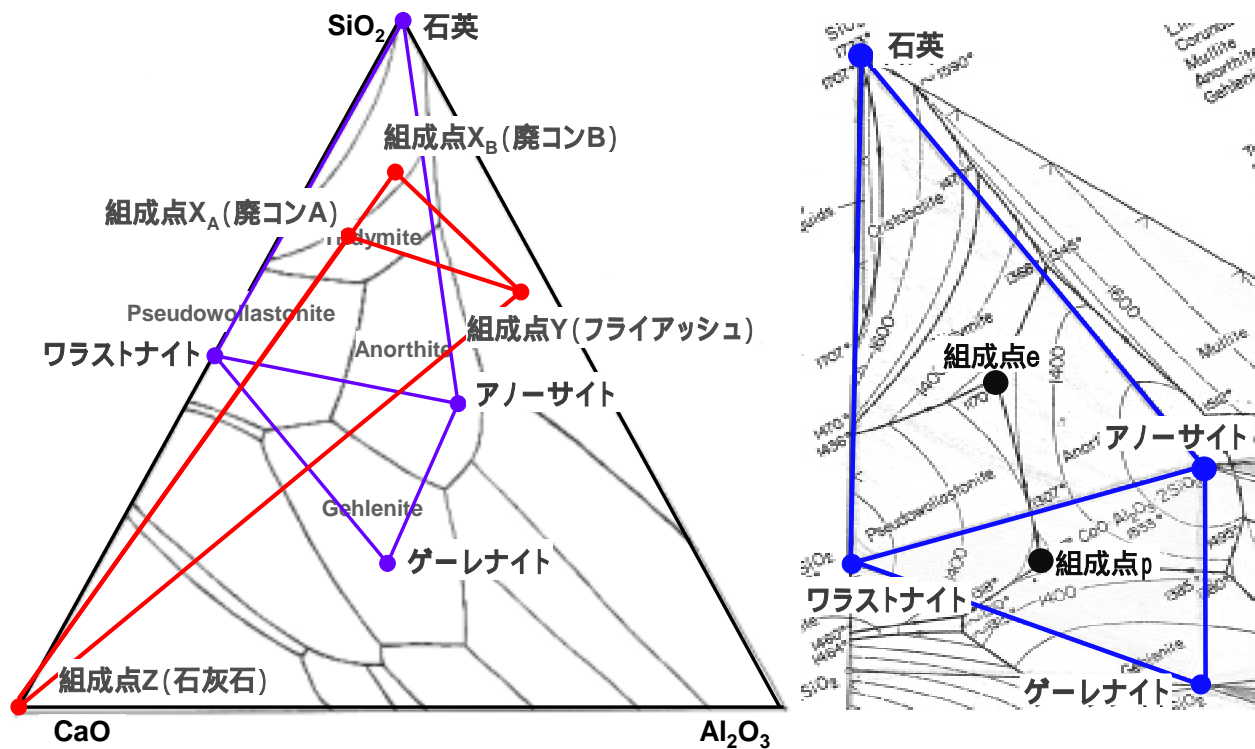


図 - 5 CaO-SiO₂-Al₂O₃の三成分状態図 (1960 E.F.Osborn et al)⁴⁾ と溶融スラグの目標化学組成

び組成点 p の焼成物を 100 とした場合の各原料粉末使用割合を表 - 2 に示す。組成点 e は廃コンクリートの処理量が約 61 ~ 79% と多いのに対し、組成点 p の同処理量は約 12 ~ 15% と少ない。実際の製造を念頭におくと、可能な限り、廃コンクリートが多い組成が望ましいが、組成点 e の方が、組成点 p と比べて、廃コンクリートの原料割合が大きい。また、組成点 p は他の都市ごみ溶融スラグの組成範囲であり、骨材としての実績が多い²⁾ ものである。

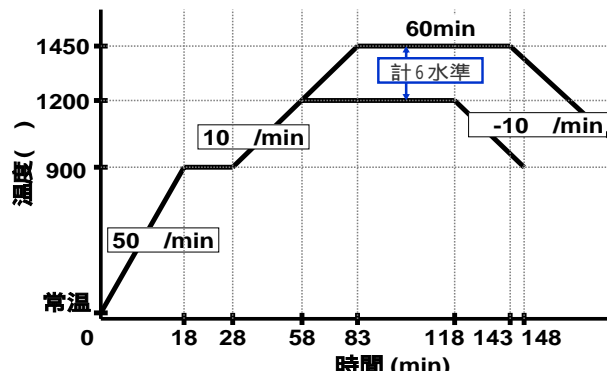


図 - 6 焼成温度履歴

4. 実験結果および考察

4.1 溶融スラグの製造

組成点 e 及び組成点 p の化学成分に合わせて混合した原料 (混合原料 A, B) について、最高温度を 1,200 ~ 1,450 間で 50 刻みに計 6 水準とし、小型電気炉により、図 - 6 の焼成温度履歴に従い焼成した。900 までの昇温速度は 50 /min とし、900 で石灰石の脱炭酸を行うため 10 分間保持し、900 からの昇温速度は 10 /min とし、最高温度で 1 時間焼成した後 -10 /min で 900 まで降温した。一つの水準の焼成時間は約 150 - 200 分の間にある。最大焼成時間を 3 時間半以下にしたのは、実際の製造プラントの運転を考慮したことにある。焼成では、銅精錬用の黒鉛ルツボ # 1 (銅 1kg を溶融できる容量) を用いて、1 バッチの原料試料量は 20g ~ 40g 程度とした。焼成後は電気炉内からルツボを取り出し、

空冷した後、ルツボを圧壊して溶融スラグを取り出した。

4.2 溶融スラグの性状

小型電気炉を用いて焼成した溶融スラグについて、密度測定 X 線回折装置による鉱物相の同定などを行った。焼成温度を変えた組成点 e および組成点 p の溶融スラグの密度変化を図 - 7、図 - 8 に示す。組成点 p では、すべての焼成温度域で溶融スラグの密度は 2.5g/cm³ を上回っていたが、組成点 e では、1,400 以上の温度での焼成では密度が 2.5g/cm³ を下回るものがあった。なお、密度 2.5g/cm³ の値は、JIS A 5031 「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」⁵⁾ のスラグ骨材として規定されている下限値であり、コンクリート用骨材として利用するためにはこの値を上回る必要がある。従って 組成点 e においては、1,400 より低い温度での焼成が適していると考えられ

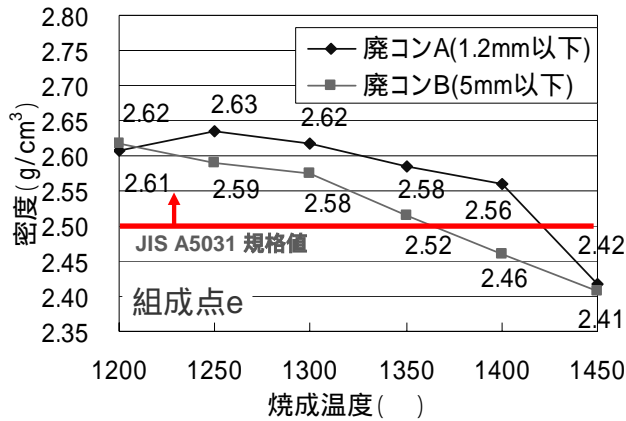


図 - 7 溶融スラグ e の密度

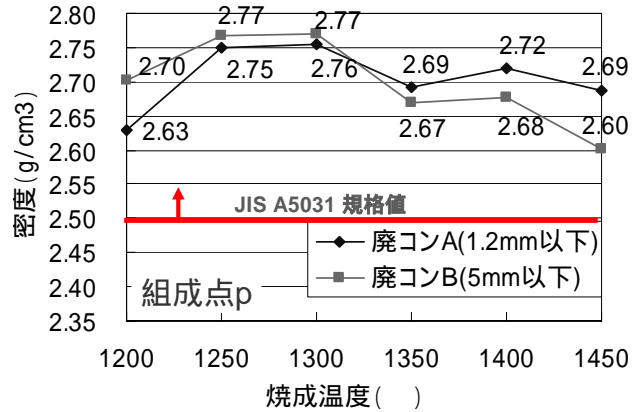


図 - 8 溶融スラグ p の密度

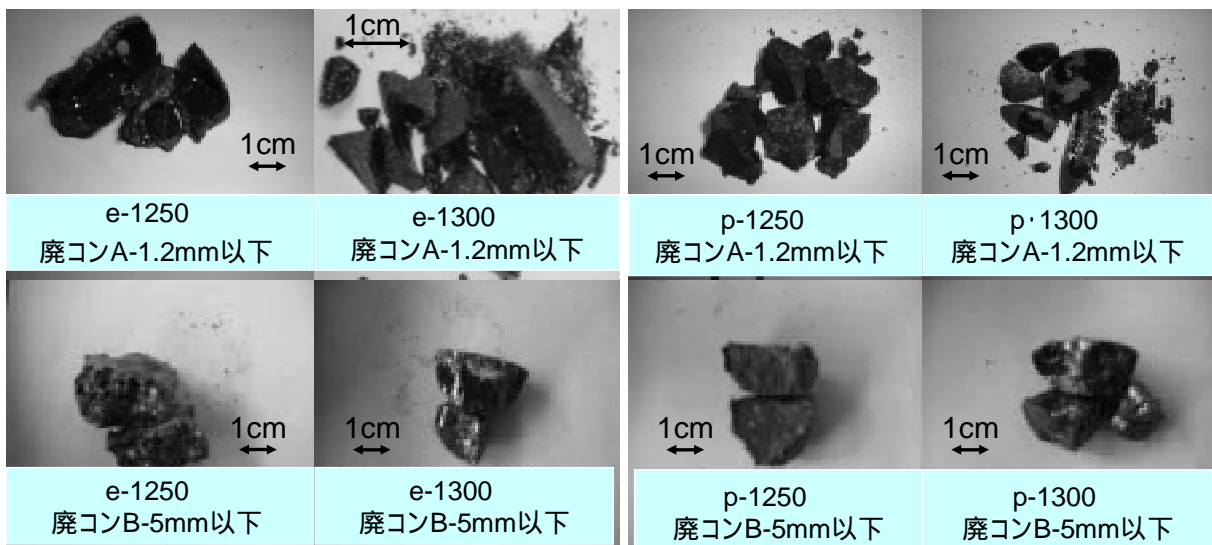


図 - 9 小型電気炉焼成スラグ e

図 - 10 小型電気炉焼成スラグ p

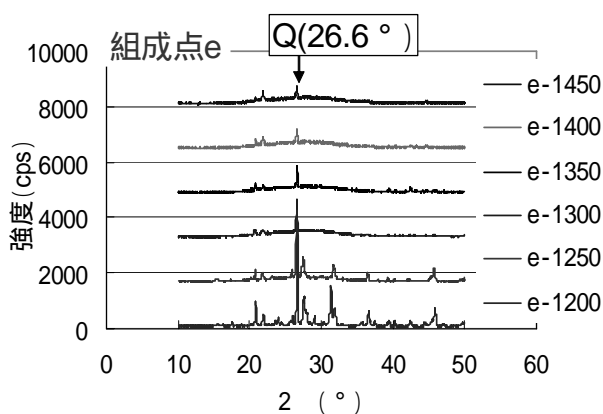


図 - 11 溶融スラグ e の X 線回折結果
Q: 石英の主回折線

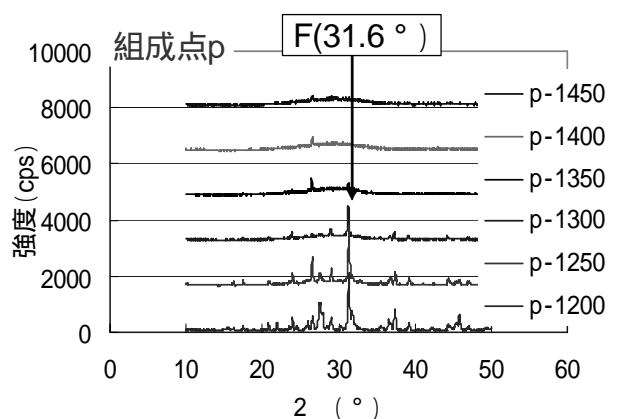


図 - 12 溶融スラグ p の X 線回折結果
F: 長石の主回折線

る。

組成点 e および組成点 p の溶融スラグを図 - 9、図 - 10 に示す。目視観察をすると、廃コン A および廃コン B を使用した両方ともに、1,250 での焼成ではまだ気泡

が多く、溶融液量が少ないため、全体が溶融していないように観察されるのに対し、1,300 以上の温度での焼成では、全体が溶融し、一体化してガラス質になっていることが分かった。廃コンクリートの粒径が最大径 1.2mm

の廃コン A 及び 5mm の廃コン B においても溶融状態に変わりはなく、原料の廃コンクリートを事前に粉砕することなく原料とすることができた。

また、廃コン B を使用して焼成を行った溶融スラグの X 線回折結果を図 - 1 1, 図 - 1 2 に示す。X 線回折結果より、1,300 以下の焼成では、組成点 e は石英のピーク (26.6°) が強く認められ、組成点 p は長石のピーク (31.6°) が強く認められるが、両組成ともに、1,350 以上の温度で焼成したスラグは、完全に溶融し、ほとんどがガラス質となっていることが分かる。

このことから、目標組成を組成点 e および組成点 p とする溶融スラグを得るのに適当な焼成温度は 1,350 ~ 1,400 の範囲であると判断した。

4.3 溶融スラグの骨材評価

溶融スラグのコンクリート用骨材としての性能試験を実施するには、数 kg の溶融スラグが必要である。ここでは、大型電気炉および大型の銅精錬用黒鉛ルツボ # 8 を用いて、組成点 e および組成点 p について、最高焼成温度を 1,350 で 1 時間溶融を行い、1 バッチ 800 ~ 1,000g の溶融を数回を行い、両組成ともに 10kg 程度のスラグを得た。1,350 で 1 時間溶融後、すぐに電気炉内からルツボを取り出し、溶融状態のスラグを鉄板に流し込み、空冷して溶融スラグを得た。

得られた溶融スラグを図 - 1 3 に示す。目視観察では、

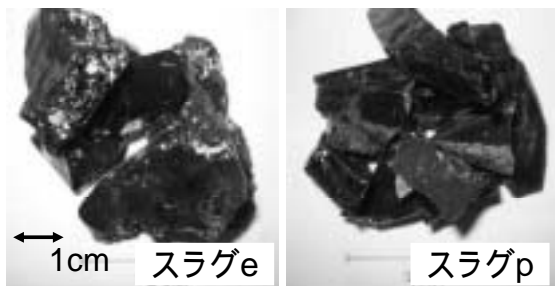


図 - 1 3 大型電気炉溶融スラグ

組成点 e および組成点 p の溶融スラグは共にガラス質の光沢を示し、内在する気泡は少なく、ほぼ完全に溶融しているように観察された。

ここで得られた溶融スラグを、細骨材粒度である 5mm 以下にするために、ジョークラッシャーとトップグラインダーを用いて粉砕した。このスラグを用いて一般のコンクリート用細骨材と同様の骨材試験を行った。現在、廃コンクリートを溶融処理したスラグのコンクリート用骨材としての JIS 規格はないため、JIS A 5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」⁵⁾ と比較し、品質を確認した。骨材試験結果を表 - 3 に示す。なお、比較として実績のある他の溶融スラグの試験値²⁾も表 - 3 に付記する。絶乾密度は、スラグ e よりスラグ p の方が高いものの、ともに JIS 規格値 2.5g/cm³ を上回っており、実績のある比較溶融スラグと同等の数値となっている。吸水率は、両スラグともにガラス質であるため低く、JIS 規格値 3.0% 以下を満足し、比較溶融スラグより低い数値となっている。また、粒形の良否を示す粒形判定実積率については、ともに同等の数値となり、規格値 53% 以上を満足している。また、比較溶融スラグより高い数値であるため、より良い形状であると判断できる。凍結融解抵抗性を示す安定性については、比較溶融スラグに比べ若干高い数値となっているが、ともに規格値 10% 以下を満足している。また、スラグ e については、石英を多く含む組成のためアルカリシリカ反応が危惧されたが、化学法試験の結果、スラグ p および比較溶融スラグに比べ Sc (溶融シリカ量) が多いものの、判定結果は無害であり、問題はなかった。また、スラグ p についても同様に無害であった。アルカリシリカ反応性については、現在、モルタルバー法による試験も実施中である。

以上の結果から、フライアッシュ、石灰石を副原料として、低融点になるよう設定して溶融・製造した廃コン

表 - 3 骨材試験結果

試験項目	スラグ e	スラグ p	比較溶融スラグ ²⁾	JIS A5031 ⁵⁾ 1	試験法	
表乾密度(g/cm ³)	2.69	2.83	2.77	-	JIS A1109	
絶乾密度(g/cm ³)	2.68	2.83	2.75	2.5	JIS A1109	
粗粒率	2.58	2.60	3.27	-	JIS A1102	
吸水率(%)	0.26	0.24	0.6	3.0	JIS A1109	
安定性(%)	0.6	0.6	0.2	10	JIS A1122	
単位容積質量(kg/l)	1.56	1.64	1.58	-	JIS A1104	
粒形判定実積率(%)	58.2	58.0	57.5	53	JIS A5005	
アルカリシリカ反応性(化学法)	Rc(mmol/l)	123	31	88	Rc > Sc 2	JIS A1145
	Sc(mmol/l)	88	20	20		
	判定結果	無害	無害	無害		

¹ 比較として用いた規格値であり、この値を満足することが求められる

² Sc (溶融シリカ量) が 10mmol/l 以上で Rc (アルカリ濃度減少量) が 700mmol/l 未満のとき、Sc > Rc となる場合無害でないと判定

クリート溶融スラグは、コンクリート用細骨材への適用の可能性があった。

5. まとめ

建物解体時に発生する解体コンクリートから再生粗骨材を取り出した後に残る、粒径が 5mm 以下の廃コンクリートに、副原料としてフライアッシュ、石灰石を加えて成分調整した原料を焼成したスラグの物性を調べ、溶融スラグ化条件の検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 粒径が 5mm 以下の廃コンクリートを主原料とし、フライアッシュ、石灰石を副原料として、組成を石英 - ワラストナイト - アノーサイトの共晶点である組成点 e およびワラストナイト - アノーサイト - ゲーレンナイトの共晶点である組成点 p に設定し、電気炉にて 1,350 で 1 時間焼成することにより、低融点組成の溶融スラグが得られた。
- (2) 小型電気炉焼成により得られたスラグは、JIS A 5031 に規定する絶乾密度 ($2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上)、吸水率 (3.0% 以下) を満足し、コンクリート用骨材として利用できる可能性が高いことが分かった。
- (3) 大型電気炉で 5mm 以下の廃コンクリートを主原料に、最高焼成温度 1,350 で 1 時間溶融を行い、骨材性能が評価できる溶融スラグ骨材を製造できた。得られた溶融スラグは、小型電気炉で製造したスラグとほ

ぼ同等の溶融状態であった。

- (4) 大型電気炉で焼成した溶融スラグをジョークラッシャー及びトップグラインダーで細骨材粒径 (5mm 以下) に粉砕し、スラグ細骨材とした。このスラグ骨材を用いて、各種骨材試験を実施し、JIS A 5031⁵⁾との比較により品質を確認したところ、絶乾密度・吸水率・安定性・粒形判定実積率・アルカリシリカ反応性の項目で、すべて規格値を満足しており、コンクリート用細骨材への適用の可能性があった。

参考文献

- 1) 「電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計製造指針(案)」コンクリートライブラリー120, 土木学会, 2005.6
- 2) 佐々木秀幸: 岩手・青森県境不法投棄物を溶融したスラグのコンクリート用骨材への利用に関する研究, 2007 年岩手大学博士論文, p29-41, 2007.3
- 3) 小野田ケミコ(株):
<http://www.chemico.co.jp/09environment/02/trass.html>
- 4) Edward Orton, Jr: Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems (Plate1), American Ceramic Society, 1960
- 5) JIS A 5031: 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材, 2006