

論文 フライアッシュと産業廃棄物溶融スラグを細骨材の一部として使用したコンクリートの性状

亀田 進^{*1}・石井 光裕^{*2}・堺 孝司^{*3}

要旨：産業副産物の有効利用と、枯渇化する天然骨材資源の延命化対策を目的として、フライアッシュと産業廃棄物溶融スラグ（以下、「溶融スラグ」と記す）を細骨材の一部として置換使用したコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状についての各種試験を行った。その結果、溶融スラグを細骨材として使用したコンクリートにフライアッシュを併用することで、ブリーディングの抑制および強度増加の効果があり、さらに凍結融解に対する抵抗性が向上し、乾燥収縮による長さ変化も小さくなり、フライアッシュによる溶融スラグ使用コンクリートの品質改善効果が明らかになった。

キーワード：フライアッシュ，溶融スラグ細骨材，細骨材補充，フレッシュ性状，硬化性状

1. はじめに

国内の石炭火力発電所等から発生する石炭灰は2002年度末実績で約920万トンに達しており、その大半がセメント製造用の粘土代替利用や埋立処分されている状況にある。しかし、近年セメント需要の低迷等により、石炭灰の新たな有効利用拡大技術の開発・実用化が急務となっている。

また、香川県では、瀬戸内海の豊島に不法投棄された産業廃棄物の溶融処理を平成15年度から約10年間で完了させる計画であり、それに伴い年間約3万トンの産業廃棄物溶融スラグ（以下、「溶融スラグ」と記す）の発生が見込まれ、コンクリート用細骨材等としての活用が始まっている。

一方、瀬戸内海沿岸地域では、環境保全意識の高まりや漁業資源の保護の観点から海砂の採取規制強化が進められており、平成17年4月から香川県では採取禁止となっている。

このような背景のもと、著者らは産業副産物の有効利用の拡大と天然骨材資源の延命化対策

を目的として、フライアッシュと溶融スラグを細骨材の一部として使用したときのコンクリート性状についての研究を行っている。

本論文では、細骨材として溶融スラグと砕砂を使用したコンクリートに、フライアッシュを細骨材の一部と置換して用いる混和材（以下、「細骨材補充混和材」¹⁾と記す）として併用したコンクリートのフレッシュ性状ならびに硬化性状に関する基礎的な試験結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表1に示す。

細骨材のベースには、JIS A 5005に適合し、四国での使用実績が多く供給の安定した砂岩砕砂を使用した。

溶融スラグ細骨材は、香川県の基準に適合した豊島産業廃棄物溶融スラグを使用した。

細骨材補充混和材としてのフライアッシュは、JIS A 6201に適合するII種を使用した。

AE減水剤、AE剤については、レディーミク

*1 ㈱ 四国総合研究所 土木技術部長 (正会員)

*2 四国電力 ㈱ 土木建築部石炭灰有効活用拡大グループリーダー 工博 (正会員)

*3 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

表－1 使用材料

材 料	種 類 (品 質 など)
セメント(C)	普通ポルトランドセメント (密度; 3.16g/cm ³ , ブレーン値; 3,290cm ² /g)
細骨材(S)	砂岩砕砂 (表乾密度; 2.57g/cm ³ , 粗粒率; 2.70)
	熔融スラグ細骨材 (表乾密度; 2.79g/cm ³ , 粗粒率; 2.67)
細骨材補充混和材 フライアッシュ	JIS A 6201 II種フライアッシュ (密度; 2.21, ブレーン値; 3,140cm ² /g, 強熱減量; 1.9%)
粗骨材(G)	砂岩碎石 Gmax; 20mm (表乾密度; 2.58g/cm ³ , 粗粒率; 6.75)
混和剤	AE減水剤 (リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体)
	AE剤 (アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤)

表－2 骨材の品質

試 料 名		表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分 (%)	粗粒率	単位容積 質量 (kg/l)	実積率 (%)	粒形判定 実積率 (%)
細骨材	砂岩砕砂	2.57	2.53	2.07	4.38	2.70	1.61	63.6	53.4
	熔融スラグ	2.79	2.79	0.12	0.94	2.67	1.66	59.6	53.8
粗骨材	碎石2005	2.58	2.53	2.01	—	6.75	—	—	—

ストコンクリート工場での使用を想定して、フライアッシュ使用の有無にかかわらず標準的なものを用いた。

骨材の品質を表－2に示す。

熔融スラグ細骨材の特徴として、吸水率が低く、密度が砕砂に比べて大きいことがわかる。また、熔融スラグ細骨材は水砕・ボール破碎されているため粒形はやや角張りがあるが、粒形判定実積率は砂岩砕砂と同等となっている。

2.2 コンクリートの製造および配合条件

コンクリートの練混ぜは二軸強制練りミキサーを使用し、セメント、フライアッシュ、骨材を投入して30秒間の空練りを行った後、水と混和剤を投入して90秒間の練混ぜを行った。

コンクリートの配合条件を表－3に示す。

細骨材の混合率は、砕砂をベースとして熔融スラグを細骨材容積の0,30および60%置換し、さらにフライアッシュは、細骨材に対して0,10,15および20%の容積置換率¹⁾で残りの砕砂の部分と置換した。

水セメント比は、55,60および65%とし、スランプと空気量はそれぞれ10.0±1.0cmおよび4.5±0.5%に目標を設定して、単位水量およびAE

剤添加量で調整した。細骨材率は、単位水量を決定する前段階に、単位水量を一定にした場合にスランプが最大となることを基本として、練上り状態も考慮して最適細骨材率を定めた。

表－3 配合条件

項 目	条 件
粗骨材最大寸法	20mm
水セメント比 (W/C)	55, 60, 65 %
スランプの範囲	10±1 cm
空気量の範囲	4.5±0.5%
熔融スラグの容積混合率※	0, 30, 60 vol.%
フライアッシュの容積置換率	0, 10, 15, 20 vol.%
AE減水剤の使用量	C×0.25% (一定)

※ 細骨材容積(フライアッシュも含む)に対する置換率

2.3 試験項目

試験は、フレッシュコンクリート性状として所定のスランプおよび空気量を得るための配合試験およびブリーディング試験を、また硬化コンクリート性状として圧縮強度試験(20℃,水中養生),乾燥収縮試験(20℃, R.H.60%恒温恒湿環境下での長さ変化試験),凍結融解試験(A法300サイクル)および促進中性化試験(20℃, R.H.60%,炭酸ガス濃度5%環境下での中性化深

表－4 配合試験結果

溶融スラグ容積混合率 (%)	FA容積置換率 (%)	砕砂容積混合率 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)								スランブ (cm)	空気量 (%)	
					水	セメント	溶融スラグ	フライアッシュ	砕砂	粗骨材	AE減水剤 (C × %)	AE剤 (C × %)			
0	0	100	60	45	178	297	0	0	790	969	0.25	0.0017	10.0	4.4	
	10	90		43	176	293	0	65	683	1009	0.25	0.0084	9.5	4.9	
	15	85		41	176	293	0	93	615	1045	0.25	0.0126	10.5	4.9	
	20	80		40	177	295	0	121	563	1060	0.25	0.0156	10.0	4.5	
30	0	70		43	178	297	246	0	528	1004	0.25	0.0011	10.5	4.2	
	10	60		42	176	293	241	64	444	1027	0.25	0.0060	9.5	4.6	
	15	55		41	173	288	237	94	400	1052	0.25	0.0084	11.0	4.4	
	20	50		40	176	293	230	121	353	1062	0.25	0.0114	10.5	4.3	
60	0	40		44	178	297	503	0	309	987	0.25	0.0006	9.5	4.5	
	15	25		41	168	280	479	95	184	1063	0.25	0.0087	9.5	4.4	
0	0	100		65	47	181	278	0	0	829	938	0.25	0.0016	10.5	4.6
	15	85			44	174	268	0	102	669	1006	0.25	0.0120	10.0	4.2
30	0	70	45		181	278	258	0	555	973	0.25	0.0010	10.5	4.6	
	15	55	43		171	263	252	100	426	1031	0.25	0.0099	10.5	4.4	
60	0	0	44		182	280	504	0	310	989	0.25	0.0006	11.5	4.9	
	15	25	42		166	255	498	99	191	1060	0.25	0.0078	9.0	4.4	
0	0	0	55		44	173	314	0	0	772	986	0.25	0.0018	10.5	4.2
	15	85			40	175	318	0	90	594	1052	0.25	0.0117	10.0	4.6
30	0	0			43	173	314	246	0	528	1004	0.25	0.0011	9.5	4.1
	15	55			41	172	313	235	93	396	1041	0.25	0.0105	9.5	4.8
60	0	0			42	173	314	480	0	295	1021	0.25	0.0009	10.0	4.5
	15	25			40	168	305	462	92	177	1069	0.25	0.0069	10.5	4.7

さ測定)についてそれぞれの JIS に準拠して実施した。また、気泡間隔係数 (気泡間隔係数および空気量の試験方法) の測定を ASTM C 457 に準拠して実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート性状

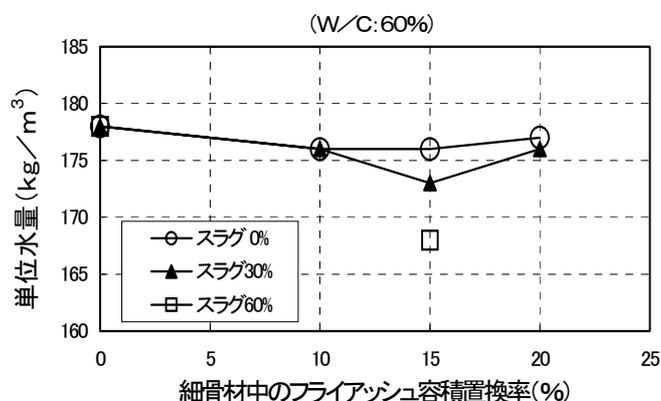
所定のスランブと空気量が得られたコンクリートの配合試験結果を表－4 に示す。

ここでは、主にフライアッシュの容積置換率が配合要因に与える影響について考察する。

(1) 単位水量

フライアッシュの容積置換率と単位水量の関係を図－1 に示す。

この図より、溶融スラグ細骨材の混合率にかかわらず、フライアッシュを細骨材補充することによって単位水量が低減している。これは、角張った粒形の細骨材を球形のフライアッシュで置換したことによるボールベアリング効果によるものと考えられる。ただし、単位水量の低減効果はフライアッシュ容積置換率によって変化し、水セメント比 60%の場合、フライアッ



図－1 フライアッシュ容積置換率と単位水量の関係

シの容積置換率が 15%のとき最も単位水量が低減している。

(2) AE 剤量

フライアッシュ容積置換率と AE 剤使用量の関係を図－2 に示す。

この図より、容積置換率の増加とともに AE 剤量は増加している。この原因は、フライアッシュ量の増大に伴いフライアッシュ中の未燃炭素分が混和剤中の空気連行成分を吸着する割合が増えることによる影響と考えられる。

(3) 細骨材率

配合の種別と細骨材率との関係を図-3に示す。

この図より、フライアッシュなしの場合、水セメント比が5%大きくなると細骨材率は約1%大きくなる。

また、それぞれの配合にフライアッシュを15%細骨材補充することで、細骨材率は平均3%低下する。これは、フライアッシュの増加とともにコンクリート中の粉体量が増加し、粘性が増加したため、所定のワーカビリティを得るために細骨材率が小さくなったものと考えられる。

これらの傾向は、既往の研究結果^{2,3)}と同様である。

(4) ブリーディング量

配合の種別とブリーディング量の関係を図-4に示す。

この図より、コンクリートのブリーディング量は、溶融スラグの混合率が増えるほど、また、水セメント比が大きくなるほど多くなる傾向があるが、いずれの場合もフライアッシュを補充することによりブリーディング量は低下している。ブリーディング量の低下量は、水セメント比60%でフライアッシュを15%補充した場合で平均 $0.05\text{cm}^3/\text{cm}^2$ である。このように、フライアッシュの利用は、単位水量の低減に加えて粉体量が増加したことによりブリーディング量を抑制させる。

3.2 硬化コンクリート性状

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-5に示す。

この図より、溶融スラグ細骨材の混合率が増えるほど、圧縮強度は低下する傾向にある。

しかし、フライアッシュを補充することによって材齢28日から強度増加が若干認められ、材齢91日では約20%の強度増加となっている。これは、溶融スラグ使用による圧縮強度低下分を上回る強度増加であり、フライアッシュの鉱物質微粉末効果やポゾラン反応によるものと考え

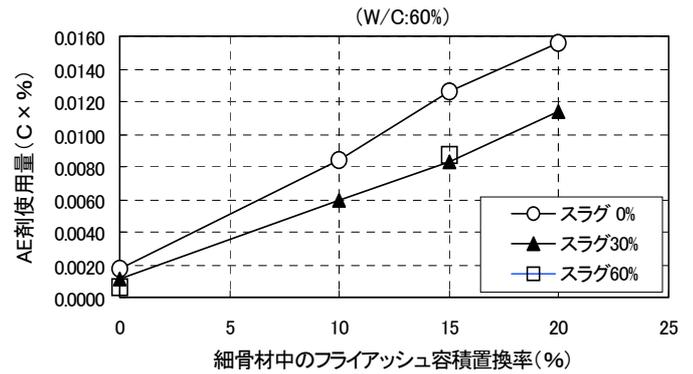


図-2 溶融スラグ混合率と AE 剤使用量の関係

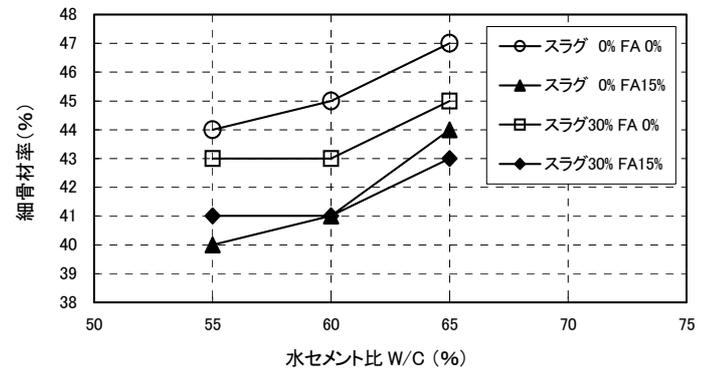


図-3 配合の種別と細骨材率の関係

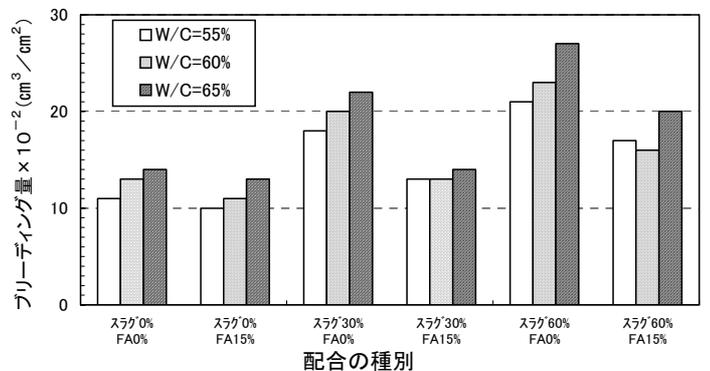


図-4 配合の種別とブリーディング量の関係

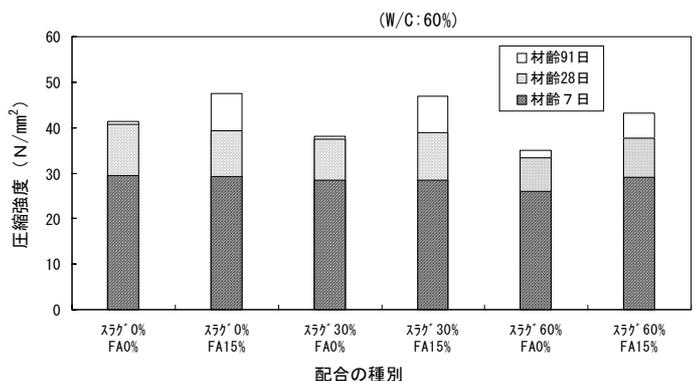


図-5 圧縮強度試験結果

られる。

(2) 凍結融解抵抗性

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数および質量減少率の関係を図-6、図-7に示す。また、気泡間隔係数測定結果を図-8に示す。

図-6、図-7より、相対動弾性係数は、全ての配合で300サイクル完了時においても80%以上となっており、溶融スラグの有無による差は小さい。また、その時の相対動弾性係数の最小値である耐久性指数は、フライアッシュ無しの場合が平均85であるのに対して、フライアッシュを15%補充することで平均90と大きくなっている。

質量減少率についても、フライアッシュ無しの場合には平均1%であるが、フライアッシュを15%補充することで平均0.5%と小さくなっている。

一方、図-8より、気泡間隔係数は、フライアッシュ無しの場合には平均325 μm であるが、フライアッシュを15%補充することで平均230 μm と小さくなっている。

以上これらの現象は、微細な球形粒子であるフライアッシュを補充することにより、AE剤の添加量が増加したこともあり、微細な気泡が均一に分散していることを示している。

この試験結果は、凍結融解に対する抵抗性を向上させていると考えられる。

(3) 乾燥収縮による長さ変化

経過日数と長さ変化率との関係を図-9に示す。この図より、溶融スラグやフライアッシュの有無による乾燥収縮の大きな差は認められないが、詳細に見ると、フライアッシュを補充することによって若干乾燥収縮が小さくなっている。

これは、フライアッシュを補充した配合は単位水量が小さいとともに、細骨材率が小さいことに伴う単位粗骨材量の増加等によるものと考えられる。

このフライアッシュの使用による乾燥収縮の減少傾向は、既往の研究^{2),3)}と同様の傾向である。

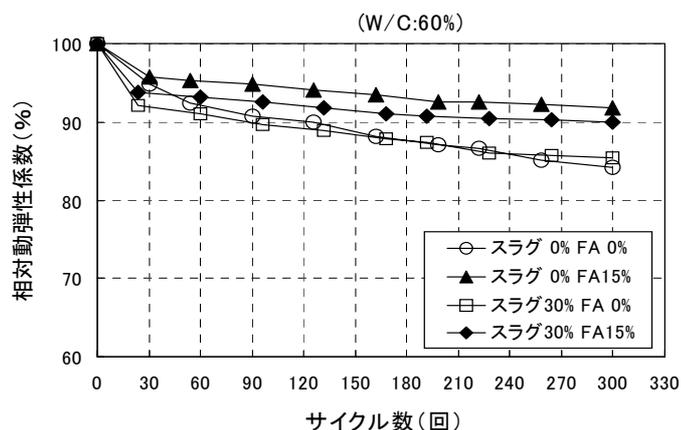


図-6 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係

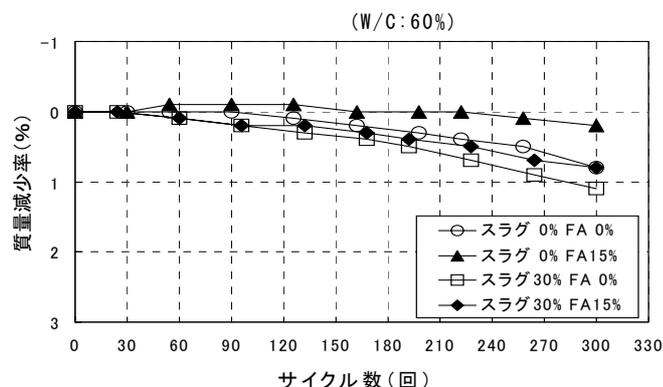


図-7 凍結融解サイクル数と質量減少率

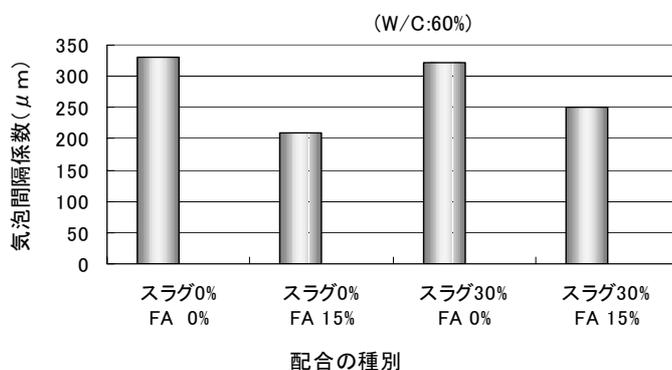


図-8 気泡間隔係数測定結果

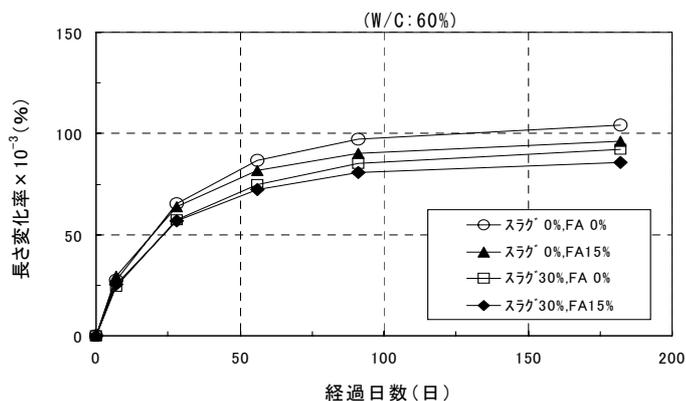


図-9 経過日数と長さ変化率との関係

(4) 促進中性化試験による中性化深さ

コンクリートの促進中性化試験結果を図-10に示す。

この図より、促進養生 182 日時点で各配合での中性化深さは、熔融スラグおよびフライアッシュを使用しない配合で若干浅い傾向があるが、その他の配合では中性化深さの差はほとんど認められない。

一般に、フライアッシュを使用したコンクリートはポゾラン反応によって、セメントの水和によって生成される水酸化カルシウムが消費されるために、中性化が進行する方向に作用すると同時に、組織を緻密化し、中性化の進行を抑制する方向にも作用することから、中性化深さの差はほとんど現れないものと考えられる。

4. 結論

細骨材として熔融スラグと砕砂を混合使用し、さらにフライアッシュを細骨材補充混和材として併用したコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状についての試験結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) フライアッシュを細骨材補充することにより、単位水量は低減する。ただし、単位水量の低減効果はフライアッシュの容積置換率によって変化する。
- (2) 熔融スラグを使用したコンクリートのブリーディング量の増加は、フライアッシュを細骨材補充することによって抑制することができる。
- (3) 圧縮強度は、熔融スラグの使用によって若干低下するが、フライアッシュを細骨材補充することにより長期強度増加が認められる。
- (4) フライアッシュを細骨材補充することにより、耐久性指数は大きくなり、質量減少率は小さくなり、また、気泡間隔係数は小さくなる。これらのことより凍結融解に対する抵抗性が向上していると考えられる。
- (5) 乾燥収縮については、熔融スラグやフライアッシュの有無による差はほとんど認められ

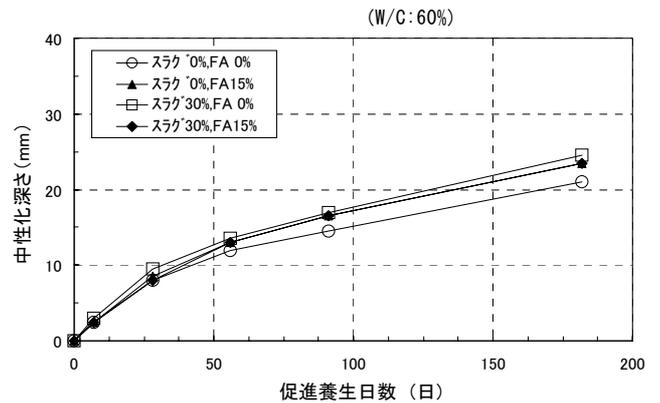


図-10 促進中性化試験結果

ない。

- (6) 促進試験での中性化深さは、熔融スラグやフライアッシュの有無による差はほとんど認められない。

以上、今回の研究結果から、フライアッシュを使用することによって、熔融スラグを細骨材の一部に使用したコンクリートの品質を改善・向上できることが明らかになった。

このことから、産業副産物である石炭灰と熔融スラグをコンクリート用材料として同時に有効利用することが可能であり、循環型社会の構築に寄与するとともに、砕砂など天然骨材資源の延命化にも貢献できるものと考えられる。

謝辞；本研究に対して、骨材資源多様化対応プロジェクト（香川大学主催）の関係各位の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案），2003.3
- 2) 加地貴，石井光裕，岩原廣彦：フライアッシュと銅スラグ細骨材を使用したコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26, No.1, pp.1659-1664, 2004.
- 3) 石井光裕，岩原廣彦，加地貴：細骨材の一部をフライアッシュで補充したコンクリートの性状，電力土木 No.303, pp.119-123, 2003.1