論文　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

加地　貴[*1]・石井　光裕[*2]・岩原　廣彦[*3]

要旨：産業副産物の有効利用拡大と，枯渇化する天然骨材資源の対策を目的として，細骨材容積の 30%に銅スラグ細骨材を使用し，さらに細骨材を補充する混和材としてフライアッシュを細骨材容積の 20%まで置換使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ついての各種試験を行った。その結果，単位水量や細骨材率等の配合上の特徴を把握するとともに，銅スラグ細骨材使用コンクリートへフライアッシュを併用することによるブリーディングの抑制効果および強度増進効果が明らかになり，さらに乾燥収縮と中性化はフライアッシュの有無に依らずほぼ同等であることを確認した。

キーワード：銅スラグ細骨材，フライアッシュ，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 2001 年度実績で約 880 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や，埋立処分場の延命化要請等により，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，銅の精錬工場から副産する銅スラグは全国で年間約 200 万 t，その内四国からは約 80 万 t が発生しており，資源としての利用拡大が望まれている。

一方，瀬戸内海沿岸地域では，天然骨材資源の枯渇化や環境保全意識の高まりから海砂の採取規制強化が進められており，今後も香川県と愛媛県で採取禁止されることになっている。このため，これまでコンクリート用骨材等の分野で海砂への依存度の高かった四国では代替材の確保が必要になっており，国や自治体等では検討会を設けて対策方針[1)]を打している。また，全国的にも海砂等の天然骨材の採取規制や原石山の開発に伴う良質の骨材の枯渇化が問題となっている。

このような背景のもと，産業副産物のリサイクルの推進と，海砂代替材確保や天然骨材資源の延命化のための対策を目的として，石炭灰と銅スラグをコンクリートの天然細骨材に置換して使用する技術の研究を進めている。

本稿では，細骨材容積の 30%に銅スラグ細骨材を使用し，さらにフライアッシュを細骨材の一部に補充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を実施した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究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 に適合する砕砂を使用した。この砕砂は，これまでの使用実績と安定供給面から四国おける海砂代替材の一つとして大きく位置付けられている[1)]。

銅スラグ細骨材は，JIS A 5011-3 に適合する 2.5mm 銅スラグ細骨材(CUS2.5)を使用した。

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[2)]」と記す。）とするフライアッシュは，JIS A 6201 に適合する II 種および IV

*1（株）四国総合研究所　土木技術部　工修　(正会員)
*2 四国電力（株）　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 四国電力（株）　土木建築部石炭灰有効活用拡大グループ副長

表－１　使用材料

材　料	性　状　など
セメント(C)	普通ポルトランドセメント　密度；3.15g/cm^3，ブレーン；3,400cm^2/g
細骨材(S)	砂岩砕砂　表乾密度；2.58g/cm^3，粗粒率；2.73
	銅スラグ細骨材(CUS2.5)，表乾密度；3.51g/cm^3，粗粒率；2.48
細骨材補充混和材[2)] フライアッシュ(FA)	JIS A 6201 II種フライアッシュ　密度；2.28，ブレーン値；3,320cm^2/g，強熱減量；1.3%
	JIS A 6201 IV種フライアッシュ　密度；2.21，ブレーン値；1,890cm^2/g，強熱減量；1.8%
粗骨材(G)	砂岩砕石　Gmax；20mm，表乾密度；2.70g/cm^3，粗粒率；6.68
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	2.58	2.53	2.07	4.38	2.73	1.61	63.6	53.4
	銅スラグ（CUS 2.5）	3.51	3.50	0.31	2.88	2.48	2.15	61.4	55.9
粗骨材	砕石2005	2.70	2.69	0.48	－	6.68	－	－	－

種を使用した。

AE 減水剤，AE 剤については，レディーミク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関わらず標準的なものを用いた。

骨材の品質を表－２に示す。

銅スラグ細骨材の特徴として，密度が大きく，吸水率が低いことがわかる。また，銅スラグ細骨材は水砕されているため，粒形は角張りがあるが，粒形判定実積率は砕砂よりも大きかった。

2.2 配合条件

コンクリートの配合条件を表－３に示す。

細骨材の混合については，銅スラグ細骨材の混合率を，普通細骨材と同様に取り扱うことができる範囲内[3)]でできるだけ高く設定することとして，細骨材容積の 30%を置換して使用した。さらにフライアッシュは，残りの 70%の細骨材容積に対して所定の容積置換率[2)]で補充した。

スランプと空気量はそれぞれ 8±1cm および 4.5±0.5%に設定して，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%
スランプの範囲	8±1cm
空気量の範囲	4.5±0.5%
銅スラグの容積置換率※	30vol.%
フライアッシュの容積置換率※	0(基準)，10，20vol.%
AE減水剤の使用量	C×0.25%（一定）

※　細骨材容積（ただし，フライアッシュも含む）に対する置換率

2.3 試験項目

コンクリートの練混ぜは二軸強制練りミキサを使用し，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。

試験は，フレッシュコンクリート性状としてスランプ，空気量，ブリーディングを，また硬化コンクリート性状として圧縮強度（標準養生），乾燥収縮（20℃，R.H.60%恒温恒湿環境下での長さ変化試験）についてそれぞれの JIS に準拠して

表－４　選定配合

配合種別	W/C (%)	フライアッシュ 種類	フライアッシュ 容積置換率[2] (vol.%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m³) 水	セメント	砕砂	銅スラグ (CUS2.5)	フライアッシュ	粗骨材	AE減水剤 (cc/m³)		AE剤 (cc/m³)
基準	55	―	0	44	171	311	544	316	0	1037	778	C×0.25%	0
II-10		II種	10	40	159	289	436	298	64	1139	723		15.9
II-20			20	37	159	289	335	274	119	1199	723		61.2
IV-10		IV種	10	40	161	293	433	295	62	1137	733		17.8
IV-20			20	37	162	295	333	274	115	1188	738		61.5

実施した。また促進中性化試験（30℃, R.H.60%, 炭酸ガス濃度 5%環境下での中性化深さ測定）を日本建築学会の方法[4]で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 配合選定

所定のスランプと空気量が得られるコンクリート配合の選定結果を表－４に示す。以下では，フライアッシュの種類と容積置換率の配合への影響について考察する。

(1) 単位水量

選定配合の単位水量を比較した結果を図－１に示す。また，試験条件が同一で，銅スラグ細骨材とフライアッシュを使用せず，砕砂単独で行った既往の試験データ[5]も図中に併記する。

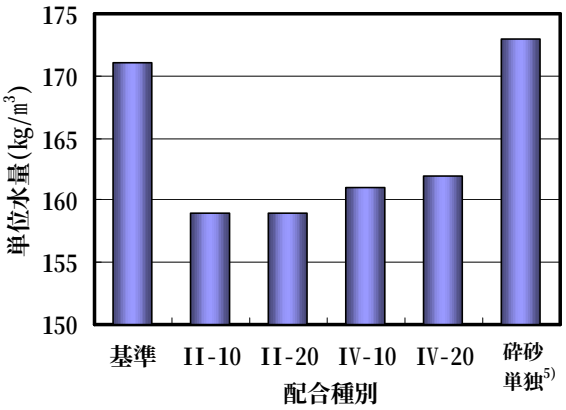
この図より，銅スラグ細骨材を使用したコンクリートにフライアッシュを細骨材補充することによって，単位水量が顕著に低減することがわかる。これは，角張った粒形の細骨材を球形のフライアッシュで置換したことによるボールベアリング効果によるものと考えられる。

フライアッシュの種類の影響については，球形粒子の多い II 種の方がⅣ種よりも単位水量が 2～3kg/m³ 少なかった。

なお，本実験における何れのコンクリートも，砕砂単独使用コンクリートより単位水量が少なくなっている。

(2) AE 剤量

選定配合の AE 剤量を比較すると，表－４のとおりフライアッシュのII種とIV種の違いにかかわらず，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，フライアッシュ中の未燃炭素分が混和剤中の空気連行成分を吸着することによる影響と考えられる。なお，これは既往の研究[5]による銅スラグ細骨材を使用しないコンクリートと同様の傾向である。



図－１　単位水量の比較

(3) 細骨材率

選定配合の細骨材率を比較すると，表－４のとおりフライアッシュのII種とIV種の違いにかかわらず，容積置換率の増加とともに細骨材率は低下している。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，所要のワーカビリティーを得るためには必然的に細骨材率が小さくなったものである。この傾向は，既往の研究[5]による銅スラグ細骨材を使用しないコンクリートと同様の傾向であり，また，フライアッシュの容積置換率の変化に対する細骨材率の変化量（容積置換率 10%増加に対して細骨材率 3～4%低下）は，土木学会四国支部制定の「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）」[2]に示されている変化量（容積置換率 5%増加に対して細骨材率約 2%低下）とほぼ一致している。

3.2 フレッシュコンクリート性状

(1) スランプおよび空気量の経時変化

スランプおよび空気量の経時変化測定結果をそれぞれ図－２，図－３に示す。

測定方法は，練混ぜ後，練り板上に静置し，所定の時間（練混ぜ後 0，30，60，90 分後）に切り返しを行った後に試験を実施した。

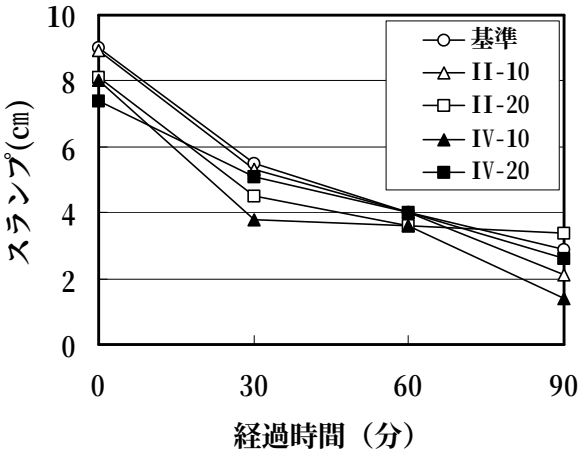
測定の結果，スランプ，空気量ともに，フライアッシュの種類や容積置換率の違いによる明確な差は認められず，フライアッシュを使用していない基準コンクリートとほぼ同等であり，既往の研究 [5]による銅スラグ細骨材を使用しないコンクリート（ただし，水セメント比は 60%）と比較してもほぼ同等の低下量であった。したがって，銅スラグ細骨材を使用し，さらにフライアッシュを細骨材補充したコンクリートは，練上がり時に所定のスランプおよび空気量を確保することにより，その後の低下は通常のコンクリートと同等と見なしてよいと考えられる。

(2) ブリーディング

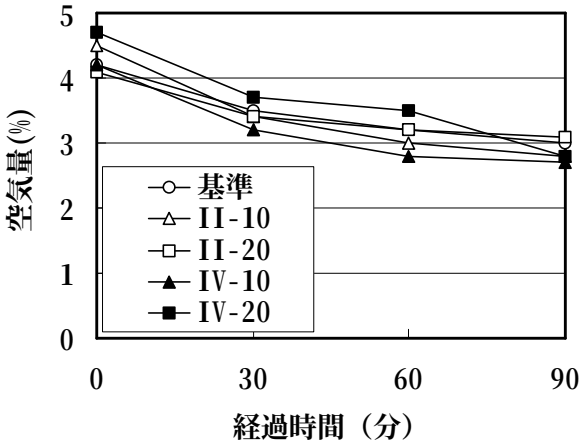
練混ぜ直後からのブリーディング試験結果を図－４に示す。

フライアッシュを使用していない基準コンクリートのブリーディング水の質量は約 310g（ブリーディング量では約 0.62cm^3/cm^2）であり，既往の研究 [5]による砕砂単独使用のコンクリート（ただし，水セメント比は 60%）の約 120g（ブリーディング量では約 0.26cm^3/cm^2）とを比較すると，基準コンクリートのブリーディング水の質量が約 2.5 倍となっている。砕砂に対する銅スラグ細骨材の混合率が 30%では，砕砂単独使用の場合と同程度との報告 [6]もあるが，本実験では顕著な増加が認められ，この原因としては，銅スラグ細骨材の表面が滑らかで，かつ密度が大きいことによるものと考えられる。

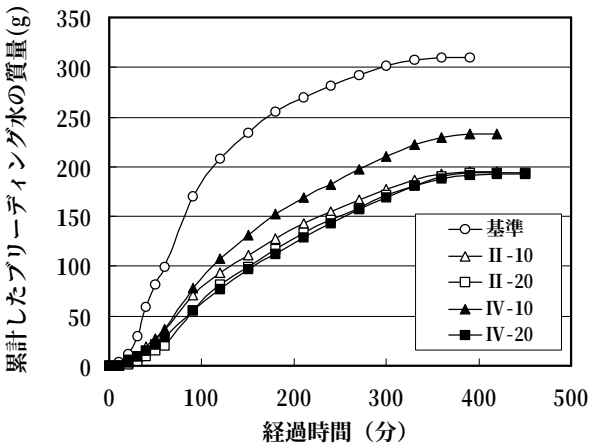
基準コンクリートに対してフライアッシュを細骨材補充したコンクリートはブリーディング



図－２　スランプの経時変化



図－３　空気量の経時変化



図－４　ブリーディング試験結果

が減少しており，フライアッシュ II 種を 20%置換した場合の減少割合は約 37%である。これは，単位水量の低減効果とともに，粉体量の増加に伴うペーストの粘性増加により，粗骨材や銅ス

ラグ細骨材の沈降を抑制したためと考えられる。

フライアッシュの種類や容積置換率の影響は比較的小さいが，IV 種フライアッシュよりも II 種フライアッシュの方がブリーディングは少なく，また容積置換率 10%よりも 20%の方がブリーディングが少ない傾向が認められる。これは，フライアッシュ II 種の方が IV 種よりも粉末度が高く，また粉体量が多いほど水の捕捉効果が高いためと考えられる。

本実験結果から，砕砂に銅スラグ細骨材を混合すると，その使用条件によっては材料分離を助長する傾向にあると言えるが，これにフライアッシュを細骨材補充混和材として使用することは，この抑制に効果的であると言える。

3.3 硬化コンクリート性状

(1) 圧縮強度

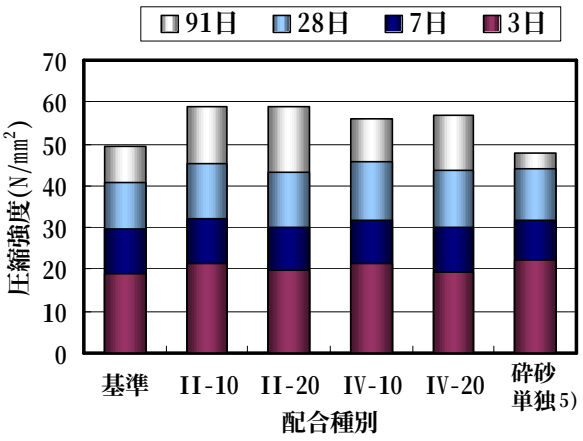
標準養生を行ったコンクリートの圧縮強度試験結果を図－５に示す。また，試験条件が同一で，銅スラグ細骨材とフライアッシュを使用せず，砕砂単独で行った既往の試験データ[5]も図中に併記する。

この図より，銅スラグ細骨材を使用する場合のフライアッシュの有無，種類，容積置換率に関わらず，材齢 3 日及び 7 日の圧縮強度はほぼ同等となっている。材齢 28 日では，フライアッシュを細骨材補充したコンクリートが基準コンクリートよりも若干強度は高くなり，さらに材齢 91 日ではその傾向は大きくなっている。これは，フライアッシュのポゾラン反応によるものと考えられる。

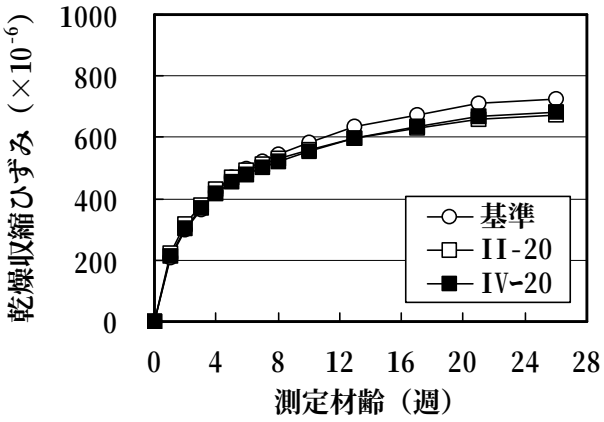
基準コンクリートの圧縮強度は，砕砂単独使用コンクリートよりも材齢 91 日において大きくなっており，これは川西の報告[6]と同様の傾向である。この基準コンクリートに，さらにフライアッシュを細骨材補充することによって長期強度が増進することから，銅スラグ細骨材とフライアッシュの併用は強度発現に有効である。

(2) 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮試験結果を図－６に示す。



図－５　圧縮強度試験結果



図－６　乾燥収縮試験結果

この図より，フライアッシュの有無や種類による乾燥収縮ひずみの差はほとんど認められない。詳細に見ると，フライアッシュの使用によって若干乾燥収縮が小さくなっているが，これは，フライアッシュを使用した配合は単位水量が小さいことや，細骨材率が小さいことに伴う単位粗骨材量の増加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[5]による銅スラグ細骨材を使用しないコンクリートと同様の傾向である。

なお，フライアッシュの II 種と IV 種の違いによる影響は認められなかった。

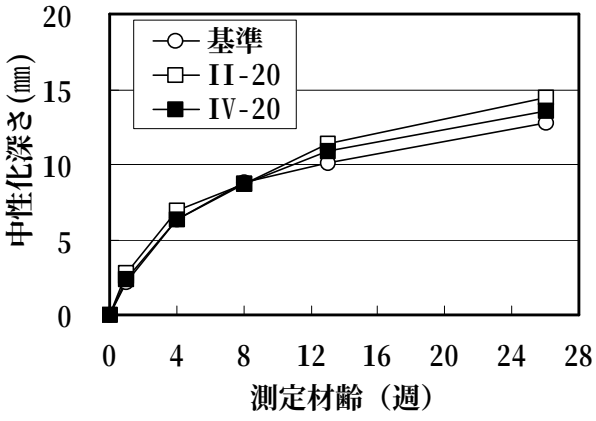
(3) 中性化深さ

コンクリートの促進中性化試験結果を図－７に示す。

この図より，フライアッシュの有無や種類による中性化深さの差はほとんど認められない。

詳細に見ると，フライアッシュの使用によって若干中性化深さが大きくなっているが，これは，フライアッシュのポゾラン反応によって水酸化カルシウムが消費されることや，フライアッシュを使用した配合は単位セメント量が減少しているためであると考えられる。しかし，ポゾラン反応は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。

フライアッシュのII種とIV種では，II種の方が僅かに中性化深さは大きかった。



図－7　促進中性化試験結果

4. 結論

細骨材容積の 30%に銅スラグ細骨材を使用したコンクリートを基準として，これにさらに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に関する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) スランプ，AE 減水剤使用率を一定にした場合の単位水量は，フライアッシュを細骨材補充することによって減少する。

(2) スランプおよび空気量の経時変化はフライアッシュの有無，種類，容積置換率に関わらずほぼ同等である。

(3) 銅スラグ細骨材を使用したコンクリートのブリーディングを，フライアッシュの使用によって抑制することができる。

(4) 圧縮強度は，材齢 7 日まではフライアッシュの有無に関わらずほぼ同等であり，材齢 28 日以降はフライアッシュを細骨材補充することによる強度増進が認められる。

(5) 乾燥収縮ひずみについては，フライアッシュの有無や種類による差はほとんど認められない。

(6) 促進中性化試験の結果，フライアッシュの有無や種類による中性化深さの差はほとんど認められなかった。

今回の研究結果から，フライアッシュによって銅スラグ細骨材使用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銅スラグをコンクリート用材料として，同時に，かつ比較的大量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。

参考文献

1) 四国地区骨材資源対策検討会：四国地区骨材資源対策の基本方針（概要），2003.3

2) 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

3) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー 92，1998.2

4) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，pp.179-184，1991.7

5) 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

6) 川西政雄：四国地区におけるコンクリート用骨材の現状と将来　F-3　銅スラグの状況，土木学会四国支部　第 9 回技術研究発表会講演概要集，pp.3-8，2003.5