

論文 品質改善した石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの諸性状

古川 雄太¹⁾・石川 嘉崇²⁾・阿部 道彦³⁾・友澤 史紀⁴⁾

要旨：石炭溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの問題点として、空気量の調整に多量の AE 助剤を必要とし、ブリーディング量が大きく、これに起因して凍結融解抵抗性が低くなることが問題として挙げられている。本研究は、空気量の調整を妨げるとされるカーボンを含む強熱減量を粒度ごとに測定し、多量に強熱減量を含む 0.15mm 以下の微粒分を除去することで空気量の調整を容易にし、取り除いた微粒分の代替として碎石粉を細骨材の 5% 置換として用いることでブリーディング量が抑えられ、その結果、良好な凍結融解抵抗性を有することが確認できた。

キーワード：石炭溶融スラグ、空気量、ブリーディング、凍結融解抵抗性、強熱減量、碎石粉、

1. はじめに

近年の温室効果ガスの削減、天然資源の枯渇化などを背景に、様々な分野で副産物の有効利用、廃棄物の削減が行われてきた。火力発電所に関しても、従来の微粉炭を燃料にした火力発電方式から、石炭をガス化して発電する石炭ガス化複合発電に移行されてきている¹⁾。この発電方式は、微粉炭を高温・高圧下で酸素と反応させて、水素・一酸化炭素を主成分とする石炭ガス化ガスをガスタービンに供給し発電を行った後、排ガスから排熱回収ボイラで熱回収し、ガス化設備で発生した蒸気と併せて蒸気タービンで発電を行うものである。

従来の発電方式では、残渣はフライアッシュとして排出され、有効利用されてきた。しかしながら、石炭ガス化複合発電の残渣は、ガラス質の石炭溶融スラグとして排出される。この石炭溶融スラグの有効利用として、コンクリート用細骨材としての有用性に関して研究が行われてきた^{2),3),4)}。しかしながら、石炭溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートは、力学性状や一部の耐久性性状では、天然砂を用いたコンクリートと同等以上の性能を有するものの、空気量の調整に多量の AE 助剤を必要とし、ブリーディング量が大きく、それに伴う凍結融解抵抗性の低下などが課題として挙げられている^{3),4)}。

本研究は、石炭溶融スラグ細骨材の微粒分の除去およ

び細骨材の一部に碎石粉を置換することで、石炭溶融スラグ細骨材を品質改善したコンクリート用細骨材の使用方法について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験はシリーズ 1 とシリーズ 2 で構成されている。シリーズ 1 では、粒度ごとの強熱減量の測定と 0.15mm 以下の微粒分を取り除いた細骨材を用いて空気量の調整を行う実験（空気量調整実験）を行った。シリーズ 2 では、0.15mm 以下の微粒分を取り除いた細骨材に碎石粉を置換した実験（碎石粉置換実験）を行った。

実験の要因と水準を表-1 に示す。水セメント比は 55% と一定にし、空気量調整実験では目標空気量を 3.0%、4.5%、6.0% の 3 水準として、それぞれの目標空気量に対しての AE 助剤の使用量の検討を行った。碎石粉置換実験では、目標空気量を 4.5% とし、碎石粉を 5% と 10% 細骨材の一部として置換して実験を行った。

試験項目を表-2 に示す。シリーズ 1 およびシリーズ 2 ともに同一の試験を行った。項目は、空気量試験、スランプ試験、ブリーディング試験、圧縮強度試験、静弾性係数試験および凍結融解試験である。

表-2 試験項目および方法

試験項目	方法
空気量およびスランプ試験	JIS A 1101, 1128
ブリーディング試験	JIS A 1123
圧縮強度試験	JIS A 1108
静弾性係数試験	JIS A 1149
凍結融解試験	JIS A 1148 (A 法)

表-1 実験の要因と水準

要因	水準	
	シリーズ 1	シリーズ 2
水セメント比	55%	55%
目標空気量	3.0%, 4.5%, 6.0%	4.5%
碎石粉置換率	0%	5%, 10%

*1 東急建設株式会社 修士 (工学) (正会員)

*2 電源開発株式会社茅ヶ崎研究所 上席研究員・博士 (工学) (正会員)

*3 工学院大学工学部建築学科 教授・工博 (正会員)

*4 日本大学生産工学部 教授・工博 (正会員)

2.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³），粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石 2005（絶乾密度：2.63g/cm³，吸水率：0.74%，実積率 61.8%），練混ぜ水は上水道水を使用した。AE 減水剤はリグニンスルホン酸系を使用し，AE 助剤は石炭溶融スラグには非イオン系のフライアッシュ用を使用し，比較用の天然砂にはアルキルエーテル系を使用した。

3. シリーズ 1 空気量調整実験

3.1 概要

シリーズ 1 では，石炭溶融スラグ細骨材に粒度調整や不純物を除くために，湿式磨砕機を用いて磨砕処理を行った時の粒度変化および粒度ごとに含まれる強熱減量を測定した。一般に，強熱減量に含まれるカーボンによって AE 助剤の効果が妨げられるため，カーボンを除去することで空気量の調整を容易にすることを試みた。

3.2 磨砕処理および強熱減量

表-3 に磨砕処理前と処理後の各群の通過質量百分率および強熱減量，図-1 には磨砕処理前と処理後の粒度分布を示す。これによると，磨砕処理前では，1.2mm 以下の通過量が少なく標準粒度範囲に収まっていない。しかし，磨砕処理を施すことで標準粒度範囲内に収まることが認められた。また，磨砕処理前では微粒分量が 1.36% であり，磨砕処理を施すことで微粒分量が 2.60% と増えたが，この値はコンクリート用骨材としては一般的な値であり，磨砕処理を施すことでコンクリート用骨材として十分な粒度分布，微粒分量となることが確認できた。

図-2 に各群における強熱減量を示す。これによると，磨砕前に強熱減量のほとんどが 0.15mm 以下に含まれていることが認められた。また，磨砕後に 0.075mm 以下の強熱減量が約半分となっているが，これは磨砕処理を施すことで 0.075mm 以下の質量割合が増え，その増加分に強熱減量が含まれていなかったために，見掛け上は強熱減量が小さくなった。全体の強熱減量をみても，磨砕前および磨砕後ともに 0.02% であるため，強熱減量のほぼ全てが 0.15mm より小さい粒度群に含まれていることが認められた。しかしながら，強熱減量の割合は全体で 0.02% とごく少量であり，必ずしも強熱減量に含まれるカーボンが AE 助剤の効果を妨げる大きな要因であるかは明確ではない。

3.3 細骨材の水洗処理

3.2 で多くの強熱減量を含むことが認められた 0.15mm 以下の微粒分を取り除くことで，空気量の調整が容易に行えるかを確認するために実験を行った。

表-4 に未処理のもの(EB)と水洗処理を施した(EA)石炭溶融スラグ細骨材および比較用の大井川産陸砂(O)

表-3 粒度分布および強熱減量

ふるい目の寸法 (mm)	各群の質量百分率 (%)		各群の強熱減量 (%)	
	磨砕前	磨砕後	磨砕前	磨砕後
10 以上	0.0	0.0	-	-
5~10	0.3	0.0	0.00	-
2.5~5	13.9	2.7	0.00	0.02
1.2~2.5	52.7	29.6	0.00	0.01
0.6~1.2	21.0	32.7	0.00	0.01
0.3~0.6	6.1	18.3	0.00	0.00
0.15~0.3	3.2	9.8	0.01	0.01
0.075~0.15	1.6	4.9	0.10	0.00
0.075 以下	1.3	2.1	1.46	0.71
全体	1.36 ^{*1}	2.60 ^{*1}	0.02 ^{*2}	0.02 ^{*2}

*1 全体の微粒分

*2 全体の質量に対する強熱減量の合計

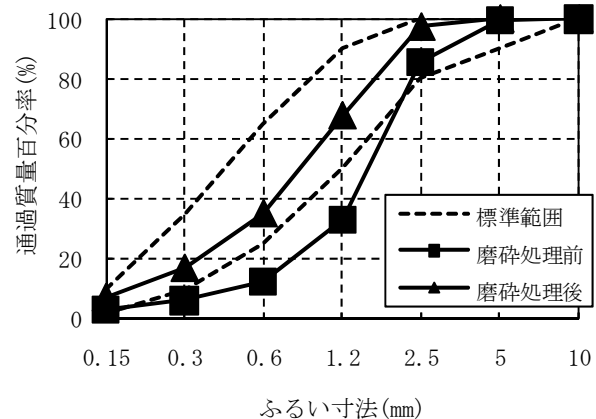


図-1 粒度分布

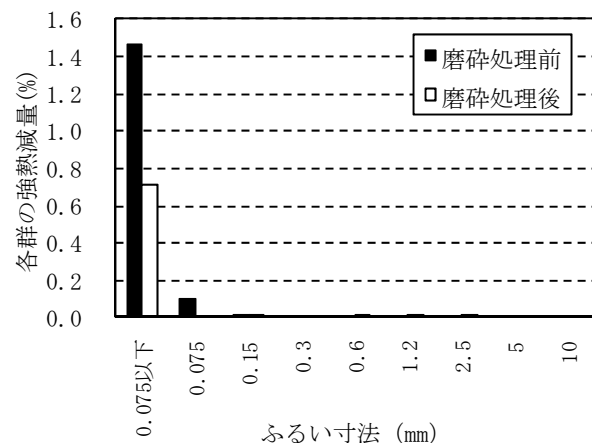


図-2 各群の強熱減量

の物性値を示す。表-4 によると，水洗処理を施すことで僅かではあるが密度が大きくなり，吸水率が小さくなることが認められた。これは水洗処理により強熱減量に含まれるカーボンが取り除かれたためであると考えら

表-4 細骨材の物性値

種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	粗粒率
EB	3.11	0.35	2.54	2.00	64.3	2.91
EA	3.13	0.32	-	1.95	62.2	2.78
O	2.68	1.32	1.80	1.75	65.3	2.87

れる。また、石炭溶融スラグは天然砂と比べ非常に密度が大きく吸水率が小さいといえる。表-5 に調合およびフレッシュ性状を示す。ここでは単位粗骨材かさ容積を一定とする調合方法を採用しているため、各調合で細骨材の量が異なっている。なお、記号の細骨材種類 (EB, EA, O) の後の記号は目標空気量を示している。目標空気量は、3.0%、4.5%および6.0%とした。また、EB-4.5Aの実験データは文献3)のものである。

3.4 空気量と AE 助剤の関係

図-3 に空気量と AE 助剤の関係を示す。これによると、未処理 (EB-4.5A) のものでは空気量 4.5%を得るのに AE 助剤を 0.050%使用しているが、水洗処理を施すことで空気量 4.5%を得るのに AE 助剤は 0.015%と約 1/3 の使用量で所定の空気量を得ることができた。これにより、カーボンが多量に含まれる 0.15mm 以下を除去することで、空気量の調整が容易に行えることが認められた。

全体に含まれる強熱減量は 0.02%とそれほど多くはないため、必ずしも強熱減量のカーボンによって AE 助剤の効果が妨げられているかは明確ではない。AE 助剤を使用していない EA-3.0A の空気量を基準にみると、EA-4.5A で 0.015%の AE 助剤使用量で 3.2%のエントレインドエアが導入され、EA-6.0A では 0.02%の AE 助剤使用量で 4.4%のエントレインドエアが導入されている。つまり、両者とも 0.001%の AE 助剤使用量で約 0.2%のエントレインドエアを得ており、細骨材の量が変わってもエントレインドエアの増加割合は変わらなかった。よって、0.15mm 以下の微粒分を取り除いた石炭溶融スラグ細骨材を用いることにより、天然の細骨材と同様にセメント使用量に対して AE 助剤使用量を調整することで空気量の調整は可能であるといえる。

3.5 ブリーディング試験

前述のとおり、0.15mm 以下の微粒分を取り除くことで容易に空気量の調整を行うことが可能であったが、一般には、微粒分を取り除くことでブリーディング量が増大するといわれている。そのため、ブリーディング量について検討を行った。

図-4 にブリーディング試験結果を示す。これによると、同一空気量であっても水洗処理を施したもの(EA)は未処理のもの(EB)よりもスランプ値が低かったこともあ

表-5 調合およびフレッシュ性状 (シリーズ 1)

記号	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 助剤 C× 使用量(%)	フレッシュ性状	
		W	C	S	G		スランプ (cm)	空気量 (%)
EB-4.5A	46.2	175	318	979	987	0.050	19.0	4.6
EA-3.0A	45.5	184	335	971	983	0.000	16.5	2.0
EA-4.5A	44.5	182	331	934	983	0.015	17.5	5.2
EA-6.0A	43.8	178	324	907	983	0.020	20.0	6.4
O-4.5A	44.8	180	327	818	983	0.004	20.5	5.0

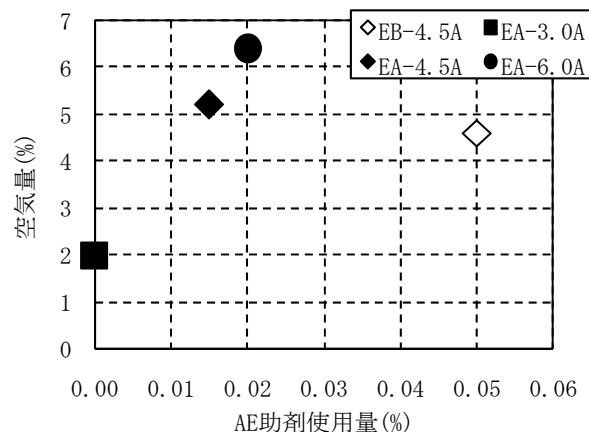


図-3 AE 助剤使用量

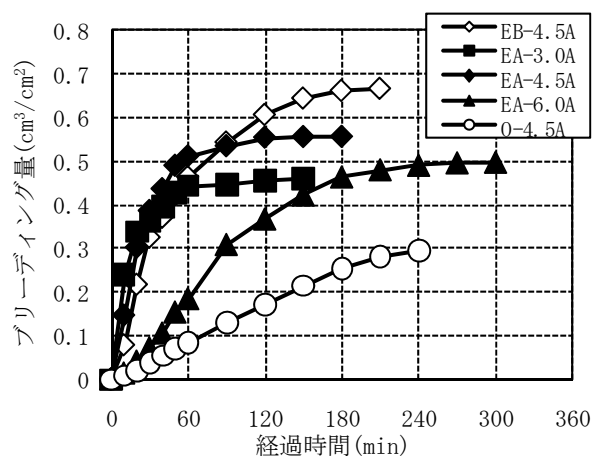


図-4 ブリーディング試験結果 (シリーズ 1)

り、微粒分を取り除くことでブリーディング量の増大は認められなかった。しかしながら、石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは非常に大きいブリーディング量であり、JASS 5-2009 で示されている、凍結融解作用を受けるコンクリートの品質目標である 0.3cm³/cm² 以下を満足しなかった。そのため、シリーズ 2 の碎石粉置換実験で再度検討することとする。

3.6 圧縮強度および静弾性係数試験

ここでは、空気量と力学特性の関係について検討する。また、0.15mm 以下の微粒分を除去することで力学特性に及ぼす影響についても検討した。

図-5 に圧縮強度試験結果を示す。これによると、水洗処理を施したもの(EA)は空気量が 3.0%のものが最も大きい圧縮強度であり、空気量が増えることで圧縮強度の低下が認められた。しかしながら、空気量の増加に伴う強度の低下は一般的な傾向であり、強度低下の割合も約 2.8%と一般的な低下割合であった。また、天然砂(O-4.5A)と水洗処理を施したもの(EA-4.5A)の空気量 4.5%を比較すると、ほぼ同等の圧縮強度であり、同一の空気量であれば十分な強度を有していることが認められる。未処理である EB-4.5A と水洗処理を施した EA-4.5A を比較すると、水洗処理を施した EA-4.5A が約 1 割大きい圧縮強度であり、水洗処理を施すことで強度の増加が認められた。この要因としては、水洗処理を施すことで骨材表面の微粒分が取り除かれ、セメントペーストとの付着力が増したためと推測される。

図-6 には、材齢 1W を 1.0 とした時の圧縮強度比(各材齢の圧縮強度/材齢 1W の圧縮強度)を示す。これによると、O-4.5A が材齢 13W での圧縮強度比が 1.7 程度であるのに対し、石炭溶融スラグを用いたものはいずれも 1.8 以上と大きい値を示した。特に EA シリーズをみると、空気量の大きいものほど圧縮強度比は大きくなる傾向が認められた。石炭溶融スラグを用いた場合、長期での強度発現が大きいことは文献 2)でも示されているが、今回も同様の傾向であった。そして、空気量の増加に伴い強度低下の大きいものほど、材齢の経過に伴う強度増進は大きいものであった。

図-7 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には RC 構造計算規準式による推定値を示している(コンクリート密度： $\gamma=2.4\text{t/m}^3$)。図-7 によると、天然砂(O-4.5A)が骨材による係数 $k_1=1.2$ と 1.0 の間でありやや大きい値であるが、石炭溶融スラグ細骨材(EA)は $k_1=1.2$ よりも大きい値を示した。これは文献 3)と同様の傾向であり、石炭溶融スラグを用いたコンクリートの単位容積質量が大きいことが影響していると考えられる。また、未処理のもの(EB-4.5A)と水洗処理をしたもの(EA-4.5A)を比べると、僅かではあるが圧縮強度の増加に伴い静弾性係数も増加した。

以上のことより、同一空気量であれば水洗処理を施すことで未処理のものよりやや良好な力学性状を示し、天然砂と同等以上の性能を有していることが認められた。

3.7 凍結融解試験

図-8 に凍結融解試験結果を示す。これによると、EA-3.0A が開始直後から相対動弾性係数が大きく下がっており、150 サイクル終了時には 10%を下回った。しかしながら、EA-4.5A および EA-6.0A は O-4.5A と同様に 300 サイクル終了時に 85%以上を有していた。また、EB-4.5A は 300 サイクル終了時に約 60%と小さい値であ

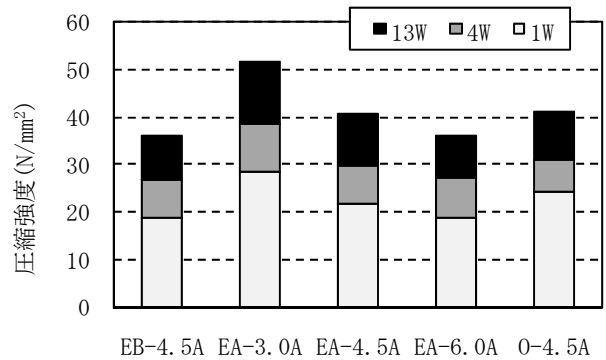


図-5 圧縮強度試験結果 (シリーズ 1)

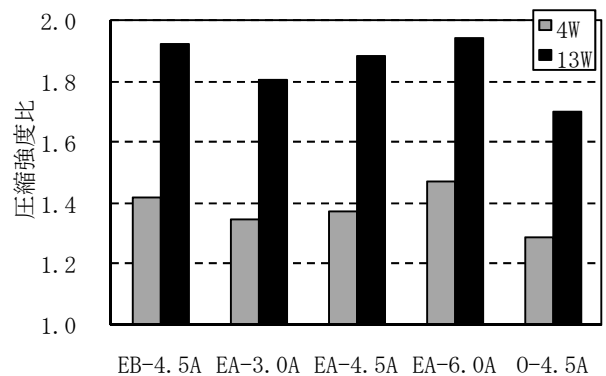


図-6 圧縮強度比

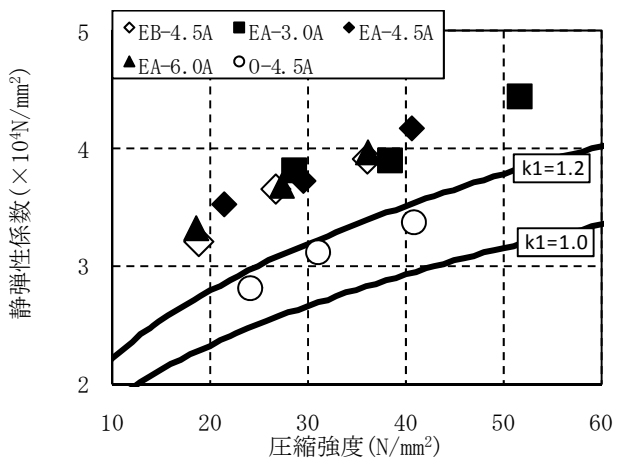


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係 (シリーズ 1)

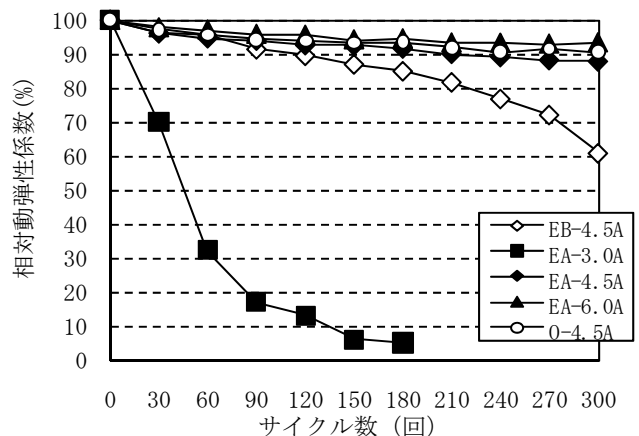


図-8 凍結融解試験結果 (シリーズ 1)

った。これは、微粒分を取り除く前と後で、気泡組織に違いがあったためと考えられる。

図-9 に気泡組織を示す。これによると、未処理のもの(EB)と水洗処理を施したもの(EA)を比べると、未処理のもの(EB)では 100 μ m から 250 μ m の気泡がほぼ同量分布しているのに対し、水洗処理を施す(EA)ことで 100 μ m から 150 μ m の気泡の割合が増えていることが認められた。また、平均気泡径も未処理(EB)では 345 μ m であり水洗処理を施す(EA)ことで 305 μ m となっており、水洗処理を施すことで小さい気泡が導入されることが認められた。この要因としては、微粒分に含まれるカーボンにより AE 助剤の効果が妨げられていたが、水洗処理を施すことで AE 助剤本来の性能が発揮され、径の小さい気泡が導入されたためと考えられる。そのため、水洗処理を施すことで良好な気泡を導入することができ、結果として凍結融解作用に良好に働き十分な耐凍害性を有したのと考えられる。

4. シリーズ 2 砕石粉置換実験

4.1 概要

ここでは、0.15mm 以下の微粒分を取り除いた石灰溶融スラグ細骨材に、文献 5)を参考に砕石粉(CSP)を置換して各種試験を行った。砕石粉は密度：2.70g/cm³、含水率 0.28%のものを使用した。表-6 に調合およびフレッシュ性状を示す。EA の後の記号は砕石粉の置換率を示している。なお、EA-0P は EA-4.5A と同一のものであり、比較用に天然砂 O-0P(O-4.5A と同一)を用いた。単位水量をみると、砕石粉の置換率の増加に伴い単位水量も増加しているが、その増加量は小さい。

4.2 ブリーディング試験

図-10 にブリーディング試験結果を示す。これによると、砕石粉を置換していないもの (EA-0P) は終始大きい値であるが、砕石粉を 5%、10%と置換したもの(EA-5P, EA-10P)は天然砂と同様に終始小さい値であった。また、5%と 10%を比較すると、5%より 10%のほうが小さい値ではあるがその差は小さく、5%の置換で JASS 5-2009 の品質目標値を十分に満足する結果であった。

4.3 圧縮強度および静弾性係数試験

図-11 に圧縮強度の試験結果を示す。これによると、砕石粉を 5%、10%と加えることでいずれの材齢においても圧縮強度が増大した。これは、細骨材の一部に砕石粉を置換したことで水結合材比が低くなり、結果として圧縮強度が大きくなったと考えられる。

図-12 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。これによると、砕石粉を加えることでやや静弾性係数が小さくなったものの、天然砂より大きい値であり十分な弾性係数を有していた。

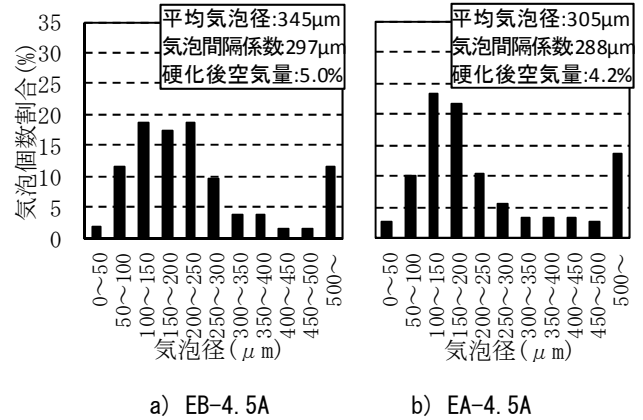


図-9 気泡組織 (シリーズ 1)

表-6 調合およびフレッシュ性状 (シリーズ 2)

記号	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				フレッシュ性状		
		W	C	S		G	スランプ (cm)	空気量 (%)
				S'	CSP			
EA-0P	44.5	182	331	934	0	983	17.5	5.2
EA-5P	46.2	183	333	920	42	950	20.0	4.9
EA-10P	46.0	185	336	862	82	950	19.5	4.5
O-0P	44.8	180	327	818	0	983	20.5	5.0

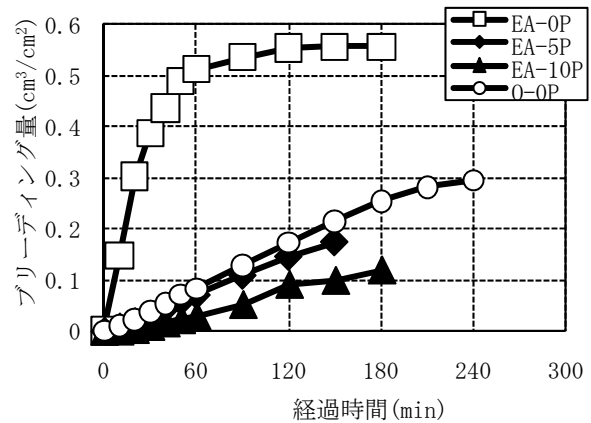


図-10 ブリーディング試験結果 (シリーズ 2)

以上より、砕石粉を細骨材の一部に置換することで力学性状においては天然砂と同等以上の性能を有していることを確認した。

4.4 凍結融解試験

図-13 に凍結融解試験結果を示す。これによると、砕石粉を置換していないもの(EA-0P)においても相対動弾性係数 85%以上を十分に有していたものの、砕石粉を置換することでやや相対動弾性係数が大きくなった。

図-14 に気泡組織を示す。これによると、砕石粉を置換しなかったもの(EA-4.5A=EA-0P)が気泡径 305 μ m であったのに対し(図-9 b), 砕石粉を 5%加えることで 257 μ m と小さくなった。よって、砕石粉を細骨材に 5%置換することで凍結融解作用に対して適切な気泡組織が形成され、十分な性能を有したのといえる。

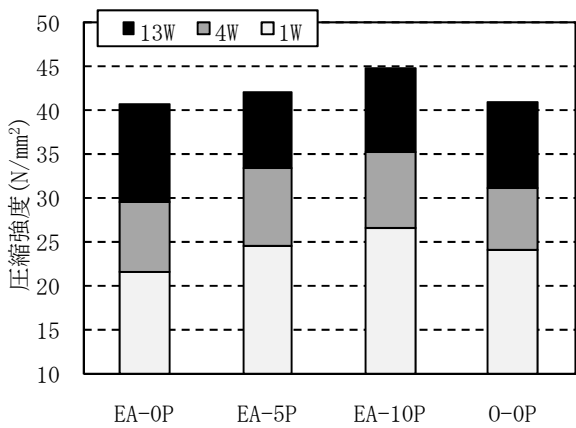


図-11 圧縮強度試験結果 (シリーズ2)

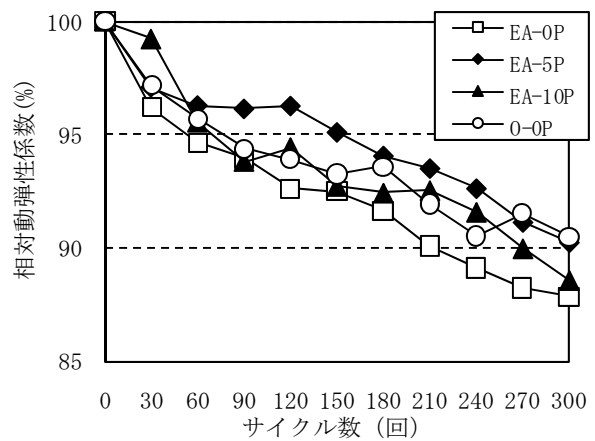


図-13 凍結融解試験結果 (シリーズ2)

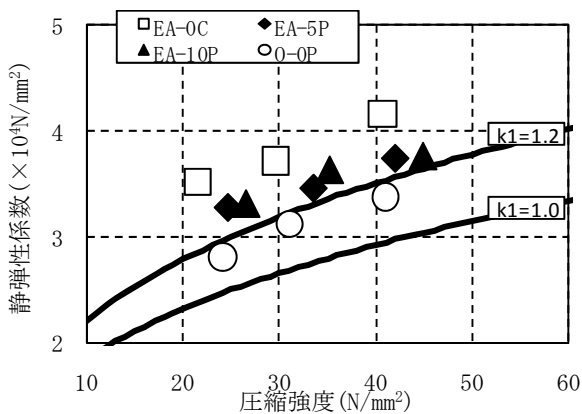
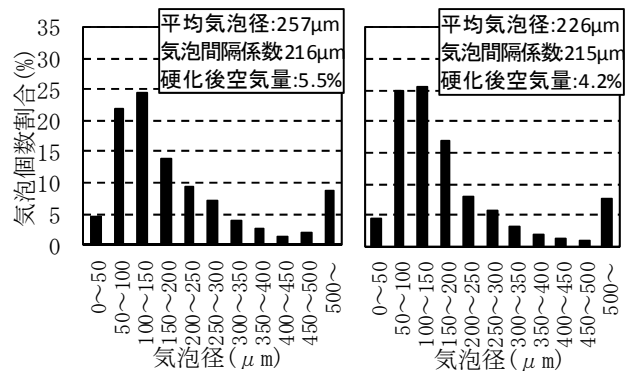


図-12 圧縮強度と静弾性係数の関係 (シリーズ2)



a) EA-5P

a) EA-10P

図-14 気泡組織 (シリーズ2)

5. まとめ

石炭熔融スラグ細骨材を用いたコンクリートの問題点に対し品質改善を試み実験的検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 強熱減量の多くは0.15mm以下に含まれおり、磨砕処理を行うことで増加することはなかった。
- (2) 0.15mm以下の微粒分を取り除くことで、AE助剤の効果を妨げるとされるカーボンが除去され、一般的なAE助剤の使用量で空気量の調整が可能であった。また、0.15mm以下の微粒分を除去することで径の小さい気泡が多く導入された。
- (3) 0.15mm以下の微粒分を除去することで、力学特性の低下は認められず、逆に向上する結果であった。
- (4) ブリーディング量に対しては、細骨材に砕石粉を5%置換することで抑えることが可能であった。
- (5) 0.15m以下の微粒分の除去および砕石粉の5%置換によって、凍結融解作用に対して適切な気泡組織が形成され、高い耐凍害性能を有した。
- (6) 砕石粉を置換することで、力学特性の低下はあまり認められなかった。

以上、0.15mm以下の微粒分を除去し、その代替として砕石粉を用いた石炭熔融スラグ細骨材は、空気量の調整を容易にし、天然砂と同等以上の力学特性、耐凍害性

を有しているため、コンクリート用細骨材として十分な有用性のあることが認められた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、電源開発茅ヶ崎研究所材料研究室の各位に協力頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山下・石川ほか：石炭熔融水砕スラグのコンクリート用細骨材への利用に関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講演概要集(関東), pp.275-276, 2006.9
- 2) 熊谷・石川ほか：石炭熔融水砕スラグのコンクリート用細骨材への利用に関する研究(その8), 日本建築学会大会学術講演概要集(中国), pp.629-630, 2008.7
- 3) 石川・古川ほか：石炭熔融スラグ細骨材のコンクリート用細骨材としての有用性についての検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.127-132, 2009.7
- 4) 樽田・古川ほか：石炭熔融水砕スラグのコンクリート用細骨材への利用に関する研究(その9, 10), 日本建築学会大会学術講演概要集(東北), pp.475-478, 2009.8
- 5) 真野・辻ほか：砕石粉を使用した砕石・砕砂コンクリートの性状, コンクリート工学, Vol.46 No.11, pp.18-24, 2008.11