

論文 フライアッシュを微粒分量として補填した石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの基本的性状

石川 嘉崇*1・有園大樹*2・佐藤道生*3・安田幸弘*4

要旨：最近石炭ガス化複合発電(IGCC)が、21世紀の高効率石炭火力発電技術として注目されており、日本国内でも鋭意開発が進められている。この方式では、石炭灰の代わりに、石炭溶融スラグが排出される。既往の研究によれば、スラグを磨砕することにより生じた微粒分に含まれる未燃炭素分が、コンクリートの空気量調節を難しくすることが報告されている。本稿では、スラグの微粒分を除去し、微粒分の代替としてフライアッシュを添加したコンクリートについて、一連の実験を実施しフレッシュ性状の改善と強度・耐久性の向上効果について検討した。

キーワード：石炭溶融スラグ，スラグ細骨材，ブリーディング量，圧縮強度，耐久性

1. はじめに

石炭火力発電においては、CO₂の排出量が他の火力発電方式より多いため、石炭火力発電所のエネルギー効率をあげることが最重要課題となっている。最近微粉炭を用いて蒸気を起こす従来の石炭火力発電形式ではなく、石炭をガス化しコンバインドサイクルを使用して発電を行う石炭ガス化複合発電システム(以下、IGCC)が注目されている。発電効率が飛躍的に増すため、日本国内でもIGCCの開発が急速に進展している¹⁾。IGCCでは微粉炭を燃料に使い、これを高温・高圧下で空気(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生成させる。この方式では、高温・高圧下でのガス化反応により、排出されるものは石炭灰ではなく、石炭溶融スラグとして排出される特徴を有している。今後、IGCCの採用に伴い、石炭溶融スラグが多量に排出されることが想定される。筆者らは、文献²⁾³⁾において、石炭溶融スラグの基本的な特性およびJISに制定されている各種のスラグ細骨材と性状との比較検討を行い、石炭溶融スラグのコンクリート用細骨材としての有効性を検討した。筆者らの既往研究報告においては、石炭溶融スラグの微粒分に含まれている未燃炭素分がAE剤を吸着し空気量の調整が難しくなることが報告されている。

本稿は、石炭溶融スラグの微粒分を除去して、微粒分の代替としてフライアッシュを添加したコンクリートについて、一連の実験を実施しフレッシュ性状の改善と強度・耐久性の向上効果について検討したものである。

2. 使用材料

試験に使用した材料を、表-1に示す。石炭溶融スラ

グとしては、室内試験ガス化炉より得られたスラグを磨砕後水洗して微粒分(0.15mm以下)を除去したものをを用いた。フライアッシュの品質に関しては、表-2に示すとおり、ブレン比表面積4130/cm²gでJIS種灰(JISA 6201)の規定値を満足するものを使用した。

表-1 使用材料

普通ポルトランドセメント(OPC): 密度 3.16 g/cm ³
石炭溶融スラグ細骨材(Sg): 表乾密度 2.63 g/cm ³ , 吸水率 2.00%
陸砂(S): 表乾密度 2.59 g/cm ³ , 吸水率 2.16 %
砕石(G): 表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.44%
JIS 種灰(FA): M 発電所産。密度 2.28 g/cm ³
AE 減水剤(AE): リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
水(W): 茅ヶ崎市上水道水

表-2 フライアッシュの品質

品質		JIS A 6201 規定値	試験値
二酸化けい素 %		45.0 以上	61.4
湿分 %		1.0 以下	0.1
強熱減量 %		5.0 以下	0.7
密度 g/cm ³		1.95 以上	2.24
粉末度	45μm ふるい残分 %	40 以下	3
	比表面積 cm ² /g	2500 以上	4130
フロー値比 %		95 以上	112
活性度指数 %	材齢 28 日	80 以上	89
	材齢 91 日	90 以上	107

*1 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)

*2 電源開発株式会社茅ヶ崎研究所 土木技術研究室(正会員)

*3 電源開発株式会社茅ヶ崎研究所 土木技術研究室(正会員)

*4 開発設計コンサルタント 技術センター 所長代理

3. 試験概要

3.1 試験目的とフライアッシュ・細骨材の粒度分布

石炭溶融スラグは、既報²⁾³⁾によれば、磨砕して粒形改善し粒度分布を調整した場合に、0.15mm以下の微粒子に未燃炭素分が偏在し、AE剤を吸着して空気量調整が難しくなることが報告されている。そこで本稿では、磨砕後水洗し0.15mm以下の微粒子を除き、同じく石炭起源でありポゾラン活性を有しているフライアッシュをその代替として補填し、コンクリートのフレッシュ性状改善と強度・耐久性の向上効果を検討することとした。フライアッシュ(FA)の補填率としては、3水準(0, 5, 10%)とした。ここでの補填率は、スラグ細骨材の体積に対して、どの程度フライアッシュで代替したかを率で表している。粒度分布は、使用したフライアッシュについては図-1に、表-4に示す各配(調)合のFAの補填率に応じた細骨材の粒度分布について、図-2に示す。

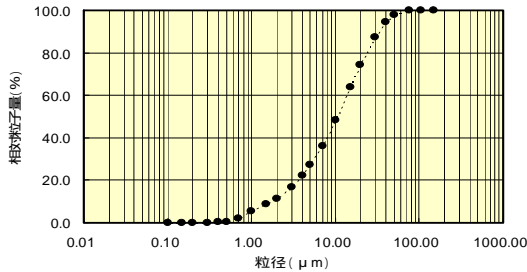


図-1 フライアッシュの粒度分布

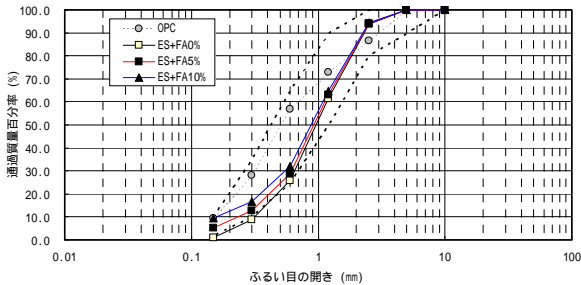


図-2 各配(調)合における細骨材の粒度分布

3.2 配(調)合

表-4に配(調)合計画を示す。コンクリートの基本配(調)合は、フライアッシュの補填による単位水量低減効果については考慮せず、単位水量一定としAE減水剤(C×0.25%)を用いて目標スランブ・空気量を得た。

3.3 試験項目および試験方法

試験項目としては、表-5に示すとおりである。また、試験方法に関しては、表-6に示すとおりJISおよび学会規準等に準じて実施した。

表-5 試験項目

大項目	試験項目	備考
フレッシュ性状	スランブ・空気量 ブリーディング	練上がり直後
強度性状	圧縮強度 ヤング係数	材齢 7, 28, 91, 182 日
	割裂引張強度	材齢 28 日
耐久性	乾燥収縮	最長: 91 日
	凍結融解	300 サイクル
	促進中性化	最長: 56 日
	気泡間隔係数	材齢 28 日以降
拘束ひびわれ	実ひずみ(時系列) 収縮拘束応力(時系列) ひび割れ材齢 ひび割れ時収縮拘束応力	試験方法については、4. 試験結果の部分で具体的に示す。

表-6 試験方法

試験項目	試験方法
スランブ試験	JISA 1101「コンクリートのスランブ試験方法」
空気量試験	JISA 1128「空気室圧力方法」
ブリーディング	JISA 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」
供試体作成	JISA 1132「コンクリート強度試験用供試体の作り方」
圧縮強度	JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」
引張強度	JISA 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」
静弾性係数	JISA 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」
凍結融解	JISA 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」
気泡間隔係数	ASTM C 457-67T「リニアトラバース法」
促進中性化	JISA 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」
促進塩分浸透	JSCE-G571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」

表-4 コンクリートの配(調)合表

配(調)合名称	W/C (%)	Sg (S+Sg) (%)	*補填率 (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						減水剤 (AE)	スランブ ^o (cm)	空気量 (%)
						W	C	FA	Sg	S	G			
OPC	50.0	0	0	4.5	48.0	179	358	0	0	824	917	0.895	19.0	5.0
ES100+FA0%	50.0	100	0	4.5	48.0	179	358	0	837	0	917	0.895	17.0	3.8
ES100+FA5%	50.0	100	5	4.5	48.0	179	358	36	795	0	917	0.895	19.5	3.7
ES100+FA10%	50.0	100	10	4.5	48.0	179	358	72	753	0	917	0.895	18.0	4.2

*補填率: FA/(FA+Sg)[体積%]

4. 試験結果と考察

4.1 フレッシュ性状およびブリーディング試験

本試験では、表-4に示すとおりスランプおよび空気量とも目標性能(スランプ: $18 \pm 2.5 \text{ cm}$, 空気量: $4.5 \pm 1.5 \%$)を満足している。なお、フライアッシュ補填率の増加に伴い、AE助剤は増加傾向にある。

図-3にブリーディング試験結果を示す。ES+FA0%のブリーディング量は、建築学会高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)⁴⁾の品質目標上限値である $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ に近い値となる。一方、フライアッシュを5%、10%と補填したものは、補填率の増大に伴いブリーディング量は減少し、補填率10%では天然細骨材と同等に小さい値となった。既報^{2) 3)}で報告されているように石炭灰溶融スラグは、ガラス質であり保水性が低くブリーディング量が多いが、フライアッシュを補填することで保水性が向上した結果ブリーディングを抑制することが可能となったことが確認された。

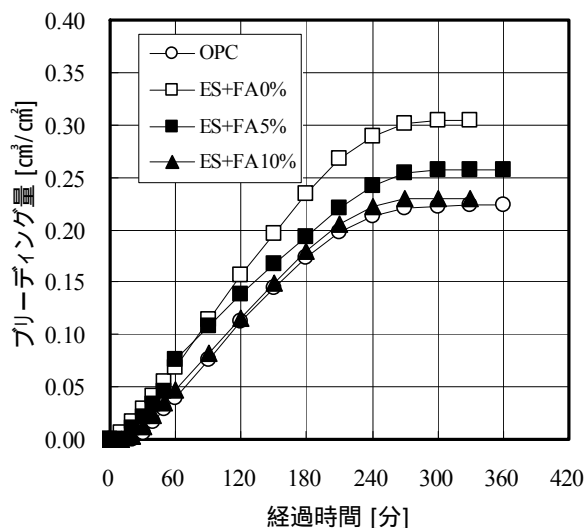


図-3 ブリーディング試験結果

4.2 圧縮強度および静弾性係数

図-4に圧縮強度の試験結果を、図-5に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。

図-4は圧縮強度を配(調)合別に比較したものである。フライアッシュを5%、10%と補填することでいずれの材齢においても圧縮強度が増大した。細骨材の一部にフライアッシュを補填したことで水結合材比が小さくなり、その結果圧縮強度が大きくなったと推察される。

4Wから13Wの材齢においては、OPCとES+FA0%の強度増進が同程度なのに比較して、フライアッシュを補填したものの強度増進が大きい。これは、フライアッシュのポゾラン反応が4Wから13Wにおいて活発化したものと思われる。また13Wから26Wの材齢においては、ES+FA0%の強度発現がフライアッシュを補填したもの

よりも大きくなる。これは石炭溶融スラグの界面が緻密化した影響と考えられる。この効果は、この材齢においては、フライアッシュのポゾラン反応による強度増進効果よりも大きく、またポゾラン反応より少し遅れて反応が進むものと思われる。引張強度は、全配(調)合でほぼ同程度の強度(4W材齢で $2.5 \sim 2.7 \text{ N/mm}^2$ 程度)となっている。図-5によると、石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは材齢の増加と共に静弾性係数が増進している。以上より、フライアッシュを補填することで強度性状においては天然細骨材を用いたものと同等以上の強度性能を期待できることが確認できた。

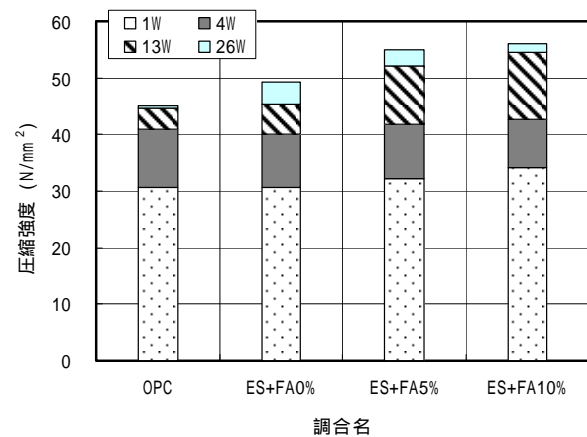


図-4 圧縮強度試験結果

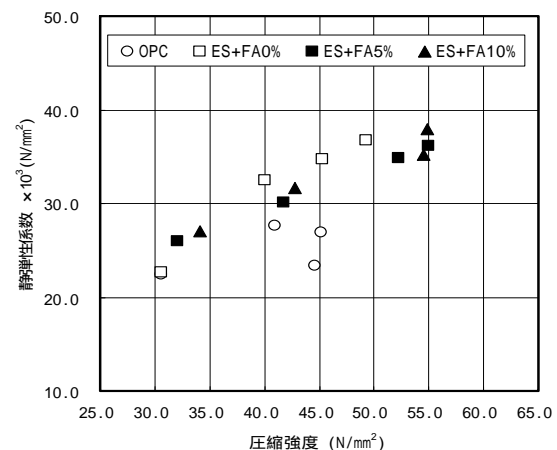


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

4.3 凍結融解試験と気泡間隔係数

図-6に凍結融解試験結果を示す。ES+FA0%は30サイクルで相対動弾性係数が20%まで低下した。一方、フライアッシュを5%、10%と補填することで相対動弾性係数は大きくなる。10%補填した場合は120サイクルで相対動弾性係数85%以上を有しているが、150サイクル以降は、フライアッシュを10%補填したコンクリートにおいても、相対動弾性係数の低下が確認された。

また、図-7に気泡組織観察結果を示す。石炭溶融スラグ細骨材を用いたもの(ES+FA0%、ES+FA5%、

ES+FA10%)は、OPC よりも、気泡径が 250 μm 以下の小さい気泡の割合が少ないことが分かる。このため、石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は天然細骨材を用いたものよりも小さくなったものと考えられる。凍結融解抵抗性は、OPC > ES+FA10% > ES+FA5% > ES+FA0%の順に抵抗性が高く、気泡間隔係数は、OPC=330 μm < ES+FA10%=418 μm < ES+FA5%=462 μm < ES+FA0%=555 μm の順で小さく、気泡径の分布とともに凍結融解抵抗性と概ね相関関係が得られた。4.1 で考察したとおり、フライアッシュの補填によりブリーディング量は、OPC と同等に小さくなり凍結融解抵抗性に対する向上効果はあるものと考えられる。しかし、図-2 で示したとおりフライアッシュの補填により粒径の小さな部分での粒度分布は改善されたものの、石炭溶融スラグは単粒度で、全体的な細骨材としての粒度分布が改善されているわけではないため凍結融解抵抗性は大きく向上しなかったものと考えられる。

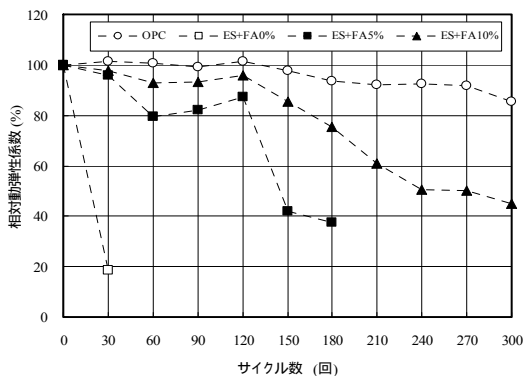


図-6 凍結融解試験結果

4.4 促進中性化試験

図-8 に促進中性化試験結果を示す。促進材齢 7 日、28 日の結果では、OPC > ES+FA0% > ES+FA5% > ES+FA10% の順に中性化深さは大きくなっている。促進材齢 56 日における中性化深さは、OPC > ES+FA10% > ES+FA5% > ES+FA0% となり、順位の変動が起きた。促進材齢 7 日の結果では、細骨材の一部にフライアッシュを補填したことで水結合材比が低くなったことに起因して、フライアッシュを補填したほうが小さな中性化深さになったと考

えられる。材齢 56 日の結果においては、フライアッシュのポゾラン反応により水酸化カルシウムが消費されたことに起因して、ES+FA0% よりもフライアッシュを補填したもののほうが大きな中性化深さとなる傾向が見られたと推察される。促進材齢 56 日までのデータからは、石炭溶融スラグ細骨材を利用した方が天然細骨材の場合よりも中性化深さが小さい結果となっており、石炭溶融スラグ細骨材は中性化に対して天然骨材と同等の抵抗性を有しているものといえる。

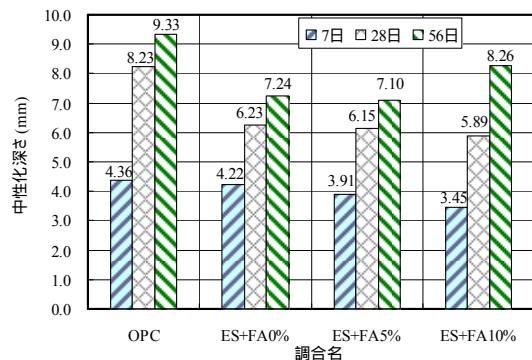


図-8 促進中性化試験結果

4.5 乾燥収縮試験

コンクリートの長さ変化試験を JIS A 1129-3 に準拠して実施した。供試体は 100 × 100 × 400mm の角柱供試体とし、コンクリート打設後 1 日で脱枠し、材齢 7 日まで標準養生した。その後、温度 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室にて乾燥を開始した。長さ変化測定結果を図-9 に示す。乾燥材齢 56 日時点での乾燥収縮量は、OPC > ES+FA0% > ES+FA5% > ES+FA10% の順に大きく、91 日時点での乾燥収縮量は OPC > ES+FA0% > ES+FA5% > ES+FA10% の順で大きい。

フライアッシュの補填効果は、乾燥収縮量に対してあまり大きな効果は認められないが、補填したもののほうが、若干乾燥収縮量が小さくなる傾向にある。また、天然細骨材に比べ石炭溶融スラグ細骨材を用いたほうが乾燥収縮量は大幅に小さくなる傾向にある。これは、石炭溶融スラグ細骨材の静弾性係数が大きいこと等の物理的性質の違いに起因すると考えられる。

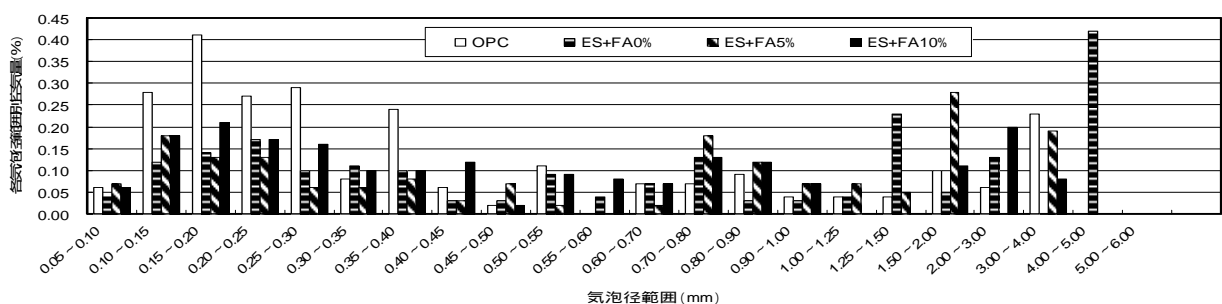


図-7 気泡径の分布

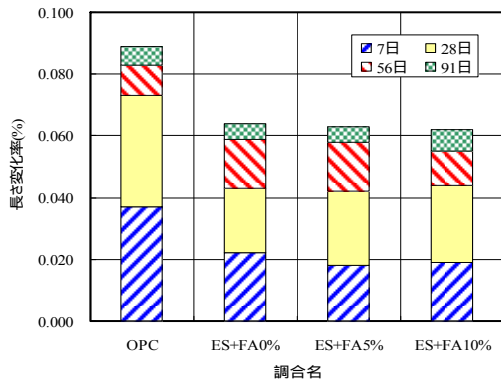


図-9 長さ変化率測定結果

4.6 拘束ひび割れ試験

拘束ひび割れ試験の試験体概要を図-10に示す。型枠の大きさは、100mm×100mm×1100mmとし、内部拘束体である鉄筋は、丸鋼 32mm、全長 1200mm で鉄筋の両端 450mm に M33 相当のねじ切り処理を施したものである⁵⁾。試験条件（試験体と型枠との付着等）の詳細に関しては文献⁶⁾と同条件とした。拘束試験の型枠は、コンクリートの打設の 1 日前から養生環境下（室温：20℃，湿度：60%）に静置した。乾燥開始材令（7 日）において、型枠を脱型し乾燥開始とした。拘束試験体のひずみ計測は、コンクリート打設前から開始し、計測間隔は 1 時間とした。またコンクリートの打設前後、脱型前後においてもひずみ計測を実施した。

得られた鉄筋の平均ひずみより収縮応力を算出した。算出式を、以下(1)式に示す。

$$\sigma_c = \frac{E_s \times \varepsilon_s \times A_s}{A_c} \quad (1)$$

ここに、 σ_c ：コンクリートの収縮応力[N/mm²]

E_s ：拘束鉄筋の弾性係数[N/mm²]

ε_s ：拘束鉄筋のひずみ

A_s ：拘束鉄筋の断面積[mm²]

A_c ：コンクリートの純断面積[mm²]

拘束供試体のひずみおよび応力の経時変化は、各配（調）合とも計測開始後 1 日以降より収縮ひずみが増大し、それに伴いコンクリートの引張応力が増大した。材齢 7 日までの封緘養生中の引張応力の増大は自己収縮の影響によるものと考えられる。

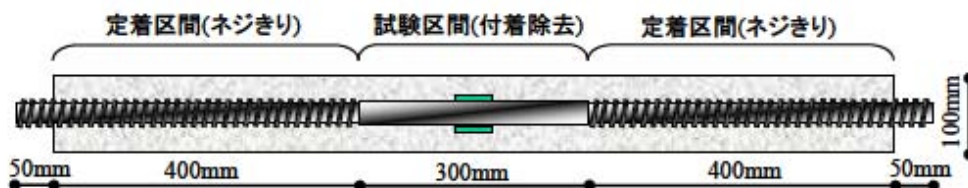


図-10 拘束ひび割れ試験体概要

拘束ひび割れ試験結果を、表-7に示す。天然細骨材を用いた場合のひび割れ発生日数は平均で約 19 日である。一方、0.15mm 以下を除去した石炭溶融スラグ細骨材を用いた場合およびフライアッシュを 5%、10%補填した場合には、天然細骨材を用いた場合の約 2 倍の約 40 日程度でひび割れが発生した。

試験結果から、石炭溶融スラグ細骨材を用いた場合がひび割れ発生日数は遅くなり、石炭溶融スラグのひび割れ抑制効果大きいことが認められた。これは、「4.5 乾燥収縮試験」の試験結果と同様の傾向を示すものであり石炭溶融スラグ細骨材の物理性状に起因するものと考えられる。また、フライアッシュの補填の効果については、筆者らの既往試験結果⁶⁾と同様、本試験結果からも確認することは難しかった。

表-7 拘束ひび割れ試験結果

配(調)合名称	試験体番号	ひび割れ発生日数(日)	ひび割れ発生時のコンクリート応力(N/mm ²)	ひび割れ発生時の引張強度(N/mm ²)	との比
OPC	1	21.4	1.22	2.28	0.54
	2	16.1	1.67		0.73
	平均	18.8	1.45	-	0.63
ES+FA0%	1	34.1	1.56	2.25	0.69
	2	53.3	1.71		0.76
	平均	43.7	1.64	-	0.73
ES+FA5%	1	43.4	1.37	2.98	0.46
	2	44.6	1.79		0.60
	平均	44.0	1.58	-	0.53
ES+FA10%	1	34.0	1.56	2.67	0.58
	2	47.3	1.57		0.59
	平均	40.6	1.57	-	0.59

4.7 促進塩分浸透試験

図-11に塩分浸透試験として土木学会規準 JSCE-G571に準拠した電気泳動試験の結果を示す。得られた塩化物イオン実効拡散係数については ES+FA0%は、天然骨材の場合 OPC の 1/3 程度小さくなる。さらにフライアッシュを補填したものは、フライアッシュの補填率が大きくなるに従って塩化物イオン実効拡散係数が小さくなる傾向

向が見られた。塩分浸透抵抗性に関しては、既往の試験結果⁷⁾と同様にフライアッシュを補填する効果が確認された。また、今回の実験で特徴的なのは石炭溶融スラグ細骨材のみでも塩分浸透抵抗性がかなり高いことである。このことは、石炭溶融スラグ細骨材の成分はフライアッシュの成分と比較してカルシウムが多いため高炉スラグと同様の効果が期待できるものと考えられる。

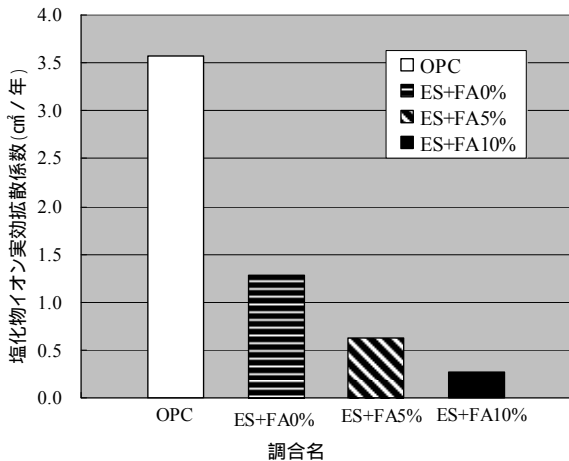


図-11 促進塩分浸透試験結果

5. まとめ

石炭溶融スラグの微粒分を除去し、微粒分の代替としてフライアッシュを補填したコンクリートについて、一連の実験を実施した結果、以下の結論を得た。

- (1)石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは、天然細骨材に比較するとブリーディング量が多くなるがフライアッシュを補填することによりブリーディング量は少なくなる。補填率の増大に伴いブリーディング量は減少し、補填率10%では天然細骨材と同等に小さい値となった。微粒分を除去した石炭溶融スラグ細骨材にフライアッシュを補填することでブリーディングを抑制することが可能であることが確認された。
- (2)圧縮強度は、初期材齢では天然細骨材とほぼ同等であるが、材齢の経過に伴う強度発現が大きい。特にフライアッシュを補填したものの強度発現が大きいことが確認された。
- (3)石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは、天然細骨材よりも大きい静弾性係数を有している。また材齢の経過に伴い静弾性係数の値が増加することがわかった。
- (4)石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは、気泡間隔係数が天然細骨材とよりも大きな値となり、耐久性指数も天然細骨材よりも劣る。フライアッシュを補填することにより、気泡間隔係数が小さくなり耐久性指数は改善するものの、天然細骨材と同様な耐久性を得るのは難しく、細骨材全体の粒度分布の改善を検討

する必要があると考えられる。

- (5)乾燥収縮試験では、天然細骨材よりも小さい長さ変化率であった。フライアッシュの補填の効果はあまり見られなかった。拘束ひびわれ試験では、石炭溶融スラグ細骨材を用いたものが天然細骨材よりもひび割れ発生日数が約2倍遅く、石炭溶融スラグのひび割れ抑制効果が認められた。これは、石炭溶融スラグ細骨材の物理的な性状に起因していると考えられる。
- (6)促進中性化試験では、石炭溶融スラグ細骨材を用いたものが天然細骨材よりも小さい中性化深さを示した。フライアッシュの補填したものは、ポゾラン反応の影響により促進材齢56日以降で中性化深さが大きくなった。
- (7)促進塩分浸透試験では、石炭溶融スラグ細骨材を用いたものが天然細骨材よりも小さい塩化物イオン実効拡散係数を示した。また、フライアッシュを補填したものは特に小さい値を示した。

以上、石炭溶融スラグの微粒分を除去し、微粒分の代替としてフライアッシュを補填したコンクリートについて、一連の実験を実施した結果、フレッシュ性状の改善、強度増進、耐久性の一部向上効果が認められた。耐凍害性に関してはフライアッシュの補填のみでは改善が難しく、今後さらに詳細な検討を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 斉藤幹夫, 犬丸淳: 石炭ガス化複合発電(IGCC)の実用化に向けて, 石炭科学会議発表論文集 (37), (社)日本エネルギー学会, 2000
- 2) 石川嘉崇, 古川雄太, 阿部道彦, 友澤史紀: 石炭溶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
- 3) 石川嘉崇, 古川雄太, 阿部道彦, 友澤史紀: 石炭溶融スラグ細骨材の長期性状と耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.1, pp.71-76, 2010
- 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, 1991
- 5) 日本コンクリート工学会: 混和材料から見たひび割れ低減と耐久性改善委員会報告書, pp.199-212, 2010
- 6) 石川嘉崇, 安田稔: コンクリートの収縮ひびわれ抵抗性に関するフライアッシュ混和の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.1, pp.191-196, 2011
- 7) 武知隆男, 高橋利昌他: フライアッシュコンクリートを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの強度および遮塩性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.229-234, 2009