

論文 石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの長期強度と耐久性状

石川 嘉崇¹⁾・古川 雄太²⁾・阿部 道彦³⁾・友澤 史紀⁴⁾

要旨：発電効率をあげ CO₂ 排出量抑制が可能な石炭ガス化複合発電が最近注目されており，その残渣は従来の石炭灰ではなく，石炭溶融スラグとして排出される。本論文は，石炭溶融スラグを用いたコンクリートの特性に関し，長期材齢での力学性状と各種耐久性試験を実施し天然砂および JIS 制定の各種スラグ細骨材との比較検討を実施したものである。その結果，長期材齢での力学性状は他のスラグ細骨材を用いた場合と同等に良好な結果であり，耐久性についてもほぼ同等であることが確認できた。以上から，石炭溶融スラグは力学性状および各種耐久性の面から，コンクリート用細骨材としての利用可能性が高いと考えられる。

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

石炭火力発電所から排出される石炭灰は年々発生量が増加している。現在，用途の大部分はセメント原料が占めており，セメントの需要拡大が見込めない現在ではその他の用途の拡大が急務である。

一方，従来の石炭火力発電では 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，石炭をガス化することによりコンバインドサイクルを使用して発電する石炭ガス化複合発電システム (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。

本論文は，石炭溶融スラグの基本的な特性に関して，JIS に制定されている各種のスラグ細骨材と比較検討することで，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するものである。

筆者らは，文献 2) において，モルタルおよびコンクリート実験を実施して，石炭溶融スラグの基本特性を把握した。本論文では，さらに長期での力学性状および各種耐久性試験を実施して，天然砂および JIS に制定されている各種スラグ細骨材の試験結果との比較検討を実施したものである。

2. 実験概要

実験の要因と水準を表-1 に示す。細骨材は，石炭溶融スラグ (E)，高炉スラグ (B)，フェロニッケルスラグ (F)，ごみ溶融スラグ (SD)，比較用の天然砂として大井川産陸砂 (O) および砂岩砕砂 (CS) の計 6 種類を用いた。水セメント比は，力学性状では 45%，55% および 65% の 3 水準とし，耐久性状では 55% の 1 水準とした。

試験項目を表-2 に示す。フレッシュ性状ではブリーディング試験，力学性状では圧縮強度試験および静弾性係数試験を行った。耐久性状試験では，乾燥収縮試験，促進中性化試験，凍結融解試験，促進塩分浸透試験を行った。また，硬化後の気泡組織を確認するため気泡間隔係数をリニアトラバース法により測定した。測定に使用した供試体は，4 週間水中養生した後に厚み約 2cm にカットをして両面を平滑になるように研磨を行った。測定面は 10cm×10cm の断面でトラバースし，全長は 2000mm から 2100mm の間で測定を行った。

促進塩分浸透試験は，塩分濃度 3% (水温 50℃) に 3 日間浸水させ，その後室温 50℃ で 4 日間乾燥させることを 1 サイクルとして，10 サイクルおよび 20 サイクルにおける塩化物イオン量を JIS A 1154 に準じて測定を行った。試験概要を図-1 に示す。促進浸透サイクル時は，小口面を残し全面をエポキシ系樹脂でシールを行った。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
細骨材種類	石炭溶融スラグ (E)，高炉スラグ (B)
	フェロニッケルスラグ (F)，ごみ溶融スラグ (SD)
	大井川産陸砂 (O)，砂岩砕砂 (CS)
水セメント比	45%，55%*1，65%

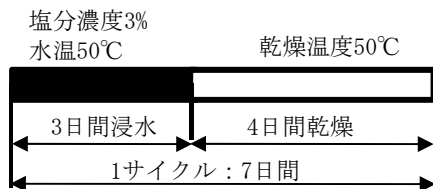
*1 耐久性状は 55% のみ

*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)

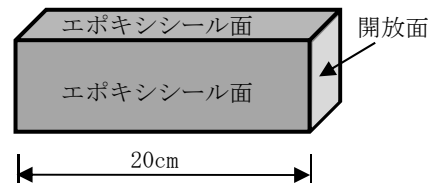
*2 工学院大学大学院工学研究科 修士課程 (正会員)

*3 工学院大学工学部建築学科 教授・工博 (正会員)

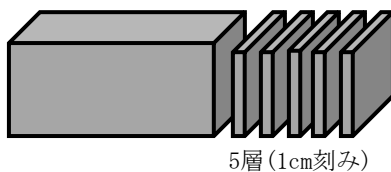
*4 日本大学生産工学部 教授・工博 (正会員)



図－1 塩分浸透試験のサイクル



a) サイクル時



b) 測定時

図－2 塩分浸透試験供試体概要

塩化物イオン量の測定の際には、開放面から1cm刻みに5層それぞれ測定を行った（図－2）。

3. 使用材料および調合

表－3 に使用した細骨材の物性値を示す。石炭溶融スラグは磨砕水洗したものを用いている。表－3 より、石炭溶融スラグは他の細骨材に比べ密度が大きく、吸水率が小さい。写真－1 を見ると、石炭溶融スラグ骨材の表面は非常に滑らかであり、磨砕後は概ね形状も丸みを帯びていることがわかる。粗骨材は青梅産砂岩砕石 2005（絶乾密度：2.68g/cm³，吸水率：0.69%，実積率：60.9%）を使用し、セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³，比表面積：3270cm²/g）を使用した。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、その他のスラグ、陸砂および砕砂にはアルキルエーテル系を使用した。調合およびフレッシュ性状を表－4 に示す。調合は単位粗骨材かさ容積一定とした。一部スランプ値が低いものがあるが、コンクリートの打設時に特に問題はなく、硬化コンクリートへの影響は少ないものと考えそのままとした。

4. 結果と考察

4.1 ブリーディング試験

図－3 に水セメント比 55%のブリーディング試験結果を示す。これによると、スラグ細骨材ではフェロニッケルスラグ（F）のみが陸砂（O）および砕砂（CS）と同

表－2 試験項目および方法

試験項目	方法
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
乾燥収縮試験	JIS A 1129-3
促進中性化試験	JIS A 1152, 1153
凍結融解試験	JIS A 1148 (A 法)
促進塩分浸透試験	JSCE G572-2003 (参考)
気泡間隔係数試験	ASTM C 457

表－3 細骨材の物性値

記号	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	実積率 (%)	粒形判定 実積率 (%)	粗粒率
E	3.11	0.35	2.54	64.3	57.5	2.91
B	2.69	1.49	5.02	58.4	50.4	2.46
F	2.82	1.81	6.00	67.0	58.7	2.82
SD	2.88	0.42	3.38	58.3	53.3	2.39
O	2.68	1.32	1.80	65.3	57.2	2.87
CS	2.59	1.32	3.47	66.8	56.2	3.02

表－4 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

記号	W/C (%)	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 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)
E45	45	177	393	899	987	17.0	3.6	2456
E55	55	175	318	979	987	19.0	4.6	2459
E65	65	175	269	1028	987	10.0	5.0	2459
B45	45	184	409	754	987	16.5	5.0	2334
B55	55	181	329	831	987	19.0	5.0	2328
B65	65	183	282	867	987	7.0	4.7	2318
F45	45	170	378	861	987	19.0	4.4	2396
F55	55	168	305	933	987	18.5	4.7	2393
F65	65	168	258	975	987	16.0	4.8	2388
SD45	45	190	422	769	987	19.5	5.5	2367
SD55	55	187	340	853	987	16.5	4.5	2366
SD65	65	189	291	892	987	10.0	3.9	2358
O45	45	185	411	747	987	18.5	5.0	2329
O55	55	180	327	832	987	19.5	4.9	2326
O65	65	178	274	884	987	17.5	4.6	2322
CS45	45	185	411	719	987	19.0	4.7	2302
CS55	55	180	327	802	987	18.5	4.7	2296
CS65	65	178	274	851	987	16.0	3.5	2290

*骨材は表乾質量



写真－1 石炭溶融スラグ骨材写真

様に、高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説³⁾（以下、高耐久 RC 指針）で示されている品質目標値 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下を満足した。石炭溶融スラグを含む他のスラグ骨材は品質目標値 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を超える結果であった。これは一般的にいわれているように、石炭溶融スラグ、高炉スラグおよびごみ溶融スラグの表面がガラス質であり、保水性が低かったことに起因すると思われる。そのため、石炭溶融スラグ細骨材を用いる場合にもブリーディングについては留意する必要があるといえる。

4.2 圧縮強度

図-4 に各水セメント比における圧縮強度試験結果を示す。これによると、水セメント比 65%では材齢 7 日においてはいずれのスラグ細骨材も陸砂 (O) や砕砂 (CS) よりも小さい値であり、材齢 28 日においてもほぼ同様の傾向であった。しかしながら、材齢が 91 日になると石炭溶融スラグ (E) は高炉スラグ (B) と同様に陸砂 (O) とほぼ同等の値となり、材齢 365 日においても強度発現が大きく、陸砂 (O) と同等の値となった。水セメント比 55%でも 65%と同様の傾向が認められ、石炭溶融スラグ (E) は材齢 28 日までは陸砂 (O) に若干劣るものの、材齢が経過するに伴う強度発現が大きく材齢 365 日では陸砂 (O) 以上の圧縮強度を得た。水セメント比 45%では、初期材齢において水セメント比 65%および 55%と比べると、陸砂 (O) との強度差が小さく材齢 28 日においてはほぼ同等の圧縮強度となった。そして、材齢 28 日以降の強度発現は水セメント比 65%、55%と同様に大きい傾向が認められた。

以上のことより、石炭溶融スラグを用いたコンクリートの圧縮強度は、初期材齢では陸砂よりも若干劣るものの、材齢の経過に伴う強度発現が大きく材齢 91 日以降では、陸砂と同等以上の圧縮強度を得ることが認められた。これは石炭溶融スラグを用いた他の試験結果⁴⁾⁵⁾と同様の傾向であり、文献 4)では石炭溶融スラグがフライアッシュなどで起こるポズラン反応のような現象により骨材とセメントペースト界面での付着強度が増し、長期での圧縮強度が大きくなると推測している。本実験においても同様の現象であったと推測することができるが、強度の増進の理由についての詳細な検討が今後必要であると考えられる。

4.3 静弾性係数試験結果

図-5 に、若材齢から長期材齢 (7 日, 28 日, 91 日, 365 日) における静弾性係数試験結果を示す。図中には日本建築学会の JASS 5-2009⁶⁾ で用いられている RC 構造計算規準式による推定値を示した (コンクリート密度: $\gamma=2.4\text{t}/\text{m}^3$)。図-5 によると、天然砂 (O, CS) を用いたものは圧縮強度 $40\text{N}/\text{mm}^2$ 以上では比較的、骨材による係数 $k_1=1.0$ に近似

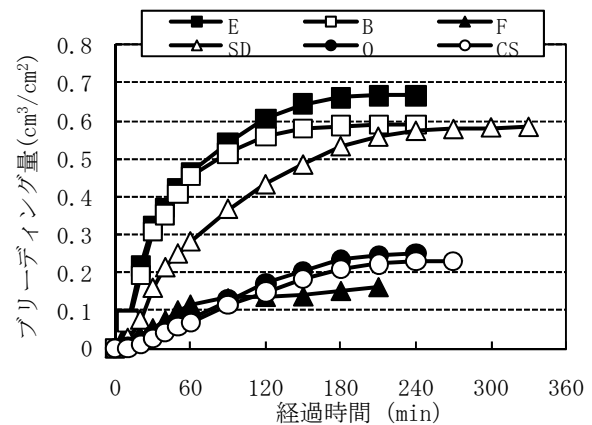


図-3 ブリーディング試験結果

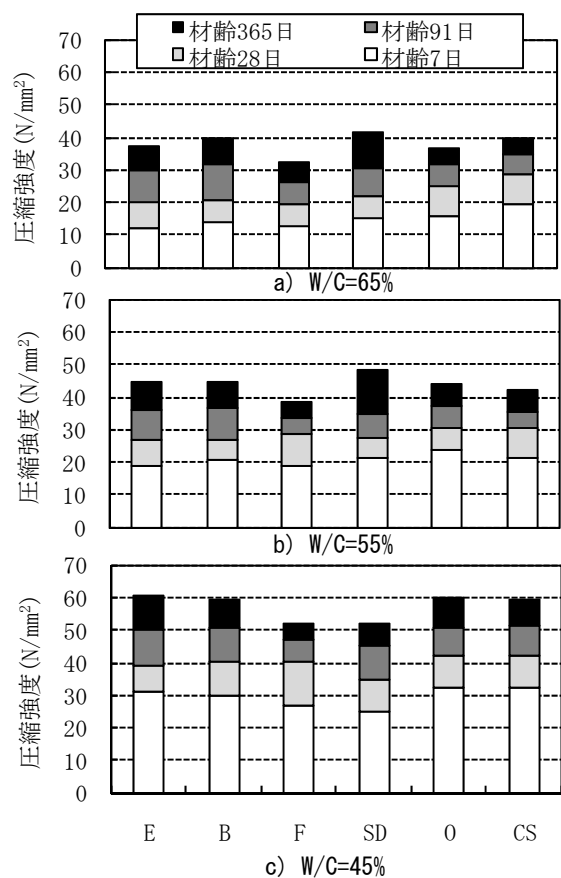


図-4 圧縮強度試験結果

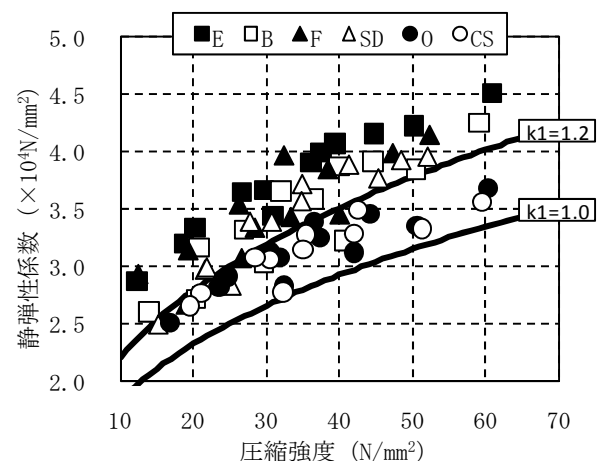


図-5 静弾性係数試験結果

しているものの、 40N/mm^2 以下ではやや $k_1=1.0$ よりも大きい値を示した。また、スラグ骨材を用いたコンクリートでは、高炉スラグ (B)、フェロニッケルスラグ (F) およびごみ熔融スラグ (SD) は比較的係数 $k_1=1.2$ に近似している。石炭熔融スラグ (E) は、係数 $k_1=1.2$ よりもやや大きい値を示し、各材齢でいずれの骨材を用いたコンクリートよりも大きい値であった。これは、既往の実験結果⁴⁾と同様の傾向であり石炭熔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と推測される。

4.4 凍結融解試験

図-6 に凍結融解試験結果を示す。これによると、JASS 5-2009 で示されている品質目標値である 300 サイクル終了時に相対動弾性係数 85%以上を天然砂 (O, CS) のみが満足する結果であった。石炭熔融スラグ (SD) およびフェロニッケルスラグ (F) は 85%には至らなかったものの、JASS 5-2003 で示されていた性能区分 A の値である 300 サイクル終了時に相対動弾性係数 60%以上を有していた。今回の実験結果では、高炉スラグ (B) およびごみ熔融スラグ (SD) は低い相対動弾性係数を示した。

4.5 気泡間隔係数

表-5 に気泡組織の試験結果を示す。これによると、気泡間隔係数はスラグ骨材において石炭熔融スラグ (E) が $297\mu\text{m}$ と最も小さく、次いでフェロニッケルスラグ (F) が小さく、高炉スラグ (B)、ごみ熔融スラグ (SD) の順に大きい値であった。陸砂 (O) および砕砂 (CS) は $300\mu\text{m}$ 前後と小さい値であった。また、平均気泡径をみると石炭熔融スラグ (E)、陸砂 (O) および砕砂 (CS) が $330\mu\text{m}$ 前後と小さいのに対し、高炉スラグ (B) フェロニッケルスラグ (F) およびごみ熔融スラグ (SD) が $400\mu\text{m}$ 以上と大きい値であった。石炭熔融スラグの気泡個数が多く、気泡間隔係数が小さくなった要因としては、空気量の調整に非イオン系のフライアッシュ用の AE 剤を使用したために、微細な気泡が他の細骨材よりも多く混入したためと推測される。また、高炉スラグおよびごみ熔融スラグの気泡間隔係数が大きい要因としては、空気量の調整に AE 剤を僅かにしか使用しておらずエントラップトエアが多く混入していたためと推測される。

図-7 に耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示す。これによると、石炭熔融スラグ (E) の気泡間隔係数が天然砂と近い値であるため、天然砂と同様に耐久性指数が 85 以上を有すると推測されるが、耐久性指数は約 60 と小さい値であった。また、同様に高炉スラグ (B) も気泡間隔係数がごみ熔融スラグ (SD) よりも小さいにもかかわらず、耐久性指数はごみ熔融スラグとほぼ同等であり小さい値であった。この要因としては、4.1 のブリーディング量が影響しているものと考えられる。石炭熔融スラグおよび高炉スラグを用いたコンクリートは、ブリーディング量がいずれも

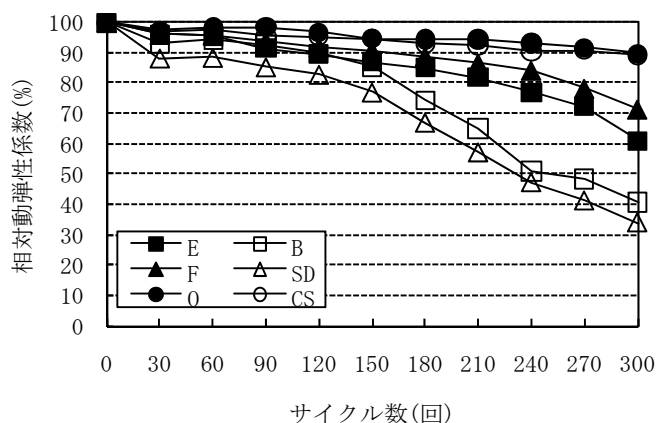


図-6 凍結融解試験結果

表-5 気泡組織試験結果

記号	気泡個数 (個)	平均気泡径 (μm)	硬化後空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
E	420	345	5.0	297
B	250	519	4.4	480
F	293	421	4.3	379
SD	185	656	4.1	634
O	471	339	5.5	281
CS	393	337	4.6	304

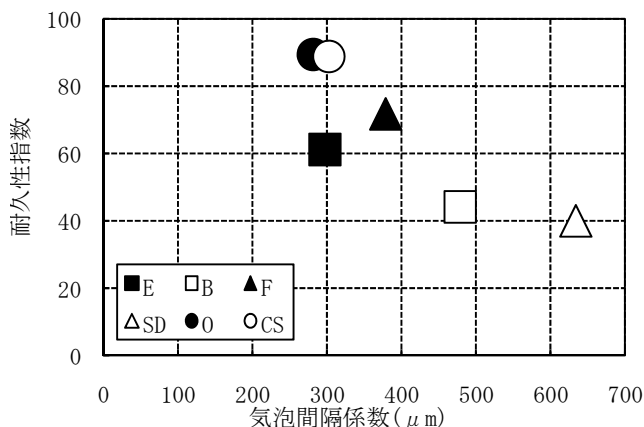


図-7 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

$0.6\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上と非常に多かったため、耐凍害性が低下したと考えられる。JASS 5-2009 においても凍結融解作用を受ける場合、ブリーディング量を $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下にすることが示されているため、今後ブリーディング量と耐凍害性については詳細な検討をする必要があると考えられる。

4.6 乾燥収縮試験

図-8 に乾燥収縮試験結果を示す。これによると、長さ変化はいずれの細骨材を用いたコンクリートでも、乾燥期間 56 日までの変化量が大きく、その後は緩やかな変化量である。細骨材別にみると、陸砂 (O)、砕砂 (CS) およびフェロニッケルスラグ (F) の長さ変化率が大きい値であり、

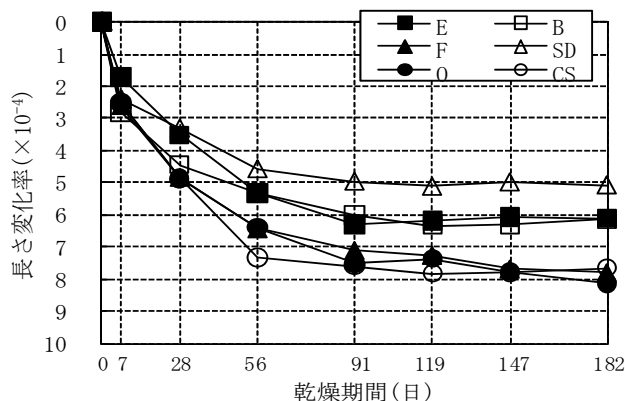


図-8 乾燥収縮試験結果

石炭溶融スラグ (E)、高炉スラグ (B) およびごみ溶融スラグ (SD) が小さい値であった。石炭溶融スラグを用いたコンクリートは天然砂よりも小さい長さ変化率であり、高耐久 RC 指針で示されている品質目標値 7×10^{-4} 以下を満足する結果であった。そのため、乾燥収縮試験において石炭溶融スラグを用いた場合、天然砂と同等の乾燥収縮に関する耐久性能を有することが認められた。

4.7 促進中性化試験

図-9 に促進中性化試験結果を示す。これによると、各種スラグ細骨材を用いたコンクリートは天然砂同様に、促進中性化深さと促進材齢の平方根の間に直線的な関係が認められ、 $\sqrt{t}$ 則が適用できるといえる。また中性化深さをみると、天然砂 (O, CS) およびフェロニッケルスラグ (F) が大きく、石炭溶融スラグ (E)、高炉スラグ (B) およびごみ溶融スラグ (SD) が小さい値であった。また、表-6 には促進材齢 26 週および 52 週における中性化深さと中性化速度係数を示している。表-6 によると、促進材齢 26 週における中性化深さは、石炭溶融スラグは 12.0mm であり、陸砂 (18.6mm) および砕砂 (16.5mm) よりも小さい値であった。また、中性化速度係数も高炉スラグやごみ溶融スラグと同様に、フェロニッケルスラグおよび天然砂よりも小さい値であった。そのため、石炭溶融スラグを用いたコンクリートは、高耐久 RC 指針で示されている品質目標値である、促進材齢 26 週において中性化深さ 25mm 以下を満たしており、天然砂と同等の中性化に関する耐久性能を有していることが確認できた。

4.8 促進塩分浸透試験

図-10 に促進塩分浸透試験結果を示す。これによると、石炭溶融スラグ (E) および高炉スラグ (B) を用いたものは、いずれのサイクル数においても各表面からの深さで天然砂 (O, CS) および他のスラグ細骨材 (F, SD) より低い塩化物イオン量となる傾向を示した。また、図-11, 12 には拡散係数および表面塩化物イオン量を示しているが、これによると、スラグ細骨材を用いたコンク

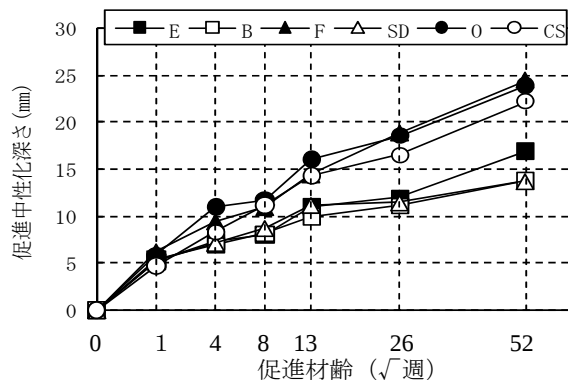
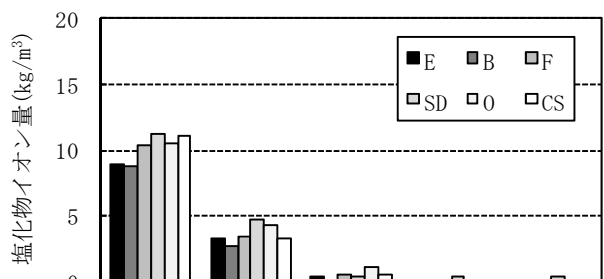


図-9 促進中性化試験結果

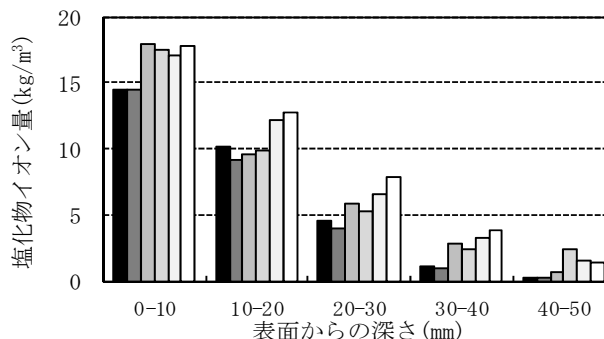
表-6 中性化深さと中性化速度係数

種類	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√週)
E	12.00 (16.93)	2.26 (2.13)
B	11.11 (13.76)	2.04 (1.71)
F	18.88 (24.50)	3.52 (3.26)
SD	11.45 (13.72)	2.21 (1.74)
O	18.58 (23.88)	3.60 (3.16)
CS	16.51 (22.22)	3.30 (2.99)

* () 内は促進材齢 52 週のデータ



a) 10 サイクル



b) 20 サイクル

図-10 促進塩分浸透試験結果

リートは天然砂を用いたコンクリートに比べ低い拡散係数であり、塩化物イオンの拡散を抑制することが期待

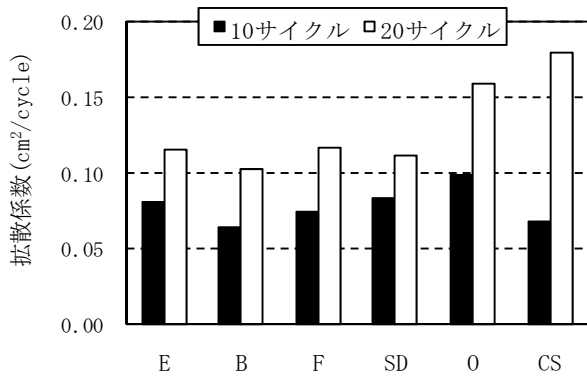


図-11 拡散係数

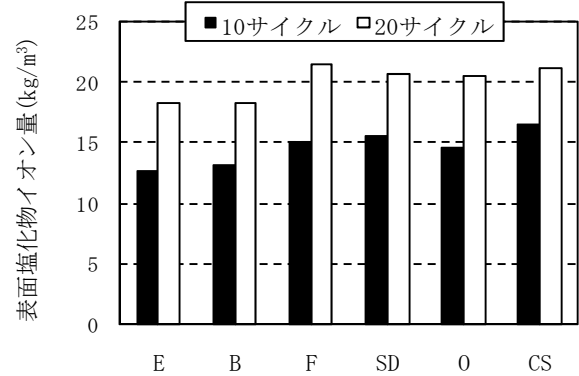


図-12 表面塩化物イオン量

できるといえる。また、石炭溶融スラグ（E）および高炉スラグ（B）においては表面塩化物イオン量が小さい結果であった。

これらの原因については現段階では明確なことは言いえないが、長期での強度発現が大きいことを考えると、石炭溶融スラグとセメントペーストの界面が緻密な組織構造となり、炭酸ガスや塩化物の浸透を抑止したものと推測される。

5. まとめ

石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートと、JISに制定されているスラグ細骨材および天然砂を用いたコンクリートで比較検討した結果、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、他の細骨材を用いたコンクリートよりも多いブリーディング量であった。
- (2) 圧縮強度は、高炉スラグと同様に初期材齢では天然砂に劣るものの、材齢の経過に伴う強度発現が大きく材齢365日においては天然砂と同等以上の圧縮強度を得ることが認められた。
- (3) 石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは、他のスラグ細骨材同様に天然砂よりも大きい静弾性係数を有しており、RC構造計算規準式による推定値の骨材による係数 $k_1=1.2$ よりも大きい値であった。
- (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砂と同等の値であるにもかかわらず、耐久性指数は天然砂よりも劣っていた。これは、高炉スラグ細骨材と同様にブリーディング量が多かったことに起因すると推測される。
- (5) 乾燥収縮試験では、高炉スラグと同様に天然砂よりも小さい長さ変化であり、高耐久性RC指針の目標値を十分満足する結果であった。
- (6) 促進中性化試験では、高炉スラグと同様に天然砂よりも小さい中性化速度係数であったため、炭酸ガス

の浸透を抑制し長期における耐久性能を十分に有すると考えられる。

- (7) 促進塩分浸透試験では、促進中性化試験と同様の傾向であり、塩化物の浸透を抑制し長期における耐久性能を十分に有していると考えられる。

以上、石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは、多くの項目で天然砂と同等の耐久性を有することが確認できた。よって、コンクリート用細骨材として十分な基本性能を有していると考えられる。今後は、長期圧縮強度の増進、ブリーディング量、気泡組織と耐凍害性の関係等を検討していく予定である。

謝辞

本研究は、文科省学術推進事業 PostEEC・工学院大学総合研究所 UDM の研究の一部として、電源開発と工学院大学の共研により実施された。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、工学院大学卒論生榎田哲郎君に協力いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 犬丸・浜松ほか：石炭ガス化複合発電、創立50周年記念 火力原子力発電50年のあゆみ、(社)火力原子力発電技術協会, 2001
- 2) 石川・古川ほか：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) 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
- 4) 熊谷・石川ほか：石炭溶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7)、日本建築学会大会学術講演概要集(九州), pp.1091-1092, 2007
- 5) 熊谷・石川ほか：石炭溶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
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2009