

論文 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

石川 嘉崇^{*1}・古川 雄太^{*2}・阿部 道彦^{*3}・友澤 史紀^{*4}

要旨：最近、石炭火力発電所のエネルギー効率をあげCO₂排出量抑制が可能な石炭ガス化複合発電(IGCC)が注目されており、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モルタルとコンクリートの基本的な特性に関して、天然砂およびJISに制定されている各種スラグ細骨材と比較検討を行なったものである。その結果、圧縮強度は他のスラグ細骨材を用いた場合と同等であった。また、ブリーディング量は多いものの、凍結融解抵抗性も同等であることが確認できた。以上の試験結果から、石炭溶融スラグは力学性状および凍結融解抵抗性の面から、コンクリート用細骨材としての利用可能性があると考えられる。

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、凍結融解抵抗性

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。経済産業省は石炭灰の有効利用率を2010年までに100%にする目標を立てているが、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。

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でCO₂の排出量抑制を目的に、最近石炭をガス化して発電する石炭ガス化複合発電(IGCC)が注目されており、国内でも石炭ガス化システムの開発が急速に進展している。

石炭ガス化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。石炭ガス化ガスをガスタービンに供給して発電を行った後、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あわせて蒸気タービンでも発電を行う。

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、石炭ガス化システムの採用に伴い、石炭溶融スラグが多量に排出されることが想定される。本論では、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用性を検討するものである。

2. 実験概要

実験は2つのシリーズより構成されている。シリーズ

1ではモルタル実験、シリーズ2ではコンクリート実験を行い、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検討を行なった。既報の研究¹⁾、²⁾、³⁾では、石炭溶融スラグの基本特性に関する試験結果は得られているが、JISに制定されている各種スラグ細骨材との比較検討は十分されてはいない。そこで本実験では、JISに制定されている高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、ごみ溶融スラグ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用性を検討した。検討に用いた細骨材は、石炭溶融スラグ、高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、ごみ溶融スラグ、標準砂(シリーズ1のみ)、大井川産陸砂、青梅産砂岩砕砂である。シリーズ1では、水セメント比を55%とし単位水量280kg/m³と一定にした。シリーズ2では、力学性状では水セメント比45%、55%、65%の3水準とし、ブリーディング試験および凍結融解試験では水セメント比55%の1水準として試験を行なった。実験の要因と水準を表-1に、試験項目を表-2に示す。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
細骨材	石炭溶融スラグ(E) ^{*1}
	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)
	標準砂(H) ^{*2}
水セメント比	大井川産陸砂(O)
	青梅産砂岩砕砂(CS)
	45%, 55% ^{*3} , 65%
試験材齢	7d, 28d, 91d (圧縮強度)

*1 シリーズ1では、磨砕水洗したものとししないもの
シリーズ2では、磨砕水洗したものを用いた

*2 シリーズ1についてののみ用いた

*3 シリーズ1は55%のみである

*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)

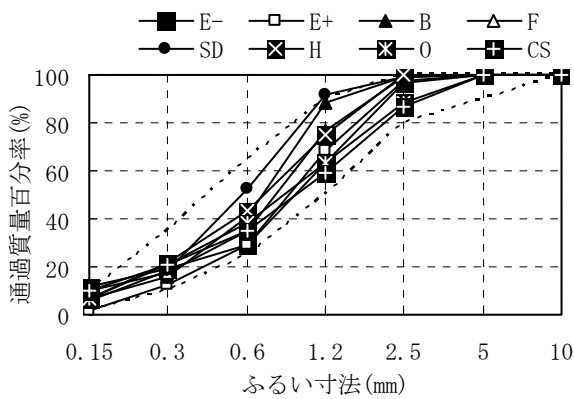


図-1 各細骨材の粒度分布

3. モルタル実験(シリーズ1)

3.1 使用材料および割合

表-3に使用した細骨材の物性値を示す。図-1には各種細骨材の粒度分布を示す。なお、シリーズ1では石炭溶融スラグは磨砕水洗処理を施したもの(E+)と未処理のもの(E-)の2種類を用いた。写真-1に磨砕前後のスラグの形状を示す。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)を用いて、練混ぜ水は上水道水を使用した。計画割合は水セメント比55%, 単位水量280kg/m³, 空気量2.0%と仮定して割合を行なった。表-4に割合およびフレッシュ性状を示す。

3.2 結果と考察

(1) モルタルフロー

図-2に各種細骨材を用いたモルタルのフロー値を示す。これによると、石炭溶融スラグは水洗処理を施したもの(E+)と未処理のもの(E-)では大きな差は認められなかった。また、陸砂(O)と比較すると、石炭溶融スラグ(E-,E+)と砕砂(CS)は同等のフロー値であったのに対し、標準砂(H)、フェロニッケルスラグ(F)は粒形が良いため陸砂(O)より大きいフロー値を示した。しかしながら、粒形の悪い高炉スラグ(B)、ごみ溶融スラグ(SD)を用いたモルタルは、他の細骨材を用いたものより小さいフロー値を示した。特に、ごみ溶融スラグ(SD)においては160mm以下と非常に小さいフロー値であった。

(2) ブリーディング量

図-3に各種細骨材を用いたモルタルのブリーディング量の経時変化を示す。これによると、石炭溶融スラグは未処理のもの(E-)では終始ブリーディング量は小さいが、水洗処理を施す(E+)ことでブリーディング量の増大が認められた。また、他の細骨材と比べても水洗処理を施した石炭溶融スラグ(E+)は、最もブリーディング量が大きい値であった。これは、水洗処理により微粒分が取り除かれたためと考えられる。そのため、石炭溶融スラグを用いたモルタルは、微粒分の調整を行なうことでブリーディング量の調整ができると考えられる。また、ブリーディング終了時刻はごみ溶融スラグ(SD)が最も早く、

表-2 試験項目

対象	試験項目	備考
シリーズ1	モルタルフロー	JIS R 5201
	ブリーディング試験	JIS A 1123
	圧縮強度試験	JIS A 1108
シリーズ2	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	JIS A 1149
	凍結融解試験	JIS A 1148

表-3 細骨材の物性値

記号	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率	単位容積質量(kg/l)	実積率(%)	微粒分量(%)
E-	2.63	2.84	2.80	2.07	78.5	11.27
E+	2.93	0.46	2.91	1.86	63.4	—
B	2.68	1.63	2.49	1.59	59.2	3.60
F	2.91	1.55	2.62	1.97	67.7	6.64
SD	2.79	0.37	2.33	1.64	58.9	2.30
H	2.63	0.21	2.53	1.75	66.2	1.37
O	2.68	1.32	2.87	1.75	64.3	1.80
CS	2.59	1.32	3.02	1.73	73.2	3.47

表-4 モルタルの割合およびフレッシュ性状

記号	単位量(kg/m ³)			フロー(mm)	単位容積質量(kg/m ³)	空気量 ^{*1} (%)
	W	C	S			
E-	280	509	1460	218	2329	-1.5
E+	280	509	1584	219	2456	-1.4
B	280	509	1466	196	2265	1.6
F	280	509	1595	242	2326	4.4
SD	280	509	1509	157	2287	2.5
H	280	509	1423	255	2175	3.6
O	280	509	1466	224	2196	4.6
CS	280	509	1412	219	2100	6.5

*1 質量法



磨砕前 磨砕後
写真-1 石炭溶融スラグの顕微鏡写真

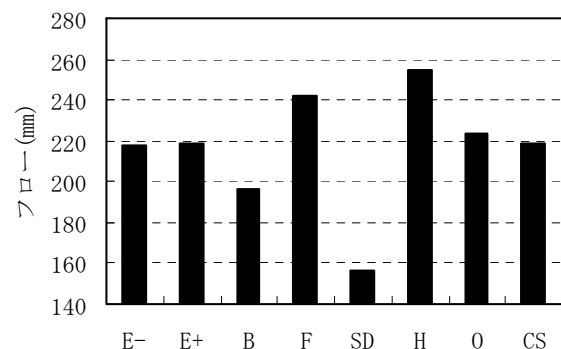


図-2 モルタルフロー

次いで標準砂(H), 陸砂(O)となり, 未処理の石炭溶融スラグ(E-), 水洗処理の石炭溶融スラグ(E+), 高炉スラグ(B), フェロニッケルスラグ(F)が最も遅くなった。

図-4にフローとブリーディング量の関係を示す。一般に, フローが大きほどブリーディング量が大きくなるとされているため, 陸砂の単位水量を 280kg/m^3 , 260kg/m^3 の2水準で試験を行い直線で結んだものを破線で示しているが, これとほぼ同等のものは未処理の石炭溶融スラグ(E-), 高炉スラグ(B), フェロニッケルスラグ(F), 標準砂(H), 砕砂(CS)となった。そのため, これらの細骨材は同等のフロー値で同等のブリーディング量になることが推測される。しかしながら, 水洗処理を施した石炭溶融スラグ(E+), ごみ溶融スラグ(SD)は破線より上側に位置しているため, 同等のフロー値でもブリーディング量は陸砂よりも大きくなることが推測される。

(3) 圧縮強度

図-5に圧縮強度の試験結果を示す。これによると, 材齢7日では標準砂(H), 陸砂(O), 砕砂(CS)を筆頭に値が大きく, 次いでフェロニッケルスラグ(F), 石炭溶融スラグ(E+, E-)となり, 高炉スラグ(B), ごみ溶融スラグ(SD)が小さい値となった。材齢28日になると, 砕砂(CS)が比較的大きい値であるが, フェロニッケルスラグ(F), 石炭溶融スラグ(E+, E-)が大きく, 次いで標準砂(H), 陸砂(O)となり, 高炉スラグ(B), ごみ溶融スラグ(SD)は小さい値となった。材齢91日になると, 石炭溶融スラグ(E+, E-), フェロニッケルスラグ(F)が大きく, 次いで砕砂(CS), 陸砂(O), 高炉スラグ(B)となり, 標準砂(H), ごみ溶融スラグ(SD)が小さい値となった。このことより, 石炭溶融スラグ(E-, E+)やフェロニッケルスラグ(F)は初期材齢では, やや天然砂よりも小さい圧縮強度ではあるが, 材齢の経過に伴い強度増進が大きく, 材齢28日以降では天然砂よりも強度発現することが認められた。高炉スラグ(B)は, 材齢7日での強度発現は小さいが, 材齢が増加すると天然砂と同等の強度発現をしたため, 長期材齢においては天然砂以上の強度発現をする可能性がある。ごみ溶融スラグ(SD)は, 初期材齢の強度発現が小さく材齢91日でも最も値が小さい結果となった。

以上の試験結果より, 理由は不明であるが石炭溶融スラグ細骨材を用いたモルタルは天然砂以上の強度発現をし, JISに制定されているスラグ細骨材と同等, あるいはそれ以上の強度発現をすることが確認された。

4. コンクリート実験(シリーズ2)

4.1 使用材料および調合

使用した細骨材の物性値を表-5に, 粒度分布を図-6に示す。物性値がモルタル実験と異なっているのは細骨材のロットが異なるためである。なお, 石炭溶融スラグ

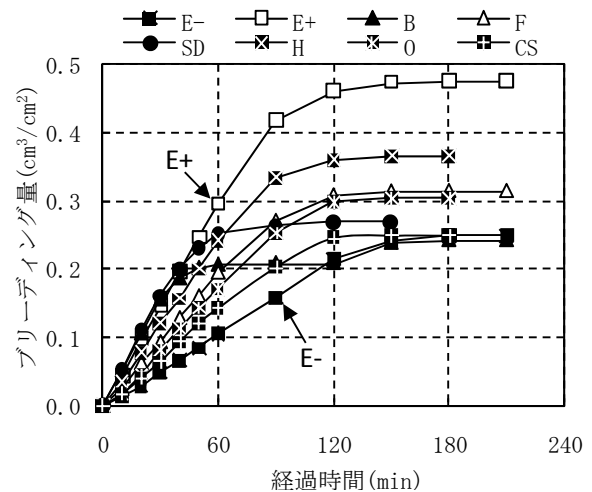


図-3 ブリーディング量と経過時間の関係

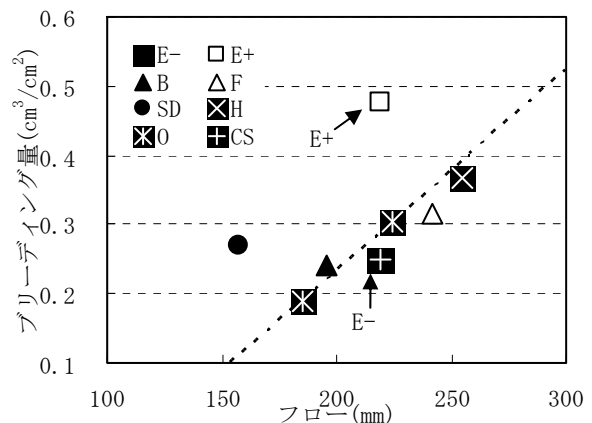


図-4 ブリーディング量とフローの関係

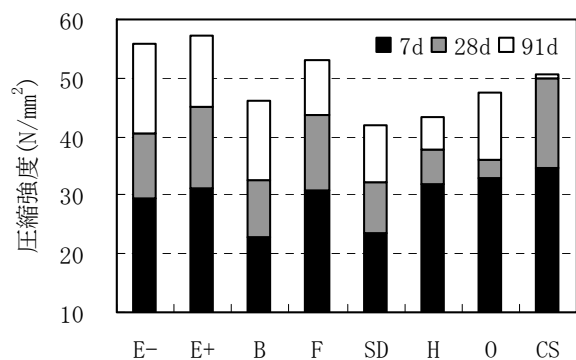


図-5 圧縮強度試験結果

表-5 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

は磨砕水洗したものを用いたが完全な水洗ではないため, 微粒分量は2.54%となっている。セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm^3 , 比表面積: $3270\text{cm}^2/\text{g}$),

表-6 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				フレッシュ性状			単位容積質量(kg/m ³)
			W	C	S	G	スランプ(cm)	空気量(%)		
E45	45	44.1	177	393	899	987	17.0	3.6	2456	
E55	55	46.2	175	318	979	987	19.0	4.6	2459	
E65	65	47.4	175	269	1028	987	10.0	5.0	2459	
B45	45	43.0	184	409	754	987	16.5	5.0	2334	
B55	55	45.5	181	329	831	987	19.0	5.0	2328	
B65	65	46.5	183	282	867	987	7.0	4.7	2318	
F45	45	45.1	170	378	861	987	19.0	4.4	2396	
F55	55	47.1	168	305	933	987	18.5	4.7	2393	
F65	65	48.2	168	258	975	987	16.0	4.8	2388	
SD45	45	42.1	190	422	769	987	19.5	5.5	2367	
SD55	55	44.7	187	340	853	987	16.5	4.5	2366	
SD65	65	45.8	189	291	892	987	10.0	3.9	2358	
O45	45	42.9	185	411	747	987	18.5	5.0	2329	
O55	55	45.6	180	327	832	987	19.5	4.9	2326	
O65	65	47.1	178	274	884	987	17.5	4.6	2322	
CS45	45	42.9	185	411	719	987	19.0	4.7	2302	
CS55	55	45.6	180	327	802	987	18.5	4.7	2296	
CS65	65	47.1	178	274	851	987	16.0	3.5	2290	

*骨材は表乾質量

粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石 2005(絶乾密度: 2.68g/cm³, 吸水率: 0.69%, 実積率 60.9%)を使用した。混和剤は AE 減水剤標準形を使用し, AE 助剤は一般のものを使用した。ただし, 石炭溶融スラグのみフライアッシュ用の AE 助剤を使用した。これは, 一般の AE 助剤では空気量の調整ができなかったため, フライアッシュ用の方が有効と考えられたためである。表-6 にコンクリートの調合とフレッシュ性状を示す。目標スランプ 18±1.5cm, 目標空気量 4.5±1.0%, 単位粗骨材かさ容積 0.60m³/m³とし, AE 減水剤の使用量はセメント質量×0.25%と一定にして AE 助剤により空気量の調整を行なった。

4.2 結果と考察

(1) 単位水量および空気量

図-7 に水セメント比 45%および 55%における単位水量を示す。図-7 によると, 石炭溶融スラグ(E)とフェロニッケルスラグ(F)は陸砂(O)や砕砂(CS)に比べ同一スランプに対する単位水量が少ないといえる。また, 高炉スラグ(B)は陸砂(O)や砕砂(CS)とほぼ同等の単位水量であったが, ごみ溶融スラグ(SD)は他のものに比べ同一スランプに対する単位水量は多く JASS 5 に規定された上限値 185kg/m³ を超える値であった。また, 水セメント比 65%では石炭溶融スラグ(E), 高炉スラグ(B), ごみ溶融スラグ(SD)で目標スランプが得られず, 低いスランプとなりやや分離気味であった。そのため, 水セメント比 65%においては単位粗骨材かさ容積や単位水量の検討が必要であると考えられる。

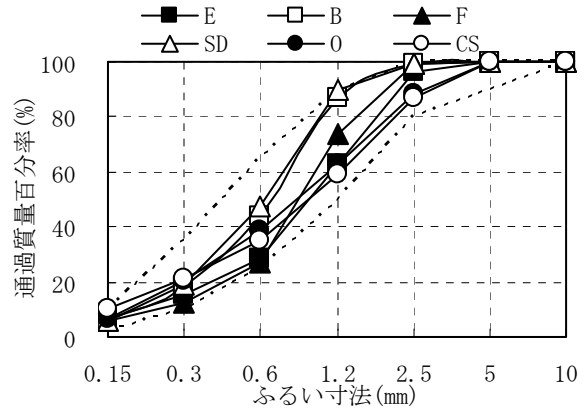


図-6 各細骨材の粒度分布

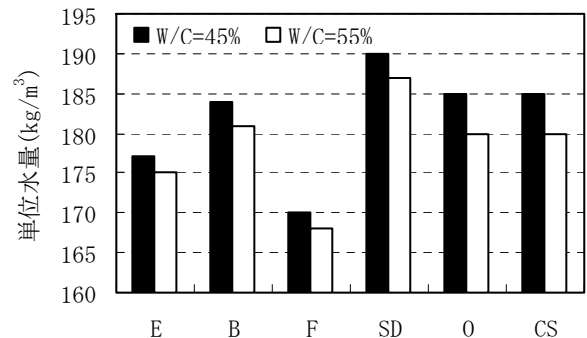


図-7 水セメント比 45%, 55%における単位水量

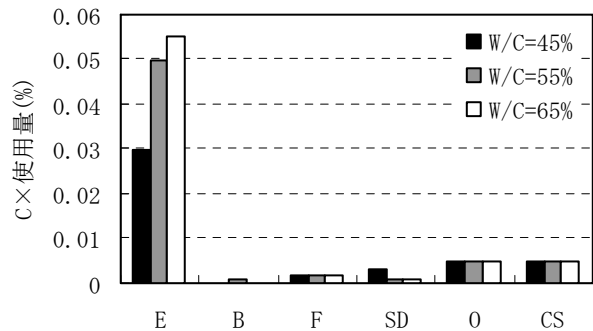


図-8 AE 助剤の使用量

図-8 に水セメント比 45%, 55%および 65%における AE 助剤の使用量を示す。これによると, 石炭溶融スラグ(E)の AE 助剤の使用量はフライアッシュ用のものを使用したにも関わらず非常に多くなった。これは, 石炭溶融スラグに付着する未燃カーボンが AE 助剤を吸着することにより AE 助剤の効果を妨げたためと推測される。そのため, 水セメント比が大きくなるほど(細骨材量が多くなるほど) AE 助剤の使用量は多くなった。また, 高炉スラグ(B)は水セメント比 45%, 65%では AE 助剤を使用しておらず 55%でも少量しか要しなかった。

石炭溶融スラグ細骨材を用いた場合, AE 助剤による空気量の調整が困難となるが, 単位水量に関しては天然砂と同等, あるいはそれ以下の単位水量で天然砂と同等の流動性が得られた。

(2) ブリーディング量

図-9 に水セメント比 55%における各種コンクリート

のブリーディング量の経時変化を示す。これによると、石炭熔融スラグ(E)、高炉スラグ(B)、ごみ熔融スラグ(SD)は試験開始直後から他の細骨材に比べて大きい値を示した。特に、石炭熔融スラグ(E)は値が大きく、60分過ぎから高炉スラグ(B)のブリーディング量が収束しはじめたのに対し、終始大きい値であった。また、ごみ熔融スラグ(SD)は試験開始直後には高炉スラグ(B)よりもやや低い値であったが、ブリーディングの収束に時間を要したため、終了時には高炉スラグ(B)と同等のブリーディング量であった。陸砂(O)と砕砂(CS)ではやや砕砂(CS)が小さい値ではあったが、同様の傾向であった。フェロニッケルスラグ(F)は試験開始直後に陸砂(O)よりやや大きい値であったが、90分過ぎから陸砂(O)よりも小さい値となった。

石炭熔融スラグ、高炉スラグおよびごみ熔融スラグは高耐久性 RC 指針 (案) ⁴⁾ の目標値である $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下を満足しなかったが、石炭熔融スラグはモルタル実験で微粒分を増やすことでブリーディング量の低減が認められたため、微粒分を調整し適切なブリーディング量に調整することが可能であると考えられる。

(3) 圧縮強度および静弾性係数

図-10 に圧縮強度の試験結果を示す。これによると、水セメント比 65%では砕砂(CS)がやや大きい値であり、フェロニッケルスラグ(F)がやや小さい値となった。しかしながら、石炭熔融スラグ(E)は高炉スラグ(B)や陸砂(O)よりやや小さい値ではあるがほぼ同等の圧縮強度を示した。また、水セメント比 55%では天然砂である陸砂(O)と砕砂(CS)がスラグ細骨材に比べやや大きい値ではあったが、石炭熔融スラグ(E)は高炉スラグ(B)、フェロニッケルスラグ(F)、ごみ熔融スラグ(SD)と同等の圧縮強度を得た。水セメント比 45%では、石炭熔融スラグ(E)は高炉スラグ(B)や陸砂(O)、砕砂(CS)と同等の圧縮強度であり他のスラグ細骨材よりも大きい値を得た。このことより、空気量の影響によりややばらつきはあるものの、石炭熔融スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は他のスラグ細骨材を用いたコンクリートとほぼ同等、あるいはそれ以上の圧縮強度でありコンクリート用細骨材として十分な強度を有していると判断される。

図-11 に各種細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には日本建築学会の JASS 5⁵⁾ 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: $\gamma=2.4$)

$$E=33.5 \times k_1 \times k_2 \times (\gamma/2.4)^2 \times (F_c/60)^{1/3} \dots \dots (1)$$

ここに、E:コンクリートのヤング係数(kN/mm²)

γ :コンクリートの単位容積質量(t/m³),

F_c:コンクリートの設計基準強度(N/mm²),

k₁:骨材による係数, k₂:混和材による係数

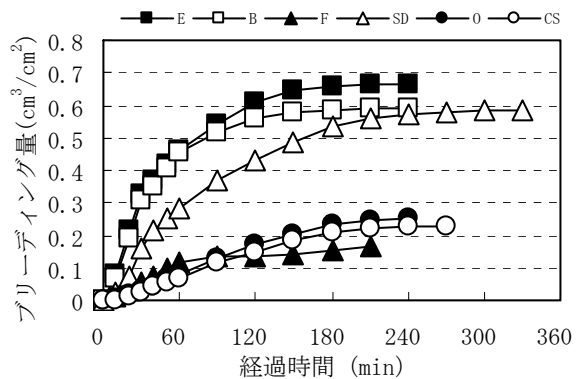


図-9 ブリーディング量と経過時間の関係

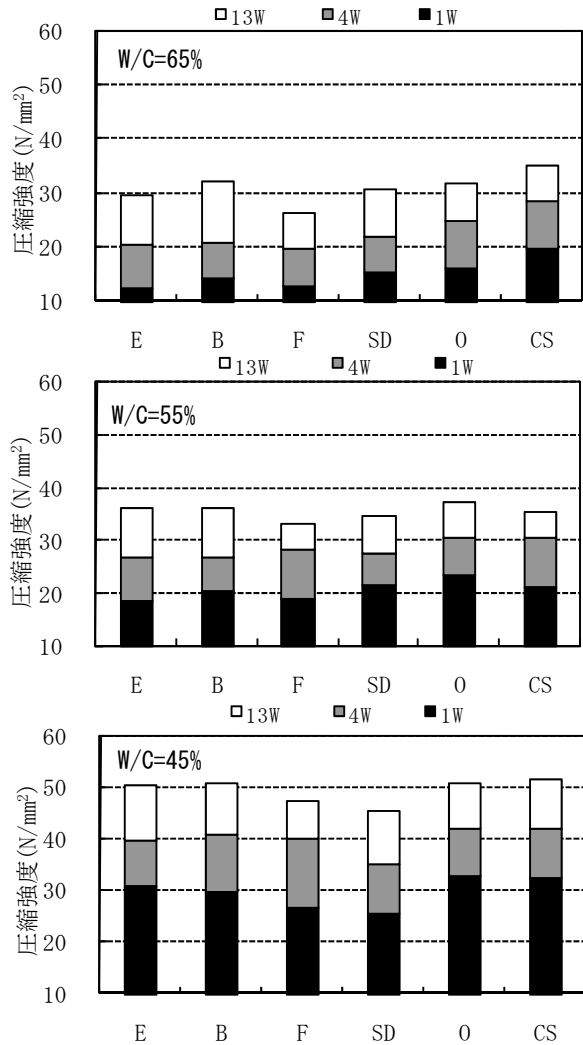


図-10 圧縮強度試験結果

図-11 によると、陸砂(O)と砕砂(CS)を含むすべての細骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は推定値よりもやや大きい値となった。特に、石炭熔融スラグ(E)や高炉スラグ(B)を用いたコンクリートは骨材による係数 $k_1=1.2$ の場合と同等以上の結果となった。これは、石炭熔融スラグの密度が大きくコンクリート密度が大きいことや、これらスラグ細骨材自体の弾性係数が大きいためと考えられる。

(4) 凍結融解

図-12 に各種細骨材を用いたコンクリートの凍結融

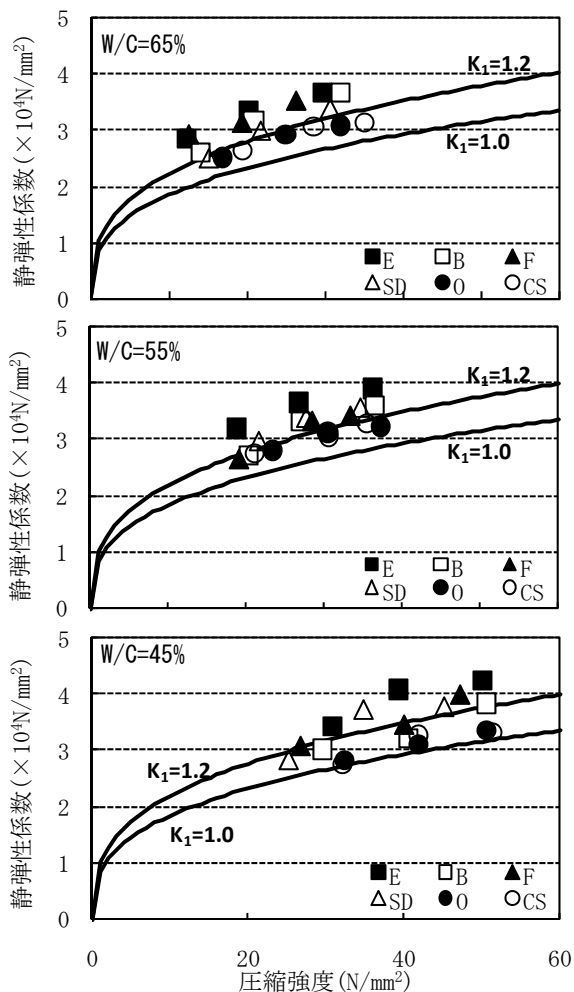


図-11 圧縮強度と静弾性係数の関係

解試験時における相対動弾性係数とサイクル数の関係を示す。これによると、天然砂である陸砂(O)、砕砂(CS)は300サイクル終了時に90%前後と高い値を示した。しかしながら、フェロニッケルスラグ(F)は71%、石炭溶融スラグは61%となり、高炉スラグ(B)、ごみ溶融スラグ(SD)においては60%以下と低い値であった。そのため、JASS 5⁵⁾の凍結融解作用を受けるコンクリートの区分Aの基準である300サイクル終了時に相対動弾性係数60%以上という品質を満たしたものは、石炭溶融スラグ(E)とフェロニッケルスラグ(F)であったが、石炭溶融スラグ(E)は60%を僅かに超える値であった。しかしながら、石炭溶融スラグ(E)はブリーディング量が多いこと、また、高炉スラグ(B)、ごみ溶融スラグ(SD)はブリーディング量が多いことと、AE助剤の使用量が少なかったためにエントラップトエアの割合が多くなり、適切な空気泡が導入されていなかったことが凍結融解試験結果に影響を与えた可能性がある⁶⁾。

5. まとめ

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天然砂およびJISに制定されているスラ

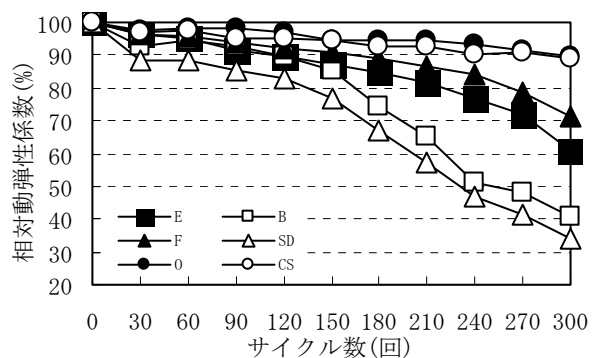


図-12 凍結融解試験結果(相対動弾性係数)

グ細骨材と比較検討した結果、以下のような結論を得た。

- 1)石炭溶融スラグ細骨材を用いた場合、天然砂と同等の単位水量で同等以上の流動性を有したが、空気量の調整に多量のAE助剤を必要とした。
- 2)石炭溶融スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートは、天然砂やJISに制定されているスラグ細骨材と同等、あるいはそれ以上の圧縮強度を有していた。
- 3)ブリーディング量は、石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートでは高耐久性RC指針(案)に示されている目標値を超えたが、モルタル実験結果により微粒分量を調整することでブリーディング量を調整できる可能性があることがわかった。
- 4)凍結融解試験では、石炭溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートは相対動弾性係数60%以上を満たした。

以上、石炭溶融スラグは、JISに制定されている各種スラグと比較して十分なコンクリート用細骨材としての基本性能を有していると思われる。今後は、空気量の調整等、明らかとなった課題について検討する予定である。

参考文献

- 1)石川・染谷他：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1~その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.275-280, 2006
- 2)石川・友澤他：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4~その7)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.1085-1092, 2007
- 3)熊谷・石川他：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梗概集(中国)、pp.629-630, 2008
- 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, 1991.7
- 5)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, 2003.2
- 6)日本建築学会：高炉スラグ細骨材を用いるコンクリートの施工指針・同解説, p.54, 1983.6