石炭溶融スラグ細骨材の長期強度と耐久性状に関する研究

石炭溶融スラグ、スラグ骨材、圧縮強度、耐久性状 石川嘉孝＊ 阿部道彦＊＊

 古川雄太＊＊＊

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．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。

　＊　：電源開発株式会社茅ヶ崎研究所　上席研究員・博士（工学），＊＊：工学院大学工学部建築学科　教授・工博

＊＊＊：工学院大学大学院工学研究科　修士課程

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 |

# 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日間乾燥されることを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。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。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。

# 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。また，粒形判定実積率は陸砂（O）よりもやや大きい値であり，粒形が良好であるといえる。写真-1に石炭溶融スラグのマイクロスコープによる骨材写真を示す。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，その他の細骨材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。

表－3　細骨材の物性値

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 記号 | 絶乾密度(g/cm3) | 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/m3) | 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/m3) |
| 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

# 4. 結果と考察

# 4.1 ブリーディング試験

　図－3に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0.3cm3/cm2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0.3cm3/cm2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考えられる。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－3　ブリーディング試験結果

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ゾ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。

図－5　静弾性係数試験結果

　　c) W/C=45%

図－4　圧縮強度試験結果

a) W/C=65%

b) W/C=55%

# 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：γ=2.4t/m3）。図－5によると，天然砂（O，CS）を用いたものは圧縮強度40N/mm2以上では比較的，骨材による係数k1=1.0に近似しているものの，40N/mm2以下ではややk1=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）およびごみ溶融スラグ（SD）は比較的係数k1=1.2に近似している。石炭溶融スラグ（E）は，係数k1=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ためと推測される。

# 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。石炭溶融スラグ（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）およびごみ溶融スラグ（SD）は低い相対動弾性係数を示した。

　　　図－7　耐久性指数と気泡間隔係数の関係

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 |

# 4.5 気泡間隔係数

図－8　乾燥収縮試験結果

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溶融スラグ（E）が297μm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），ごみ溶融スラグ（SD）の順に大きい値であった。陸砂（O）および砕砂（CS）は300μm前後と小さい値であった。また，平均気泡径をみると石炭溶融スラグ（E），陸砂（O）および砕砂（CS）が330μm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）およびごみ溶融スラグ（SD）が400μm以上と大きい値であった。石炭溶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溶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，石炭溶融スラグ（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溶融スラグ（SD）よりも小さいにもかかわらず，耐久性指数はごみ溶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。石炭溶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0.6cm3/cm2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0.3cm3/cm2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，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。

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

0

図－9　促進中性化試験結果

# 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，√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。

b) 20サイクル

　図－10　促進塩分浸透試験結果

a) 10サイクル

# 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。そのため，石炭溶融スラグを用いたコンクリートは高炉スラグと同様に，天然砂などに比べ塩化物の拡散を抑制することが期待できるといえる。

# 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k1=1.2よりも大きい値であった。

図－11　拡散係数

図－12　表面塩化物イオン量

 (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。

# 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