

論文 焼却灰溶融スラグを用いたコンクリートの性質

越川 茂雄*¹・伊藤 義也*²・佐藤 次郎*³・三嶋 司*⁴

要旨：一般廃棄物の減量化対策の一環として一般廃棄物の焼却灰を原料として製造された溶融スラグのコンクリートへの有効利用を目的とし、溶融スラグの品質及びこれを用いたスラグコンクリートの性質について実験検討を行った。その結果、溶融スラグはこれからの有害な溶出物はなく品質の変動も小さく安定していることが認められた。またスラグコンクリートは、溶融スラグが破碎粒であることから単位水量が増加すること及び破碎値が大きいことから高強度が得られにくいこと等が認められたがコンクリートへの有効利用が可能であることを明らかにした。

キーワード：溶融スラグ, アルカリ骨材反応, 単位水量, 凝結時間, 圧縮強度

1. はじめに

溶融スラグは一般廃棄物の減量化対策の一環として一般廃棄物の新資源化を目指し開発製造されたもので一般廃棄物の焼却灰を原料とする。この溶融スラグの用途を確立することは近年大きな社会問題となっている廃棄物の減量化及び新資源の確保の有力な手段となる。溶融スラグはガラス質で一般砂と同程度の粒度を有することから埋土、路盤材及びコンクリート用骨材等の建設材料としての利用が検討されている。

本研究は溶融スラグのコンクリート用骨材としての有効利用を目的とし、溶融スラグの物理的性質・化学的性質及びアルカリ骨材反応等のコンクリート用骨材としての品質及び安定性並びに溶融スラグを用いたスラグコンクリートのフレッシュ時の性状及び強度特性等について実験検討を行ったものである。

2. 溶融スラグの品質の検討

本研究で用いた溶融スラグは一般廃棄物の焼却灰をバーナ式灰溶融炉内で高温溶融（1400℃）した後水冷する方法により公共施設で製造されたものである。

2. 1 物理的性質

8ヶ月間の月間試験及び計 3回の月内試験を行った。表-1 に試験項目及び月間試験結果を示す。また月内試験結果の 1例を表-2 に示す。この結果によれば、粒度は連続粒度で粗粒率が平均4.23と一般砂に比して粗い。また、骨材破碎値試験（BS法）による 40ton破碎値は平均33%と人工軽量骨材とほぼ同等¹⁾及び普通骨材（硬質砂岩）の約 2倍であることが認められた。他の物理的性質は有機不純物に問題なく一般に用いられている普通骨材と同等の品質であった。また変動係数は月間及び月内とも洗い試験で失われる量を除き約10%以下と小さく品質が安定していることが認められた。

* 1 日本大学助教授 生産工学部土木工学科、工博（正会員）

* 2 日本大学助手 生産工学部土木工学科、工修（正会員）

* 3 (株)内山アドバンス中央技術研究所所長（正会員）

* 4 (株)内山アドバンス中央技術研究所研究員

表-1 月間試験結果

| | 表乾比重 | 吸水率 (%) | 単位容積質量 (kg/m ³) | 実績率 (%) | 洗い試験 (%) | 粗粒率 F.M. | 40t破砕値試験 (%) | | |
|---------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------------------|
| | | | | | | | 10~5mm | 3.3~2.5mm | 平均 |
| 範囲 | 2.63~2.87 | 0.55~0.69 | 1540~1660 | 57.5~60.4 | 0.14~0.37 | 3.94~4.54 | 34~47 | 11~37 | 23~37 |
| 平均 | 2.73 | 0.63 | 1590 | 58.5 | 0.26 | 4.23 | 43 | 23 | 33 (15) ^{*1} |
| 標準偏差 | 0.08 | 0.07 | 30.5 | 0.91 | 0.08 | 0.19 | 4.83 | 5.58 | 4.86 |
| 変動係数(%) | 2.93 | 11.1 | 1.92 | 1.56 | 30.8 | 4.49 | 11.2 | 24.3 | 14.7 |

1月、6~12月(1995年)の8ヶ月間、※1:普通骨材実験値

表-2 月内試験結果

| | 表乾比重 | 吸水率 (%) | 単位容積質量 (kg/m ³) | 実績率 (%) | 洗い試験 (%) | 粗粒率 F.M. | 40t破砕値試験 (%) | | |
|---------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-------|
| | | | | | | | 10~5mm | 3.3~2.5mm | 平均 |
| 範囲 | 2.65~2.74 | 0.50~0.62 | 1560~1600 | 58.1~59.2 | 0.20~0.50 | 3.87~4.06 | 41~48 | 21~23 | 32~35 |
| 平均 | 2.69 | 0.55 | 1570 | 58.7 | 0.30 | 3.94 | 44 | 22 | 33 |
| 標準偏差 | 0.03 | 0.05 | 18.0 | 0.41 | 0.12 | 0.07 | 3.00 | 0.87 | 1.41 |
| 変動係数(%) | 1.11 | 10.0 | 1.15 | 0.70 | 40.0 | 1.78 | 6.82 | 3.95 | 4.27 |

12月(1995年)、試験数 n = 5

2.2 化学成分

成分量の分析項目及び試験結果を表-3に示す。この結果において比較的量の多い成分はSiO₂(約37%)、CaO(約23%)、Al₂O₃(約16%)及びFe₂O₃(約7%)であって他の成分量は約5%以下と微量であった。次に図-1にX線回折結果を示す。この結果によれば20°~40°の範囲にガラス質特有のピークが認められる他明確なピークは認められず非結晶であると判断される。

表-3 化学成分量分析結果

| 成分 | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | MgO | SO ₃ | S | Cl ⁻ |
|--------|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------|-----------------|------|-----------------|
| 成分量(%) | 36.8 | 23.0 | 16.38 | 6.60 | 4.7 | 3.10 | 0.14 | 0.23 | 0.0015 |

2.3 アルカリ骨材反応

7ヶ月間の試料についてJIS A 5308付属書7「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(化学法)」により実験検討した。

試験結果を表-4に示す。この結果では Rc/Scは 2.2~24.5となりいずれの試料の場合ともRc>Scであ

って本試験法によるアルカリ骨材反応性は無害であることが認められた。

2.4 有害物質の溶出

溶融スラグからの有害物質の溶出は環境庁排水

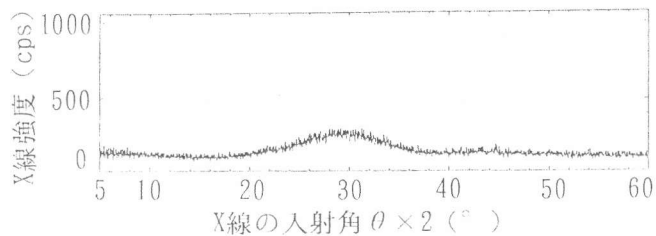


図-1 溶融スラグのX線回折図

表-4 アルカリ骨材反応試験結果(化学法)

| | | | | | | | |
|----------------------|------|------|-----|------|-----|-----|------|
| アルカリ濃度減少量 Rc(mmol/l) | 37 | 44 | 37 | 49 | 11 | 35 | 54 |
| 溶解シリカ量 Sc(mmol/l) | 3 | 4 | 14 | 2 | 5 | 4 | 13.2 |
| Rc/Sc | 12.3 | 11.0 | 2.6 | 24.5 | 2.2 | 8.8 | 4.1 |

試験数 n = 7

基準（総理府令）による分析を行い基準値との比較検討を行った。分析成分は排水基準に指定されている項目のうち揮発性物質を除く表-5に示す9項目である。溶出試験は6lの蒸留水中に6kgの溶融スラグを15日間浸漬した浸漬液中の成分溶出量を測定した。結果を表-5に示す。

この結果によれば鉛のみ溶出が認められたが基準値以内であって、この他の溶出成分は検出されなかった。このことは、溶融スラグをコンクリート骨材として用いた場合溶融スラグがセメント硬化体で包含されるのでコンクリート中からの前述の成分溶出量はさらに溶出しにくく、溶融スラグを用いたコンクリートの環境汚染への安全性に問題はないと言える。

2.5 形状及び細孔空隙

フレッシュコンクリートのワーカビリチーや硬化コンクリートの力学的性質及び耐久性に影響を及ぼす溶融スラグの形状、細孔空隙について実験検討を行った。形状は走査型電子顕微鏡を用い倍率30倍及び500倍の撮影を行った。細孔空隙は水銀圧入式ポロシメーターを用い0.14~1kgf/cm²下のマクロポア及び1~2000kgf/cm²下のミクロポアの測定を行った。

形状：外観形状は写真-1（30倍）に示す通り角ばった破碎粒で表面部に気泡が認められた。写真-2（500倍）は表面部を拡大したもので表面に数μ程度の小さい亀裂が生じていることが認められた。この亀裂は水冷の際の表面部と内部の温度差による収縮率の違いにより生じたものと考えられる。

細孔空隙：細孔空隙の測定結果を図-2に示す。この結果は溶融スラグと比較用の東京都青梅産碎石の硬質砂岩である。この結果によれば碎石に比して溶融スラグの空隙量は全空隙量で約0.016cc/grと碎石の約2倍であった。また7.5μ~35Åの微細空隙量は碎石の約0.008cc/grに対し約0.005cc/grとほぼ同等であるが、7.5μ~55μと比較的大きな細孔空隙量は碎石の場合測定されなかったことに対し、溶融スラグの場合は、走査型電子顕微鏡でも観察された様に約100cc/grと大きかった。このことは焼却灰が高温溶融されスラグ化する際のガス発生と関係があるものと考えられる。

表 5 有害物質の溶出試験結果

| 分析項目 | 溶出量 (mg/l) | 基準値 (mg/l) |
|-----------|------------|------------|
| ・カドミウム | 不検出 | (0.10) |
| ・シアン化合物 | 不検出 | (1.00) |
| ・有機リン | 不検出 | (1.00) |
| ・鉛 | 0.009 | (0.10) |
| ・六価クロム化合物 | 不検出 | (0.50) |
| ・ヒ素 | 不検出 | (0.10) |
| ・総水銀 | 不検出 | (0.005) |
| ・アルキル水銀 | 不検出 | (不検出) |
| ・PCB | 不検出 | (0.03) |

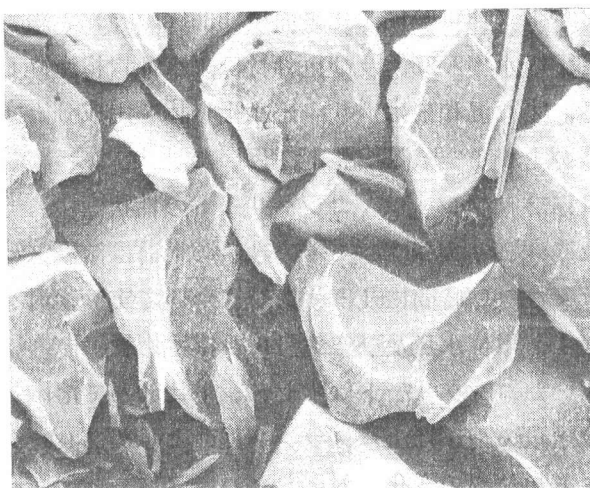


写真-1 走査型電子顕微鏡写真（30倍）

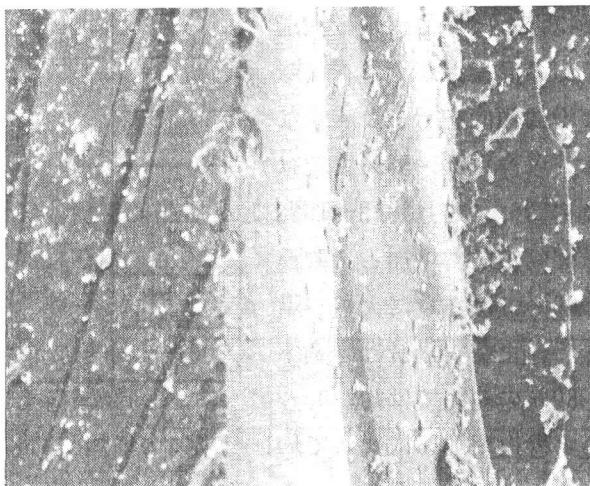


写真-2 走査型電子顕微鏡写真（500倍）

3. 溶融スラグを用いたコンクリートの性質

溶融スラグの粒度に関する試験結果から本研究では溶融スラグをコンクリート用細骨材として用いることとし、細骨材に容積置換したスラグコンクリートのフレッシュ時の性状及び強度特性について実験検討を行った。

3. 1 使用材料

用いたセメントは普通ポルトランドセメント（比重3.16, 比表面積 3360cm²/g）、細骨材及び粗骨材は鹿島産陸砂（比重2.58, F.M. 2.70, 吸水率2.25）及び粗骨材は東京都青梅産碎石2005（比重2.67, F.M. 6.70, 吸水率0.92）である。また混和剤はポリオール複合体を主成分とする減水剤及びアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする空気量調整剤を用いた。

3. 2 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状の検討は溶融スラグの置換率が単位水量, 空気量, ブリーディング及び凝結時間に及ぼす影響について実験検討を行った。

(1) 単位水量及び空気量に及ぼす影響

用いたコンクリートは水セメント比50%で溶融スラグを0, 20, 40, 60, 80及び100%置換し、単位水量の補正によりスランプ12cmとしたプレーンコンクリートである。なお細骨材率は置換率による粗粒率の変化に対応した。

コンクリートの配合及び試

験結果を表-6に示す。この結果によれば単位水量は溶融スラグの置換率が大きくなるほど増加傾向を示した。すなわち、置換率20~80%までは置換率 0%に対し約 3~16%とほぼ直線的に増加し、置換率 100%ではさらに大きく増加した。また空気量は置換率 20~80%の範囲では約2.0~2

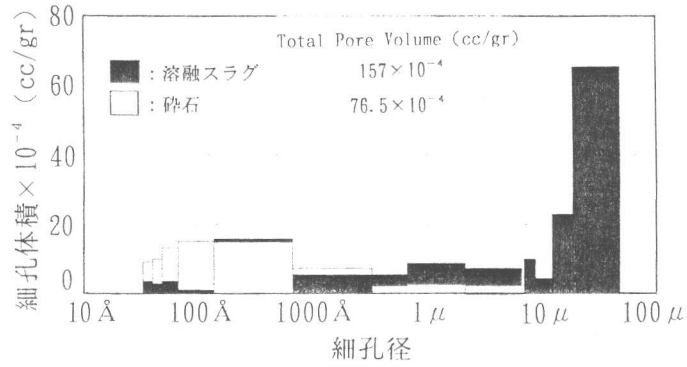


図-2 細孔径分布

表-6 コンクリートの配合及び試験結果

| 溶融スラグ容積置換率 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 実測スランプ (cm) | 空気量 (%) | 凝結時間 | |
|----------------|------------|----------|---------------------------|-------------|---------|------------------|------------------|
| | | | | | | 始発時 ^分 | 終結時 ^分 |
| 0 | 50 | 46.3 | 170 (1.00) | 12.0 | 1.3 | 6-45 | 9-20 |
| 20 | | 47.5 | 175 (1.03) | 12.1 | 1.7 | 6-40 | 8-50 |
| 40 | | 48.7 | 182 (1.07) | 12.5 | 2.2 | 6-30 | 9-35 |
| 60 | | 49.9 | 189 (1.11) | 12.5 | 2.5 | 6-25 | 9-35 |
| 80 | | 51.1 | 197 (1.16) | 12.6 | 2.2 | 6-50 | 10-05 |
| 100 | | 52.2 | 210 (1.24) | 11.8 | 3.6 | 7-05 | 10-30 |

.5%と置換率 0%に比して約1~1.5%の増加であるのに対し置換率 100%では 3.6%とさらに増加することが認められた。これらのことは、2. で述べた様に溶融スラグの形状の影響によるものと思われる。また目視ではあるが置換率が80%以上となるとコンクリートは粗々しくなり良好なワーカビリティが得られにくいことが観察された。以上のことからさらに一般に用いられるAEコンクリートとしてのスランプ及び空気量の調整について実験検討した。この場合のスランプ及び空気量は12cm及び 6%とした。用いたスラグコンクリートの配合及び試験結果を表-7に示す。この結果によれば置換率と単位水量の増加割合及びワーカビリティは前述の結果と同様であった。また、空気量は調整剤により目標の空気量が得られることが認められた。

表-7 コンクリートの配合及び試験結果

| 溶融スラグ 容積置換率 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 減水剤 (c×%) | 空気量 調整剤 (cc/c=1kg) | 実測 スランプ (cm) | 空気量 (%) | ブリーディング 率 (%) |
|-----------------------|---------------|-------------|------------------------------|--------------|--------------------------|--------------------|------------|------------------|
| 0 | 50 | 44.3 | 149 (1.00) | 0.25 | 6 | 11.0 | 6.0 | 4.02 |
| 20 | | 45.5 | 153 (1.03) | | 6 | 11.0 | 6.5 | 4.10 |
| 40 | | 46.7 | 160 (1.07) | | 4 | 11.0 | 5.9 | 4.65 |
| 60 | | 47.8 | 170 (1.14) | | 4 | 12.9 | 6.2 | 4.78 |
| 80 | | 49.0 | 175 (1.17) | | 1 | 10.5 | 6.0 | 6.65 |
| 100 | | 50.0 | 183 (1.23) | | 0 | 13.0 | 7.0 | 10.00 |

(2) 凝結時間に及ぼす影響

凝結試験はJIS A 6204によって行った。用いたコンクリートの配合及び試験結果を表-6に示す。

スラグコンクリートの凝結時間は、置換率20~60%では始発及び終結とも置換率0%とほぼ同等であるのに対し、置換率80~100%では始発で5~20分及び終結で45分~1時間10分遅れることが認められた。この遅延の原因は明らかではないが実用上問題ないと考えられる。

(3) ブリーディングに及ぼす影響

ブリーディング試験はJIS A 1123によって行った。用いたコンクリートの配合及び試験結果を表-7に示す。

スラグコンクリートのブリーディング率は置換率20~60%では4.10~4.78%と置換率が大きくなるほど若干大きくなる傾向を示したが置換率0%の4.02%とほぼ同程度であった。これに対し、置換率80~100%では6.65~10.00%と置換率0%の約1.7~2.5倍と大きくなることが認められた。このことは前述したワーカビリティの低下によるものと考えられる。

4. スラグコンクリートの強度特性

本研究では溶融スラグの置換率が圧縮強度及び動弾性係数に及ぼす影響及びセメント水比と圧縮強度の関係について実験検討を行った。用いたスラグコンクリートの溶融スラグの置換率は3.2のフレッシュコンクリートの結果から良好なワーカビリティの得られる20, 40及び60%とした。スラグコンクリートの配合は表-8に示す通りであって水セメント比45, 50, 55及び60%とし、スランプ12cm及び空気量6%と一定にしたAEコンクリートである。

(1) スラグの置換率が圧縮強度及び

動弾性係数に及ぼす影響

溶融スラグの置換率と圧縮強度の試験結果を図-3に示す。

スラグコンクリートの圧縮強度はいずれの水セメント

表-8
コンクリートの配合及び試験結果

| 水セメント比 (%) | 溶融スラグ 容積置換率 (%) | 細骨材率 (%) | 単位水量 (kg/m ³) |
|---------------|-----------------------|-------------|------------------------------|
| 45 | 0 | 43.3 | 149 |
| | 20 | 44.5 | 153 |
| | 40 | 45.7 | 160 |
| | 60 | 48.0 | 170 |
| 50 | 0 | 44.3 | 149 |
| | 20 | 45.5 | 153 |
| | 40 | 46.7 | 160 |
| | 60 | 49.0 | 170 |
| 55 | 0 | 45.3 | 149 |
| | 20 | 46.5 | 153 |
| | 40 | 47.7 | 160 |
| | 60 | 50.0 | 179 |
| 60 | 0 | 46.3 | 149 |
| | 20 | 47.5 | 162 |
| | 40 | 48.7 | 173 |
| | 60 | 51.0 | 183 |

比の場合も置換率が大となるほど強度低下することを示した。また、強度低下率は水セメント比50%及び60%の場合1.03~0.71であるのに対し、水セメント比45%の場合には0.95~0.59と前者の場合に比して大きくなることを示した。このことは溶融スラグの強度特性や溶融スラグとセメントペーストとの付着等によるものと考えられる。水セメント比45~60%のスラグコンクリートの動弾性係数は置換率0%の動弾性係数 $3.54 \times 10^4 \sim 3.26 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ に比して置換率20%で1.03~1.00、40%で0.95~1.02及び60%で0.96~0.94であった。

(2) セメント水比と圧縮強度の関係
スラグコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は図-4に示す通りであって置換率0%と同様に直線関係となることが認められた。しかし、直線の勾配は置換率が大となるほど緩やかとなる。

5. まとめ

本研究の主な成果を要約すると以下の通りとなる。

- 1) 溶融スラグの粒度はコンクリート用細骨材より若干粗く、また破砕値は普通骨材の約2倍及び人工軽量骨材とほぼ同じであったがその他の物理的性質はほぼ普通骨材と同等であった。
- 2) 溶融スラグの成分量は SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 が約37~7%及び MgO 、 SO_3 、 S 、 Cl^- が約5%以下であった。また、溶融スラグはガラス質で非結晶であることを示した。
- 3) 有害物質の溶出に問題なく、アルカリ骨材反応(化学法)も無害であった。
- 4) スラグコンクリートのフレッシュ時の性状は置換率が大きくなると単位水量が増大しワーカビリティが低下することが認められた。しかし置換率60%以下ではワーカビリティは比較的良好でブリーディング及び凝結時間に特に問題は認められなかった。
- 5) 置換率20~60%のスラグコンクリートの圧縮強度は置換率が大となるほど低下し、低下率は水セメント比によって相違するが約5~40%であった。また、セメント水比との関係はいずれの置換率の場合ともほぼ直線関係であった。

以上のことは、スラグコンクリートの実用化にあたってはさらに研究成果の蓄積を必要とするが、溶融スラグのコンクリート用骨材への利用が基本的に可能であることを示すものとする。

《参考文献》

- 1) 軽量骨材コンクリートハンドブック編集委員会編
軽量骨材コンクリートハンドブック 日刊工業新聞社

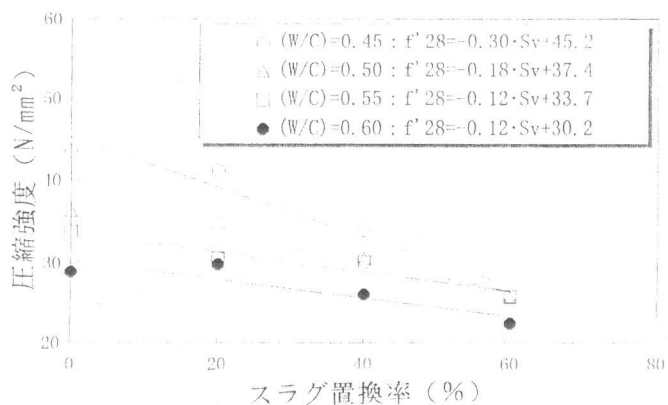


図-3 スラグ置換率と圧縮強度の関係

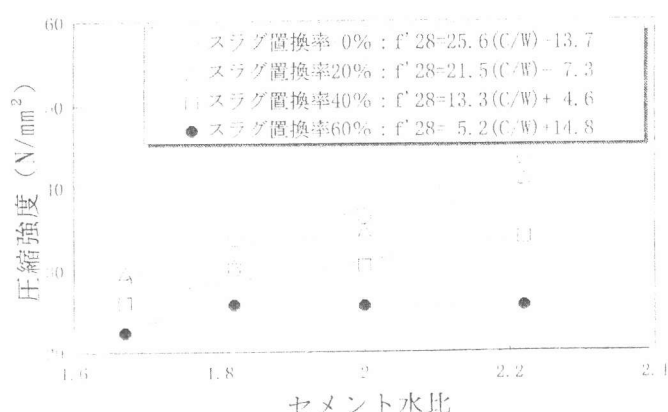


図-4 セメント水比と圧縮強度の関係